



Modéliser et organiser la conception innovante : le cas de l'innovation radicale dans les systèmes d'énergie aéronautiques

Frédéric Arnoux

► To cite this version:

Frédéric Arnoux. Modéliser et organiser la conception innovante : le cas de l'innovation radicale dans les systèmes d'énergie aéronautiques. Gestion et management. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2013. Français. NNT : 2013ENMP0005 . pastel-00820633

HAL Id: pastel-00820633

<https://pastel.hal.science/pastel-00820633>

Submitted on 6 May 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 396 : Économie, Organisations & Société

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École nationale supérieure des mines de Paris

Spécialité “ Sciences de Gestion ”

présentée et soutenue publiquement par

Frédéric ARNOUX

le 22 janvier 2013

Modéliser et organiser la conception innovante :

Le cas de l'innovation radicale dans les systèmes d'énergie aéronautiques

Directeur de thèse : **Armand HATCHUEL**

Co-encadrement de la thèse : **Mathias BEJEAN**

Jury

M. Mathias BEJEAN, Maître de conférences, IRG, Université Paris Est Créteil
M. Albert DAVID, Professeur, DRM, Université Paris-Dauphine
M. Antoine DRACHSLER, Chef de service Avant-Projets, Turbomeca
M. Armand HATCHUEL, Professeur, Centre de Gestion Scientifique, Mines ParisTech
M. Jérémie LEGARDEUR, Professeur, ESTIA
M. Michel NAKHLA, Professeur, EMI, Agro ParisTech
M. François PELLERIN, Docteur en Physique des surfaces, Sudinnove

Examineur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Rapporteur
Examineur
Suffragant

MINES ParisTech n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse. Ces opinions doivent être considérées comme propres à l'auteur.

A mes parents,

REMERCIEMENTS

Je voudrais saluer ici les personnes qui de près ou de loin ont contribué à la concrétisation de ce travail de thèse de doctorat.

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse, Armand Hatchuel, qui a accepté de m'accompagner tout au long de cette expérience. Merci pour sa confiance, sa disponibilité, ses conseils et ses intuitions. Au travers de nos discussions, il m'a apporté une connaissance approfondie des divers aspects du sujet.

Mes remerciements s'adressent ensuite tout particulièrement à mon codirecteur de thèse, Mathias Béjean, pour son investissement dans l'encadrement de cette thèse et ses nombreux conseils sur le monde de la recherche.

Un grand merci à Sophie Hooge de m'avoir encouragé et aidé à diffuser mes résultats en dehors de mon terrain de recherche, mais surtout pour ses nombreuses contributions à l'amélioration de ce mémoire et son soutien sans failles durant ces derniers mois de rédaction.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble de l'équipe de la chaire TMCI et du Centre de Gestion Scientifique pour son accueil durant ces trois années de thèse. L'école des Mines a été un cadre privilégié pour effectuer ce travail.

Jérémy Legardeur, professeur à l'ESTIA, m'a guidé vers ce projet de recherche et je tiens à l'en remercier vivement. J'espère que nos riches collaborations sur la conception innovante qui durent depuis maintenant plus de six ans se poursuivront à l'avenir.

Je tiens à remercier Frédéric Garcias pour son travail de relecture et de correction du mémoire ainsi que pour sa réactivité à mes demandes.

Je voudrais remercier ma mère pour ses corrections sur de nombreux chapitres du manuscrit et pour sa confiance et son soutien inconditionnel durant ces années de thèse.

Cette thèse n'aurait jamais vu le jour sans les équipes de Turbomeca.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon tuteur industriel, Antoine Drachsler, chef de service des avant-projets, pour m'avoir soutenu et accompagné dans l'ensemble de mes intuitions dans un domaine qui lui était inconnu il y a trois ans de cela ; ce qui a dû lui prendre un temps précieux.

Je remercie François Pellerin de m'avoir fait confiance au moment où il lançait ce projet lorsqu'il était responsable de l'innovation de Turbomeca.

Mes remerciements vont également à Partrick Marconi, ingénieur des avant-projets, pour la richesse des discussions que nous avons pu avoir sur l'histoire des sciences ainsi que pour sa pédagogie et humilité pour enseigner le fonctionnement des technologies. Cela a rendu cette thèse encore plus plaisante à rédiger.

Je remercie l'ensemble de l'équipe des avant-projets pour son accueil et sa bonne humeur.

Je tiens à remercier l'ensemble des partenaires industriels qui ont contribué à enrichir ces recherches, Dominique Levent, directrice Créativité & Vision à Renault, de m'avoir aidé à diffuser mes travaux à travers la communauté d'innovation de Renault, Dominique Lahousse, responsable innovation et prospective à la SNCF, de m'avoir invité à coanimer des séminaires de conception innovante sur des méthodes en phase de recherche, ainsi que tous les acteurs industriels qui m'ont accordé de leur temps pour discuter ces travaux : Yvon Bellec expert en conception innovante, Philippe Loué, consultant en management de l'innovation, Bertrand Stelandre, responsable Design et Innovation chez Visteon, Jean-Pascal Derumier spécialiste en management de l'innovation à la SNCF, Benjamin Duban, responsable de Viva conseil, Stéphane Cobo, responsable de la prospective à la RATP.

J'aimerais remercier ceux et celles qui d'une manière ou d'une autre ont participé à l'écriture de ce document même si parfois le sujet leur était totalement inconnu.

Enfin, ces remerciements ne seraient pas complets sans une pensée pour Frédéric Basse qui fut à l'origine de mon attrait pour la conception innovante en m'ayant confié une mission importante sur ce thème lors de mon passage en tant que stagiaire chez Rip Curl il y a 5 ans de cela.

Je finis mes trois années de thèse avec une certaine sérénité. En trois ans, je suis passé de l'enthousiasme de commencer un nouveau projet, aux doutes et découragements quant aux nombreuses difficultés et à l'exigence de ce travail, à la satisfaction enfin de le voir progresser, et évoluer.

RESUME GENERAL

Cette recherche étudie l'intégration de capacités organisationnelles pour l'innovation radicale dans les entreprises industrielles établies. Elle s'appuie sur l'étude longitudinale des processus d'innovation radicale d'un motoriste de l'aéronautique : Turbomeca. Cette entreprise, numéro un mondial des turbines à gaz d'hélicoptère, a connu en 2008 des bouleversements importants liés à la mutation des systèmes d'énergie aéronautiques, qui ont incité ses dirigeants à lancer une démarche d'innovation radicale. Cette démarche fut découpée en deux actions principales: 1/ la mobilisation d'un collectif transversal d'experts de l'entreprise entre 2009 et 2011, coordonnés selon une méthode collaborative de conception innovante, 2/ l'étude scientifique des conditions de genèse et d'intégration de capacités d'innovation radicale dans l'entreprise. Afin d'exploiter au mieux la richesse de ce matériel empirique, notre méthodologie de recherche est basée sur une recherche-intervention menée entre 2009 et 2012, et s'est appuyée sur un ensemble de méthodes et d'outils pour la collecte, la triangulation et l'analyse des données, telles que des entretiens semi-directifs, l'observation-participante, ou encore l'analyse d'archives de l'entreprise.

Dans une première partie, nous proposons une revue de littérature synthétisant les apports des travaux de recherche internationaux sur l'innovation radicale, à travers laquelle nous mettons en évidence la limite de la segmentation de la littérature par niveaux organisationnels pour l'étude de l'organisation de l'innovation. De ce fait, pour étudier ces processus dans leur globalité, nous mobilisons les approches par la conception et proposons un cadre théorique permettant l'étude des capacités d'innovation radicale relatives au Design (D), à l'Incubation (I), et à la Mutation (M) de l'écosystème. Le cadre D-I-M permet d'une part, de rendre compte des nouveaux raisonnements de conception en jeu dans les processus d'innovation radicale et, d'autre part, d'étudier les moyens de production de connaissances nouvelles ainsi que l'interaction de l'entreprise avec son écosystème.

Dans une deuxième partie, nous mobilisons l'ensemble très riche d'archives de notre terrain d'étude et les expériences des collaborateurs de Turbomeca — actifs ou retraités — pour étudier l'évolution historique des capacités d'innovation de l'entreprise. Afin de mieux comprendre et caractériser cette évolution, nous avons mené une investigation longitudinale approfondie sur les soixante-dix ans d'existence de la société (1948-2009). Cela nous permet d'analyser la genèse de la turbine à gaz et de reconstruire la généalogie des capacités de conception innovante de Turbomeca, depuis sa création jusqu'à la période de

bouleversements que cette entreprise rencontrait en 2008.

Dans un premier temps, notre analyse de l'apparition de la turbine à gaz nous amène à proposer la notion de *potentiel d'innovation de rupture* pour comprendre l'apparition d'une innovation radicale.

Puis, à travers notre cadre d'analyse des capacités d'innovation radicale D-I-M, nous proposons une relecture de l'histoire de Turbomeca qui nous permet de caractériser l'évolution des capacités de conception de l'entreprise en isolant trois modèles de conception, qui correspondent à trois périodes historiques différentes : le modèle entrepreneurial, le modèle exploratoire, et le modèle technocentré. Cette analyse met en évidence les limites de ce dernier modèle pour répondre aux nouveaux enjeux de l'aéronautique à Turbomeca, ainsi que la nécessité de faire émerger un nouveau modèle pour s'y adapter.

Dans une troisième partie, afin de comprendre les processus à piloter pour conduire les transitions organisationnelles nécessaires à l'intégration de capacités d'innovation radicale, nous analysons la méthode collaborative de conception innovante mise en place dans l'entreprise : la méthode KCP. Nous mettons en évidence un type de transformation dans l'entreprise induit par cette méthode, et qui n'avait pas été repéré par la littérature sur l'innovation radicale : l'interaction entre la transformation du raisonnement de conception et la transformation multi-niveaux de l'organisation.

Nous montrons, à partir de notre analyse, que l'intégration de capacités d'innovation radicale dans l'entreprise passe par une transformation de l'organisation que nous nommons *transition organisationnelle par la conception*. Nos recherches montrent ainsi que la méthode KCP permet d'outiller et de piloter ces types de transitions.

Ce point a fait l'objet d'une communication internationale à la conférence IPDMC XVIII en 2010, et est actuellement en cours de révision pour une publication dans le journal *Creativity and Innovation Management* (cf. encadré en fin de résumé).

Par la suite, à partir de l'étude de trois projets de conception innovante issus de la méthode KCP, nous avons pu caractériser les processus à gérer pour conduire ce type de transformation. Nous montrons en effet qu'une *transition organisationnelle par la conception* implique le pilotage de six grands types d'activités de conception innovante :

- (1) la prise de conscience des incertitudes de l'écosystème;
- (2) l'apprentissage forcé du *non-art* ;
- (3) la construction d'une exploration conceptuelle ;
- (4) la conception de l'environnement d'incubation, ou *nidification* ;
- (5) l'incubation agile ;
- (6) la dissémination interne et externe.

Dans une quatrième partie, nous décrivons précisément ces activités et nous construisons une proposition d'organisation pour la conception innovante adaptée à l'entreprise. Cette proposition inclut un processus macro de conception et un processus méso de description des tâches de conception, des principes organisationnels, ainsi qu'une structure organisationnelle et l'interaction de celle-ci avec les autres entités de l'entreprise, telles que la Recherche, le Développement, ou encore la direction Stratégique. Une proposition de dimensionnement (nature et volume) des ressources nécessaires à son implantation a également été formulée sur la base d'une triangulation des ressources consommées par les projets issus de la méthode KCP. Nous montrons finalement, au travers de la construction de cette proposition d'organisation, que la description opérationnelle des activités de la conception innovante permet de définir les principes organisationnels pour l'intégration de capacités d'innovation radicale dans l'entreprise.

Dans une partie conclusive, nous synthétisons les apports de nos recherches à la littérature sur l'innovation radicale. Nous confirmons, dans un premier temps, l'intérêt d'une approche par la conception pour organiser les activités de conception innovante. Puis, nous avançons que nos recherches fournissent une contribution significative à la notion d'*organisation orientée conception*, en proposant les activités et les entités constitutives d'une telle organisation.

Publications scientifiques associées

1. Arnoux, F., & Béjean, M. 2010. Strategies for building Radical Innovation potential: Exploring the role of collaborative creative design methods. *International Product Development Management Conference, Murcia, Spain*.
2. Arnoux, F., Béjean, M., & Hooge, S. 2013. Organizing for Radical Innovation: From Stage-Gate control processes to Stage-Based Collaborative Exploration Methods. *Creativity and Innovation Management*. (accepté sous condition de modifications)

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE ET METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE	17
---	----

PARTIE I INTEGRER DES CAPACITES D'INNOVATION RADICALE : UNE APPROCHE PAR LA CONCEPTION	37
--	----

Chapitre 1 - analyse des limites de la littérature sur les capacités d'innovation radicale	41
--	----

Chapitre 2 - approches de la conception pour intégrer des capacités d'innovation radicale	77
---	----

PARTIE II L'INNOVATION RADICALE DANS UNE ENTREPRISE ETABLIE : ANALYSE HISTORIQUE DES CAPACITES DE CONCEPTION INNOVANTE DE TURBOMECA.....	95
--	----

Chapitre 3 - généalogie des capacités de conception innovante à turbomeca	99
---	----

Chapitre 4 - interprétation de la généalogie des capacités de conception innovante à Turbomeca	183
--	-----

PARTIE III LES LECONS DE L'EXPERIENCE KCP : UNE <i>TRANSITION ORGANISATIONNELLE PAR LA CONCEPTION</i>	201
---	-----

Chapitre 5 - origine, description et analyse de la methode KCP chez Turbomeca	205
---	-----

Chapitre 6 - interprétation des impacts de la méthode : une <i>transition organisationnelle par la conception</i>	249
---	-----

PARTIE IV LA CONCEPTION INNOVANTE : PRINCIPES D'ORGANISATION D'UNE NOUVELLE FONCTION STRATEGIQUE	259
--	-----

CONCLUSION GENERALE.....	301
--------------------------	-----

BIBLIOGRAPHIE	313
---------------------	-----

TABLES DES LEGENDES	322
---------------------------	-----

PLAN GENERAL	326
--------------------	-----

INTRODUCTION GENERALE ET METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

1. Objet de recherche : l'intégration de capacités d'innovation radicale	19
2. Problématique de recherche	23
3. Approche méthodologique	25
3.1. Recherche-intervention et statut du chercheur en contrat CIFRE	26
3.2. Présentation du terrain d'étude et de son intérêt pour la recherche.....	27
3.2.1. Sélection et pertinence du cas Turbomeca	27
3.2.2. Les étapes de la recherche et une combinaison de méthodes mobilisées	28
4. Organisation du document de thèse	32

Nouveaux produits, compétition par l'innovation, créativité, politique d'innovation, ou encore stratégie d'innovation ne sont pas des termes nouveaux dans la littérature en sciences de Gestion, mais l'intérêt qu'ils suscitent dans l'industrie semble avoir augmenté ces dernières années. Les entreprises de nombreux secteurs sont de plus en plus sollicitées pour innover. Les acteurs de ces entreprises sont incités à innover davantage et plus rapidement, et ces nouveaux rythmes de l'innovation poussent les entreprises à innover différemment. Par conséquent, les logiques d'organisations dédiées aux activités d'innovation s'en trouvent modifiées. Alors que les années 1990 ont été dominées par les paradigmes organisationnels de l'innovation incrémentale, de la qualité totale et des performances en qualité-coûts-délais, les premières décennies du 21^e siècle appartiendront à ceux qui sauront maîtriser l'innovation radicale. Aujourd'hui, pour entrer dans ce nouveau terrain de jeu, que certains nomment le « capitalisme de l'innovation intensive » (Chapel, 1997), les entreprises doivent se transformer pour se doter de capacités nouvelles pour l'innovation radicale. Afin que ces transformations ne se reposent pas sur la seule intuition de certains dirigeants éclairés, la recherche en gestion cherche à fournir des modèles, des méthodes et des principes d'organisation aux entreprises pour les accompagner dans ces changements. Les travaux présentés dans ce document s'inscrivent dans cette perspective, et s'appuient sur l'étude longitudinale d'un processus d'innovation radicale dans une entreprise leader mondial des moteurs d'hélicoptères : Turbomeca.

1. Objet de recherche : l'intégration de capacités d'innovation radicale

Bien qu'il soit évident que les entreprises du secteur des nouvelles technologies de l'information et de la communication doivent lancer davantage de nouveaux produits, et dans des délais de plus en plus courts notamment pour rester dans la compétition rythmée par la loi de Moore, d'autres secteurs qui semblaient plus ou moins à l'abri de ces phénomènes se voient également contraints d'innover à un rythme soutenu pour perdurer. C'est le cas de l'industrie de l'aéronautique. Aujourd'hui, l'impact environnemental est un critère prédominant dans la conception des nouveaux produits de l'aviation, en raison de plusieurs facteurs. Il est d'abord exigé par les consommateurs finaux, dont de plus en plus sont sensibles à la réduction de leur « empreinte environnementale », et tendent à utiliser les produits les plus « verts » possible. Cette contrainte est ensuite imposée par les autorités de réglementation qui visent à normaliser et à taxer les émissions de gaz à effet de serre. Enfin, l'objectif environnemental est structuré par les acteurs de l'aéronautique eux-mêmes qui construisent ensemble – groupes de réflexion public / privé - des *roadmaps* pour suivre les

évolutions du trafic aérien des décennies à venir - une des conséquences étant que les projets de la recherche doivent être en adéquation avec ces *roadmaps* pour obtenir des financements publics. Cependant, les objectifs fixés par ces conseils sont délibérément très ambitieux et acculent les entreprises de l'aéronautique à la nécessité de conduire des innovations radicales. Dans ce contexte, ce sont tout particulièrement les motoristes qui, en tant que fournisseurs des énergies propulsives et non propulsives à bord des aéronefs, deviennent les acteurs centraux de ces bouleversements. Turbomeca, en tant que motoriste d'hélicoptères, est donc particulièrement affecté par ces nouveaux enjeux.

À Turbomeca, ces enjeux sont liés à la pression sur la réduction de l'impact environnemental des moteurs ainsi que sur les coûts d'utilisation de ces derniers corrélés à la consommation spécifique. En effet, les diminutions d'émissions de CO₂ et de NOx proposées par un agenda stratégique élaboré par ACARE, un conseil aéronautique européen, suggèrent, depuis 2001, des efforts considérables de la part des motoristes pour suivre, entre autres, les réglementations futures de l'aéronautique : à savoir une réduction de 15 % en 2015, de 22 % en 2020, et de 35 % en 2030 de la consommation spécifique des turbomoteurs.

En réponse à ces nouveaux enjeux, la question posée en 2008 par le responsable de l'innovation de Turbomeca, et qui fut à l'origine d'un important processus d'innovation radicale dans l'entreprise, et donc du lancement de nos recherches, était la suivante : **quelles stratégies d'innovation intégrer à Turbomeca pour répondre aux nouveaux enjeux de l'énergie dans les aéronefs ?**

Cette question le conduisit à proposer deux démarches parallèles et complémentaires :

- 1) le lancement d'un projet de réflexion sur les produits à horizon vingt ans;
- 2) le lancement d'une étude scientifique sur l'innovation radicale à Turbomeca.

Le premier projet devait contribuer à penser et concevoir des produits adaptés aux nouveaux enjeux environnementaux, en s'appuyant sur une méthode collaborative de conception innovante. La seconde initiative devait contribuer à la compréhension des processus de conception de l'entreprise, à l'analyse de la démarche du projet d'innovation de rupture en question ainsi qu'à des recommandations organisationnelles pour l'innovation radicale. Notre intervention, qui a démarré en janvier 2009, s'inscrit dans le cadre de la deuxième initiative qui portait des questions de recherches très pertinentes pour l'étude de l'innovation radicale dans les entreprises établies.

L'innovation radicale n'est pas une notion nouvelle. Elle remonte aux travaux en économie de Joseph Schumpeter. Dès 1942, dans son ouvrage *Capitalisme, populisme et démocratie*, il popularisait le concept de « destruction créatrice » Schumpeter (1942). Il fut le premier à voir

la création de l'entrepreneur comme une force motrice de l'économie déstabilisant les entreprises établies ou en situation de monopole pour créer des activités nouvelles, et donc de la croissance économique. En 1953, l'économiste Maclaurin proposa des indicateurs pour suivre et évaluer l'investissement dans la recherche. Dans ce cadre, il fit apparaître le besoin de distinguer les innovations incrémentales des innovations radicales en se reportant à l'histoire du nylon (Le Masson, Weil, & Hatchuel, 2006). Les chercheurs en sciences de l'organisation se sont aussi intéressés de près à la question. En effet, l'analyse de l'histoire de Ford par Abernathy a conduit à la caractérisation de la notion de « *dominant design* » (Abernathy & Townsend, 1975). Il s'agit d'une notion particulièrement structurante pour l'analyse de l'innovation, qui permet d'étudier la conception de technologies clés devenant un modèle *de facto* sur un marché. L'apparition d'un *dominant design* dans une industrie a été décomposée en trois phases distinctes par ces auteurs : une phase fluide dans laquelle les incertitudes sont importantes, permettant ainsi une large compétition entre technologies jusqu'à la stabilisation des caractéristiques fonctionnelles, une phase de transition portant essentiellement sur les procédés, puis la rationalisation de ces procédés relevant de la phase dite spécifique d'un *dominant design*. Ces travaux ont eu un impact important dans la littérature et dans l'industrie, en ce qu'ils ont permis de caractériser une innovation radicale comme un élément perturbateur d'un *dominant design* sur un ensemble de critères : technologie, compétences, modèle d'affaires et marché. Dans cette lignée, les travaux de Tushman et Anderson ont mis en évidence la notion de « *punctuated equilibrium* ». Leurs recherches s'intéressent aux changements technologiques à travers un produit caractérisé par de longues périodes de changements incrémentaux ponctués de discontinuités (Tushman & Anderson, 1986). Leurs études montrent que ces équilibres et discontinuités jouent de deux manières sur les compétences relatives à un produit : les *competence destroying*, qui sont des périodes dans lesquelles les compétences établies sont remises en cause et ouvrent ainsi la voie à de nombreux acteurs, et les *competence enhancing*, périodes dans lesquelles les compétences établies sont améliorées de manière incrémentale, ce qui débouche sur une diminution des acteurs dans le marché. D'autres travaux ont étudié l'innovation radicale, mais sous l'angle des technologies nouvelles et de leur rapport au marché: Christensen (1997) propose ainsi le concept d'*innovator dilemma* pour caractériser les difficultés rencontrées par les entreprises établies faisant face à une technologie « disruptive »¹. Ce concept connut un large succès, aussi bien dans le monde académique, que dans l'industrie. L'auteur met en évidence le dilemme dans lequel se trouvent les entreprises établies qui consacrent la plupart de leurs investissements sur des projets rentables, en améliorant leurs technologies existantes pour des marchés existants, omettant ainsi de consacrer des efforts à des technologies

¹ Terme utilisé par l'auteur pour décrire une innovation de rupture.

disruptives faisant appel à de nouveaux critères de performance ; par la suite, ce sont des entreprises émergentes qui s'en chargeront et développeront des technologies sur des marchés *ad hoc* qui, peu à peu, rattraperont la technologie dominante sur les valeurs usuelles.

L'ensemble de ces travaux a posé les bases de l'innovation radicale dans la littérature. Or, la majorité de ces études demeure essentiellement théorique et ne fournit pas, en pratique, aux entreprises les moyens de générer et piloter l'innovation radicale dans un contexte d'innovation intensive (Chapel, 1997). Récemment des auteurs ont travaillé sur ces questions et se sont appuyés sur le champ des *dynamic capabilities* pour proposer les éléments à intégrer pour l'innovation radicale (Kelley, O' Connor, Neck, & Peters, 2011; Leifer et al., 2000; O'Connor, 2008). Il reste que ces travaux ne fournissent pas de principes opérationnels répondant aux besoins des entreprises, et ne proposent pas de manière explicite **les principes d'intégration des capacités d'innovation radicale, c'est-à-dire le processus de gestion par lequel une entreprise peut se transformer pour acquérir la faculté de comprendre, générer et organiser l'innovation radicale.**

Il est à noter que de nombreux auteurs utilisent des concepts différents pour décrire des innovations non incrémentales : innovation de rupture, innovation radicale, innovation disruptive ou encore innovation majeur. Bien que, chacune de ces notions soit mobilisée dans la littérature pour décrire une forme particulière de discontinuité, nous utiliserons dans l'ensemble de ce document ces termes de manières équivalentes. Nous proposons une définition pour décrire ces formes d'innovation à partir des théories de la conception, travaux que nous présenterons en détail dans la première partie du document.

Nous définissons une proposition « en rupture » comme une proposition portant sur un objet — produit ou service — dont l'identité et la valeur sont instables et/ou nécessitant l'acquisition de poches de connaissances entières.

Une autre approche pour répondre à cette problématique est d'étudier les activités de conception. C'est-à-dire l'activité du raisonnement qui, à partir d'une proposition sur un objet partiellement inconnu, tente de le transformer en d'autres concepts et connaissances. Cette approche est définie comme essentielle pour la compréhension des processus d'innovation radicale dans l'entreprise (Le Masson et al., 2006; Le Masson, Weil, & Hatchuel, 2010). Partant du constat que l'intégration de capacités d'innovation radicale dans l'entreprise passe par des capacités de renouvellement de l'identité des objets, les chercheurs du Centre de

Gestion Scientifique ont formalisé les fonctions organisationnelles et managériales nécessaires à la conception innovante (Hatchuel & Weil, 2002a, c; Hatchuel & Weil, 2009) et aux organisations orientées conception (Hatchuel, Le Masson, & Weil, 2002b; Hatchuel & Weil, 1999). Ce cahier des charges a permis de poser les bases d'un modèle organisationnel pour la conception innovante : le modèle R-I-D (Le Masson, 2001). Néanmoins, bien que ces travaux soient très structurants pour comprendre les phénomènes en jeu dans les processus d'innovation radicale, les auteurs ne définissent pas les activités de conception qui permettraient d'opérationnaliser un tel modèle dans l'organisation.

Ainsi, comme nous venons de le voir, alors que ce phénomène est étudié depuis des décennies par de nombreux courants de recherche, les chercheurs n'ont pas mis à disposition des entreprises des modèles permettant d'intégrer des capacités organisationnelles pour l'innovation radicale. Le champ de la conception propose des éléments permettant de comprendre et d'analyser de tels phénomènes, mais nécessite encore des études empiriques pour compléter les recherches visant à l'opérationnalisation de telles capacités dans les entreprises.

Notre recherche s'inscrit dans la continuité de ce champ, et vise à montrer qu'une entreprise acquiert des capacités d'innovation radicale à travers des transitions organisationnelles par la conception. Elle propose six grands types d'activités de conception pour l'intégration de capacités d'innovation radicale.

Dans les sections suivantes, nous expliciterons le positionnement de notre recherche et la structure du document.

2. Problématique de recherche

« Je ne veux pas être le General Motors de l'aéronautique », « Faites-moi la Prius de l'aéronautique ». Ces verbatim du PDG de Turbomeca décrivent parfaitement le contexte dans lequel démarraient nos recherches dans l'entreprise en 2009. En effet, en faisant référence au monde de l'automobile, le dirigeant de Turbomeca formulait au directeur technique ainsi qu'au directeur Innovation, l'urgence de transformer les logiques d'innovation de l'entreprise. À cette période, le PDG avait probablement le sentiment que d'importants changements étaient à opérer afin que l'entreprise ne connaisse pas le sort de General Motors. En effet, vu de l'industrie aéronautique, le champion américain des grosses cylindrées haut de gamme aurait ignoré ou n'aurait pas vu venir la raréfaction du crédit, la crise pétrolière ainsi

que la désaffection pour les voitures à forte empreinte environnementale, alors que Toyota, qui avait lancé dans les années 90 le projet G21², semblait plus préparé aux enjeux automobiles du XXI^e siècle.

Aussi, bien que le *brief* de départ formulé par le PDG au directeur de l'innovation semblait parfaitement clair, cet acteur semblait démuné quant à la manière de conduire un processus d'innovation radicale et d'intégrer durablement ce type de capacités dans l'entreprise. En effet, si la littérature reconnaît le besoin d'intégrer de telles capacités dans les entreprises pour préparer leur avenir — notamment la littérature sur l'ambidextrie organisationnelle —, elle ne va jamais jusqu'à expliciter les activités permettant l'intégration de telles capacités.

D'un point de vue théorique, ces limites nous permettent de clarifier nos recherches. Notre thèse porte donc sur la caractérisation des processus et des activités pour l'intégration de capacités d'innovation radicale. Et nous formulons notre problématique de notre recherche de la manière suivante :

Comment modéliser et organiser les activités de conception innovante pour intégrer des capacités d'innovation radicale dans une entreprise établie ?

Nos travaux traitent cette problématique au travers de trois questions de recherches.

Tout d'abord, nous avons besoin de comprendre les phénomènes d'innovation radicale *ex-ante*, c'est-à-dire de comprendre comment émerge une innovation radicale d'une part, mais surtout d'analyser les situations qui rendent nécessaires des innovations de ce type.

À Turbomeca, lors de notre premier rendez-vous avec le responsable des architectures moteurs, celui-ci nous rapportait qu'il n'avait pas, à l'époque, de pistes pour atteindre les objectifs de réduction de l'impact environnemental des moteurs fixés par le conseil aéronautique ACARE : « -30% de consommation spécifique, je ne sais pas comment faire », nous rapportait-il. Cette phrase venait confirmer les limites du processus de conception en place au sein de l'entreprise pour répondre aux nouveaux défis de l'aéronautique, et suscita chez nous un certain nombre d'interrogations du point de vue industriel : comment une entreprise leader de l'aéronautique et dans sa 70^{ème} année d'existence pouvait-elle soudainement afficher une telle difficulté quant à la préparation de son avenir ? Comment pouvons-nous caractériser la situation dans laquelle se trouvait l'entreprise ? La littérature sur l'innovation radicale étudie majoritairement des cas *ex-post* et ne propose pas d'études

² Le projet G21 lancé en 1992 par Toyota était un projet exploratoire qui avait débouché sur la fameuse voiture hybride Prius.

permettant de caractériser, avant même le démarrage d'un processus de conception, une situation d'innovation radicale. La première question de recherche que nous proposons relève par conséquent d'un effort de qualification des situations d'innovation radicale :

(Q1) Comment caractériser une situation d'innovation radicale ?

Afin de répondre à ces situations d'innovation radicale, les entreprises doivent se doter de capacités organisationnelles adaptées. Bien que, récemment, plusieurs auteurs (O'Connor, 2008; O'Connor & DeMartino, 2006) se soient intéressés à la forme que pouvaient prendre ces capacités, leurs études demeurent limitées en ce qui concerne les processus à gérer dans les transitions organisationnelles aboutissant à l'intégration de telles capacités. Notre seconde question de recherche — qui relève d'un effort de conceptualisation — vise donc à préciser les éléments en jeu dans les transitions en question :

(Q2) Comment piloter et modéliser des transitions organisationnelles pour intégrer des capacités d'innovation radicale ?

Du point de vue des attentes des managers des entreprises, le problème soulevé est encore plus complexe. Ils souhaitent en effet intégrer des capacités d'innovation radicale qui soient aussi des capacités pérennes. La préparation de l'avenir de l'entreprise doit reposer sur des activités permettant de renouveler ses concepts, ses produits et ses connaissances. De fait, il s'agit ici de s'interroger sur les éléments organisationnels sur lesquels reposent ces activités. Notre troisième question de recherche relève donc d'un effort d'opérationnalisation et vise donc à proposer les principes organisationnels pour l'innovation radicale :

(Q3) Quels principes organisationnels pour l'intégration de capacités d'innovation radicale de manière pérenne dans l'entreprise ?

Dans la section suivante, nous présentons notre méthodologie de recherche.

3. Approche méthodologique

Dans cette section, nous présentons notre démarche générale de recherche. Nous explicitons notre approche méthodologique en tant que chercheur-salarié de l'entreprise, puis nous présentons le terrain d'étude ainsi que son intérêt pour la recherche, et nous finissons par proposer un panorama des méthodes utilisées pour récolter les données et s'assurer de leur validité.

3.1. Recherche-intervention et statut du chercheur en contrat CIFRE

Les processus d'innovation radicale sont des processus complexes. Leur étude requiert une connaissance approfondie du champ d'investigation pour comprendre et analyser dans son ensemble leurs impacts sur les différents paramètres de l'entreprise. En effet, les chercheurs s'accordent sur le fait que les processus d'innovation opèrent des changements à tous les niveaux de l'entreprise et sur de nombreux métiers. Dans notre étude et afin de mieux appréhender les processus d'innovation de rupture, nous avons ancré notre recherche dans une démarche de recherche-intervention (David, 2002; Hatchuel & David, 2007; Radaelli, Guerri, Cirella, & Shani, 2012; Shani, Mohrman, Pasmore, Stymne, & Adler, 2007), définie par David (2000) de la façon suivante :

"La recherche-intervention consiste à aider, sur le terrain, à concevoir et à mettre en place des modèles, outils et procédures de gestion adéquats, à partir d'un projet de transformation plus ou moins complètement défini, avec comme objectif de produire à la fois des connaissances utiles pour l'action et des théories de différents niveaux de généralité en sciences de gestion."

Ainsi, en immergeant le chercheur dans son étude de cas, la recherche-intervention « permet à la fois d'explorer en profondeur l'objet de l'étude grâce à la collecte de nombreuses données de natures variées (économiques, critères décisionnels, identification des parties prenantes...) et dans le même temps de cerner sa contingence » (Hooge, 2010). Cette méthodologie fournit un cadre aux chercheurs pour produire collectivement des connaissances à la fois valables scientifiquement et actionnables. Contrairement aux méthodologies basées sur des interviews, le chercheur, placé ainsi au cœur de son terrain, peut mieux « saisir les trajectoires et relativiser les différentes perceptions recueillies » (Hatchuel, 1994). De plus, la recherche-intervention permet un double apprentissage, celui du chercheur d'abord qui s'imprègne des pratiques managériales propres à l'entreprise, et celui des membres de l'entreprise qui apprennent en retour sur leurs propres modes d'action (Hooge, 2010).

Nous avons conduit notre recherche dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE). Ce dispositif permet de subventionner toute entreprise de droit français qui embauche un doctorant pour le placer au cœur d'une collaboration de recherche avec un laboratoire public. Il a été institué en 1981 par le ministère de la Recherche pour renforcer les relations entre les universités, les établissements de recherche et les entreprises. À partir de ce financement sont liés contractuellement une entreprise, un laboratoire de recherche et le doctorant. Il impose aussi que le doctorant soit salarié dans l'entreprise pour une durée de trois ans minimum. Dans notre cas, le doctorant était lié à Turbomeca par un contrat à durée déterminée de mai 2009 à mai 2012. Ce statut a un double intérêt pour la

recherche-intervention. D'une part, il offre au doctorant un statut intéressant, puisque celui-ci se trouve autant concerné par la réussite de ses travaux de recherche que par le succès du projet de l'entreprise dans lequel il est impliqué. D'autre part, à travers sa position de salarié de l'entreprise, le chercheur dispose d'un matériau important auquel il aurait plus difficilement accès en tant que chercheur externe (lieux, évènements, comités de pilotages et communications internes). Ainsi, le chercheur CIFRE a accès à des données de premier ordre et participe à la vie de l'organisation. L'immersion du chercheur dans l'entreprise à travers ce dispositif constitue donc un atout important pour la recherche-intervention en sciences de gestion. Par ailleurs, il est à noter qu'il existe quelques biais au statut de chercheur-salarié. D'une part, son positionnement hiérarchique dans l'entreprise ne lui donne pas toute l'indépendance qu'il aurait en tant que chercheur externe, et, d'autre part, il peut être confronté à ce que Baumard *et al.* (1999) nomment le paradoxe de l'intimité : *« plus le chercheur développe une intimité avec les acteurs interrogés, plus ceux-ci auront tendance à dévoiler des informations. Toutefois, plus le chercheur entre dans le jeu de la « désinhibition du cas étudié, plus il aura tendance à abonder dans le sens de l'acteur en offrant un degré d'intimité réciproque. »*

3.2. Présentation du terrain d'étude et de son intérêt pour la recherche

3.2.1. Sélection et pertinence du cas Turbomeca

Pour étudier les activités de conception innovante à intégrer pour acquérir des capacités d'innovation radicale, notre recherche étudie de façon approfondie une entreprise : Turbomeca. Plusieurs éléments ont motivé notre choix d'étudier ce cas. D'abord, le caractère intentionnel de la démarche de Turbomeca de s'inscrire dans un processus d'innovation radicale nous paraît être un cas rare. En effet, à l'époque, Turbomeca, en tant que leader mondial des turbines à gaz, n'était pas forcé par le marché de lancer une telle initiative. Les cas d'études de processus d'innovation radicale d'entreprises pionnières dans leur domaine ne sont pas fréquents. En témoigne, par exemple le peu d'études récentes publiées sur le management de l'innovation chez Apple.

Dans la littérature, les études des capacités d'innovation radicale concernent, pour la plupart, des entreprises évoluant dans des écosystèmes industriels rapidement changeants (*high velocity environments* (Eisenhardt, 1989)) tels que l'industrie des nouvelles technologies de l'information et de la communication. Or, dans ces secteurs, le temps de développement d'un produit nouveau n'est de l'ordre que de quelques mois. Le secteur de l'aéronautique offre une échelle de temps de renouvellement des produits bien plus grande. En effet, le temps de

développement d'un nouvel aéronef, par exemple, est de 5 à 10 ans. Celui d'un nouveau moteur est de l'ordre de 5 ans. Enfin, les programmes de moteurs dans l'aéronautique ont des durées de vie de plusieurs dizaines d'années. Cette échelle de temps offre à la fois un terrain de recherche nouveau par rapport à la littérature conventionnelle sur l'innovation radicale, mais aussi la possibilité d'analyser en profondeur et de manière très précise les processus de transformation d'une entreprise qui venait de fêter son 70^{ème} anniversaire lors du démarrage de nos recherches.

Une autre spécificité de ce cas relève du fait que l'entreprise évolue dans un écosystème particulièrement contraint. Tout d'abord parce que cette entreprise est un fournisseur de composants très dépendant d'un des intégrateurs dominant le marché. Ensuite parce que l'industrie aéronautique est soumise à des normes de sécurité drastiques, qui rendent d'autant plus contraignants les processus d'innovation.

Le dernier élément ayant motivé notre sélection de cas fut la méthode adoptée par le responsable de l'innovation pour accompagner son initiative d'exploration des produits à long terme. Cette méthode, appelée méthode KCP, est une méthode collaborative de conception innovante développée au Centre de Gestion Scientifique de Mines ParisTech. Elle s'appuie sur la théorie de la conception C-K, et vise à concilier objectifs cognitifs et organisationnels dans les processus d'exploration collective. L'analyse de cette méthode constituait pour nous un matériel empirique très riche, car il allait nous permettre d'étudier à la fois des processus cognitifs nouveaux ainsi que des transitions organisationnelles au tout début des processus d'innovation. Là où tout se joue dans les processus d'innovation de rupture, et que certains auteurs (Koen et al., 2001) appellent le « *fuzzy front end* » de l'innovation. Le lieu où prennent forme les propositions en rupture dans une organisation.

3.2.2. Les étapes de la recherche et une combinaison de méthodes mobilisées

Afin de saisir toute la complexité de notre problématique de recherche et de traiter les nombreuses questions soulevées par notre terrain d'étude, nous avons combiné plusieurs méthodes de recherche. **Chacune de ces méthodes sera précisée et détaillée dans les parties du document qu'elle concerne.** Nous explicitons, ici, uniquement l'intérêt de chacune d'entre elles pour notre recherche.

Durant nos recherches, nous avons recueilli nos données à partir de quatre méthodes de collectes de données : des entretiens semi-directifs, des analyses d'archives, notre observation-participante ainsi que des retours d'expérience d'acteurs internes et externes. Il est admis, dans la littérature que les recueils de types « multi-angulé » sont très pertinents

pour augmenter la validité des données pour les approches qualitatives en recherche (Rispal & Saporta, 2002).

Aussi, bien que nos démarches fussent quasiment parallèles durant toute la durée de notre recherche, par souci de clarté nous présentons les différentes étapes de notre recherche de manière séquentielle. Dans notre recherche, nous pouvons distinguer 3 étapes majeures (voir Figure 1).

La première étape relevait d'un effort de qualification visant à analyser la situation dans laquelle se trouvait Turbomeca à notre arrivée dans l'entreprise au début de l'année. Ce travail consistait à effectuer une **généalogie des capacités de conception innovante de l'entreprise depuis sa création jusqu'en 2009**. Afin d'établir cette généalogie, nous avons procédé de deux façons : l'analyse de l'histoire de l'entreprise et l'analyse des projets d'innovation actuels et historiques de l'entreprise. Pour analyser l'histoire de l'entreprise, nous avons étudié un ouvrage collectif de Turbomeca ainsi qu'un important document biographique du fondateur de l'entreprise. Par ailleurs, nous avions un accès illimité à la salle des archives de l'entreprise comprenant de nombreux articles scientifiques et de conférences du fondateur l'entreprise, ainsi que d'anciennes notes internes. Ces données ont par la suite été analysées avec la théorie C-K ainsi qu'au travers d'un cadre interprétatif que nous avons construit pour les capacités de conception innovante : le cadre *Design-Incubation-Mutation*.

La deuxième étape relevait d'un effort de conceptualisation visant à étudier et analyser les transitions organisationnelles pour intégrer des capacités d'innovation radicale. Dans cette étape, nous avons participé à un large processus d'innovation radicale mis en œuvre à travers la méthode collaborative de conception innovante : la méthode KCP. Le processus collectif s'appuyant sur cette méthode a démarré en janvier 2009, et nous avons été intégrés dans son déroulement à partir de cette date. Notre statut de doctorant-salarié nous a permis d'avoir l'occasion d'étudier l'impact du déploiement de cette méthode à différents niveaux d'analyse durant l'ensemble de sa mise en œuvre. D'abord, du fait que nous étions hiérarchiquement et physiquement rattachés au service des avant-projets, nous pouvions collecter des données au niveau de l'expert en travaillant avec eux sur les propositions nouvelles. Ensuite, en tant que chercheur en innovation, nous aidions le chef de projet au pilotage de la méthode, et avions donc accès à toutes les informations concernant les actions du *mid-management*. Aussi, nous participions à la préparation des documents de présentation à destinations du *top-management*. Ces différentes positions nous ont permis d'**observer les impacts de cette méthode à tous les niveaux organisationnels de l'entreprise**, ainsi que dans de nombreuses directions. Notre observation était dans certains cas complétée par des entretiens semi-directifs.

La troisième étape de notre intervention relevait d'un effort d'opérationnalisation visant à proposer les principes organisationnels pour l'intégration de capacités d'innovation radicale. Au cours de cette phase, nous avons effectué une analyse comparative d'organisations de conception innovante dans l'industrie, en mobilisant des récits sur des projets d'innovation radicale dans la littérature, mais aussi en effectuant plusieurs interviews avec des acteurs internes de la conception innovante et des spécialistes des processus d'innovation d'autres entreprises. Ce réseau d'acteurs nous a aussi permis de consolider **notre proposition d'organisation de la conception** durant sa phase de construction.

La Figure 1 ci-après fait la synthèse des différentes étapes de notre recherche en mettant en évidence les outils, matériaux et apports aux différents niveaux théoriques.

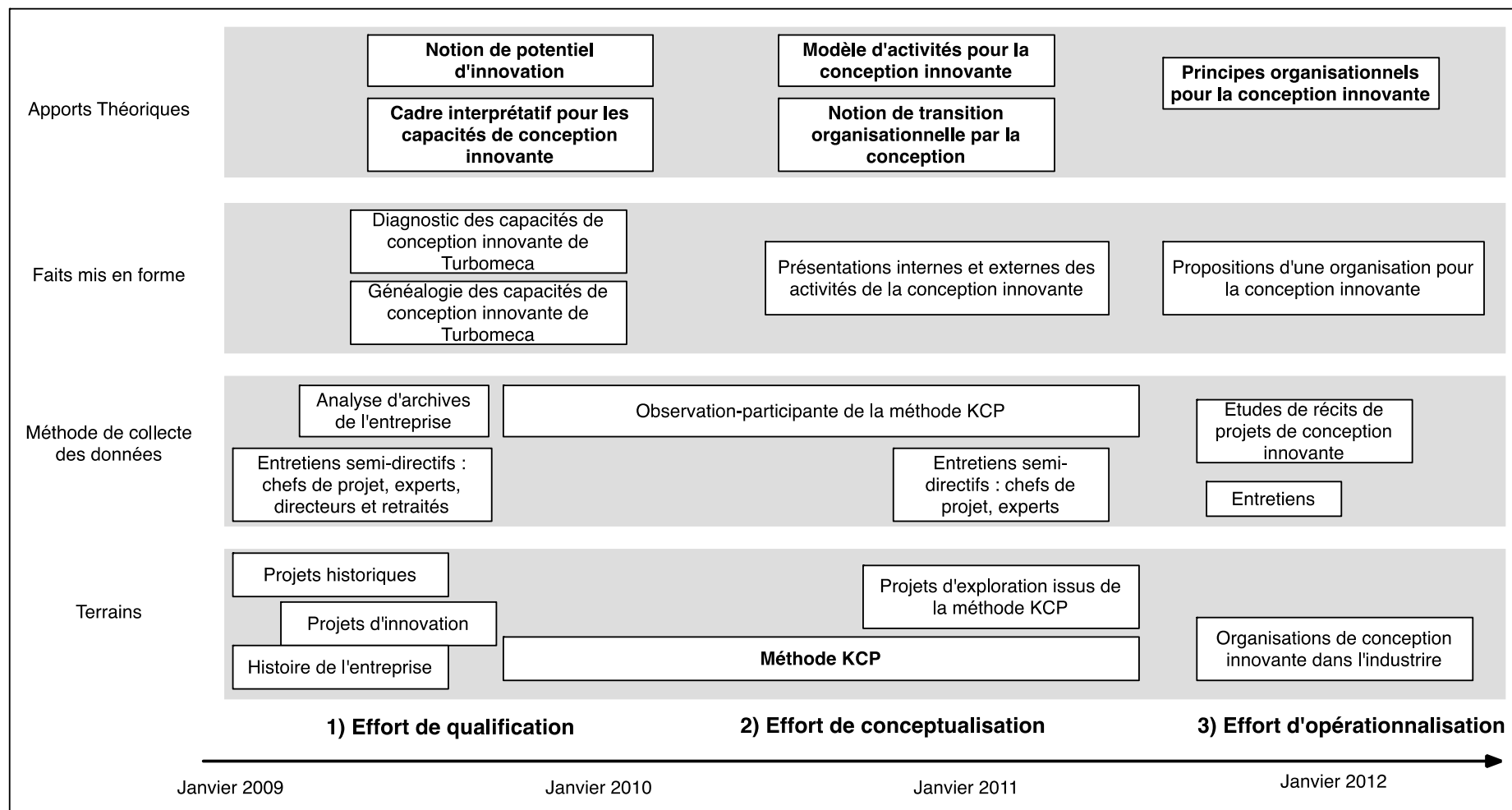


Figure 1 - Synthèse des données, méthodes de collecte de données, et apports aux différents niveaux théoriques

4. Organisation du document de thèse

Le document de thèse est composé de quatre parties dont le synoptique est présenté ci-dessous.

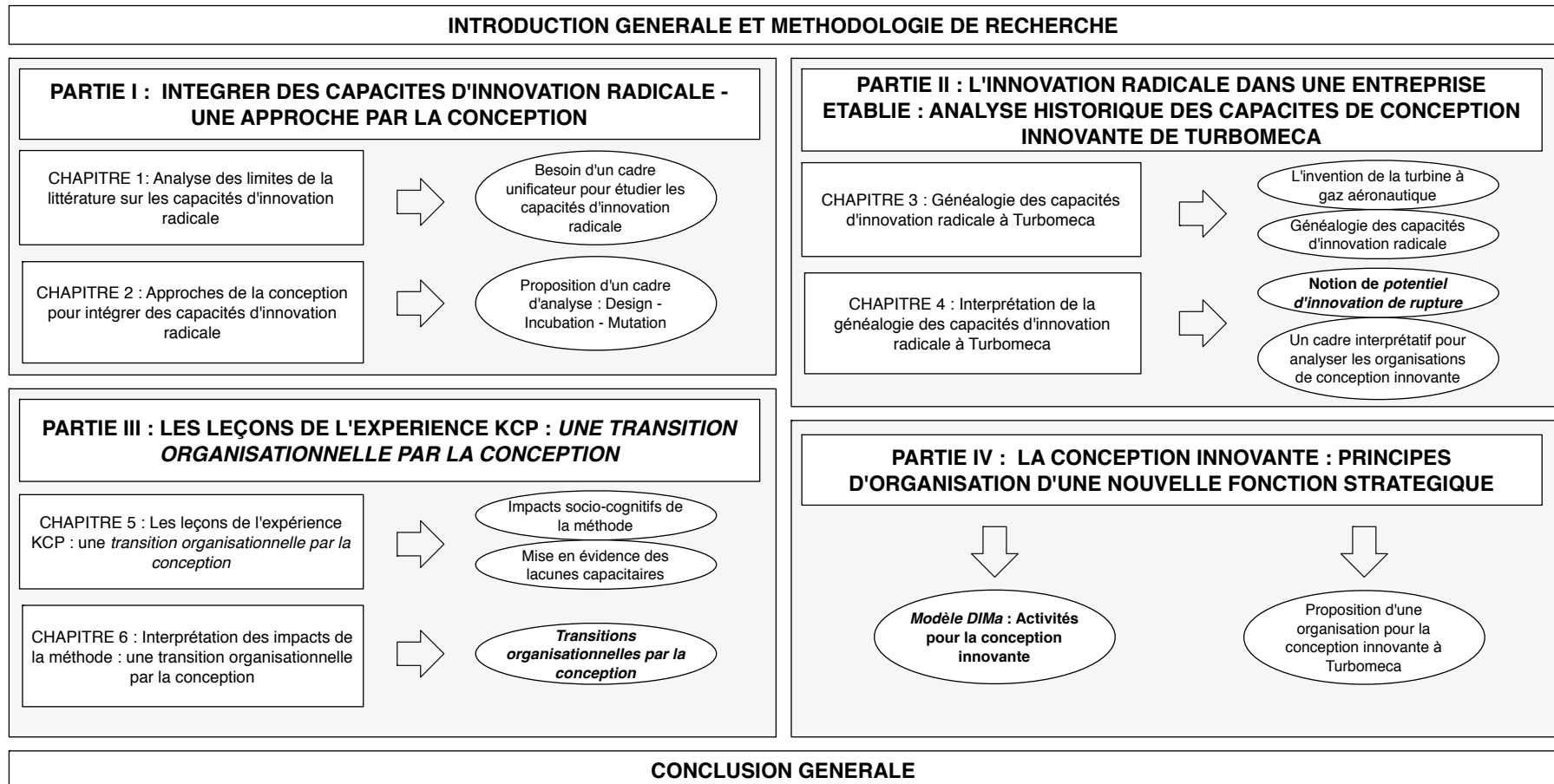


Figure 2 – Synoptique du document de thèse

La première partie de ce document introduit les cadres théoriques pour l'intégration de capacités d'innovation radicale dans les entreprises établies.

Dans le chapitre 1, nous proposons une revue de littérature mettant en avant les apports et les limites des approches classiques de l'innovation radicale. Ce chapitre présente un état de l'art des approches de l'innovation radicale à différents niveaux organisationnels : les approches cognitives et la résolution de problème au niveau individuel, les approches de la créativité de groupe et de la gestion de projet au niveau de l'équipe, ainsi que les approches de la cognition et de la structure organisationnelle au niveau de l'entreprise. **Nous concluons ce chapitre en mettant en évidence les limites de ces théories pour étudier les processus d'innovation radicale et soulignons la nécessité d'un cadre théorique unifié.**

Dans le chapitre 2, nous présentons de manière générale les différentes approches de la conception pour l'innovation radicale. Nous introduisons les travaux sur la conception innovante et la théorie C-K de la conception. Puis, à partir du cahier des charges organisationnel R-I-D, nous proposons un cadre d'analyse pour étudier les capacités d'innovation de rupture dans l'entreprise. **Ce cadre nommé D-I-M permet d'analyser les capacités relatives au *Design*, à l'Incubation et aux Mutations de l'écosystème.**

Dans la deuxième partie, nous proposons une relecture de la genèse de la turbine à gaz aéronautique ainsi qu'une relecture détaillée des capacités d'innovation radicale de Turbomeca depuis sa création, en 1938, jusqu'en 2009.

Dans le chapitre 3, nous présentons un déchiffrement de l'histoire de la turbine à gaz aéronautique en nous appuyant sur la théorie C-K puis nous construisons une généalogie des capacités d'innovation radicale chez Turbomeca à partir de 1938, année de fondation de l'entreprise, jusqu'à aujourd'hui, en nous appuyant sur notre cadre d'analyse D-I-M. Nous concluons en mettant en évidence la quasi-**disparition des activités de conception innovante historiques de Turbomeca pour gérer l'innovation radicale.**

À partir de la relecture de la genèse de la turbine à gaz aéronautique, nous développons dans le chapitre 4 la notion de *potentiel d'innovation de rupture*. Puis, nous caractérisons trois modes de conception de l'histoire de l'entreprise à travers notre cadre d'analyse D-I-M. **Nous concluons ce chapitre en montrant que les capacités d'innovation radicale rendues nécessaires par les nouveaux enjeux d'innovation de l'entreprise ne peuvent être une simple réactivation « aveugle » des activités historiques de conception innovante.**

Dans la troisième partie, nous nous intéressons justement aux processus de transition des entreprises pour intégrer des capacités d'innovation radicale adaptées au contexte de l'entreprise. Nous étudions notamment une méthode collaborative de conception innovante, la méthode KCP, mise en œuvre par Turbomeca pour accompagner un processus d'exploration.

Dans le chapitre 5, nous exposons le nouveau contexte dans lequel se trouvait Turbomeca en 2008, avant d'explicitier l'intérêt de la mise en œuvre d'une méthode collaborative pour la conception innovante en situation de rupture. Puis nous présentons les impacts sociocognitifs de la méthode sur l'entreprise et analysons trois projets de conception innovante résultant de cette démarche.

A partir de l'analyse des interactions entre processus cognitifs et organisationnels en conception innovante, le chapitre 6 décrit les apports de notre recherche à la littérature en sciences de gestion. Nous mettons en avant la notion de *transition organisationnelle par la conception* pour caractériser les processus d'intégration de capacité d'innovation radicale à partir de la méthode KCP.

Dans la quatrième et dernière partie, nous proposons les activités et principes organisationnels à intégrer pour générer et piloter l'innovation radicale. À partir de l'analyse de projets de conception innovante, **nous caractérisons, dans cette partie, un modèle comportant six grands types d'activités de conception innovante pour intégrer des capacités d'innovation radicale. Ce modèle est le modèle DIMa pour *Design Incubation Mutation activities*** sur lequel repose la construction d'une proposition d'organisation de conception innovante pour Turbomeca.

En conclusion générale, nous revenons sur les résultats obtenus et leur appropriation par notre terrain d'étude. Puis nous mettons en avant les contributions de nos recherches à la littérature pour les *organisations orientées conception*. Enfin, nous clôturons le document en proposant des perspectives pour notre travail de recherche.

PARTIE I

INTEGRER DES CAPACITES D'INNOVATION RADICALE : UNE APPROCHE PAR LA CONCEPTION

CHAPITRE 1 – ANALYSE DES LIMITES DE LA LITTERATURE SUR LES CAPACITES D'INNOVATION RADICALE	41
1. Intégrer des capacités par la résolution de problèmes – Le niveau individuel	43
2. Intégrer de capacités collaboratives pour l'innovation radicale – Le niveau de l'équipe....	49
3. Capacités organisationnelles pour l'innovation radicale	59
4. Mise en évidence des lacunes théoriques et proposition d'un cadre unificateur par la conception.....	70
Résumé du CHAPITRE 1	74
 CHAPITRE 2 - APPROCHES DE LA CONCEPTION POUR INTEGRER DES CAPACITÉS D'INNOVATION RADICALE	 77
1. Les approches par la conception de l'innovation radicale.....	79
2. Proposition d'un cadre d'analyse pour la conception innovante : le modèle Design – Incubation – Mutation de l'écosystème	89
Résumé du CHAPITRE 2	91
 Conclusion de la PARTIE I	 92

Dans l'introduction générale, nous avons montré que les phénomènes d'innovation intensive rendent nécessaire l'intégration de capacités d'innovation radicale. La littérature s'accorde sur le fait que l'innovation radicale suscite des bouleversements à tous les niveaux organisationnels de l'entreprise. Si l'on s'intéresse à présent à la structure de la littérature consacrée aux phénomènes de ce type, il apparaît qu'elle est organisée par niveaux d'analyse dans l'organisation. Par exemple, le champ de la créativité se positionne majoritairement au niveau de l'individu ou du groupe, celui du management de l'innovation au niveau de la firme et du projet, et celui de la stratégie au niveau de l'industrie ou de l'écosystème. Or, il nous semble que cette structuration du champ, qui résulte davantage du type de raisonnements et de méthodes propres au travail académique, peut en revanche limiter la compréhension de ces processus complexes. Une approche possible pour dépasser ces limites pourrait être d'essayer de construire un cadre permettant d'articuler et intégrer ces différents niveaux. Pour nos recherches, nous mobiliserons le cadre théorique de la conception pour étudier et analyser les capacités d'innovation radicale dans les entreprises établies.

Dans cette partie, nous présentons dans un premier temps (chapitre 1) une revue de littérature multi-niveaux recensant les approches usuellement mobilisées par les entreprises pour générer des capacités d'innovation radicale. Puis nous mettons en évidence les limites de ces approches pour l'étude des phénomènes d'innovation radicale. Dans le chapitre 2, nous soulignons l'intérêt des approches par la conception pour analyser les phénomènes de génération d'innovation radicale et doter l'entreprise de capacités permettant de les gérer. Enfin, nous construisons un cadre d'analyse pour l'étude de ces phénomènes. Cadre qui sera successivement mobilisé dans l'ensemble de cette thèse pour interpréter et opérationnaliser la construction de capacités d'innovation radicale.

CHAPITRE 1

ANALYSE DES LIMITES DE LA LITTÉRATURE SUR LES CAPACITES D'INNOVATION RADICALE

1. Intégrer des capacités par la résolution de problèmes – Le niveau individuel	43
2. Intégrer de capacités collaboratives pour l'innovation radicale – Le niveau de l'équipe....	49
2.1. Caractéristiques d'un « groupe de créativité »	49
2.2. Facteurs sociaux influençant la créativité de groupe	51
2.2.1. Espace psychologique sécurisant	51
2.2.2. Leadership	52
2.3. Processus cognitifs collaboratifs pour la génération de capacités d'innovation radicale	53
2.3.1. Shared Mental Models	53
2.3.2. Réflexivité	54
2.4. Une méthode pour des capacités d'innovation de groupe : le <i>brainstorming</i>	55
2.5. Des capacités de gestion de projet pour l'innovation radicale	56
3. Capacités organisationnelles pour l'innovation radicale	59
3.1. Cognition organisationnelle pour l'innovation radicale	59
3.2. Structure organisationnelle pour l'innovation radicale	62
3.3. Skunk Works, un exemple de structure organisationnelle pour les avions en rupture de Lockheed	64
4. Mise en évidence des lacunes théoriques et proposition d'un cadre unificateur par la conception.....	70
4.1. Synthèse et limites des approches conventionnelles pour intégrer des capacités d'innovation radicale	70
4.2. Choix du modèle Recherche - Innovation - Développement (R-I-D)	73
Résumé du CHAPITRE 1	74

Dans ce chapitre, nous proposons une revue de littérature mettant en avant les apports et les limites des approches classiques de l'innovation radicale. Ce chapitre se compose de quatre sections.

Les trois premières comportent un état de l'art des approches de l'innovation radicale à différents niveaux organisationnels : les approches cognitives et la résolution de problèmes au niveau individuel, les approches de la créativité de groupe et de la gestion de projet au niveau de l'équipe, ainsi que les approches de la cognition et de la structure organisationnelle au niveau de l'entreprise.

Dans la dernière section, nous mettons en évidence en quoi cette segmentation de la littérature limite la compréhension des enjeux liés aux capacités d'innovation radicale, et nous justifions notre recours aux approches par la conception pour les étudier.

1. Intégrer des capacités par la résolution de problèmes – Le niveau individuel

Dans la littérature, la créativité est souvent considérée comme une condition nécessaire mais non suffisante des processus d'innovation (Acar & Runco, 2012; Im & Workman, 2004; Mumford, Hester, & Robledo, 2012). En d'autres termes, une innovation ne pourrait certes apparaître sans processus créatif, c'est-à-dire sans un processus de génération de propositions nouvelles, mais la seule existence d'« proposition créative » ne saurait, en retour, garantir la production d'une innovation. Pour favoriser l'émergence de projets, d'objets, de produits et de services radicalement innovants, une entreprise établie peut s'appuyer sur les travaux proposant des outils et des techniques stimulant la génération d'idées au niveau individuel (Legardeur, 2009; Legardeur, Boujut, & Tiger, 2010). De très nombreuses approches se sont développées, notamment au milieu du 20^{ème} siècle, qui visaient à construire des processus pour émettre des solutions ou des idées créatives, considérant que ces processus n'étaient pas spontanés chez l'individu. Nous n'exposerons cependant ici qu'un bref aperçu de la littérature consacrée à la créativité, à travers les approches par la résolution de problèmes.

Selon Ward, la créativité et la résolution de problèmes ont beaucoup d'éléments en commun (Ward, 2012). Pour cet auteur, de nombreuses situations nécessitant une aptitude créative peuvent être abordées comme étant des « problèmes », et les processus de la pensée qui permettent de créer des résultats nouveaux et utiles dans ces situations peuvent ainsi être caractérisés comme de la résolution de problème (ibid). Ainsi, bien que tous les *problem solving* ne soient pas forcément créatifs, et que toutes les situations créatives ne soient pas forcément réductibles à du *problem solving*, les nombreux attributs communs entre ces deux notions rendent l'étude de la résolution de problèmes particulièrement riche pour comprendre la créativité. En psychologie, deux branches existent pour l'étude de la résolution de problème (ibid). La première est issue de la théorie du « traitement de l'information (en anglais *Information Processing theory*), et la seconde provient de la psychologie de la « Gestalt » (ou « psychologie de la forme »). Dans le cadre de l'*information processing theory*, la définition est formalisée à partir d'un état initial et d'un objectif ou état final. En ces termes, le « problème » est alors un écart entre un état initial et un état final.

Chez Newell and Simon (1972), plusieurs notions permettent de caractériser un « problème » :

- « l'espace du problème », qui est la représentation qu'a le *problem solver* du problème ;
- « l'environnement de la tâche » qui est le point de vue externe (« omniscient ») sur le problème ;

- l'espace du problème lui-même, qui contient des états de connaissances appelés « états du problème » ;
- les moyens de passer d'un état à un autre qui sont appelés « les opérateurs ».

Un « espace de problème » contient donc un état initial, un état à atteindre ainsi que tous les états intermédiaires. Les états intermédiaires sont représentés par des nœuds, et les liens entre ces nœuds sont les procédures ayant permis la transformation d'un nœud à un autre. Dans ce champ, l'accent est mis sur les processus qui permettent de passer d'un état initial (dans l'espace du problème) à un état désiré (*goal state*). Le processus de résolution de problème est créé à partir de certaines caractéristiques cognitives de l'homme comme un système de traitement de l'information (Ward, 2012) qui permet de se déplacer dans l'espace du problème. Pour cette théorie, deux types d'opérateurs permettent de passer d'un état à un autre : les algorithmes et les heuristiques (Newell & Simon, 1972; Ward, 2012). La différence majeure entre ces deux notions étant que la première permettra au concepteur d'arriver à la bonne solution s'il suit correctement l'algorithme, alors que la seconde le guidera vers un nombre de solutions restreint à partir de règles empiriques.

En ce qui concerne l'approche *gestaltiste*, Duncker et Lees (1945) définissent un problème ainsi : « une personne a un problème quand elle a un but à atteindre mais ne sait pas comment faire, une situation qui nécessitent un processus de la pensée ». Nous précisons maintenant ces deux courants. Dans ce champ de la psychologie, les chercheurs ont orienté leurs études non pas sur le processus de recherche de la bonne solution, mais sur la recherche d'un nouveau cadre de représentation du problème. Dans ce courant, l'accent est mis sur la manière dont le problème est représenté dans l'esprit de la personne ayant à résoudre le problème. Ainsi, **une des principales difficultés pour la résolution d'un problème relèverait davantage de la perception de l'espace du problème que du processus qui mène à la résolution de ce problème dans sa représentation conventionnelle**. Pour Duncker et Lees (1945), structurer un problème de manière différente peut aider à sortir des voies de solutions classiques se révélant non satisfaisantes. Kaplan et Simon (1990) eux-mêmes expliquent que la difficulté de trouver une solution dans la représentation initiale du problème peut inciter à redéfinir le cadre du problème. Ils proposent même une structuration heuristique pour la recherche d'un nouvel espace du problème, ainsi que différents types d'éléments internes et externes au problème pouvant aider à redéfinir sa représentation.

Ainsi, dans la vision *gestaltiste*, les chercheurs en psychologie ont mis en évidence l'importance de la représentation d'un problème pour sa résolution, alors que ceux de l'*information processing theory* ont centré leur approche sur les processus de recherche de la bonne solution dans l'espace du problème en modélisant le raisonnement humain.

Nombreuses sont les méthodes de résolution de problème ayant été développées sur la base ou en parallèle de ces travaux. L'une d'entre elles, la méthode TRIZ, qui repose sur des travaux très complets, combine les deux approches, et propose des outils pour la redéfinition du problème et la résolution des problèmes techniques. Nous présentons brièvement cette méthode dans Encadré 1 ci-dessous.

Une méthode pour la résolution de problème : TRIZ

L'une des méthodes de résolution de problème ayant émergé en parallèle des travaux en psychologie sur la créativité est la méthode TRIZ. Cette méthode a été inventée par l'ingénieur et auteur de science fiction soviétique Genrich Altshuller. Pour formaliser sa méthode, Altshuller se serait fortement inspiré de son travail au bureau des brevets soviétique, qui lui aurait permis de mettre en évidence que toute invention peut se baser sur la résolution de ce qu'il appelle une « contradiction », i.e. : un paramètre ayant un impact négatif sur un autre. Partant du principe que les problèmes techniques peuvent s'exprimer comme des contradictions présentant des analogies, il a proposé une approche algorithmique pour résoudre ces contradictions techniques. A partir d'une base de données de 40 000 brevets, il a formalisé une méthode de résolution de problème, TRIZ, en **40 principes d'invention pour résoudre les contradictions techniques** (Altshuller & Shapiro, 1956). Altshuller a également mis au point une méthode plus complète, ARIZ – Algorithme de Résolution de Problèmes Innovants – regroupant l'ensemble des outils de résolution de problèmes qu'il a développés (Altshuller, 1986). Cette méthode comprend aussi bien la méthode TRIZ comme algorithme de résolution des contradictions que des mécanismes permettant de se détacher de phénomènes de « fixation cognitive » (Finke, Ward, & Smith, 1992) comme la Modélisation Homme Miniature¹. ARIZ rassemble donc des attributs des deux traditions de la psychologie pour la résolution de problème présentées dans le paragraphe précédent. Pour maximiser les chances de trouver une solution, les travaux d'Altshuller font aussi bien appel à des outils favorisant la restructuration et la reformulation de l'espace du problème qu'à des algorithmes s'appuyant sur des bases de données pour résoudre une contradiction. Cette méthode est aujourd'hui largement diffusée dans l'industrie, mais elle est particulièrement lourde à mettre en œuvre en matière d'expertise, et ne semble adaptée qu'à la résolution de problèmes dans des domaines très techniques.

Encadré 1– Présentation de la méthode de résolution de problème TRIZ

En résumé, les travaux présentés ici s'intéressent aux sources *individuelles* de l'innovation, et étudient prioritairement la créativité comme un processus du raisonnement permettant de résoudre un problème. Deux champs majeurs semblent se compléter, le premier traitant des processus de réduction de l'écart entre un point départ et un objectif souhaité par le concepteur, le deuxième mettant plutôt l'accent sur l'interprétation du monde du problème et sa reformulation. L'intégration de capacités d'innovation radicale à ce niveau peut donc passer par un apprentissage de la créativité, en jouant sur ces deux champs : le monde du problème et le processus de résolution du problème. D'ailleurs, en parallèle des travaux en psychologie, des méthodes pratiques ont été développées visant à favoriser la résolution de problèmes techniques complexes, c'est le cas de la théorie TRIZ présentée plus haut. Le Tableau 1 ci-dessous fait la synthèse de ce niveau individuel pour l'innovation radicale :

Niveau individuel	
Approches pour l'innovation radicale	Créativité et génération d'idée une condition nécessaire (d'entrée) au processus d'innovation radicale (Acar & Runco, 2012; Im & Workman, 2004; Mumford et al., 2012)
Ancrage théorique	Créativité en sciences cognitive et psychologie
Phénomènes étudiés	Processus du raisonnement (Wallas, 1926), Effet de fixation (Finke et al., 1992)
Réponses théoriques	Intégration de capacités de résolution de problème. Théorie Gestaltiste (Duncker & Lees, 1945) pour la perception et la reformulation du problème, <i>information processing theory</i> pour l'étude du processus de résolution du problème (Newell & Simon, 1972)
Méthodes et outils	Méthode de créativité : exemple TRIZ et ses méthodes dérivées (Altshuller, 1984)

Tableau 1 – Synthèse des travaux au niveau individuel

2. Intégrer de capacités collaboratives pour l'innovation radicale – Le niveau de l'équipe

Les travaux précédemment présentés étudient les mécanismes et les phénomènes cognitifs restreignant ou favorisant la génération d'idées créatives. Ces recherches ont cependant généralement négligé l'équipe ou le groupe comme niveau d'analyse actionnable. C'est pourquoi nous présentons dans cette section des travaux mettant en avant l'intérêt, pour intégrer des capacités d'innovation, d'étudier conjointement les processus sociaux et cognitifs au niveau du groupe.

Il est à noter que bien que l'on parle souvent de la créativité comme d'un « processus », en pratique, il consiste en fait en une succession de phases (Paulus, Dzindolet, & Kohn, 2012), dont la représentation canonique est la suivante : sélection du problème, idéation, évaluation, implémentation (Parnes, 1975). La majorité des recherches sur la créativité de groupe s'est focalisée sur la phase « divergente », c'est-à-dire la phase d'idéation et de génération de propositions créatives, qui semble être la plus critique de ce processus en termes sociocognitifs. Nombreux sont les travaux et champs de littérature ayant traité de ces sujets. Nous les étudions ici sous l'angle des différents leviers d'action permettant d'intégrer des capacités collaboratives pour générer des propositions en rupture.

2.1. Caractéristiques d'un « groupe de créativité »

Les deux paramètres majeurs et évidents du dimensionnement d'un groupe sont le nombre et la diversité des membres. Etant donné que ces deux variables sont en partie corrélées, on pourrait penser que plus le groupe est large, plus il a de chances d'être diversifié en compétences, connaissances et capacités créatives. Certaines études vont d'ailleurs dans ce sens, et démontrent que plus une équipe est importante, plus le groupe a de chances d'être innovant (Hülsheger, Anderson, & Salgado, 2009). Ceci semble cohérent à première vue puisque, plus l'équipe est importante, plus elle a de chances d'aborder des perspectives variées concernant le problème (Paulus et al., 2012). Cependant, il existe des revers à l'augmentation de la taille du groupe. En effet, une taille de groupe trop importante peut diminuer le sentiment d'implication des participants au niveau individuel, et ainsi diminuer leur performance (Hülsheger et al., 2009). Certaines études des techniques de *brainstorming* montrent même que plus la taille est importante, moins la performance sera bonne en comparaison de l'évaluation d'un groupe similaire mais dont les membres auront généré des

idées de manière individuelle (Mullen, Johnson, & Salas, 1991). Ainsi, ce dilemme implique que, pour un traitement complexe nécessitant la mobilisation de multiples champs d'expertise, l'on doit impliquer un groupe dont les compétences correspondent au spectre de connaissances nécessaires, sans pour autant accroître le nombre de participants plus qu'il n'est indispensable. Les auteurs insistent sur le fait que pour les sessions où les participants doivent interagir, il est important de limiter au maximum le nombre de participants, afin d'augmenter l'efficacité et le partage de connaissances. **La taille optimale d'un groupe pour favoriser les interactions possibles serait ainsi de deux membres. En effet, Mullen *et al.* (1991) ont montré qu'un binôme de « *brainstormers* » ne présentait pas de déficit de production.** D'autres analyses (Farrell, 2003) soutiennent ces études en montrant qu'en session de groupe, la meilleure efficacité est obtenue en binôme. **Ainsi, dans un objectif de maximisation de l'efficacité de groupe, des binômes peuvent être détachés pour des sessions de travail puis être réintégrés au groupe projet plus important, et ainsi travailler en oscillant entre des sessions en binôme et d'autres avec le groupe entier.**

La seconde variable importante dans les caractéristiques d'un groupe est sa diversité. Le fait que la diversité semble favoriser l'innovation a souvent soutenu l'utilisation d'équipes multidisciplinaires dans le domaine de la science et de l'industrie. Les équipes multidisciplinaires sont des équipes dont les membres ont des expertises complémentaires et nécessaires pour la réalisation d'un projet. Les auteurs mettent cependant en garde sur l'importance d'un certain nombre de variables de contingence influant sur l'efficacité des sessions en groupes multidisciplinaires comme : l'existence d'une vision partagée, des fréquences élevées d'interaction, de hauts niveaux de réflexivité et des « espaces psychologiques sécurisants », que nous détaillerons dans la section suivante (Fay, Borrill, Amir, Haward, & West, 2006). Par ailleurs, certains chercheurs insistent sur le fait que les projets d'innovation radicale peuvent nécessiter des groupes interdisciplinaires dans lesquels il y a intégration de compétences et de connaissances (Paulus *et al.*, 2012). Ces équipes doivent comporter des capacités permettant de comprendre les connaissances des uns et des autres, afin de construire, à partir de ces connaissances partagées, de nouvelles perspectives ou techniques. Cependant, ces auteurs montrent que peu d'études ont été menées sur la différence entre des équipes multi- et interdisciplinaires. **Au delà des compétences rassemblées, le plus structurant pour l'innovation est la qualité et l'intensité des relations entre les différents membres du groupe.** Par exemple, une proximité physique est positivement corrélée à l'efficacité d'une équipe multidisciplinaire pour la créativité, du fait de l'augmentation de la fréquence d'échange d'informations (Cummings & Kiesler, 2005). **Néanmoins, certains auteurs alertent sur le fait qu'une fréquence trop importante des**

communications peut entraîner une baisse de la créativité dans un groupe, car celles-ci détournent les activités créatives au niveau individuel, ou tout simplement conduisent à un manque d'efficacité du groupe (Kratzer, Leenders, & Engelen, 2004). Aussi, bien que la diversité soit un déterminant important de la capacité d'un groupe à innover, certains éléments de diversité culturelle ou démographique peuvent en revanche l'inhiber. En effet, certaines propositions créatives peuvent être parfaitement adaptées dans un contexte social et ne plus l'être dans un autre (Paulus et al., 2012). Ces effets ont tendance à homogénéiser les *outputs* des processus créatifs.

2.2. Facteurs sociaux influençant la créativité de groupe

La composition et la taille du groupe sont les deux variables permettant de dimensionner un groupe pour un processus d'innovation. Voyons maintenant quels sont les paramètres organisationnels qui doivent accompagner l'intégration de capacités d'innovation radicale pour favoriser les processus créatifs au niveau du groupe. *Paulus et al.* (ibid) proposent deux déterminants majeurs pour des capacités collaboratives d'innovation : l'existence d'un « espace psychologique sécurisant » d'une part, et le *leadership* d'autre part.

2.2.1. Espace psychologique sécurisant

En session de créativité de groupe, toutes les idées ne peuvent faire consensus parmi les participants, ce qui n'est d'ailleurs pas le but recherché. Bien souvent, ces propositions dérangent ou perturbent certains modèles cognitifs en place, et mettent les membres des projets dans des situations d'inconfort. Ces sentiments inhibent la créativité de groupe, car les membres du groupe se retiennent de proposer des idées dont ils pensent qu'elles recevront une évaluation défavorable de la part des autres personnes (Osborn, 1957). L'un des moyens de limiter ce phénomène est alors de construire un espace psychologique sécurisant. C'est-à-dire de veiller à ce que les membres d'un groupe aient le sentiment que l'organisation ou l'équipe est réceptive, et supporte la génération d'idées nouvelles fussent-elles non consensuelles. Le management de ces équipes doit donc faire émerger cet espace, en montrant qu'il encourage et supporte les propositions en rupture (Burningham & West, 1995; Paulus et al., 2012). Cependant, dans l'autre sens, Hülshager et al. (2009) ont montré que la sécurité participative « *participative safety* » - une forme de processus combinant fort degré d'implication, environnement souple et soutien important – est faiblement corrélé avec l'innovation. Ceci est dû à un manque d'implication des membres d'une équipe dans une atmosphère trop clémentine, qui inciterait les membres du groupe à éviter tout conflit. Par conséquent, **compte tenu de ces deux tendances, nous pouvons avancer qu'en situation**

d'innovation radicale, pour favoriser la génération d'idées, l'entreprise doit construire un espace psychologique sécurisant permettant de proposer de l'originalité, tout en gardant à l'esprit que l'efficacité de ce groupe dépend tout de même d'une forme de responsabilisation de chacun quand à l'utilité et la faisabilité des idées dans un temps imparti.

2.2.2. Leadership

La littérature sur l'innovation s'accorde sur le fait que le profil type du *leader* favorisant le plus l'innovation dans un groupe est un individu qui inspire une vision partagée et des exigences importantes, qui encourage les membres de l'équipe à adopter de nouvelles approches, et qui apporte un soutien et une reconnaissance importante aux différents membres. Cette définition pourrait évoquer la figure du « leader charismatique » (Shamir, House, & Arthur, 1993; Weber & Eisenstadt, 1968) correspondant au profil du célèbre fondateur d'Apple, et que d'autres nomment aussi le *transformational leadership* (Avolio & Bass, 1993). Cependant, d'autres auteurs sont plus réservés quant au bénéfice de ce type de profil pour l'innovation, et indiquent que leur intérêt n'est certain que si l'organisation possède un vrai climat favorisant l'excellence (Eisenbeiss, van Knippenberg, & Boerner, 2008) et qu'il existe une grande diversité en compétence dans les équipes (Shin & Zhou, 2007). Aussi des chercheurs montrent-ils qu'étant donné que beaucoup d'équipes visant l'innovation radicale sont autonomes et possèdent une structure organisationnelle horizontale, le *leadership* est à considérer différemment pour ces équipes (Paulus et al., 2012; Zaccaro, Heinen, & Shuffler, 2009). Deux genres de *leadership* sont à considérer selon ces auteurs, le genre *leader-centric* et le genre *team-centric*, le deuxième impliquant une forme de *leadership* plus participative et distribuée que le premier (Zaccaro et al., 2009). **Finalement, selon la tâche à réaliser et le degré d'innovation attendu, le *leadership* d'un groupe de créativité doit apporter le juste équilibre entre un environnement sécurisant, une forme de structure et une intense motivation à atteindre les objectifs.**

En résumé, en termes de processus sociaux, le groupe de créativité doit avoir un périmètre organisationnel rassurant dépendant entre autres, de la construction d'un espace psychologique sécurisant, d'un modèle de *leadership* adapté au processus d'innovation radicale, c'est-à-dire qui favorise l'ouverture tout en contraignant les processus avec des objectifs clairs et rigoureux. En outre, le management doit favoriser des mécanismes de cohésion importants dans les environnements incertains que sont les projets d'innovation radicale.

2.3. Processus cognitifs collaboratifs pour la génération de capacités d'innovation radicale

Bien que la littérature soit abondante sur les processus sociaux permettant la créativité de groupe, peu d'auteurs ont traité spécifiquement des processus cognitifs en groupe. Deux travers sont classiques dans ces études de la créativité de groupe : le premier est de se cantonner aux notions de cognition telles qu'abordées par la psychologie, et donc de revenir à des mécanismes cognitifs individuels dûs à des effets de groupes (par exemple l'inhibition) ; le second est de limiter à l'étude de paramètres organisationnels ou de facteurs de l'environnement de travail favorisant la créativité. Néanmoins, dans la littérature sur la créativité et l'innovation, deux objets de la littérature semblent nous permettre d'étudier la cognition en groupe. Le premier est la notion de *Shared Mental Models* (SMMs), et le second la notion de « réflexivité de groupe ».

2.3.1. Shared Mental Models

L'une des voies d'étude des processus cognitifs retenues par la littérature en groupe est de mobiliser la notion de *Shared Mental Models*. Les SMMs sont une représentation des connaissances et des croyances partagées à travers les membres du groupe (Klimoski & Mohammed, 1994; Rouse, Cannon-Bowers, & Salas, 1992). Reiter-Palmon *et al.* (2012) mettent en évidence deux domaines de SMMs :

1. la connaissance sur la tâche : outils, objectifs et performances attendues ;
2. la connaissance sur les membres du groupe : compétences, aptitudes et interactions entre les membres.

Des études montrent qu'il existe une corrélation positive entre le degré de partage et de consensus sur les SMMs et plusieurs paramètres de mesure de l'efficacité d'un groupe (Marks, Sabella, Burke, & Zaccaro, 2002; Mathieu, Heffner, Goodwin, Salas, & Cannon-Bowers, 2000; Reiter-Palmon *et al.*, 2012). Des résultats similaires montrent des effets positifs de certains éléments des SMMs sur la créativité et l'innovation. Par exemple, certaines études ont montré qu'une vision partagée (Ensley & Pearce, 2001) ou encore un consensus autour des objectifs à atteindre pouvaient favoriser la génération d'idées en groupe et l'innovation durant des processus de développement de nouveaux produits (Gilson & Shalley, 2004). Néanmoins, d'autres recherches ont aussi mis en avant qu'un degré trop élevé de concordance de vues entre les acteurs pouvait diminuer la diversité et, ainsi, nuire à la créativité (Floyd, Kellermanns, Pearson, & Spencer, 2008). Ces auteurs expliquent que, dans un environnement social favorisant le partage d'informations, offrant un espace

psychologique sécurisant et dans lequel les membres soient capables de gérer correctement les conflits, alors la diversité est à favoriser, dans le cas contraire l'effort est à placer sur les SMMs. Aussi, (Reiter-Palmon et al., 2012) suggèrent que, pour l'innovation, les SMMs concernant les connaissances sur les membres du groupe, c'est-à-dire ceux qui facilitent les processus sociaux dans le groupe, sont plus importants que ceux concernant la tâche. En d'autres termes, **les auteurs prônent finalement l'intégration de SMMs sociaux favorisant la diversité cognitive et les processus divergents pour permettre l'innovation radicale.**

2.3.2. Réflexivité

La réflexivité est la deuxième notion souvent mise en avant dans la littérature consacrée à l'intégration de capacités cognitives d'innovation à travers le groupe. Une définition possible de la réflexivité est celle proposée par West (1996) :

« [reflexivity is] the extent to which group members overtly reflect upon the group's objectives, strategies, and processes and adapt them to current or anticipated endogenous or environmental circumstances. »

Reiter *et al.* (2012) définissent la réflexivité d'une équipe comme un processus d'introspection de l'équipe sur tous les aspects de sa performance, incluant la tâche, les processus utilisés pour atteindre l'objectif, les processus sociaux (comme la coordination, la communication), ainsi que les processus cognitifs. Cette notion fut d'abord identifiée comme un élément clé de l'efficacité des équipes travaillant sur des tâches complexes. Par la suite, il a été mis en évidence que la réflexivité avait un impact positif sur l'innovation et la créativité. Par exemple, une étude portant sur des groupes d'étudiants travaillant sur des tâches de développement de nouveaux produits a montré que des capacités d'introspection de groupe favorisent la génération d'idées et l'innovation (Muller, Herbig, & Petrovic, 2009). Ces résultats demeurant valables que cette capacité apparaisse naturellement ou artificiellement au sein d'un groupe. Cette étude met également en avant le fait que l'introspection a un impact encore plus favorable quand elle se situe au niveau du groupe plutôt qu'au niveau individuel.

En résumé, en termes cognitifs, pour favoriser la créativité et l'innovation de groupe, les membres peuvent à la fois partager des représentations cognitives favorisant la diversité, et intégrer des capacités de réflexivité permettant au groupe de s'adapter dans des processus d'innovation radicale rapidement changeants.

2.4. Une méthode pour des capacités d'innovation de groupe : le *brainstorming*

On doit la paternité des méthodes collaboratives de créativité à Osborn, le concepteur de la fameuse méthode dite de *brainstorming*. Ce publicitaire américain, fondateur de la BBDO en 1928, fut le premier à définir les caractéristiques d'un « bon » processus de génération d'idées créatives en groupe. Il avait remarqué que les membres d'un groupe ne proposaient pas leurs idées s'ils pensaient qu'elles seraient mal évaluées par le groupe. Ainsi proposa-t-il des règles visant à garantir une certaine efficacité durant les sessions en groupe, parmi lesquelles :

- se focaliser sur la quantité ;
- ne pas critiquer ;
- accepter les idées originales ;
- combiner et rebondir sur les idées nouvelles.

Plus tard, Osborn proposa un processus plus élargi, auquel appartenait justement le *brainstorming* : le Creative Problem Solving process. Le CPS est une méthode collaborative de créativité qu'Osborn proposa avec Parnes dans les années 1950 (Osborn, 1957; Parnes & Meadow, 1959). Elle se veut être une approche de résolution de problèmes plus opérationnelle – de terrain- que le *brainstorming*. Le CPS a pour objectif de faciliter les démarches de résolution de problèmes en groupe, en prenant en compte des paramètres organisationnels dans des contextes réels. Elle se décompose en trois macro-étapes, elles-mêmes décomposées en sous-étapes :

- ***explore the challenge*** (*Objective finding, fact finding, problem finding*) ;
- ***generate ideas*** (*idea finding*) ;
- ***prepare for actions*** (*solution finding, acceptance finding*).

A travers ces étapes, nous pouvons entrevoir l'intérêt d'Osborn à la fois pour les processus cognitifs, avec des phases de définition du problème et de génération des idées), mais aussi pour les processus sociaux, avec des phases d'*acceptance finding* pour la fédération autour des idées créatives. Par ailleurs, bien que cette technique ait été, de loin la méthode de créativité la plus répandue, popularisée et utilisée dans l'industrie, elle a reçu plusieurs critiques émanant du monde académique. En effet, certaines recherches montrèrent ses limites, en démontrant tout d'abord que la somme des idées générées par les participants était deux fois plus importante quand ceux-ci étaient en session individuelle plutôt qu'en groupe. Par ailleurs, d'autres études ont mis en évidence des phénomènes de stérilisation de la génération d'idées durant les sessions de groupe, parmi lesquels : les troubles de l'attention (Mulligan & Hartman, 1996), l'anxiété sociale (Camacho & Paulus, 1995) ou encore des effets négatifs de l'expertise perçue (Collaros & Anderson, 1969). Ainsi, bien que cette méthode fasse partie des techniques les plus utilisées pour générer des idées créatives, son

efficacité pour générer des idées créatives laisse la communauté scientifique perplexe. L'intérêt de cette méthode, au-delà de la génération d'idées nouvelles, réside donc plus probablement dans le partage des idées nouvelles avec les participants. **Le brainstorming serait ainsi vu davantage comme un outil de *socialisation* en vue de l'innovation radicale qu'un véritable moyen de générer de la rupture pour l'innovation radicale.** Il est aussi à noter que les méthodes CPS ont inspiré la grande majorité des méthodes de créativité de groupe employées dans l'industrie.

2.5. Des capacités de gestion de projet pour l'innovation radicale

La maîtrise des paramètres organisationnels pertinents pour la génération et le partage de propositions nouvelles sont des conditions nécessaires, mais non suffisantes, à la gestion de la totalité d'un processus d'innovation radicale. En effet, comme nous le précisons auparavant, l'idéation n'est qu'une des composantes d'un processus d'innovation de rupture. Pour les phases aval, les principes de management de projet peuvent être appliqués aux équipes d'innovation radicale. Nombreux sont les projets qui contiennent une part de créativité ou d'innovation. Par conséquent, la différence majeure d'un projet à un autre selon Paletz (2012) réside davantage dans le « degré » d'innovation visé que de la nature même du projet. Cooper (1997) affirme par exemple que les mêmes problématiques majeures se retrouvent dans des projets à fort et à faible degré d'innovation, citant en exemple le risque de ne pas atteindre les objectifs de performance, de délai, de coûts, de marchés, etc. Pour la tradition classique de recherche en gestion de projet, tout développement de nouveaux produits comporte des incertitudes sur plusieurs dimensions, et l'essence de la gestion de projet réside justement dans la gestion et la réduction de ces incertitudes (Souder & Moenaert, 1992). Ainsi, la seule différence pour un projet d'innovation radicale contenant donc de fortes incertitudes sera de nécessiter un mode de conduite de projet impliquant une gestion des risques et des opportunités plus adaptée. Pour la conduite d'innovation selon les processus de type *stage-gate*TM, l'idée sera donc de maîtriser ces risques à travers des processus décisionnels dans lesquels les « portes » (*gate*) serviront à évaluer et à réorienter les projets en fonction des connaissances acquises pendant les étapes (*stages*) qui permettent de diminuer les incertitudes à mesure de l'avancement du projet.

Néanmoins, un autre courant défend que, pour gérer des projets d'innovation radicale, l'entreprise doit intégrer des capacités de management différentes de celles préconisées par les théories classiques en management de projet, et qui tiennent compte des incertitudes, de la nouveauté et de la complexité, et ce dès le début du projet (Paletz, 2012). Dans ce champ, il est par exemple mis en évidence que les activités de planification, cruciales pour le

management de projet, ne sont pas directement applicables tant qu'un projet n'est pas complètement conceptualisé :

« Prematurely creating a plan (e.g., creating a quickly obsolete SOW) can lead to problems in executing, inaccurate monitoring, and irrelevant controlling. Imagine creating a work breakdown structure when the end product itself is still under debate: subtasks in the course of production are completely unknown (ibid). » Ainsi, les projets à fort degré d'incertitude, ne peuvent, par nature, être pilotés au moyen des outils classiques de la gestion de projet. En effet, l'évaluation d'un projet d'innovation radicale dépasse largement le simple contrôle des écarts en qualité, coûts, et délais par rapport à un objectif initial. Sur tous ces points, la littérature est abondante et s'accorde à dire que ces projets doivent faire intervenir des moyens de pilotages différents, tenant compte de l'incertitude : des stratégies d'exploration, la non-sanction de l'échec ou encore la planification pour l'apprentissage sont autant de sujets qui sont discutés par la littérature relative à la gestion des incertitudes (Loch, Terwiesh, & Thomke, 2001; Loch, De Meyer, & Pich, 2006; Loch, Solt, & Bailey, 2008). D'autres auteurs proposent des stratégies d'innovation parallèles pour les projets d'innovation complexes. Lenfle (2009), par exemple, met en avant des stratégies d'innovation parallèles sur des projets historiques en situation de ressources illimitées, à l'instar de la conception de la bombe atomique. En ce qui concerne le processus de développement de nouveaux produits lui-même, des études ont montré l'intérêt d'augmenter les itérations, ainsi que leur fréquence, mais aussi d'accroître le pouvoir des responsables de projets (Eisenhardt & Tabrizi, 1995). D'après (Paletz, 2012), ces indications doivent permettre d'améliorer la flexibilité dans les projets, et d'apporter davantage de confiance et de chances de succès pour le projet.

Ainsi, dans ce courant, deux champs s'opposent. D'un côté la littérature « classique » en management de projet considère l'intégration de capacités de gestion de projets d'innovation radicale comme une adaptation des processus conventionnels au degré plus élevé d'incertitude ; de l'autre côté, dans l'autre domaine de la littérature, les projets d'innovation radicale sont envisagés comme des projets d'une autre *nature*, et des théories et des méthodes adaptées en conséquence sont proposées.

En résumé, notre revue de littérature au niveau du groupe met tout d'abord en avant les facteurs sociaux et cognitifs en jeu lors des phases amont de l'innovation radicale, pour la génération de proposition en rupture en équipe. Cette littérature donne les grands principes permettant d'améliorer l'efficacité d'une équipe pour l'innovation de rupture. Ces éléments comprennent aussi bien la nécessité d'une certaine diversité des compétences pour construire l'équipe que les modèles conceptuels partagés à supporter pour favoriser les processus divergents. Les méthodes de CPS inventées par Osborn permettent d'opérationnaliser ces grands principes en proposant les bonnes règles permettant d'augmenter l'efficacité du groupe en matière de créativité. Ensuite, nous avons montré que la littérature en management de projet met en avant la nécessité de favoriser l'utilisation de méthodes et d'outils managériaux nouveaux, adaptés aux spécificités des processus d'innovation de rupture : c'est le cas, par exemple, de la littérature sur la gestion des incertitudes. Le Tableau 2 ci-dessous fait la synthèse de ce niveau organisationnel de la littérature.

Niveau de l'équipe	
Approches pour l'innovation radicale	Gérer des paramètres sociocognitifs pour favoriser l'efficacité des processus divergents et exploratoires en groupe
Ancrage théorique	Psychologie de groupe, créativité et gestion de projet
Phénomènes étudiés	<i>Shared mental models</i> (Klimoski & Mohammed, 1994; Rouse et al., 1992), liens entre les acteurs, espaces psychologiques et incertitudes
Réponses théoriques	Création d'espace sociaux sécurisants (Hülshager et al., 2009), cohésion (Mullen & Copper, 1994), diversité des compétences et taille de groupes, gestion des incertitudes (Loch et al., 2006), leadership
Méthodes et outils	<i>Creative problem solving</i> (Osborn, 1957), stratégie d'exploration et d'apprentissage parallèles (Lenfle, 2009; Loch et al., 2001).

Tableau 2 : Synthèse des travaux au niveau de l'équipe

3. Capacités organisationnelles pour l'innovation radicale

Le troisième niveau d'étude que nous proposons à présent d'étudier pour intégrer des capacités d'innovation radicale est le niveau de l'entreprise. L'importance de l'organisation pour l'innovation a été largement démontrée par les études longitudinales conduites par Van de Ven *et al.*, et détaillées dans l'ouvrage *The innovation journey* (Van de Ven, Polley, Garud, & Venkataraman, 1999). Le courant de littérature consacré aux liens entre organisation et innovation est particulièrement vaste, et comprend une multitude de théories. Néanmoins, Lam (2006) propose une classification de cette littérature, dont nous retenons ici deux catégories : 1) les théories sur la cognition et l'apprentissage organisationnel, qui comprennent les processus de création de connaissances dans l'entreprise permettant la résolution de problèmes ou l'innovation ; 2) les théories sur la conception de l'organisation, qui étudient les liens entre les structures et la disposition d'une organisation à l'innovation.

3.1. Cognition organisationnelle pour l'innovation radicale

Cette littérature traite de la « firme innovante » comme d'une organisation qui serait « intelligente » et « créative ». Les chercheurs de ce champ (Argyris & Schön, 1978; Nonaka, 1994; Nonaka & Takeuchi, 1995) étudient les différents processus mentaux qui interviennent en réponse à des bouleversements de l'environnement de l'entreprise. L'analyse se situe au niveau des processus organisationnels permettant de mettre en œuvre ces problématiques. Ces études éclairent la compréhension de la capacité d'une organisation à créer et à exploiter des nouvelles connaissances dans une perspective d'innovation. Pour comprendre la cognition organisationnelle, il faut revenir à sa définition, tirée des recherches sur le niveau individuel. Ainsi, ce terme fait appel à l'idée selon laquelle les individus développent des modèles mentaux, des systèmes de croyances et des structures de connaissances, qu'ils utilisent pour percevoir, construire et conférer du sens à leur monde, ainsi que pour prendre des décisions (Weick, 1979). Simon avait introduit la notion de « rationalité limitée » pour souligner le fait que l'individu ne peut traiter l'ensemble des éléments de son environnement, et qu'il développe en conséquence des modèles cognitifs lui permettant d'analyser et de remodeler ces données (Simon, 1991). Dans certaines circonstances, ces modèles peuvent conduire à la génération d'idées créatives et de nouvelles propositions, mais dans la plupart des cas ils donnent lieu à des biais et de l'inertie (Lam, 2006). A partir de ce même constat, la psychologie se sera plutôt focalisée sur l'analyse des processus mentaux au niveau individuel, éléments que nous avons largement détaillés dans les paragraphes précédents, alors que les théoriciens des organisations auront plutôt étudié l'impact de ces phénomènes au niveau de l'entreprise dans son ensemble.

La « connaissance collective » est la connaissance accumulée par une organisation, stockée dans ses règles, ses procédures, ses routines et ses normes, et qui guident aussi bien les activités de résolution de problèmes que les interactions entre ses membres. D'autres auteurs comme Walsh et Ungson (1991) définissent la connaissance collective comme la « mémoire » de l'organisation. Comme pour le niveau du groupe, la cognition organisationnelle ne peut être pensée indépendamment des processus sociaux. Ce champ traite donc également des processus sociocognitifs et de la possibilité de partager des modèles interprétatifs tels que les *Shared Mental Models* décrits précédemment. Pour les théoriciens de la connaissance organisationnelle, l'apprentissage collectif et la cognition partagée sont les fondements de la création de la connaissance collective. Nonaka (1994) explique par exemple que la connaissance a besoin d'un contexte pour être créée. Il nomme ce contexte par le mot japonais, « *Ba* », signifiant l'endroit. C'est l'espace social et mental pour l'interprétation, l'interaction et l'émergence des relations sociales, servant de base à la création de la connaissance. Schématiquement, participer à un « *Ba* » signifie dépasser sa limite cognitive et sociale pour s'engager dans un processus dynamique de partage et de production de connaissances. D'autres notions similaires permettent de définir les lieux sociocognitifs de production de la connaissance dans l'organisation. C'est le cas de la notion de « *Community of practice* » proposée par (Lave & Wenger, 1991). Pour ces auteurs, les membres de l'organisation construisent leur identité et leurs représentations à travers des « *practices* », soit des expériences de travail partagées. Ainsi, **en ce qui concerne l'intégration de capacités d'innovation radicale, cette littérature suggère que l'entreprise doit favoriser la construction de ce type de groupes qui, placés à l'intersection des flux organisationnels horizontaux et verticaux, permettent de construire des ponts entre les niveaux individuels et organisationnels dans le processus de production de connaissances** (Lam, 2006).

D'autres auteurs décrivent l'apprentissage comme un processus cumulatif et *path-dependent*, permettant de construire des *core competencies*. Pour les chercheurs de ce champ, l'organisation serait tentée de persister dans ce qu'elle sait déjà faire car, d'après Lam (ibid), « *they are embedded in social relationships, shared cognition and existing ways of doing things* ». Ces tendances peuvent contraindre les entreprises dans leurs processus d'apprentissage, et ainsi générer de l'inertie dans l'apprentissage de connaissance ou de routines nouvelles. C'est ce que Levinthal et March (1993) appellent le phénomène de « *Learning Myopia* », qui peut conduire les entreprises à tomber dans le « piège de la compétence ». De la même manière, d'autres chercheurs mettent en avant, à travers leurs recherches, comment des « *core capabilities* » peuvent se transformer en « *core rigidities* »

(Leonard-Barton, 1992). **En situation d'innovation radicale, ces phénomènes d'« attache » ou de « blocage » aux compétences usuelles sont par définition problématiques.** En effet, pour le développement de nouveaux produits classiques, la simple amélioration des connaissances de l'entreprise peut suffire. Mais en situation de rupture, ce n'est plus le cas. Ainsi, pour rester compétitive, l'entreprise est donc face à dilemme : continuer à « exploiter » ces *core competencies*, et entreprendre des activités d'exploration de nouvelles connaissances, nécessaires au développement de produits en rupture. Cette tension a été caractérisée par March (1991), et étendue comme la capacité d'une organisation à gérer les tensions entre activités d'exploitation et d'exploration. La littérature utilise aujourd'hui la notion d'*ambidextrie organisationnelle* pour nommer cette capacité.

Cette tension pose bien évidemment la question de la frontière de l'entreprise, dont plusieurs chercheurs se sont saisis. En effet, pour certains auteurs, si les connaissances et compétences usuelles de l'entreprise ne suffisent plus pour faire face à des situations d'innovation radicale, alors elles se trouvent à l'extérieur. Von Hippel (1976, 1978, 1982, 1988), par exemple, suggère que, pour construire ses produits du futur, l'entreprise doit intégrer des usagers pilotes (les « *lead users* ») au plus tôt dans le processus de conception. D'autre part, les travaux sur l'*open innovation* proposent de rendre les frontières des processus de développement produit plus perméables afin d'acquérir idées et connaissances nouvelles puisées de l'environnement extérieur, mais aussi pour externaliser l'exploitation de certains produits qui ne serait possible par l'entreprise (Chesbrough, 2003).

Par ailleurs, en réponse aux situations d'innovation radicale, d'autres courants proposent une approche dynamique s'inscrivant dans un autre champ de la cognition organisationnelle : le champ de la Ressource Based View (RBV). La RBV définit les conditions dans lesquelles les entreprises peuvent obtenir un avantage compétitif à partir de leurs compétences et de leurs capacités. Dans ce champ, la combinaison des ressources et des capacités d'une entreprise lui fournit un avantage compétitif tant qu'elles sont valorisables. Et, pour cela, elles doivent être chères à imiter et non substituables (Barney, 2001). En réponse au caractère statique inhérent à cette approche, Teece et Pisano ont élaboré une approche dite par les « *dynamic capabilities* » (Teece, Pisano, & Shuen, 1997), qui eurent un impact important sur la communauté de recherche en stratégie (1994). Ces auteurs définissent les *dynamic capabilities* comme l'aptitude de l'entreprise à intégrer, construire et reconfigurer ses compétences internes et externes, afin de faire face à des environnements rapidement changeants. Dans cette lignée, considérant l'innovation radicale comme un phénomène complexe impliquant des incertitudes sur de nombreuses dimensions, O'Connor défend que

les approches en termes d'ambidextrie et de *dynamic capabilities* ne sont pas suffisantes pour gérer de tels phénomènes (O'Connor, 2008). L'auteur propose donc une approche systémique des capacités d'innovation radicale, reposant sur sept principes : la mise en place d'unités dédiées et spécialisées, l'intégration de processus exploratoires, l'implémentation de mécanismes d'interface avec l'organisation *mère*, des logiques d'évaluation des projets par option ainsi qu'un lien à la stratégie comprenant un soutien important de l'état-major.

Ainsi la littérature sur la cognition organisationnelle met-elle en garde sur les « pièges » cognitifs dans lesquels l'entreprise établie risque de tomber, l'empêchant de préparer ses produits et compétences du futur. La littérature s'est donc centrée sur les moyens de renouveler les compétences de l'entreprise à travers des espaces sociocognitifs dans l'entreprise, l'ouverture des frontières de l'entreprise, ou encore le renouvellement dynamique des routines.

3.2. Structure organisationnelle pour l'innovation radicale

Le deuxième champ que nous mobilisons au niveau de l'organisation est celui de l'étude des structures organisationnelles. La plupart des recherches dans le domaine de la conception organisationnelle (*organizational design*) ont traité des liens entre structure organisationnelle et performance de l'entreprise. Les premiers travaux dans ce domaine cherchaient à trouver une forme universelle idéale d'organisation. De ce point de vue, les travaux de Weber (1997 (red. 1947)) sur la bureaucratie, puis de Chandler (Chandler, 1989 (red. 1962)) sur les formes multidivisionnelles ont eu un impact important dans la littérature. Mais l'assomption du « *single set of rules for good organizations* » fut par la suite critiquée par les tenants des théories de la contingence. Ces théories mettent en avant que la structure la plus appropriée pour une organisation est celle qui est la plus adaptée à un contexte donné : technologie, écosystème, marché, etc. (Burns & Stalker, 1961; Lawrence & Lorsch, 1967; Woodward, 1965). Burns et Stalker (1961) montrent ainsi que les entreprises peuvent être classées dans deux catégories : à un environnement stable et prévisible sera adapté un système mécaniste plutôt rigide et hiérarchisé, dans lequel tâches et frontières sont parfaitement formalisées ; au contraire, un système organique avec des paramètres organisationnels plus souples sera plus adapté à un environnement rapidement changeant. Dans cette lignée, les travaux de Lawrence et Lorsch insistent sur le fait que, pour être adaptée à ce type d'environnement, l'entreprise doit pouvoir basculer d'une structure mécaniste à une structure organique en fonction contexte et du besoin de renouvellement des produits (Lorsch & Lawrence, 1965). Ils

explicitent le fait qu'au sein de la même organisation, des structures organiques et mécanistes peuvent coexister. Ces travaux sont par ailleurs liées aux notions d'ambidextrie permettant d'accompagner les cycles technologiques comprenant des périodes d'innovation de rupture ou de simple amélioration des produits et des processus (Tushman, Anderson, & O'Reilly, 1997).

Bien que postérieurs dans la littérature consacrée aux structures organisationnelles, les travaux de Mintzberg sont aujourd'hui parmi les plus influents. Ce dernier propose une synthèse des travaux du domaine, et identifie cinq configurations structurelles : structure simple, bureaucratie mécaniste, bureaucratie professionnelle, forme divisionnalisée, adhocratie (Mintzberg, 1979). D'après son « hypothèse configurationnelle » l'entreprise a de fortes chances d'être dominée par l'un de ces modèles possédant chacun des dispositions différentes pour l'innovation. Ainsi, une structure bureaucratique est très adaptée dans un environnement stable, mais se révèle peu performante pour des activités fortement innovantes. En revanche, l'adhocratie, qui est un système souple et reconfigurable, est très adaptée à des environnements instables, et donc à des situations d'innovation de rupture. L'adhocratie est une organisation organique et adaptative, qui permet de combiner des experts de différents domaines dans des projets *ad hoc*, pour travailler sur des tâches complexes ou à fort degré d'incertitude. La force de l'adhocratie vient de sa capacité à reconfigurer la base de connaissances très rapidement, pour justement supporter de hauts niveaux d'incertitude technologique, ou produire de la connaissance nouvelle pour l'innovation radicale. Dans cette structure, les carrières sont d'ailleurs plus souvent structurées autour d'une série de projets plutôt qu'à travers une progression hiérarchique interne. Ces structures ont aussi des frontières très perméables, permettant l'acquisition et la diffusion rapide de connaissances. Toutefois, la souplesse de la structure, la rapidité des transformations et du renouvellement des ressources dans ces organisations, peuvent créer des problèmes d'accumulation de compétences, car la connaissance technique et du marché n'est détenue que par les experts, et est donc transférable. **Une survie à long terme de ces organisations nécessite donc le support d'une infrastructure stable, enracinée dans une communauté ou dans des réseaux localisés d'entreprises.** La *Silicon Valley* et son tissu d'entreprises innovantes s'appuyant sur un marché du travail local, et des institutions ou autres universités, en est une bonne illustration. De nombreux modèles organisationnels ayant été mis en œuvre dans l'industrie peuvent être considérés comme des adhocraties. Les *cellular forms* (Miles, Snow, Mathews, Miles, & Coleman, 1997), *modula forms* (Galunic & Eisenhardt, 2001), les *project based networks* (DeFillipi, 2002), ou encore les *spaghetti organizations* (Foss, 2003) sont autant de propositions de structures organisationnelles souples et agiles adaptées à des contextes d'innovation intensive. Néanmoins, malgré le grand nombre de structures de ce type qui furent développées, les essais des grandes entreprises pour adopter une structure

d'adhocratie de façon pérenne se sont souvent avérés peu durables. Ainsi, pour des contextes de forte incertitude (liés par exemple à des processus d'innovation radicale), la mise en œuvre de structures organisationnelles de type organique sont favorisées. Cependant, ces structures n'étant pas adaptées pour des activités d'exploitation, l'entreprise doit pouvoir faire intervenir ces deux types d'organisation pour être capable à la fois de travailler dans des contextes stables sur ses produits présents, tout préparant les produits du futur dans des contextes plus incertains.

3.3. Skunk Works, un exemple de structure organisationnelle pour les avions en rupture de Lockheed

Une entreprise a cependant connu un grand succès dans la mise en place d'une organisation de type adhocratique pour sa cellule de développement de nouveaux projets. Il s'agit de Lockheed³, constructeur américain de l'aéronautique et de l'espace. En effet, dans l'aéronautique, la première structure adhocratique à avoir vu le jour est le *Skunk Works*. Le premier projet associé à la création du *Skunk Works* à Lockheed est, selon les sources, le X-38 en 1938 (Bodie, 2001), ou le XP-80 en 1943 (Johnson, 1989; Rich & Janos, 1996).



Figure 3 - Le logo du Skunk Works que l'on pourrait traduire par « Atelier des putois »

Bien qu'en désaccord sur cette date, les différents récits relatant l'histoire de cette entité font l'unanimité quant à la contribution de Clarence « Kelly » Johnson⁴ dans sa création. Cet ingénieur américain fut responsable de cette entité pendant près de quarante ans. Les deux

³ **Lockheed Corporation** était un constructeur de l'aéronautique et de l'espace fondée en 1912 en Californie. La corporation devint Lockheed Martin en 1995 après avoir fusionnée avec Martin Marietta.

⁴ **Clarence Leonard « Kelly » Johnson** (1910 – 1990) était un ingénieur en aéronautique américain à qui fut à le responsable des renommés *Skunk Works* de Lockheed pendant près de 40 ans. En tant que chef de projet et responsable des Skunk Works, il est reconnu par la communauté aéronautique pour avoir été l'un des contributeurs majeurs au avions U2, SR 71 Blackbird, le P 80 Shooting Star et le F-104 Starfighter.

plus grands succès de cette entité furent probablement l'avion d'espionnage U-2, connu du grand public à travers l'affaire de Gary Powers⁵, et son remplaçant, l'avion supersonique le Blackbird SR-71, au design futuriste n'ayant rien à envier aux films de science-fiction du 21^{ème} siècle –voir Figure 4.



Figure 4 – Blackbird SR-71 de Lockheed

Au moment de sa création, la structure du *Skunk Works* intégra un grand nombre de caractéristiques qui seraient préconisées par les théories organisationnelles et gestionnaires pour l'innovation radicale quelques années plus tard. En premier lieu, elle possédait une structure hiérarchique « plate », à propos de laquelle « Kelly » Johnson plaisantait en ces termes « *we are short of title at the Skunk Works* ». En d'autres termes, et à l'exception du responsable du Skunk Works (lui-même, donc), il n'y avait pas à l'époque de « managers » dans les Skunk Works. Aussi cette cellule sélectionnait-elle ses meilleures ressources, mais en nombre très limité. Par exemple, pour la conception et la mise en fabrication de l'avion d'espionnage U2, le Skunk Works était composé de 50 ingénieurs, et de 135 seulement pour le SR 71, soit à peu près le dixième des bureaux d'études de Lockheed de l'époque. Pour souligner ce besoin de ressources juste nécessaires, Johnson expliquait que dans le cadre des projets Skunk Works il avait vu un seul cas d'échec, concernant un projet de nouvel hélicoptère pour l'armée. Johnson expliquait que, dans le cadre de ce projet précis, en un mois, l'armée (qui gérât elle-même son projet de Skunk Works) avait mis en place un département des achats qui était de la même taille que tout le département ingénierie du Skunk Works de Lockheed travaillant sur sept projets à la fois. Par ailleurs, Johnson avait

⁵ **Gary Powers** (1929 -1977) était un pilote américain dont l'avion d'espionnage U2 fut abattu lors d'une mission de reconnaissance pour la CIA dans l'espace aérien de l'Union Soviétique en 1960. Il fut capturé par les soviétiques, ce qui donna lieu à incident diplomatique.

pour habitude « *to put people in close contact with the airplane while it is being built. They fill responsible for the part they make (Johnson, 1989)* ». Ce principe était l'une des clés du succès de cette organisation, car cela permettait de prendre des décisions immédiates et de les mettre rapidement en application.



Figure 5 – Chaîne de montage du SR 71 Blackbird dans un Skunk Works

En ce qui concerne la gestion des projets, le top management de Lockheed donnait au manager de la cellule toute la latitude nécessaire quant aux décisions technico-économiques des projets. La particularité de ces Skunk Works était aussi d'aller jusqu'à la fabrication des avions sur certains projets. Ainsi, dans le cadre des avions d'espionnage par exemple, le Skunk Works produisait les avions qui allaient rentrer en service. Cette caractéristique se rapproche d'ailleurs du modèle des *spin-off* contemporaines. L'ensemble de ces caractéristiques organisationnelles permettait à cette cellule de répondre à des projets dans des temps records, et avec des ressources très restreintes. Le Skunk Works était d'ailleurs connu pour rendre des projets dans des temps inférieurs à la planification prévue dans les contrats (Bodie, 2001). L'avion de chasse XP 80 avait été conçu en seulement 143 jours (au lieu des 180 initialement prévus) grâce à ce format. Aussi, à sa retraite, compte tenu du succès de l'ensemble des projets qu'il avait mené durant sa carrière, Johnson proposa les 14 règles et principes pour la conduite d'un Skunk Work – voir Encadré 2- dont les quatre plus connues sont les suivantes :

1. Tout la gestion du programme doit être déléguée au manager du Skunk Works. Il doit reporter à un président de division, ou plus haut.

2. Le nombre de personnes en connexion avec le projet doit être restreint au plus petit nombre. Utiliser un petit nombre de personnes compétentes. (10% ou 20% d'une équipe classique pour la même tâche)
3. Utiliser des schémas simples et des outils pour le dessin simples, permettant une grande flexibilité pour effectuer des modifications
4. Il doit y avoir le moins possible de comptes-rendus, mais les travaux importants doivent être continuellement écrits.

Néanmoins, malgré la réussite de cette entité, il existe quelques biais dans la mise en œuvre concrète d'une telle structure pour une entreprise établie se trouvant dans un contexte d'innovation intensive. En premier lieu, cette organisation était très adaptée au contexte de la Guerre froide, avec les ressources et la protection industrielle que cela impliquait. Les projets d'avions d'espionnage étaient financés par la CIA, qui avait des budgets considérables, et qui était très coutumière d'un encadrement drastique visant à maintenir la confidentialité sur ce type de projets. A titre d'illustration, pour certains projets comme la conception du SR 71, les locaux du Skunk Works étaient situés en zone militaire nucléaire dans le désert. Aussi, les Skunk Works de chez Lockheed des années 1950 à 1980 dépendaient beaucoup du rôle de *heavy weight project manager* que tenait Kelly Johnson. En effet, en plus de sa grande expertise du milieu aéronautique, il était doté d'une grande capacité à générer les bons concepts d'avions répondant aux *briefs* de l'armée de l'air américaine et de la CIA.

Les 14 règles et pratiques de Clarence « Kelly » Johnson (1989)

1. The Skunk Works manager must be delegated practically complete control of his program in all aspects. He should report to a division president or higher.
2. Strong but small project offices must be provided both by the military and industry.
3. The number of people having any connection with the project must be restricted in an almost vicious manner. Use a small number of good people (10% to 25% compared to the so-called normal systems).
4. A very simple drawing and drawing release system with great flexibility for making changes must be provided.
5. There must be a minimum number of reports required, but important work must be recorded thoroughly.
6. There must be a monthly cost review covering not only what has been spent and committed but also projected costs to the conclusion of the program.
7. The contractor must be delegated and must assume more than normal responsibility to get good vendor bids for subcontract on the project. Commercial bid procedures are very often better than military ones.
8. The inspection system as currently used by the Skunk Works, which has been approved by both the Air Force and Navy, meets the intent of existing military requirements and should be used on new projects. Push more basic inspection responsibility back to subcontractors and vendors. Don't duplicate so much inspection.
9. The contractor must be delegated the authority to test his final product in flight. He can and must test it in the initial stages. If he doesn't, he rapidly loses his competency to design other vehicles.
10. The specifications applying to the hardware must be agreed to well in advance of contracting. The Skunk Works practice of having a specification section stating clearly which important military specification items will not knowingly be complied with and reasons therefore is highly recommended.
11. Funding a program must be timely so that the contractor doesn't have to keep running to the bank to support government projects.
12. There must be mutual trust between the military project organization and the contractor, the very close cooperation and liaison on a day-to-day basis. This cuts down misunderstanding and correspondence to an absolute minimum.
13. Access by outsiders to the project and its personnel must be strictly controlled by appropriate security measures.
14. Because only a few people will be used in engineering and most other areas, ways must be provided to reward good performance by pay not based on the number of personnel supervised.

Encadré 2 – Les 14 règles de Kelly Johnson pour la conduite d'un Skunk Works

En résumé, les travaux portant sur le niveau organisationnel pour intégrer des capacités d'innovation radicale fournissent deux cadres d'analyse, et deux types de réponses au problème de l'innovation radicale. En premier lieu, les théories de la cognition organisationnelle identifient des « rigidités » du point de vue des compétences et des routines, qui engendrent de l'inertie organisationnelle. Or, ces auteurs mettent justement en avant le fait que, dans une perspective d'innovation radicale, l'entreprise doit intégrer des capacités pour renouveler ses compétences et ses routines. Une des réponses de la littérature est donc de préparer les entreprises à devenir « ambidextres », c'est-à-dire à gérer les ressources qui permettent de faire vivre l'entreprise aujourd'hui tout mobilisant des ressources pour préparer l'avenir. La préparation de l'avenir de l'entreprise peut passer par la mise en place de « zones de création de la connaissance », les « Ba », ou encore de « *communities of practices* », par l'ouverture des frontières de l'entreprise permettant l'intégration de connaissances nouvelles, ou encore par la régénération des routines de l'entreprise avec les approches système pour l'innovation radicale, s'inscrivant dans la littérature des *dynamic capabilities*. Un autre courant de la littérature propose d'étudier les structures organisationnelles les mieux adaptées à l'innovation radicale. Dans ce courant de recherche, la littérature s'accorde sur la nécessité d'une structure adaptée à des écosystèmes et environnements rapidement changeants. Ces structures doivent être « agiles », et posséder des capacités de reconfiguration rapide des connaissances et des ressources. L'une des structures les plus connues possédant ces caractéristiques est la structure adhocratique. En pratique, certaines entreprises ont rencontré des succès significatifs dans la mise en œuvre de ces organisations, c'est le cas de Lockheed et de son fameux *Skunk Works*.

Nous synthétisons cette littérature dans le Tableau 3 ci-dessous :

Niveau de l'organisation	
Approches pour l'innovation radicale	Gérer et adapter ressources et structures de l'entreprise pour l'innovation radicale
Ancrage théorique	Cognition organisationnelle et théorie de la contingence pour l'organisation
Phénomènes étudiés	Core competencies et learning myopia (Levinthal & March, 1993), organisation la plus adaptée (Burns & Stalker, 1961)
Réponses théoriques	Ambidextrie organisationnelle (March, 1991), ouverture des frontières de l'entreprise, open innovation (Chesbrough, 2003), structure organique (Burns & Stalker, 1961), adhocratie (Mintzberg, 1982)
Méthodes et outils	« Ba » (Nonaka & Konno, 1998), community of practices (Wenger & Snyder, 2000), lead users (von Hippel, 1976), Skunk Works (Johnson, 1989)

Tableau 3 : Synthèse des travaux au niveau de l'organisation

4. Mise en évidence des lacunes théoriques et proposition d'un cadre unificateur par la conception

Nous avons vu dans les sections précédentes que la littérature mobilisée pour l'intégration de capacités d'innovation radicale est majoritairement organisée par niveaux dans l'organisation : le niveau individuel, le niveau de l'équipe et le niveau stratégique. Nous présentons dans cette section la synthèse de ces différentes approches, ainsi que leurs limites pour étudier l'innovation radicale. Cette synthèse nous permettra de dégager les lacunes théoriques et de renforcer nos questions de recherche. Puis, après avoir mis en avant la nécessité d'un cadre théorique unifié pour l'étude de ces phénomènes, nous justifions l'intérêt pour nos recherches de mobiliser les approches par la conception.

4.1. Synthèse et limites des approches conventionnelles pour intégrer des capacités d'innovation radicale

Au niveau de l'individu, nous avons vu que l'approche par la créativité dominait. Ce champ, majoritairement inspiré de la psychologie, met en avant les biais cognitifs qui restreignent la production de propositions nouvelles indispensables au démarrage de tout processus d'innovation de rupture. Afin de favoriser la génération des bonnes idées, les auteurs de ce champ proposent des méthodes de résolution de problèmes, ou de reformulation du problème. **Dans cette littérature cependant, l'accent a été trop peu mis sur les mécanismes de partage des propositions créatives avec les parties prenantes et les destinataires de ces idées.** Aussi, les propositions créatives et les idées ne sont pas étudiées en tant que telles. Par conséquent, **les moyens concrets de manipulation et de transformation des idées sont absents de cette littérature.**

Au niveau du groupe, nous avons rapporté deux types de littérature. Les premiers travaux également inspirés de la cognition et de la créativité en psychologie étudient les modèles sociocognitifs en jeu dans les phases très « amont » des processus d'innovation pour la génération de propositions créatives en groupe. Ces travaux ont mis en avant de « bonnes règles » à mettre en œuvre afin d'éviter certains écueils lors du partage et du travail sur des propositions nouvelles. Des méthodes, comme les CPS, ont même été proposées pour mener des sessions de travail cherchant à générer et partager des idées en rupture. Les deuxièmes travaux concernent la gestion de projet pour l'innovation radicale. Ayant constaté que les

variables en jeu dans les processus d'innovation de rupture étaient très différentes de celles à gérer dans les processus de développement de nouveaux produits, les chercheurs de ce champ de littérature ont majoritairement insisté sur la gestion des incertitudes. Les auteurs proposent ici des formes d'exploration adaptées à des milieux très incertains. Cependant, alors que ces deux champs sont indissociables pour conduire l'ensemble d'un processus d'innovation radicale, il s'avère qu'ils communiquent peu. De ce fait, **le lien entre génération collective d'idées en rupture et gestion de l'exploration pour faire évoluer ces idées est rarement fait dans cette littérature**. Aussi les chercheurs de ces champs de recherche ont-ils peu mis l'accent sur **les activités à conduire en processus d'innovation radicale**.

Au niveau de l'organisation, nous avons mis en avant deux champs pour l'intégration de capacités d'innovation radicale. Le premier est la cognition organisationnelle. Les auteurs de champ mettent en évidence des biais cognitifs, cette fois au niveau de l'organisation, qui créent une forme d'inertie pour l'entreprise quant aux processus de renouvellement de ses connaissances. Les chercheurs proposent de se détacher de ces effets en intégrant des espaces de production de connaissances, ainsi que des capacités d'« ambidextrie organisationnelle », pour gérer à la fois exploitation et exploration, afin de renouveler les routines et les compétences de l'entreprise. Le deuxième courant que nous avons étudié à ce niveau concerne les théories de la contingence. Les auteurs de ce champs contredisent l'idée d'un « *one best way* » pour la structure des organisations, et prônent que celle-ci soit la plus adaptée à son environnement. Ainsi, dans ce champ sont traités les contextes rapidement changeants pour lesquels les structures organiques, telles que les adhocraties, sont considérées comme les plus adaptées. **Ces études proposent les structures organisationnelles les mieux adaptées à l'innovation radicale, sans pour autant discuter la génération et la gestion de ces innovations. Ces études ne proposent pas non plus les processus de transformation permettant de conduire une transition organisationnelle d'un état organisationnel A à un état organisationnel « ambidextre » B.**

Ainsi, alors que ces trois approches fournissent une base très structurante pour notre étude, les articulations entre ces différents niveaux nécessaires à la mise en œuvre de capacités d'innovation radicale, semblent manquer.

Le Tableau 4 ci-dessous synthétise les différentes lacunes théoriques relevées à chacun des niveaux organisationnels de la littérature, avant d'exposer les lacunes théoriques associées au besoin d'articuler ces trois niveaux.

	Niveau individuel	Niveau de l'équipe	Niveau de l'organisation
Lacunes théoriques	• Comment gérer une bonne proposition pour l'innovation radicale ? • Comment partager des propositions partiellement connues et indécidables avec d'autres acteurs concepteurs ou destinataires ?	• Quelle articulation entre les processus de génération des propositions en rupture et processus d'exploration ? • Quelles activités conduire dans un processus d'innovation radicale ?	• Comment construire des propositions en rupture ? • Quels processus de transformation conduire pour l'intégration des capacités d'exploration ?
Lacunes théoriques transverses	• Quels outils managériaux pour articuler l'ensemble de ces niveaux organisationnels pour l'innovation radicale ? • Quelles sont les activités à conduire pour l'innovation radicale ? • Quel est l'effet des propositions en rupture sur les différents niveaux organisationnels de l'entreprise ? • Quelles transformations conduire pour intégrer des capacités d'innovation radicale à tous les niveaux organisationnels de l'entreprise ?		

Tableau 4 – Lacunes théoriques pour l'innovation radicale aux différents niveaux organisationnels

4.2. Choix du modèle Recherche - Innovation - Développement (R-I-D)

L'ensemble de la littérature sur l'innovation radicale fournit un socle solide pour enrichir nos connaissances sur les phénomènes en jeu lors des processus d'innovation radicale, mais cette base de connaissances demeure très segmentée. Or notre hypothèse de départ sur la nécessité d'une approche multi-niveaux, confirmée plus tard par les résultats de notre terrain d'étude, nous incite à mobiliser un cadre unificateur pour traiter des capacités d'innovation radicale, au delà des frontières usuelles des champs de la littérature. Dans cette perspective, l'une des approches possibles est d'étudier les activités de conception. C'est-à-dire l'activité du raisonnement qui part d'une proposition sur un objet partiellement inconnu et qui tente de le transformer en d'autres concepts et connaissances. Cette approche est définie comme essentielle pour la compréhension des processus d'innovation radicale dans l'entreprise (Le Masson et al., 2006, 2010). Ainsi, partant du constat que la notion d'innovation est limitée comme objet d'étude car elle suppose une évaluation *ex post*, les chercheurs du Centre de Gestion Scientifique (CGS) de l'Ecole des Mines de Paris ont postulé que c'est le processus même, l'activité de conception qui mène à l'innovation, qui doit être changé, révisé, repensé. Afin d'étudier ce type d'activité, ces chercheurs proposent d'étudier les raisonnements en jeu dans ces processus du point de vue du concepteur ou du collectif concepteur. Dans ce cadre, et dans la lignée des travaux du *design science*, ces auteurs proposent une théorie permettant de modéliser les raisonnements lors de processus de conception : la théorie C-K (Hatchuel & Weil, 2002a, b, c; Hatchuel & Weil, 2009). Aussi, partant du constat que l'intégration de capacités d'innovation radicale dans l'entreprise passe par des capacités de renouvellement de l'identité des objets, ces chercheurs ont formalisé les fonctions organisationnelles et managériales nécessaires à la conception innovante. Ce cahier des charges a permis de poser les bases d'un modèle organisationnel pour la conception innovante : le modèle R-I-D. Ce modèle a par ailleurs permis de proposer de nouvelles structures organisationnelles pour la conception innovante, nommées *Organisations Orientées Conception* (Hatchuel & Weil, 1999).

Résumé du CHAPITRE 1

Dans ce chapitre, nous avons proposé une revue de littérature multi-niveaux sur les capacités d'innovation radicale. Nous avons mis en évidence que la littérature sur l'innovation radicale proposait de nombreuses approches de l'innovation radicale : par la psychologie et la résolution de problèmes au niveau individuel, par la créativité de groupe ou la gestion de projet au niveau de l'équipe, ou encore par la cognition ou la structure au niveau organisationnel. Cependant, nous soulignons que le manque d'articulation entre ces différents niveaux ne permet pas de comprendre précisément l'ensemble des paramètres intervenant dans les processus d'innovation radicale.

L'approche que nous retenons par conséquent, pour comprendre les nouveaux enjeux liés à l'innovation radicale, est de mobiliser un cadre unificateur. Selon nous, la compréhension des capacités d'innovation radicale nécessite d'étudier l'activité du raisonnement menant à l'innovation, c'est-à-dire l'activité de conception. Ce champ propose des cadres théoriques unifiés ainsi que les spécifications organisationnels pour les capacités de conception innovante en entreprise. Ces éléments nous permettront de mobiliser un ensemble de connaissances unifié pour étudier les processus de conception innovante, et d'ainsi faire le lien entre les travaux dominants de la littérature sur l'innovation radicale.

Dans le chapitre suivant, nous proposerons une présentation de la littérature sur les approches théoriques, méthodologiques et organisationnelles de la conception que nous mobilisons dans le cadre de cette thèse.

Le Tableau 5 ci-après fait la synthèse de l'ensemble de la littérature présentée dans ce chapitre, ainsi que des différentes lacunes théoriques relevées.

	Niveau individuel	Niveau de l'équipe	Niveau de l'organisation
Approches pour l'innovation radicale	Créativité et génération d'idées comme condition nécessaire (d'entrée) au processus d'innovation radicale (Acar & Runco, 2012; Im & Workman, 2004; Mumford et al., 2012).	Gérer des paramètres sociocognitifs pour favoriser l'efficacité des processus divergents et exploratoires en groupe	Gérer et adapter ressources et structures de l'entreprise pour l'innovation radicale
Ancrage théorique	Créativité en sciences cognitives et en psychologie	Psychologie de groupe, créativité et gestion de projet	Cognition organisationnelle et théorie de la contingence pour l'organisation
Phénomènes étudiés	Processus du raisonnement (Wallas, 1926), effets de fixation (Finke et al., 1992)	<i>Shared mental models</i> (Klimoski & Mohammed, 1994; Rouse et al., 1992), liens entre les acteurs, espaces psychologiques et incertitudes	<i>Core competencies</i> et <i>learning myopia</i> (Levinthal & March, 1993), organisation la plus adaptée (Burns & Stalker, 1961)
Réponses théoriques	Intégration de capacités de résolution de problème. Théorie Gestaltiste (Dunker & Lees, 1945) pour la perception et la reformulation du problème, <i>information processing theory</i> pour l'étude du processus de résolution du problème (Newell & Simon, 1972)	Création d'espaces sociaux sécurisants (Hülshager et al., 2009), cohésion (Mullen & Copper, 1994), diversité des compétences et taille de groupes, gestion des incertitudes (Loch et al., 2006), leadership	Ambidextrie organisationnelle (March, 1991), ouverture des frontières de l'entreprise, open innovation (Chesbrough, 2003), structure organique (Burns & Stalker, 1961), adhocratie (Mintzberg, 1982)
Méthodes et outils	Méthodes de créativité : exemple TRIZ et ses méthodes dérivées (Altshuller, 1984)	<i>Creative problem solving</i> (Osborn, 1957), stratégie d'exploration et d'apprentissage parallèles (Lenfle, 2009; Loch et al., 2001).	« Ba » (Nonaka & Konno, 1998), <i>community of practice</i> (Wenger & Snyder, 2000), <i>lead users</i> (von Hippel, 1976), Skunk Works (Johnson, 1989)
Lacunes théoriques	• Comment gérer une bonne proposition pour l'innovation radicale ? • Comment partager des propositions partiellement connues et indécidables avec d'autres acteurs concepteurs ou destinataires ?	• Quelle articulation entre processus de génération des propositions en rupture et processus d'exploration ? • Quelles activités conduire dans un processus d'innovation radicale ?	• Comment construire des propositions en rupture ? • Quels processus de transformation conduire pour l'intégration des capacités d'exploration ?
Cadre théorique	Cadre théorique unifié par la conception : modèle R-I-D et <i>Organisation Orientée Conception</i>		

Tableau 5 – Synthèse des travaux théoriques pour l'innovation radicale multi-niveaux et proposition d'un cadre théorique unifié

CHAPITRE 2

APPROCHES DE LA CONCEPTION POUR INTEGRER DES CAPACITÉS D'INNOVATION RADICALE

1. Les approches par la conception de l'innovation radicale.....	79
1.1. Design et art appliqué	80
1.2. <i>Design-driven innovation</i>	80
1.3. La conception comme processus	81
1.2.1. La conception systématique allemande	81
1.2.2. La conception axiomatique	82
1.2.3. L'approche d'Herbert Simon	82
1.4. Conception innovante et théorie C-K	83
1.5. Cahier des charges des capacités d'innovation radicale et fonction I	87
2. Proposition d'un cadre d'analyse pour la conception innovante : le modèle Design – Incubation – Mutation de l'écosystème	89
2.1. Design : les capacités de raisonnement de conception innovante	89
2.2. Incubation : les capacités de production de connaissance en rupture.....	89
2.3. Mutation de l'écosystème : les capacités d'interaction et de transformation de l'écosystème.....	90
Résumé du CHAPITRE 2	91

Dans le chapitre précédent, nous avons montré l'apport des approches classiques à l'étude de l'innovation radicale. Mais nous avons aussi mis en évidence que la segmentation de la structure de la littérature consacrée à ce type de processus ne permettait pas une compréhension complète des phénomènes en jeu. Le manque d'interaction entre les cadres d'analyse à différents niveaux organisationnels justifiait notre recours à un cadre unifié par une approche *design*, c'est-à-dire par l'étude des activités de conception des objets.

Dans ce chapitre nous présentons de manière générale les différentes approches du design pour l'innovation radicale. Après avoir présenté brièvement les approches de l'art appliqué à l'industrie, nous exposons quelques travaux sur l'étude des processus pour le design avant d'introduire la théorie de la conception C-K. Puis, à partir du cahier des charges organisationnel R-I-D, nous proposons un cadre d'analyse pour étudier les capacités d'innovation de rupture dans l'entreprise.

1. Les approches par la conception de l'innovation radicale

Nous présentons dans cette section les différents courants de recherche sur le design, en présentant successivement les approches de l'art appliqué à l'industrie, l'étude des processus de conception, pour finir avec une introduction à la théorie C-K.

1.1. Design et art appliqué

Aujourd'hui en France, la traduction anglaise du mot design est souvent associée à l'art appliqué. L'art appliqué à l'industrie, ou tout simplement l'art appliqué, a été connu du grand public au début du 20^{ème} siècle, notamment par les enseignements des écoles du Bauhaus (Itten, 1975) ou de l'école de design d'Ulm (Betts, 1998) en Allemagne.

Les frontières entre la tradition artistique et l'art appliqué ne sont pas évidentes. En effet, l'art appliqué est un champ comprenant de nombreuses disciplines telles que le stylisme, le design industriel ou encore le graphisme. Il semble tout de même exister dans l'art appliqué un fort héritage artistique dans le rapport à l'inconnu, à l'inattendu, et donc à la capacité à générer du nouveau. Néanmoins, bien que les travaux et cours du monde du design industriel soient très proches de la représentation contemporaine du résultat d'un processus d'innovation, mis à part certains travaux (Bejean, 2008), il existe peu d'études permettant de caractériser les activités de conception des objets nouveaux.

1.2. Design-driven innovation

Pour générer de l'innovation radicale, un champ de littérature propose par ailleurs, une nouvelle approche par le design. Cette approche appelée *design-driven innovation*, basée sur plus de dix années d'étude d'entreprises spécialisées dans le design, propose de concevoir des produits innovants apportant un nouveau « *meaning* » au consommateur (Verganti, 2009). Ces travaux permettent à une entreprise ou à un concepteur d'être leader sur son marché (Dell'Era, Marchesi, & Verganti, 2010; Dell'Era & Verganti, 2009). Les auteurs expliquent en effet que les consommateurs ne sont pas seulement touchés par des fonctions, c'est-à-dire des technologies, mais le sont aussi par l'expérience, et donc le « *meaning* » des objets. En rapport au produit, le « *meaning* » d'un objet peut recouvrir plusieurs aspects tels que la mémoire, la part de soin et de réparation accordée, la personne qui a donné ou vendu l'objet, et la manière dont la personne lie le produit à sa personnalité. Ainsi, l'aspect « *meaning* » prête à un produit le pouvoir d'incarner des buts, de manifester des compétences, et de façonner les identités des utilisateurs. Néanmoins, bien que cette approche permette de fournir des éléments concrets pour concevoir des nouveaux produits (les auteurs proposent même une

méthodologie), cette littérature ne permet pas de comprendre les raisonnements en jeu dans les processus de conception d'une entreprise.

1.3. La conception comme processus

Les approches par les processus ont conduit de nombreux auteurs à caractériser et construire des théories et modèles pour la conception.

Tout d'abord, notons ce que doit comprendre une théorie de la conception. Gillier (2010) propose deux critères d'évaluation d'une théorie scientifique :

1. Un cadre de compréhension généralisable. « *Les théories de la conception doivent permettre d'expliquer un grand nombre de cas de conception.* »
2. Un cadre théorique réfutable. « *Une théorie doit a minima expliquer un certain nombre de propriétés observables aujourd'hui* » (*ibid*). Deux éléments sont proposés par l'auteur ici : tout d'abord, la conception étant un processus fini, une théorie doit rendre compte non seulement du début et de la fin du processus, mais doit aussi permettre de décrire les objets tout au long du processus de conception. Le deuxième élément est que la théorie doit prendre en compte la production de connaissances nouvelles, l'utilisation de connaissances existantes, et la créativité, qui sont trois activités indispensables à tout processus de conception.

Abordons à présent les théories existantes pour modéliser la conception. Nous présenterons ici deux approches de la modélisation des processus de conception. La première concerne les travaux en ingénierie proposant une approche systématique pour la conception, et la seconde est la modélisation du raisonnement de conception comme processus de résolution de problèmes.

1.2.1. La conception systématique allemande

En Allemagne, avec la structuration des bureaux d'études, ont été créés de nouveaux langages de conception correspondant aux quatre phases du processus de conception. Ce processus fut synthétisé pour la première fois en 1977 par G. Pahl et W. Beitz (1977) décrivant l'activité de conception en quatre phases :

1. *Product planning and clarifying the task* est la phase de collecte des données et de construction des cahiers des charges ;
2. *Conceptual design* est la phase de précision des principes physiques pouvant être utilisés pour répondre aux fonctions ;
3. *Embodiment design* est la phase de proposition des éléments physiques et organiques permettant de remplir les principes physiques sélectionnés ;

4. *Detail design* est la phase de construction des spécifications pour industrialiser le produit.

Bien que ce modèle soit l'un des modèles les plus diffusés dans l'industrie et dans la formation des ingénieurs dans le monde, du fait de son tropisme vers la rationalisation et l'organisation de la conception, il n'en reste pas moins un modèle très limité pour appréhender l'innovation radicale. En effet, de par les objectifs de rationalisation visés par cette approche systématique, celle-ci impose une importante limitation de la production de connaissances nouvelles, et la seule créativité est restreinte strictement au début du processus, grâce l'abstraction imposée lors de la phase conceptuelle.

1.2.2. La conception axiomatique

Sur cette base et dans un souci de proposer un modèle d'évaluation du processus de conception, d'autres approches de formalisation de la conception ont émergé. C'est notamment le cas de la « conception axiomatique » proposée par Nam Suh. Dans son ouvrage *The principles of Design* (Suh, 1990), il propose une théorie d'évaluation de la qualité d'une conception. Cette théorie introduit une matrice faisant intervenir le couplage entre fonctions de produit (FR) et paramètres de conception (DP). De cette théorie, il propose deux axiomes pour la « bonne » conception :

- l'axiome d'indépendance, postulant que la matrice doit être diagonale pour qu'à chaque FR soit associé le minimum de DPs. Ainsi, la modification d'un FR affectera un minimum de DPs, et réciproquement ;
- l'axiome d'information postulant que le produit doit nécessiter le moins d'information possible pour pouvoir être utilisé.

Cette approche permet de faciliter la décomposition des tâches entre différents métiers de l'entreprise, mais ne fournit qu'un élément d'évaluation *ex post*. Ce modèle ne permet de discuter ni les activités permettant d'intégrer des fonctions nouvelles, ni la révision des fonctions des objets techniques, opérations pourtant caractéristiques des processus d'innovation radicale.

1.2.3. L'approche d'Herbert Simon

En termes théoriques, Simon fut le premier à poser les bases d'une science permettant de comprendre les activités du raisonnement en jeu dans la conception. En effet, dans son ouvrage, *Science of the artificial* (1969), il propose d'accorder une plus grande importance aux « sciences de l'artificiel », c'est-à-dire de ce qui est créé par l'homme – par opposition aux sciences naturelles. Simon propose la notion de « rationalité limitée » pour caractériser le fait que les concepteurs ne sont capables de traiter qu'un nombre restreint de données et

paramètres dans la résolution de problèmes, en raison d'une connaissance limitée et imparfaite, de capacités cognitives limitées, et de défauts d'attention. Ainsi, pour Simon la conception serait un processus de décision sous contrainte permettant au concepteur de parvenir à la solution la plus satisfaisante. Il mobilise pour ces travaux les théories de la décision pour modéliser le raisonnement de conception. Cependant, pour la conception innovante, l'association de la conception à de simples processus de résolution de problème semble réductrice (Le Masson et al., 2006). En effet, d'après Armand Hatchuel (2002), les théories classiques de la résolution de problèmes ne sont pas suffisantes pour comprendre la notion d'expansion, élément fondamental en conception innovante, et qui est par ailleurs très bien appréhendé par les approches de l'art appliqué à l'industrie.

1.4. Conception innovante et théorie C-K

Hatchuel (*ibid*) montre en effet que la résolution de problème n'est qu'un cas particulier de la conception. Il montre en fait que la rationalité, contrairement à ce que proposait Simon, peut être aussi expansive. Dans certains cas de conception, le concepteur n'a pas seulement le choix dans un univers de solutions possibles, mais il peut aussi avoir à reconcevoir le champ des possibles au moyen de nouvelles propositions. Ainsi, certains processus de conception seraient des processus expansifs, dans lesquels le concepteur aurait non seulement à trouver une proposition répondant au mieux au *design brief*, mais dont les propositions viendraient modifier en retour le champ des possibles.

La théorie C-K (Hatchuel & Weil, 2002a; Hatchuel & Weil, 2007, 2009) permet justement de modéliser ce type de raisonnement, en faisant intervenir un processus de double expansion : une expansion sur les concepts ainsi qu'une expansion sur les connaissances. Ainsi cette théorie fait intervenir deux types d'espaces pour modéliser le raisonnement :

- l'espace des connaissances (K), qui contient l'ensemble des propositions vraies relatives à un espace d'objets X. C'est-à-dire l'espace qui contient les propositions dotées d'un statut logique. C'est un espace extensible, qui est organisé sous forme archipélagique et dont les îlots sont des « poches de connaissance » relatives à des objets.
- l'espace des concepts (C), qui contient les propositions n'ayant pas de statut logique. Il est de la forme $C = \{x \in X, P_1(x) \dots P_k(x)\}$, où les $P_i(x)$ sont des propositions interprétables dans $K(X)$, mais qui ne sont ni vraies ni fausses. En d'autres termes, leurs éléments sont compréhensibles avec les connaissances du concepteur (ou groupe de concepteurs), mais celui-ci ne peut dire si elles sont vraies ou fausses au moyen des connaissances à sa disposition. Ainsi, on dit que l'espace C est *K-relatif*,

c'est-à-dire qu'il n'y a pas de concepts « en soi », mais seulement relatifs à une base de connaissance donnée. Aussi, dans la théorie C-K, si le concept devient soit vrai, soit faux, alors la conception s'arrête.

Quatre opérateurs permettent de modéliser la coévolution de ces deux espaces, ces quatre opérateurs formant ce que l'on appelle le « carré de la conception » :

- 1) l'opérateur $K \rightarrow C$: Cet opérateur est une disjonction. Cette opération apparaît lorsque le concepteur transforme une proposition vraie en un concept par association d'un nouvel attribut ou une autre opération. Tout processus de conception démarre avec cette opération.
- 2) l'opérateur $C \rightarrow C$: cet opérateur permet de désigner la trace de l'objet en conception, en d'autres termes la suite des propriétés qui le composent.
- 3) l'opérateur $K \rightarrow K$: cet opérateur rend compte de la production de connaissances à partir d'autres connaissances. Ce sont les inférences logiques qui rendent ici possible l'expansion comme l'abduction, la déduction, l'induction. C'est un raisonnement classique à partir de connaissances considérées comme vraies.
- 4) l'opérateur $C \rightarrow K$: cet opérateur transforme une proposition sans statut logique en une proposition ayant un statut logique. Si cette proposition est validée dans K, alors c'est une conjonction. Un test, un prototype, une expertise en sont des exemples. Tout processus de conception se termine avec cet opérateur.

Sur la Figure 6 ci-dessous sont représentés le carré de la conception représentant l'ensemble des opérateurs de la théorie C-K ainsi qu'une modélisation de la théorie C-K sur la Figure 7.

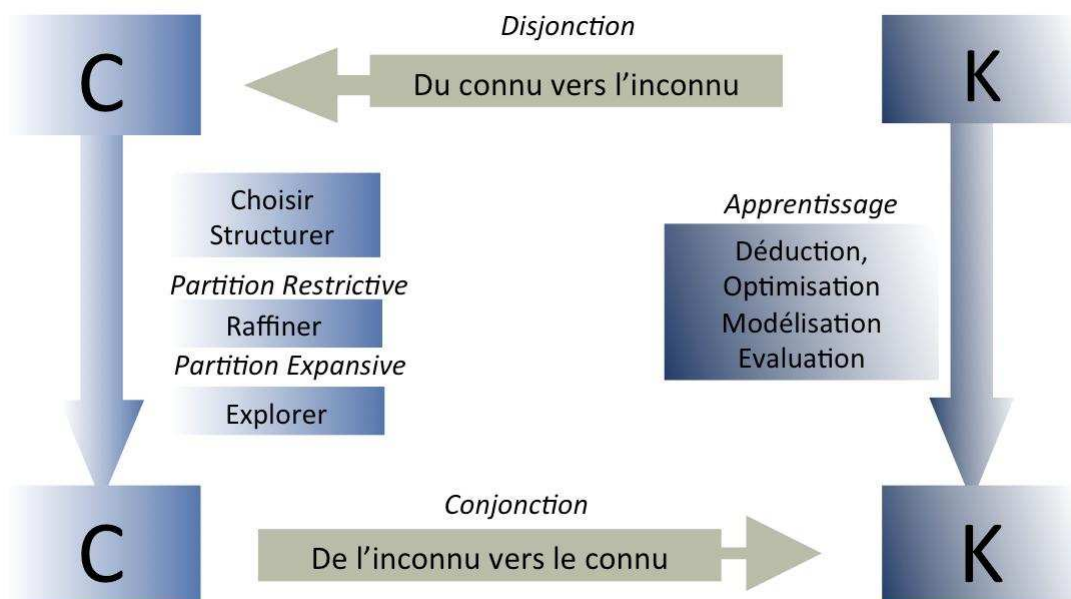


Figure 6 – Le carré de la conception et les quatre opérateurs de C-K

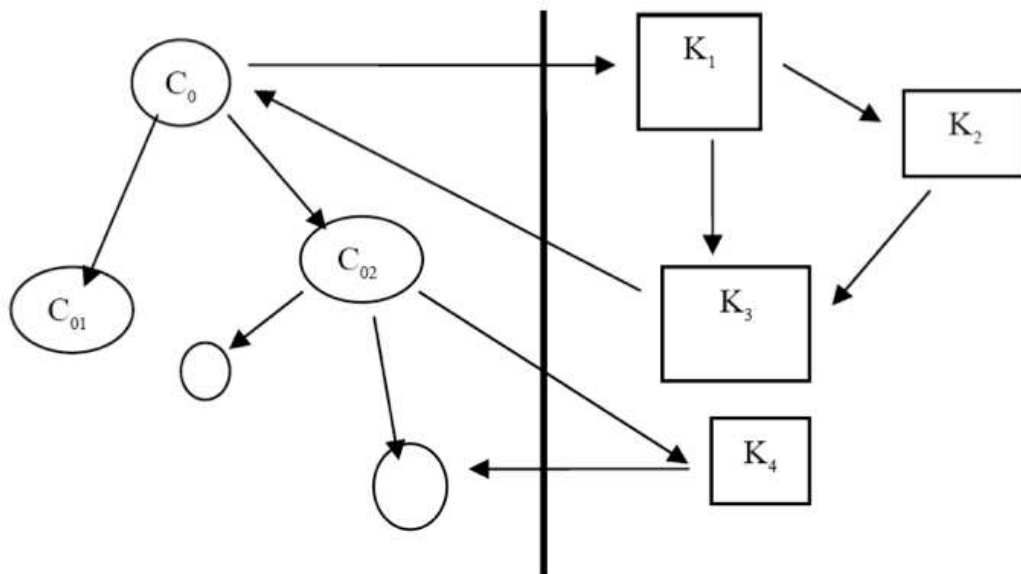


Figure 7 – Représentation d'un diagramme C-K (Hatchuel & Weil, 2002c)

L'élément déterminant de la théorie C-K pour l'étude de l'innovation radicale est qu'elle permet de rendre compte de *la révision de l'identité des objets*. En effet, dans le processus de conception, le concepteur peut effectuer deux types de partitions en ajoutant des attributs au concept de départ. Les partitions restrictives correspondent à une classe d'objets connue par le concepteur. Par exemple, « un téléphone portable incassable » peut être considéré comme une partition restrictive du champ téléphone portable. Une partition expansive, elle, correspond à une partition qui n'est pas connue par le concepteur. On dit de cette partition qu'elle transforme l'identité de l'objet. Cette transformation peut porter sur différents attributs de cet objet, il peut s'agir d'un élément technologique, d'une fonction, ou encore d'un modèle d'affaires. Si, par exemple, on parle d'« un téléphone portable invisible », étant données les connaissances disponibles du monde des téléphones, un concepteur peut considérer que cette partition est expansive.

D'après Le Masson *et al.* (2006), les nouveaux régimes de conception, les régimes d'innovation intensive se manifestent précisément par la révision continue de l'identité des objets. Ainsi, dans de tels régimes, pour anticiper ou même seulement suivre les dynamiques d'innovation, les concepteurs doivent mener des processus d'innovation dont l'objectif est de générer des partitions expansives, produisant une double expansion en concept et en connaissance.

Pour l'entreprise, ces nouveaux enjeux entraînent des besoins de nouvelles fonctions organisationnelles, de nouveaux outils de gestion et de nouveaux acteurs capables d'imposer et de soutenir des rythmes de régénération des objets. Les principes organisationnels édictés par Le Masson (Le Masson, 2001), et repris dans Le Masson *et al.* (2010) caractérisés sous la forme R-I-D⁶, répondent à ces besoins.

⁶ Recherche – Innovation - Développement

1.5. Cahier des charges des capacités d'innovation radicale et fonction I

En partant du constat que la compétition par l'innovation correspond « à une compétition en situation d'incertitudes sur l'identité des objets, menée en contrôlant rigoureusement les ressources consacrées à l'innovation », Le Masson (2001) propose une grille des capacités d'innovation radicale dans l'entreprise, reposant sur :

1. la mise en évidence des nouveaux raisonnements de conception qui permettent de rendre compte de la transformation de l'identité des objets, ainsi que du renouvellements des connaissances et des compétences de l'entreprise ;
2. l'explicitation des nouvelles techniques et moyens collectifs de gestion, différents des objets de gestion classiques (cahier des charges, prestation) inadaptés au management de concepts remettant en cause le *dominant design* de l'entreprise ;
3. la prise en compte de nouvelles logiques de performance, reposant sur des capacités à imposer de nouveaux rythmes d'innovation, et non plus à miser seulement sur « la » bonne innovation ;
4. l'explicitation de nouvelles formes d'organisation tirant parti des fonctions recherche et développement déjà existantes dans l'entreprise.

Sur la base de ces recommandations, et à partir de l'histoire des fonctions R et D de l'entreprise (Le Masson & Weil, 2010a), les auteurs mettent en avant les risques liées au fait de faire reposer la gestion de l'innovation sur les seules fonction R ou D (Hatchuel, Le Masson, & Weil, 2006). Ils proposent un modèle triple intégrant une nouvelle fonction : la fonction « I » pour innovation. Face aux nouveaux enjeux de la conception innovante, cette fonction permet à l'entreprise de répondre au cahier des charges précédent. Et de nombreux travaux ont été depuis entrepris pour gérer cette fonction I. Au niveau du raisonnement de conception, des travaux ont mis en évidence les biais cognitifs dans les processus collaboratifs de conception innovante, notamment dans la génération d'alternatives de conception (Agogue, 2012). Aussi, Hatchuel *et al.* (Hatchuel, Le Masson, & Weil, 2004, 2005) montrent que les objets de gestion à gérer en conception innovante ne sont plus des processus de développement de nouveaux produits, mais des « champs d'innovation » permettant de gérer des apprentissages nouveaux en conception innovante. Du point de vue des nouvelles logiques de performance, les travaux de Hooge (2010) démontrent que la fonction I doit s'appuyer sur de nouveaux modèles de pilotage des projets d'innovation de rupture, en combinant plusieurs axes de valeur des projets, tels que l'usage conditionnel de l'analyse économique, la qualification des enjeux stratégiques de l'innovation, ainsi que le suivi de l'impact organisationnel et des mécanismes d'adhésion des partenaires internes. Concernant les organisations, les chercheurs du Centre de Gestion Scientifiques des Mines de Paris (Hatchuel *et al.*, 2002b; Hatchuel & Weil, 1999) mettent avant qu'en situation

d'innovation intensive, l'entreprise doit intégrer des capacités pour reconstruire ses apprentissages collectifs à partir « d'objet-concepts » et de « métiers embryonnaires », afin de régénérer les routines organisationnelles et les métiers de l'entreprise. Les organisations favorisant ces formes d'apprentissages collectifs, par un renouvellement simultané des objets et des métiers, sont appelées par les auteurs « organisations orientées conception ». Nous montrerons dans la conclusion de cette thèse en quoi nos travaux complètent ce modèle. D'autres travaux (Maniak & Midler, 2008; Segrestin, 2003) se sont intéressés à de nouvelles formes de partenariats pour l'exploration, et proposent même de nouveaux outils managériaux pour générer de nouveaux objets en coopération interentreprises (Gillier, 2010).

Ainsi, ce nouveau modèle pour l'intégration des capacités de conception innovante dans l'entreprise fournit un premier canevas très riche pour gérer les activités d'innovation dans l'entreprise. Néanmoins, pour nos recherches, ce modèle semble incomplet. En effet, les processus d'innovation font, certes, apparaître de nouveaux raisonnements de conception permettant de piloter la révision de l'identité des objets, mais qu'en est-il des activités de production de connaissances autour de ces objets, telles que les activités de prototypage rapide ou d'exploration concernant ces objets à concevoir ? Est-ce le rôle de la recherche ou des centres de prototypage conventionnels de l'entreprise, alors même que l'identité de l'objet à concevoir est incertaine et que les compétences ne sont pas dans l'entreprise ? De même, la révision de l'identité des objets implique la modification des réseaux d'acteurs concepteurs et récepteurs des processus d'innovation en interne et en externe. Comment piloter et gérer l'intégration de ces nouveaux acteurs et partenaires dans les processus de conception ?

Pour répondre à ces questions, nous pensons que le modèle R-I-D doit être étendu en ce qu'il doit tenir compte des capacités qui ne sont pas explicitées avec la seule fonction « I ». **Nos travaux prolongent et complètent donc les travaux sur la fonction « I » initiées par les travaux de thèse de Le Masson (2001).**

2. Proposition d'un cadre d'analyse pour la conception innovante : le modèle Design – Incubation – Mutation de l'écosystème

Dans cette section, nous introduisons notre cadre d'analyse des capacités d'innovation radicale dans l'entreprise. Ce cadre d'analyse comporte trois composantes : la capacité à gérer des nouveaux raisonnements de conception permettant de comprendre le renouvellement de l'identité des objets, que nous nommons les capacités de **Design** ; la capacité à produire de la connaissance nouvelle autour des nouveaux objets, que nous appelons la capacité d'**Incubation** ; et la capacité d'interaction avec l'écosystème que nous nommons simplement **Mutation de l'écosystème**. Le sigle retenu pour caractériser ce modèle est D-I-M.

2.1. Design : les capacités de raisonnement de conception innovante

Nous avons montré dans les sections précédentes que l'instabilité de l'identité des objets était une des caractéristiques principales des régimes d'innovation intensive. Ainsi, dans la lignée des travaux du Centre de Gestion Scientifique (CGS), nous posons ici qu'en situation d'innovation radicale, l'entreprise doit être capable d'analyser et de gérer la transformation de l'identité des objets. **Cette capacité repose sur la maîtrise de la double expansion en concept et en connaissance**. Les capacités de design intègrent aussi des logiques de performance nouvelles, ainsi que des objets de gestion adaptés pour piloter les processus d'innovation comme par exemple la notion de « champs d'innovation » proposée par Hatchuel et al. (2005). En situation d'innovation radicale, l'étude de cette capacité doit permettre de mettre en évidence le potentiel de l'entreprise pour l'expansion en concept et en connaissance.

2.2. Incubation : les capacités de production de connaissance en rupture

Le fait que la conception de nouveaux objets doive être accompagnée de moyens de production de connaissance n'est pas nouveau. Néanmoins, nous pensons que les rythmes accélérés de l'innovation imposent une gestion différente des moyens de production de connaissance. Non seulement l'intensification du renouvellement de l'identité des objets impose de s'intéresser à des moyens rapides de production de connaissance, mais en outre, la nature des moyens à intégrer pour accompagner la conception des nouveaux objets est aussi instable que les objets à concevoir. Ainsi, dans la lignée des travaux de O'Connor et DeMartino, nous statuons que l'étude des capacités d'incubation, c'est-à-dire **la capacité d'une entreprise à opérer la maturation des propositions en rupture** (O'Connor & DeMartino, 2006), est structurante pour l'analyse des capacités d'innovation radicale d'une entreprise établie. Des capacités d'incubation pourraient ainsi être définies comme des

capacités de renouvellement des connaissances, préparatoires de la fonction « Recherche » d'une entreprise.

2.3. Mutation de l'écosystème : les capacités d'interaction et de transformation de l'écosystème

Il est aujourd'hui communément admis que les régimes d'innovation intensive transforment en profondeur les écosystèmes industriels des entreprises. Les acteurs concepteurs ne sont pas connus au démarrage des processus de conception, tant les connaissances pour les entreprises sont nouvelles dans ces activités. Ceci implique de nouvelles formes de partenariat, (Gillier, Piat, Roussel, & Truchot, 2010; Segrestin, 2003) mais aussi de nouveaux outils de conception permettant d'interagir avec ces acteurs, tels que des cartographies d'exploration (Agogue, 2012) ou encore les « *concept cars* » chez certains fournisseurs de rang 1 dans l'automobile (Maniak & Midler, 2008). Par ailleurs, les destinataires de l'innovation ne peuvent plus être considérés comme de simples récepteurs de l'innovation, mais clients, consommateurs et utilisateurs doivent intervenir très tôt dans le processus de conception, afin de proposer les objets les plus adaptés possible. **Nous pensons donc qu'en situation d'innovation radicale, il est indispensable d'étudier les capacités d'interaction de l'entreprise avec son écosystème ainsi que les capacités de l'entreprise à opérer des mutations de son écosystème.** Ainsi, les capacités de mutation pourraient être comprises comme des capacités préparatoires pour la fonction « Développement » d'une entreprise.

En résumé, en situation d'innovation, l'étude de l'entreprise repose sur un cadre d'analyse à trois composantes permettant à la fois de caractériser les transformations importantes de l'identité des objets, éléments caractéristiques de ces régimes, mais aussi d'analyser les aptitudes de l'entreprise à produire de la connaissance nouvelle autour de ces objets, et à interagir avec son écosystème. Nous nommons ce modèle D-I-M.

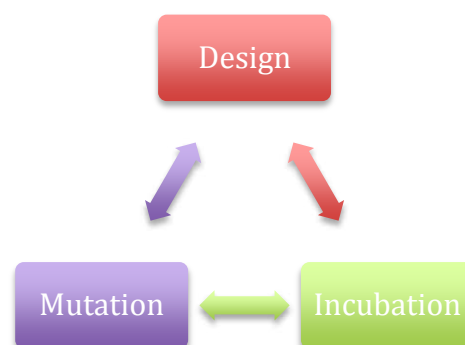


Figure 8 – Cadre d'analyse D-I-M pour les capacités de conception innovante

Résumé du CHAPITRE 2

Dans ce chapitre, nous avons commencé par rappeler plusieurs approches par la conception. La première approche de l'art appliqué à l'industrie, bien que prenant en compte la notion d'expansion propre aux processus de conception innovante, ne nous semblait pas fournir de cadre théorique adapté pour l'étude de l'innovation radicale. Nous avons donc mobilisé les approches par les processus de conception. Nous avons montré que les approches de la tradition allemande, ou encore les théories développées par Simon, bien que fournissant des assises théoriques solides, ne permettaient pas de rendre compte de l'ensemble des raisonnements de conception de l'innovation radicale, comme la génération de partitions expansives. Partant justement de ce constat, la théorie C-K entend répondre à ce besoin. Elle propose un cadre unifié pour étudier les capacités d'innovation radicale dans l'entreprise. Cette approche permet de comprendre les activités en jeu durant les processus de conception, en focalisant l'analyse sur les raisonnements de conception pour la génération de nouveaux objets. Nous avons mis en avant que dans le champ de la conception, cette théorie fournit le cadre le plus complet pour comprendre les raisonnements de conception permettant l'innovation radicale, en proposant un processus de double expansion sur un espace des concepts et sur un espace des connaissances. Nous avons montré qu'à partir de cette théorie avait été construit un cahier des charges pour organiser la conception innovante dans l'entreprise donnant lieu au modèle R-I-D (Le Masson, 2001; Le Masson et al., 2010). Ce modèle propose l'intégration d'une fonction « I » dans l'entreprise, dont la finalité est la gestion des activités d'innovation autour de la transformation de l'identité des nouveaux objets. Cependant, nous avons également mis en avant que, pour comprendre en pratique les capacités de conception innovante, ce modèle devait être étendu. Nous proposons à cet effet le cadre d'analyse Design – Incubation – Mutation. Ce cadre intègre à la fois les capacités d'innovation radicale relatives au raisonnement de conception, ainsi que les capacités de production de connaissances pour l'innovation radicale et les moyens déployés par l'entreprise pour interagir avec les acteurs de son écosystème. Ce cadre d'analyse, que nous nommons D-I-M, servira de fil conducteur à notre raisonnement tout au long de notre étude de cas dans les parties suivantes.

Conclusion de la PARTIE I

Dans cette partie, nous avons proposé une revue de la littérature consacrée à l'innovation radicale. Nous avons mis en avant les apports de cette littérature à différents niveaux organisationnels. Mais nous avons également montré que la segmentation de la structure de connaissance par niveaux limitait l'étude des processus d'innovation dans leur globalité. En effet, nous avons justement souligné que les processus d'innovation radicale se jouaient simultanément aux différents niveaux de l'organisation. Notre ambition d'une compréhension la plus complète possible des phénomènes d'innovation radicale de notre terrain d'étude justifiait donc la mobilisation d'un cadre théorique unifié. Les approches par la conception semblaient être les plus appropriées pour répondre à cette problématique.

Nous avons présenté plusieurs approches par la conception. Les approches de la conception par les processus, et notamment l'étude des raisonnements de conception dans ce champ, semblent fournir le cadre théorique nécessaire à nos recherches, mais restent limitées dès lors qu'il s'agit de prendre en compte l'expansion propre à la conception innovante. Dans la lignée des travaux sur l'organisation de la conception innovante, la théorie C-K permet justement de modéliser les raisonnements de conception « expansifs » à l'œuvre dans les processus de conception innovante. Aussi, sur la base du modèle organisationnel R-I-D, issu de ce même courant de recherche, nous avons proposé une extension de la fonction « I », et proposé un cadre d'analyse des capacités d'innovation radicale dans l'entreprise. Ce modèle est le modèle Design- Incubation – Mutation, permettant de rendre compte à la fois des nouveaux raisonnements de conception ainsi que des moyens de production de connaissances nouvelles et d'interaction avec l'écosystème de l'entreprise en régime d'innovation intensive.

Dans les parties suivantes, nous mobiliserons ce cadre théorique D-I-M dans une triple perspective : tout d'abord pour qualifier et comprendre les capacités d'innovation radicale dans une entreprise établie, en nous appuyant sur la généalogie des capacités d'innovation radicale de Turbomeca ; ensuite pour faire émerger un nouveau modèle d'activités nécessaires à l'intégration de capacités d'innovation radicale dans les entreprises ; enfin pour proposer des principes organisationnels et des propositions opérationnelles pour la gestion des activités de conception innovante. Ce dernier point permettra de compléter la notion d'*Organisation Orientée Conception*.

PARTIE II

L'INNOVATION RADICALE DANS UNE ENTREPRISE ETABLIE : ANALYSE HISTORIQUE DES CAPACITES DE CONCEPTION INNOVANTE DE TURBOMECA

CHAPITRE 3 - GÉNÉALOGIE DES CAPACITÉS DE CONCEPTION INNOVANTE À TURBOMECA	99
1. Méthodologie	101
2. Les premiers pas d'un nouveau moteur (Le Cas Whittle)	107
3. La généalogie des capacités de conception innovante à Turbomeca	119
Résumé du CHAPITRE 3 :	181
CHAPITRE 4 - INTERPRETATION DE LA GENEALOGIE DES CAPACITES DE CONCEPTION INNOVANTE A TURBOMECA	183
1. La turbine à gaz, un potentiel d'innovation de rupture	185
2. Analyse des capacités d'innovation radicale à Turbomeca : le pouvoir explicatif du cadre D-I-M	189
Résumé du CHAPITRE 4	197
Conclusion de la PARTIE II	198

En 2009, année de démarrage de notre recherche, le monde de l'aéronautique connaissait des bouleversements importants. La crise énergétique affectait lourdement cette industrie, et plus particulièrement les motoristes. Et, comme souvent lors de crises dans le domaine de l'énergie, les concepteurs des systèmes d'énergie sont pointés du doigt et des efforts conséquents sont attendus de leur part par les avionneurs et les opérateurs d'aéronefs (compagnies aériennes). L'industrie de l'hélicoptère n'échappe à cette remise en cause. En réponse à ces nouveaux enjeux, la thèse avait deux objectifs principaux : 1) analyser une méthode collaborative de conception innovante, la méthode KCP, qui avait été implémentée pour aider l'entreprise à gérer cette situation, et 2) et proposer des moyens managériaux et organisationnels pour pérenniser l'innovation radicale dans l'entreprise. C'est ce deuxième point qui nous a conduits à étudier les capacités d'innovation radicale dans l'entreprise.

Cette analyse devait nous permettre de mieux comprendre les éléments managériaux nécessaires à l'innovation de rupture dans un contexte très contraint comme l'est le monde de l'aéronautique. Cependant, d'après Le Masson et Weil (2010a, b) l'étude des capacités d'innovation de la firme nécessite une analyse approfondie remontant à l'histoire de l'objet de conception ainsi que des éléments organisationnels et contextuels ayant accompagné son émergence. Ainsi, l'analyse des bouleversements actuels concernant la turbine à gaz aéronautique et les moyens organisationnels pour la concevoir nous a conduits à revisiter l'histoire de cet objet, ainsi que l'histoire des capacités de conception innovante de Turbomeca, depuis sa création jusqu'à aujourd'hui.

La présente partie a pour objectif de qualifier et caractériser les capacités d'innovation radicale d'une entreprise établie. Dans le chapitre 3, sera développée une relecture de la genèse de la turbine à gaz aéronautique à travers la théorie C-K. Nous étudierons l'émergence de ce nouveau moteur, en nous focalisant sur son apparition en Angleterre. Cette relecture contribuera à la fois à nous familiariser avec cet objet qui est au centre des bouleversements que connaît Turbomeca aujourd'hui, mais aussi à comprendre les conditions d'apparition d'une innovation radicale. Nous proposerons, dans un deuxième temps, une relecture détaillée et approfondie de l'histoire de Turbomeca au travers de l'évolution de ses capacités d'innovation radicale depuis sa création jusqu'en 2009. Ce travail minutieux, qui nous a fait remonter aux études du fondateur, nous donnera un matériau très riche pour comprendre l'évolution des capacités de conception de l'entreprise au regard de l'évolution de ses moteurs. Par ailleurs, nous tenterons de saisir les données collectées au travers du cadre d'analyse D-I-M. Dans le chapitre 4, à partir de l'histoire de la turbine à gaz, nous développerons la notion de *potentiel d'innovation de rupture* pour comprendre les conditions

d'apparition d'un nouvel objet dans un écosystème donné. Puis, à partir de la généalogie des capacités d'innovation radicale, nous caractériserons trois périodes clés de la conception à Turbomeca, nous justifierons le potentiel explicatif de notre cadre d'analyse D-I-M. Finalement, cette généalogie nous permettra de comprendre et caractériser la situation d'innovation radicale de l'entreprise.

CHAPITRE 3

GÉNÉALOGIE DES CAPACITÉS DE CONCEPTION INNOVANTE À TURBOMECA

1. Méthodologie.....	101
1.1. Les premiers pas d'un objet : la genèse de la turbine à gaz en Angleterre 1928-1945... ..	102
1.2. Une généalogie des capacités de conception : la conception à Turbomeca 1945-2009... ..	103
2. Les premiers pas d'un nouveau moteur (Le Cas Whittle).....	107
2.1. Caractéristique de la turbine à gaz aéronautique	107
2.2. Limite du modèle de conception dominant	109
2.3. Efforts d'optimisation du modèle de conception dominant.....	111
3. La généalogie des capacités de conception innovante à Turbomeca.....	119
3.1. 1945-1955 : Szydlowski et l'héritage allemand de la Seconde Guerre mondiale, consolidation de la turbine à gaz aéronautique	123
3.1.1. Études et formation	123
3.1.2. 1938, la création de Turbomeca	128
3.1.3. La récupération des BE allemands et la naissance de la turbine à gaz française.....	130
3.1.4. La première Turbine à gaz de Szydlowski, TT782	132
3.1.5. L'ADN des moteurs de Turbomeca	133
3.2. 1955-1980 : le modèle exploratoire : des capacités d'essais pour universaliser la turbine à gaz.....	136
3.2.1. L'amélioration du générateur de gaz : l'expansion axiale.....	137
3.2.2. La génération de nouvelles variantes de moteurs : expansion radiale.....	144
3.2.3. Des moyens pour améliorer le cœur thermodynamique et explorer de nouvelles applications	150
3.3. 1980-2000 : la restructuration et l'orientation vers l'hélicoptère	159
3.3.1. La turbine à gaz, une technologie mature	160
3.3.2. L'arrivée de l'industrialisation unique : la disparition des capacités de prototypage.....	160
3.4. 2000-2008 : conception réglée et politique de démonstrateurs, principal vecteur pour l'innovation	164
3.4.1. Une stratégie monolignée, la turbine à gaz d'hélicoptère	164
3.4.2. Restructuration du processus de conception	165
3.4.3. Le renforcement de l'activité «démonstrateurs»	165
3.4.4. Un processus de conception unique	168
3.5. 2008 : Nouveaux défis et mise en place d'une démarche de conception innovante ..	171
3.5.1. Une prise de conscience de nouveaux défis par Turbomeca	171
3.5.2. Vers la réintégration de capacités de conception innovante : mise en place d'une démarche de conception innovante	180
Résumé du CHAPITRE 3 :.....	181

Dans ce chapitre, à travers l'histoire de la turbine à gaz et de Turbomeca, nous proposons une généalogie des capacités de conception innovante de l'entreprise. Ce chapitre vise, d'une part, à saisir les conditions d'apparition d'un nouvel objet, et, d'autre part, à comprendre la situation de l'entreprise en 2008 au travers de l'histoire de ses capacités de conception. Dans la première section nous détaillerons notre méthodologie de recherche. Nous présenterons ensuite l'histoire de la turbine à gaz au prisme de la théorie C-K. Théorie qui sera, avec le cadre d'analyse D-I-M, le fil conducteur de la dernière section qui retrace les capacités d'innovation radicale de Turbomeca depuis sa création à aujourd'hui.

1. Méthodologie

Cette analyse des capacités d'innovation radicale est le résultat d'une investigation de trois ans que nous avons eu l'opportunité de mener grâce au format de la thèse CIFRE. Ce format nous offrait un accès quasi illimité à des sources d'une grande richesse : la salle des archives de Turbomeca ainsi que de nombreux acteurs de l'entreprise ayant participé ou participant aux activités d'innovation de l'entreprise : experts, managers, directeurs, en activité ou retraités. Aussi, dans cette période de forte instabilité que rencontrait l'entreprise, nous avons l'avantage, via l'encadrement de la thèse CIFRE, de nous trouver aux avant-postes de la conception des systèmes d'énergie du futur dans le projet Propulsion 2030 piloté par le service des avant-projets de Turbomeca. Ainsi, nous avons la possibilité de confronter les nouveaux enjeux pour le futur de l'aéronautique aux données historiques tout au long de notre étude. Notre analyse historique des capacités d'innovation radicale s'est décomposée en deux étapes : la genèse de la turbine à gaz en Angleterre (1928-1945) et la conception à Turbomeca (1945-2009).

1.1. Les premiers pas d'un objet : la genèse de la turbine à gaz en Angleterre (1928-1945)

Au démarrage de l'étude, nous avions peu de connaissances sur les moteurs aéronautiques. Comprendre les tensions actuelles rencontrées autour de l'objet « turbine à gaz » impliquait de réétudier les conditions de son émergence. Pour cela, à partir d'archives et de récits sur les pionniers de ces moteurs, nous avons mis en évidence les éléments cognitifs et organisationnels qui accompagnèrent son apparition.

De nombreux travaux retracent cette histoire, (Golley, 2010; Golley, Whittle, & Gunston, 1996; Jones, 1989; Nahum, 2005; Smith, 1949; Whittle, 1953) mais l'un des plus précis est probablement celui de l'historien américain Constant II (1980). Ses travaux sont d'autant plus intéressants pour notre étude sur les changements technologiques, qu'ils se sont largement inspirés des théories faites par Kuhn (1962, 1970, édition française 1983) sur les ruptures dans les théories scientifiques. Cette mobilisation des théories sur les « ruptures épistémologiques » lui ont valu quelques critiques (Nahum, 2005), mais les éléments qu'il relate, notamment sur l'héritage de la TAGA ainsi que l'écosystème dans lequel elle émerge, n'en restent pas moins extrêmement riches. La turbine à gaz connut quatre protagonistes différents. Mais ceux ayant joué le plus grand rôle dans l'avènement de cette technologie sont

Hans von Ohain⁷ en Allemagne et Franck Whittle en Angleterre⁸. Notre étude s'est plus particulièrement focalisée sur l'histoire anglaise de la turbine à gaz, portée par ce dernier, un jeune prodige de l'aéronautique au Royaume-Uni. Bien que la turbine à gaz aéronautique ait connu deux origines géographiques différentes : Allemagne et Angleterre, le contexte de début de la Seconde Guerre mondiale impliquait des histoires strictement parallèles. Nous pouvions donc considérer l'expérience de Franck Whittle comme indépendante de celle de son homologue allemand Hans von Ohain.

Pour construire le fil conducteur de notre propos, nous avons reconstruit les chemins de conception et les héritages technologiques en nous appuyant sur la théorie C-K. Les cartographies C-K que nous avons pu ainsi reconstruire nous ont permis de mettre en évidence les éléments cognitifs et les paramètres de l'écosystème de Franck Whittle ayant conduit à l'émergence de la turbine à gaz. Aussi, l'utilisation de cette théorie du raisonnement de conception nous permettait de nous détacher de certains récits biographiques de l'inventeur surdoué.

1.2. Une généalogie des capacités de conception : la conception à Turbomeca 1945-2009

La deuxième démarche a consisté en l'analyse des capacités de conception innovante de Turbomeca en partant de l'histoire de son fondateur Joseph Szydlowski jusqu'à la période de démarrage de nos travaux de recherche en 2009.

La collecte des données était séparée en deux catégories : des données de seconde main et données de première main. Les premières ont été collectées à partir de la base d'archives de l'entreprise à laquelle nous avons un accès illimité, ainsi qu'à l'aide de plusieurs ouvrages retraçant le parcours du fondateur et de son entreprise. Ces documents comprenaient une biographie de Joseph Szydlowski (Decôme, 1999), le fondateur de Turbomeca de plusieurs centaines de pages, rédigées par un ancien cadre de l'entreprise ; un ouvrage collectif sous la direction de Charles Claveau (Claveau, 2008), directeur de la stratégie de Turbomeca et historien de l'aéronautique ; des articles de journaux sur le fondateur dont (Michelet, 1968) ainsi que de nombreuses archives ou documents internes concernant plusieurs périodes de l'entreprise ou des comptes-rendus de groupes de travail stratégiques sur les lignées de produits (Compte-rendu interne de la stratégie de Turbomeca, 1969; Ouvrage Collectif Interne Turbomeca, 1986, 1987, 1998). De même, nous avons eu l'opportunité d'avoir accès à

7 **Hans Joachim Pabst von Ohain** (1911-1998) était un ingénieur allemand et l'un des inventeurs de turboréacteur. Son premier concept tourna en 1937, et ce fut l'un de ses moteurs qui effectua le tout premier vol à réaction de l'histoire sur un Heinkel He 178, en 1939.

8 Les deux autres sont les Allemands Herbert Wagner et Hermut Schelp

une base de données très riche d'une dizaine d'articles de conférences et journaux du fondateur de Turbomeca qui, jusqu'à un âge très avancé, aura très activement participé aux débats scientifiques et industriels de l'aéronautique (Szydlowski, 1950, 1951, 1952, 1957, 1958, 1960, 1963, 1965, 1966, 1974a, b, c, 1975).

Cette collecte de données fut complétée par un ensemble d'interviews semi-directifs avec du personnel de l'entreprise en activité ou retraité. Au total, nous avons effectué 31 interviews semi-directifs, portant majoritairement sur des projets innovants en cours ou historiques, ainsi que sur les structures organisationnelles pour le développement de nouveaux produits. Ces entretiens furent réalisés avec des personnes d'une grande valeur pour notre recherche. Nous en citons ici quelques-unes :

- parmi les personnes à la retraite, nous avons eu l'opportunité d'interviewer un ancien ingénieur et un ancien ingénieur navigant ayant travaillé l'ensemble de leur carrière au centre d'essais en vol de l'entreprise ; un ingénieur à l'origine de la régulation électronique puis numérique à Turbomeca ayant permis à l'entreprise d'être la première à développer des moteurs d'hélicoptère dotés d'une telle technologie ; un ancien expert des avant-projets à l'origine de plusieurs architectures moteur de l'entreprise ; le premier responsable de l'atelier de fabrication des moteurs prototypes qui finit sa carrière comme directeur de la fabrication (l'un des deux postes les plus importants dans l'aéronautique avec celui de directeur technique)...
- Parmi les personnes en fonction nous avons pu interroger un grand nombre d'experts reconnus dans la filière expertise de Safran, ayant participé à d'anciens projets de démonstrateurs ou des projets de développement de variantes moteurs ; le directeur de la stratégie C. Claveau, historien et rédacteur de l'ouvrage collectif de Turbomeca ainsi que de nombreux articles dans les revues internes de l'entreprise ; le responsable du département intégration, bras droit du directeur technique, auteur d'articles sur la turbine à gaz et responsable des architectures de nombreux nouveaux moteurs et démonstrateurs depuis les années 80 ; des responsables R&T et des avant-projets ayant un double point de vue sur le fonctionnement historique et les nouveaux enjeux pour le futur de l'entreprise ; un responsable des financements des nouveaux moteurs à la direction technique ; le responsable du département des essais pour la recherche et développement...

Le guide d'entretien a été inspiré des travaux de thèse de S. Hooge (2010) – voir Encadré 3. Pour ces guides d'entretien nous avons adopté volontairement un cadre assez large, afin de

collecter une part importante de l'expérience des personnes interviewées. Nous avons limité nos entretiens aux personnes clés ayant participé aux projets innovants. Ainsi, la série d'entretiens s'est achevée quand nous avons interviewé l'ensemble de ces personnes.

Guides d'entretien pour les projets innovants

- Écosystème du projet
 - Historique du projet
 - Histoire du concept et genèse du projet
- Processus de développement
 - Partenaires impliqués dans le projet
 - Définition de la valeur
 - Jalons du projet
- Montage du financement du projet
 - Outils et méthodes utilisés
 - Impact SAFRAN sur le financement du projet
- Acquisitions et partage des connaissances
 - Méthodes d'acquisition des nouvelles connaissances
 - Partage des connaissances en interne
 - Moyens de production de connaissances nouvelles
 - Capitalisation et retombées hors projet
- Interaction du groupe dans le projet et dans l'entreprise
 - Flexibilité de l'environnement de travail
 - Modalités d'adhésion autour du projet
 - Appropriation du concept
- Incertitudes projets innovants
 - Protection et/ou valorisation du projet
 - Notion de prise de risque/ acceptation de l'erreur
 - Flexibilité d'attribution des ressources

Encadré 3 - Guide d'entretien semi-directif

Les données collectées ont ensuite été étudiées avec le cadre d'analyse D-I-M (Design, Incubation, ecosysteM) décrit dans la partie précédente. Ce cadre théorique nous a permis de reconstruire l'évolution des capacités d'innovation de l'entreprise depuis sa création à nos jours. De même, à travers ce cadre, nous avons été à même de mettre en évidence les capacités que l'entreprise doit déployer pour s'adapter à des contextes bien spécifiques.

Le Tableau 6 ci-dessous résume notre méthodologie, en mettant en avant le matériel étudié, le cadre d'analyse ainsi que les résultats attendus pour chacune de nos deux parties : 1) premiers pas de la turbine à gaz ; 2) généalogie des capacités de conception innovante de Turbomeca.

<u>Objet étudié</u>	<u>Matériel</u>	<u>Cadre d'analyse</u>	<u>Résultats</u>
1) Les premiers pas de la turbine à gaz	- Ouvrages d'histoire des technologies et des sciences (Constant, 1980; Kuhn, 1962, 1970, édition française 1983; Pacey, 1992) - Biographies des précurseurs de la turbine à gaz (Golley, 2010; Golley et al., 1996; Jones, 1989; Nahum, 2005; Smith, 1949; Whittle, 1953)	Théorie C-K	Mise en évidence du phénomène du « potentiel d'innovation de rupture »
	- Articles de journaux sur l'histoire du turboréacteur (Constant, 1983) - 31 <u>entretiens</u> semi-directifs : managers, experts, <u>responsables R&T</u> , directeurs retraités, responsables <u>retraités</u> des anciennes entités de prototypage rapide de Turbomeca.		
2) Généalogie des capacités de conception innovante à Turbomeca	- <u>Biographies du fondateur</u> de Turbomeca (Decôme, 1999; Michelet, 1968) - Documents et <u>ouvrages collectifs internes</u> de l'entreprise (Claveau, 2008; Compte-rendu interne de la stratégie de Turbomeca, 1969; Ouvrage Collectif Interne Turbomeca, 1986, 1987, 1998) - <u>Articles de journaux et conférences du fondateur de Turbomeca</u> (Szydlowski, 1950, 1951, 1952, 1957, 1958, 1960, 1963, 1965, 1966, 1974a, b, c, 1975)	Cadre d'analyse D-I-M et Théorie C-K	Proposition d'un « <i>cadre interprétatif de capacités d'innovation radicale</i> »

Tableau 6 – Méthodologie d'analyse des capacités de conception innovante

2. Les premiers pas d'un nouveau moteur (Le Cas Whittle)

Ce paragraphe a pour objectif de comprendre les conditions d'apparition d'une nouvelle classe d'objet dans les toutes premières phases de conception. Nous étudierons, ici, l'émergence d'une nouvelle classe de moteur⁹ liée à l'histoire de Turbomeca : la turbine à gaz. Il existe plusieurs manières de catégoriser les moteurs : combustion interne ou externe, à piston ou sans piston, électrique ou non... Ces classifications sont très diverses et selon les critères retenus par les experts, un moteur peut se trouver classé dans une catégorie ou une autre. L'idée ici ne sera donc pas de classer la turbine à gaz, mais d'observer les attributs et les connaissances dont elle a hérité d'autres classes d'objets, ainsi que le contexte qui a permis son émergence. Ainsi, à travers l'histoire F. Whittle, un jeune prodige de l'aéronautique anglaise, nous retracerons le raisonnement de conception et les éléments de l'écosystème ayant favorisé l'apparition de la turbine à gaz aéronautique. Il est à noter que la turbine à gaz aéronautique contient plusieurs dérivés, mais c'est la lignée des turboréacteurs qui a d'abord émergé et donné naissance à toutes ces variantes citées plus bas. Nous relaterons donc, dans ce paragraphe, l'émergence des turboréacteurs dans la première moitié du XX^e siècle.

2.1. Caractéristique de la turbine à gaz aéronautique

Dans un premier temps, apportons quelques précisions sur la turbine à gaz aéronautique. La turbine à gaz est un moteur composé 1) d'un générateur de gaz, fournissant des gaz chauds et à haute pression et 2) d'un module, une tuyère ou une turbine, transformant ces gaz respectivement en énergie cinétique ou en énergie mécanique de rotation. Il est important pour notre étude de différencier la turbine à gaz terrestre mobile ou industrielle, de la turbine à gaz aéronautique (TAGA). En effet, les contraintes sur la seconde classe sont autrement plus importantes que sur la première, du fait qu'elle est destinée à des applications volantes, ceci impliquant des exigences sévères en termes de masse et de sécurité. La TAGA est une classe de moteur comprenant le turboréacteur, le turbomoteur, le turbopropulseur et les auxiliaires de puissance. Le premier est utilisé pour fournir de la poussée pour avion à voilure fixe (avion A320, etc.) ; le turbomoteur fournit une puissance mécanique au rotor de l'hélicoptère ; le turbopropulseur, quant à lui, fournit aussi une puissance mécanique, mais à

⁹ Un moteur est une machine transformant de l'énergie en mouvement mécanique utile. Plus précisément, elle permet de mettre en mouvement de la matière en y apportant de la puissance.

l'hélice d'un avion à voilure fixe (A400M) ; et enfin, le dernier peut-être considéré comme un générateur d'énergie électrique et/ou pneumatique embarqué dans les avions.

Sur la Figure 9 ci-dessus, nous avons construit une représentation de la turbine à gaz à turbine libre : 1) un générateur de gaz composé d'un compresseur, d'une chambre de combustion et d'une turbine produit des gaz chauds et à haute pression ; 2) qui est détendu dans un module qui produit, soit de l'énergie mécanique de rotation (turbine), soit de l'énergie cinétique (tuyère), et ainsi peut-être déclinée sur de nombreuses applications : avion à réaction, avion à hélice, hélicoptère, génération d'électricité embarquée ou non.

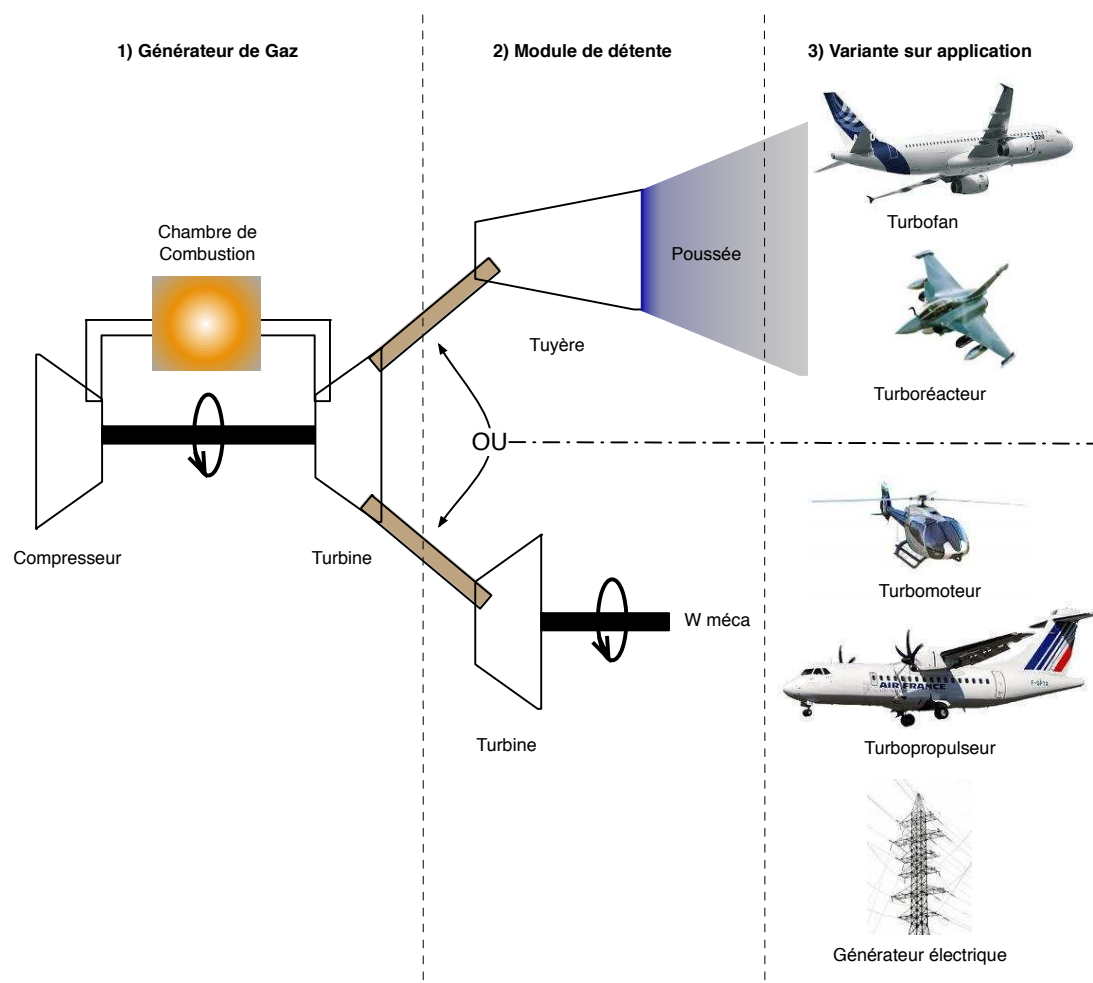


Figure 9 – le générateur de gaz et quelques-unes de ses applications

2.2. Limite du modèle de conception dominant

Dans un premier temps, il faut comprendre le contexte dans lequel est apparu le turboréacteur. Dans l'entre-deux-guerres, le premier vol des frères Wright faisait déjà partie d'un passé lointain. L'intérêt stratégique de l'aviation a largement été démontré par le conflit mondial de 14-18, à tel point que le traité de Versailles de 1919 interdit à l'Allemagne de développer et disposer d'une aviation militaire. Interdiction qui sera d'ailleurs très largement transgressée quelques années plus tard par le régime Nazi. De plus, à cette époque, nombreux étaient ceux qui pensaient que la grande période des révolutions aéronautiques était terminée. D'après Decôme (1999), le gouvernement français déployait encore, dans les années 1930, des politiques de développement de l'aéronautique basées sur des architectures aéroplanes de la Première Guerre mondiale. Les avions de l'époque suivaient un modèle de conception dominant (Anderson & Tushman, 1990), établi depuis près de vingt ans, et dont l'architecture était très fortement conçue autour de la motorisation : moteur à piston et hélice. Constant II (1980) évoque d'ailleurs le contexte aéronautique dans lequel apparut le turboréacteur en ces termes : « *The turbojet revolution occurred, then, not in face of a failed or discredited normal technology, but within a deeply committed community which by its own efforts had created one of the most spectacular and successful of modern technologies.* » Bien évidemment, comme toute technologie, le moteur à piston et hélice avait des limites technologiques, mais la grande expertise des bureaux d'étude de l'époque engagea des efforts considérables pour y remédier et rendre la technologie toujours plus performante.

Pourtant, ces limites technologiques ouvrirent tout de même une brèche dans laquelle s'engouffrèrent les protagonistes du turboréacteur. D'après Constant II (1983), trois grands travaux dans le domaine de l'aérodynamique peuvent être considérés comme déclencheurs des premiers concepts de turboréacteurs.

- 1) Les travaux sur les écoulements turbulents de B.M. Jones¹⁰ (Jones & Trevelyan, 1925) puis de T. von Karman¹¹ (von Karman, 1930) – travaux bien antérieurs à ces deux publications. Ils ont montré non seulement que les avions perdaient deux tiers

¹⁰ **Bennett Melvill Jones** (1887-1975), était un professeur d'aéronautique à l'université de Cambridge de 1919 à 1935. Il démontra l'importance des lignes de courants pour le dimensionnement des aéronefs. L'idée qu'un corps en mouvement dans un fluide rencontrait de la résistance était connue depuis Aristote, mais il démontra son importance dans le dimensionnement des avions.

¹¹ **Theodore von Karman** (1881-1963), était un ingénieur et physicien hongrois et américain. Il était spécialisé en aéronautique et notamment directeur du Jet Propulsion Laboratory

de leur puissance à lutter contre des effets turbulents indésirables, mais aussi, qu'en modifiant leur architecture, ils pourraient doubler leur vitesse. Ces conclusions étaient structurantes, car étant données les vitesses de vol déjà élevées de l'époque, un peu plus de 300 km par heure, les doubler tendrait vers les limites potentielles des moteurs à piston. En effet, l'industrie de l'époque ne savait pas faire des moteurs à piston ayant le rapport puissance sur masse nécessaire.

- 2) Les travaux entrepris par A. Griffith¹² (Griffith, 1926). Il avait considérablement modifié les pales des compresseurs axiaux en appliquant une nouvelle théorie développée par L. Prandtl¹³. Il avait en effet remarqué les limites de la modélisation hydrodynamique des écoulements à travers une conduite pour étudier les compresseurs et turbines, en ce sens qu'elle ne permettait pas de prendre en compte l'énergie ajoutée ou retirée au fluide. Ces travaux eurent pour conséquence d'améliorer significativement l'efficacité des composants des turbomachines et donc, par la suite, de pouvoir penser des turbines à gaz à rendement élevé.
- 3) Les travaux sur les écoulements supersoniques qui permettaient de démontrer le seuil des hélices à haute vitesse. Ils montraient que des vitesses en bout de pale des hélices, par l'addition de la vitesse de déplacement élevée de l'avion à la vitesse de rotation de l'hélice, impliqueraient des perturbations très importantes pour des vitesses proches de la vitesse du son. L'impact de ces études fut déterminant, car elles remettaient en question le moteur à piston quelle que fût l'amélioration de son rendement ou de sa puissance, tant qu'il restait associé à une hélice. Ceci eut une influence importante pour la génération des premiers concepts des ingénieurs qui penseront dans un premier temps à supprimer les hélices.

En résumé, dans l'entre-deux-guerres, la communauté aéronautique était face à une technologie arrivant à maturité et qui, en théorie, ne pouvait pas suivre l'évolution des applications pour laquelle elle était développée. En fait, les scientifiques montraient que l'on pouvait améliorer les applications de l'époque pour atteindre des vitesses deux fois

¹² **Alan Arnold Griffith** (1893 – 1963) était un ingénieur anglais, connu pour avoir été le premier ingénieur anglais à développer des bases théoriques solides sur les turbines et compresseurs axiaux.

¹³ **Ludwig Prandtl** (1875 – 1953) était un scientifique allemand. Il était pionnier dans le développement d'analyses rigoureuses mathématiques pour les sciences de l'aérodynamique. Il est notamment à l'origine de la théorie de la couche limite.

supérieures. Il semblait donc nécessaire de travailler à l'amélioration des moteurs à piston pour qu'ils fournissent des puissances spécifiques toujours plus importantes. Mais les hélices ne pouvaient évoluer à des vitesses importantes. Et pourtant, l'analyse historique montre que l'industrie en place n'a pas tenté de trouver des alternatives au moteur à piston et hélice. Bien au contraire, nous soulignerons qu'elle a concentré tous ses efforts sur son optimisation.

2.3. Efforts d'optimisation du modèle de conception dominant

Dans les années trente, le moteur à pistons aéronautique possédait déjà les critères d'amélioration actuels : puissance utile, puissance spécifique et puissance massique, consommation spécifique, altitude et vitesse atteinte. Pour donner un ordre de grandeur des travaux des bureaux d'études de l'époque sur les moteurs à piston, nous pouvons fournir quelques chiffres issus de l'ouvrage de Constant II (1980). Entre 1912 et 1944, la puissance spécifique fut multipliée par quatre, et de 1928 à 1944, la consommation spécifique diminua de 25 %. Ainsi, de grands efforts étaient fournis pour améliorer le modèle de conception dominant de cette industrie. Il faut noter aussi que la compréhension de la composition des carburants et leur amélioration était pour beaucoup dans ces performances. Mais ces performances atteignaient des limites importantes, notamment sur les points de fonctionnement à haute altitude. Et bien que les suralimenteurs¹⁴ de type turbocompresseurs aient permis d'augmenter la pression d'entrée du moteur à pistons, ils avaient eux-mêmes un rendement qui chutait avec l'altitude.

Dans la cartographie CK de la Figure 10, nous avons modélisé les chemins de conception empruntés par l'industrie de l'aéronautique pour faire perdurer sa technologie de motorisation aéronautique. Dans, l'espace C, nous avons mis en évidence (en gras) le chemin : moteur à piston et hélice avec suralimentation, illustrant donc la voie privilégiée par l'industrie. En d'autres termes, à cette période, pour motoriser un aéronef à haute vitesse et haute altitude, l'industrie aéronautique n'avait d'autres voies que celle du moteur à piston suralimenté. Dans l'espace des connaissances, les quatre poches représentées sont celles relatives au moteur à piston, à l'hélice et son application, ainsi qu'au turbocompresseur alimentant le moteur. Nous souhaitons les mettre en évidence car ces connaissances, très structurantes pour le moteur à piston, furent à la fois des technologies dont allait hériter la TAGA (notamment les matériaux,

¹⁴ La suralimentation est une compression de l'air avant son entrée dans le moteur lui permettant d'ingérer plus d'air pour la même cylindrée et donc de brûler plus de carburant. Ceci permet d'augmenter la puissance à une vitesse de rotation donnée.

turbines et compresseurs) mais qui allaient s'avérer aussi être des freins cognitifs importants parmi la communauté aéronautique (notamment les applications avion postal et bombardier).

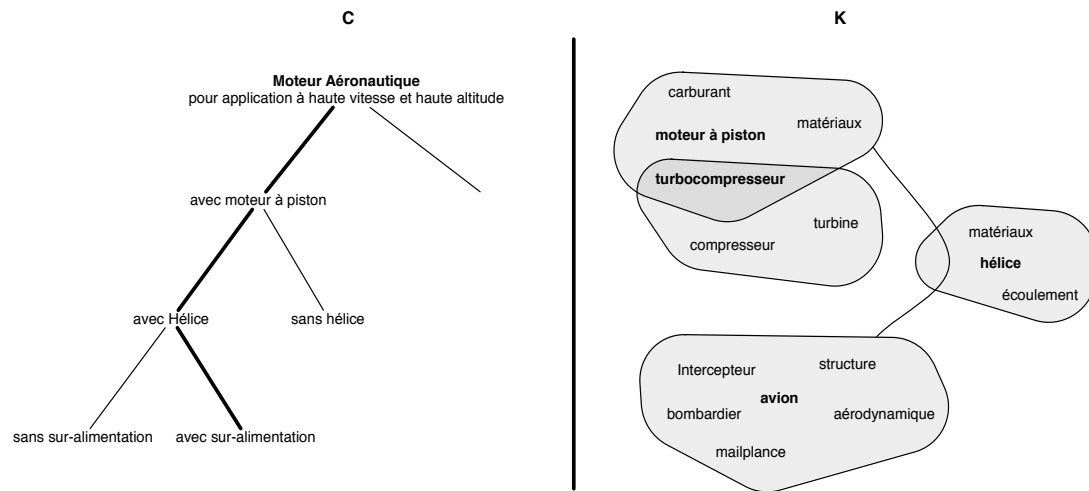


Figure 10– Cartographie CK de conception du moteur aéronautique pour application haute vitesse et haute altitude avant la TAGA.

En parallèle de ce modèle de conception dominant, en réponse aux constats faits précédemment, une classe d'objets apparut : la turbine à gaz aéronautique. Celle-ci bénéficia des travaux de l'énergétique sur tous les moteurs et des théories scientifiques et technologies qui leur étaient associées.

Afin de clarifier notre propos, nous avons reconstruit une cartographie - Figure 11- - à l'aide de la théorie CK pour catégoriser les moteurs dont a hérité la turbine à gaz. Cette figure est indépendante de la présente. Elle illustre, dans l'espace C, deux chemins bien distincts comprenant l'un les moteurs à piston et l'autre les turbines. Dans ce dernier, c'est le chemin « avec chambre de combustion » interne qui mena à la turbine à gaz moteur qui fut d'abord utilisé pour des applications fixes (génération d'électricité). Dans l'espace des connaissances, cinq objets majeurs ont contribué à l'héritage technologique et scientifique de la turbine à gaz (Constant, 1980) : les turbines et pompes à eau, les turbocompresseurs, les turbines à vapeur, les turbines à gaz à combustion interne et les turbocompresseurs. Les avancées faites notamment dans le monde de l'aérodynamique et des matériaux autour de ces objets bénéficièrent largement aux précurseurs de la TAGA.

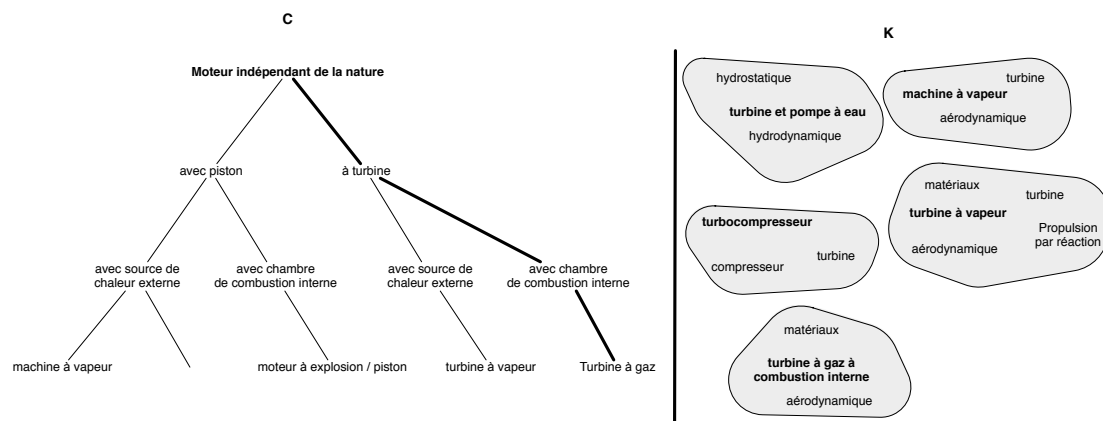


Figure 11– Représentation avec la théorie C-K de l'héritage de la turbine à gaz aéronautique

Les historiens ont retracé l'émergence de la TAGA à travers la vie de quatre personnes, mais ce sont surtout Hans Von Ohain (Conner, 2001) et Franck Whittle qui ont marqué plus particulièrement son histoire. Bien que Turbomeca héritât plus tard des travaux entrepris par les ingénieurs allemands sur cette technologie, nous nous intéresserons au cas de Whittle. En effet, des quatre, il est celui qui connut l'expérience la plus intéressante pour illustrer les aléas de l'émergence d'un nouveau moteur. De plus, compte tenu du contexte politique de l'époque, ce cas peut être traité et considéré comme indépendant, car les ingénieurs allemands et anglais n'avaient aucune connaissance de leurs travaux respectifs. L'apparition de la TAGA se faisait donc simultanément en Angleterre et en Allemagne.

Franck Whittle était un homme doué en sciences aéronautiques, mais aussi expert en pratique comme pilote de la Royal Air Force. L'ensemble des biographies de Sir F. Whittle dressent un portrait classique de l'innovateur aéronautique de l'époque (Golley, 2010; Golley et al., 1996; Whittle, 1953) : un homme connaissant très bien les théories scientifiques de son domaine, un fin connaisseur du vol en tant que pilote de la RAF, mais aussi un homme ayant un certain goût du risque. Sa manière de piloter très engagée lui valut d'ailleurs quelques remontrances par les officiers de l'armée britannique, qui faillirent même lui valoir la cour martiale.

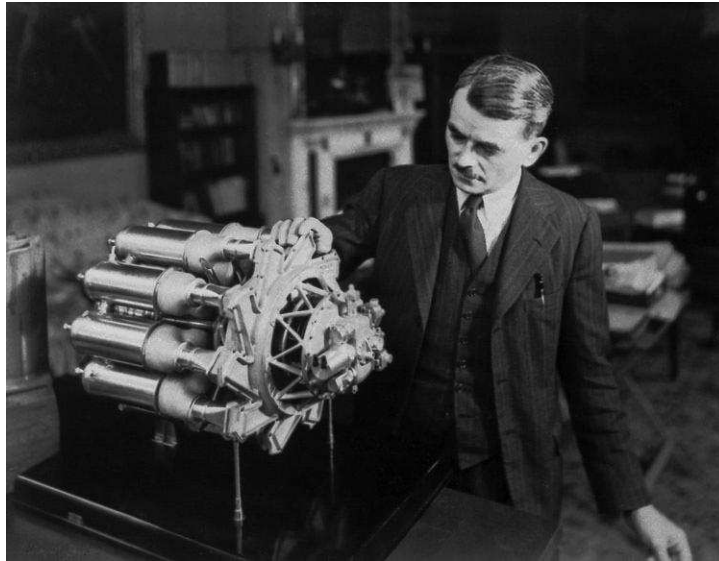


Figure 12– F. Whittle devant une maquette d'un de ses concepts de turboréacteur

Alors qu'il n'avait même pas connaissance des travaux anglais sur les turbopropulseurs publiés par A.A. Griffith (1926), il formula son premier concept de moteur seul. En revanche, il maîtrisait les dernières avancées théoriques de l'aéronautique grâce au Master qu'il effectuait à Cranfield, université pionnière dans ce domaine.

Son mémoire fut intitulé, *Future Development in Aircraft Design*, un titre annonciateur quand on connaît l'impact qu'eurent ses travaux dans le monde de l'aviation. **À 21 ans seulement, il annonçait déjà que l'avenir de l'aéronautique serait dans le vol à haute vitesse et haute altitude.** Dans son mémoire, il soulignait deux points importants : le premier était qu'un avion volant à haute altitude pouvait avoir une vitesse plus importante grâce à une densité de l'air plus faible ; le second que la température plus basse à haute altitude avantagerait le moteur à piston. De ce fait, le premier moteur auquel avait pensé Whittle utilisait bien la propulsion par réaction, attributs majeurs du turboréacteur, mais avec **un moteur à piston !** Dans la cartographie Figure 13, nous l'avons placé dans la branche « avec moteur à piston sans hélice ».

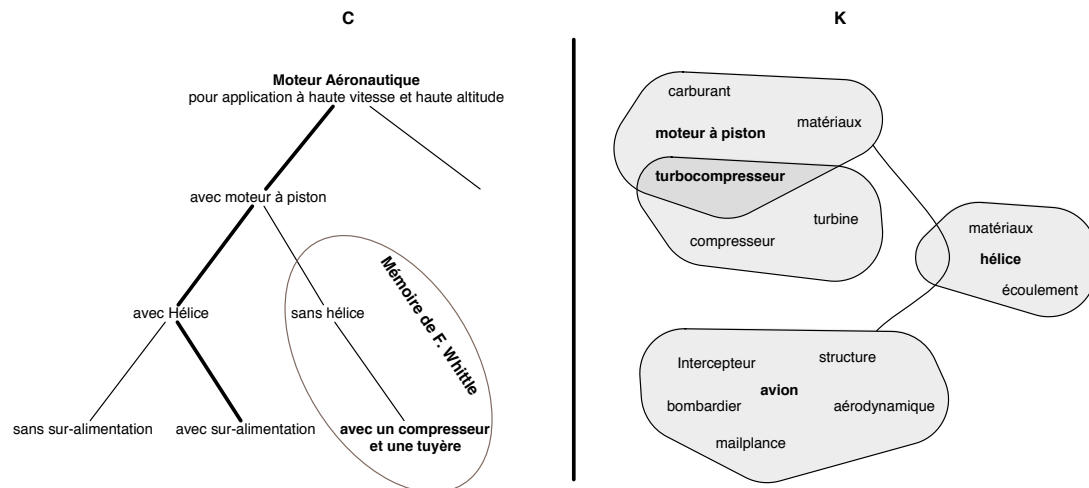


Figure 13 - Cartographie CK de conception du moteur aéronautique h. vitesse et altitude dans le mémoire de F. Whittle

Il avait donc bien pris en compte les travaux sur les limites des vitesses en bout de pale et pensait ainsi s'affranchir de l'hélice au profit de la tuyère. Toujours dans ce même mémoire, il avait également proposé la propulsion par fusée, mais avait finalement opté pour un concept à 800 km/h avec le moteur à piston plus tuyère : le motorjet. Mais la turbine à gaz vint très vite remplacer le moteur à piston dans ses travaux ultérieurs sur son concept.

En effet, il s'intéressait de près à la turbine et savait que c'était le meilleur moteur d'entraînement - dans son sens anglais *prime mover* (Nahum, 2005). En effet, alors que la turbine à vapeur avait peu d'avenir pour des applications aéronautiques en raison du poids du fluide et des modules de changement d'état associés, il était convaincu qu'une turbine actionnée en brûlant du pétrole pouvait avoir un grand intérêt. Des calculs plus approfondis sur son motorjet mirent en évidence que ce moteur aurait un poids équivalent à celui des moteurs classiques. C'est ainsi que lui vint l'idée d'alimenter le compresseur avec une turbine de la même manière que dans les turbocompresseurs utilisés sur les moteurs à pistons. Son raisonnement était qu'avec la diminution de la pression à haute altitude, le rendement global du moteur serait augmenté. Il pensait notamment à l'appliquer à l'avion postal anglais. **Son concept était très prometteur, car « l'idée était de générer 2000 h.p. en ne faisant tourner qu'une seule pièce ! »** (Nahum, 2005).

La cartographie CK Figure 14 ci dessous est une extension de la cartographie CK Figure 13 précédente. Dans celle-ci nous mettons en évidence le cheminement qui mène au concept de Whittle ; un concept ne possédant plus aucun attribut de la motorisation de l'époque : un moteur pour les applications à haute altitude et haute vitesse *sans moteur à piston sans hélice*

avec une tuyère. Ce cheminement illustre la rupture conceptuelle que représentait ce nouvel objet dans le monde de l'aéronautique : dans le turboréacteur, tout diffère du moteur à piston : l'hélice est supprimée et remplacée par une tuyère ; le cycle thermodynamique sous-jacent n'est plus le même¹⁵ ; les composants assurant ce cycle sont non plus le trio historique piston-bielle-vilebrequin, mais un ensemble nouveau compresseur-chambre-turbine ; et enfin, la combustion devient une combustion à pression constante au lieu d'une combustion à volume constant. Il est à noter que l'espace des connaissances est totalement réorganisé autour des nouveaux moteurs : turboréacteur et turbopropulseur notamment. Les hélices demeurent en association avec la turbine à gaz, mais pour des vols moins rapides et nous le verrons par la suite, les applications associées seront complètement renouvelées. Ce moteur était conceptuellement complètement nouveau et Whittle eut rapidement besoin de le tester pour démontrer son efficacité. Il réussit à trouver une source de financement pour concevoir son nouveau prototype.

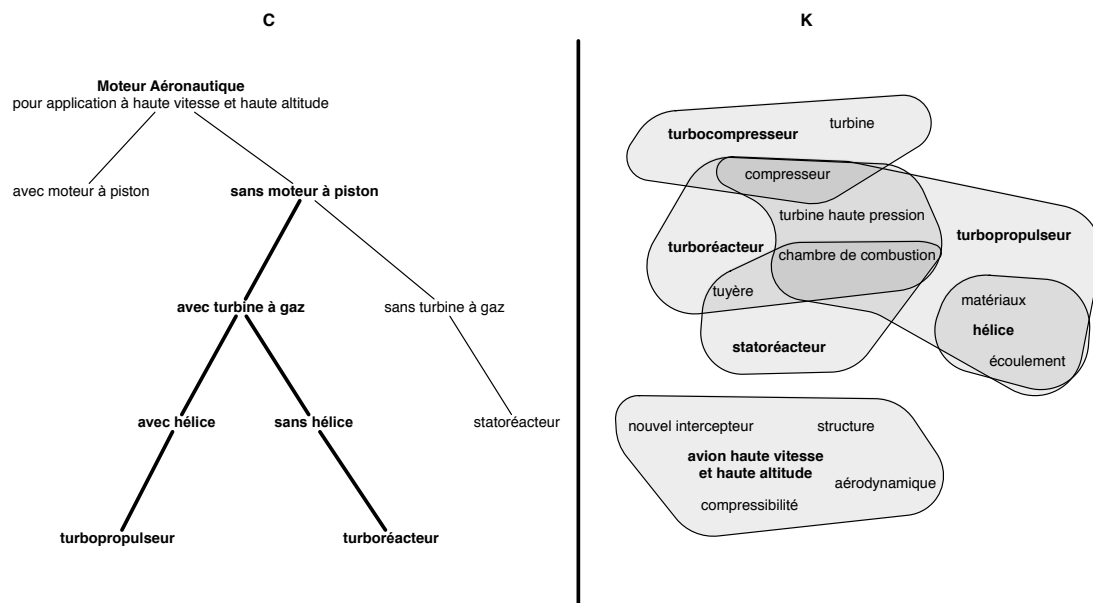


Figure 14 - Cartographie CK de conception du moteur aéronautique h. vitesse et altitude avec turbine à gaz

Afin d'avoir un avis sur ce dernier, la Royal Aircraft Establishment lui conseilla de le présenter à A.A. Griffith, qui, en raison des travaux qu'il avait effectués sur le turbopropulseur (l'entraînement d'une hélice avec une turbine à gaz), était le scientifique anglais le plus avisé du domaine. Griffith fit un rapport sur le moteur de Whittle dont les points majeurs étaient les suivants : rendement du compresseur centrifuge trop faible, rapport

¹⁵ Dans le moteur à piston, le cycle thermodynamique est le cycle Beau de Rochas, dans la turbine à gaz il se nomme le cycle de Joule-Brayton

masse sur puissance trop faible, et pouvant être valorisé pour des applications à haute altitude et haute vitesse uniquement. Ce rapport conclut : « *The jet propulsion cannot compete with a conventional power plant in any case where economical flight is demanded (transport of the maximum percentage of useful load over a given distance) : bombardier, mailplane.* » Griffith, à travers ce document condamne le turboréacteur pour les applications aériennes conventionnelles de l'époque. En effet, la consommation étant largement supérieure à celle du couple moteur à piston et hélice conventionnel, le réservoir de carburant en était affecté, et donc la charge utile fortement dégradée. Or, il faut bien comprendre que le modèle de performance de ces avions était justement corrélé à ce critère. A l'époque, la communauté aéronautique pensait que plus un bombardier avait de bombes, plus il avait de chances de neutraliser son ennemi et d'ainsi s'en sortir indemne ; quant à l'avion postal, il avait un modèle d'affaires calqué sur la masse embarquée.

Le rapport met donc clairement en évidence les tensions auxquelles Whittle devait faire face avec une technologie qui, d'une part, ne pouvait trouver une application aéronautique à l'époque et, d'autre part, se confrontait directement avec le modèle de conception dominant du moteur à piston aéronautique. Pourtant, Griffith travaillait justement à cette époque sur des concepts de TAGA actionnant une hélice : le turbopropulseur (Nahum, 2005) mais son raisonnement pour l'évaluation de ce nouveau concept restait limité aux applications aéronautiques conventionnelles.

Néanmoins, le potentiel de valeur apporté par la haute altitude et la haute vitesse ne laissa pas l'ensemble de la communauté scientifique anglaise indifférente. Griffith n'avait en fait pas toutes les cartes en main pour évaluer le potentiel de cette nouvelle technologie, et c'est Henri Tizard¹⁶, une figure importante de l'Aeronautical Research Committee, qui joua un rôle clé dans l'avènement de l'entreprise de Whittle : il vit un intérêt à voler plus vite et plus haut malgré un rapport puissance sur masse plus important et une consommation dégradée ! À l'époque, Tizard avait une avance sur ses collègues de l'aéronautique grâce au vaste programme de recherche dans lequel il était impliqué : le radar. En fait, il possédait une vision stratégique qui allait bien au-delà de la technologie de radar. Avant même que cette dernière fût au point, il pensait déjà au rôle clé que pourraient jouer les avions intercepteurs dans la défense du ciel anglais. « Biggin hill trials », un projet expérimental d'interception guidée, avait pour objectif de repenser ces aéronefs. Le changement conceptuel qui allait s'opérer est

¹⁶ **Henri Tizard** (1895-1959) était un chimiste et inventeur anglais, il est connu pour avoir participé au développement du projet de radar avant la 2^{ème} guerre mondiale en tant que Chairman du Aeronautical Research Committee

le suivant : avant l'arrivée du radar, l'avion de défense devait être prêt à intervenir à une certaine altitude pendant de longues périodes. Ceci impliquait donc d'avoir la meilleure consommation de carburant possible (Nahum, 2005). Avec l'arrivée du radar, ce projet montrait justement que les critères de performance de l'intercepteur allaient s'inverser : désormais, l'intercepteur devrait attendre au sol la détection des bombardiers par les radars et monter le plus rapidement possible à l'altitude nécessaire pour les intercepter. Tizard savait qu'il fallait se focaliser sur des moteurs fournissant une vitesse et un taux de montée les plus élevés possible même si cela induisait une consommation de carburant plus importante. Ces critères de performance étaient justement ceux que Whittle associait au turboréacteur et prônait dans son mémoire de master. Ainsi, sur la cartographie Figure 14 ci-dessus, nous avons associé la poche de connaissance sur les avions au nouvel intercepteur, et non plus au bombardier et à l'avion postal.

Ces nouveaux critères de performance en tête, Tizard devint un promoteur du développement de cette technologie, ainsi qu'un soutien important dans la création de Power Jets par Whittle, la première entreprise de turboréacteurs au monde. En 1941, le moteur développé par Power Jets fut utilisé sur le premier intercepteur à réaction anglais, le Gloster E. 28/39, une dizaine d'années seulement après la thèse de Whittle et quelques centaines de prototypes plus tard. Par la suite, Power Jets connut une histoire difficile, mais au sortir de la guerre, ces travaux et ceux des Allemands avaient révolutionné l'aéronautique. À la fin de la guerre, l'intérêt de la turbine à gaz pour des applications aéronautiques était partagé par tous. Le paragraphe suivant relate à travers l'histoire de Joseph Szydlowski comment Turbomeca est devenu un acteur dans le monde de ce nouveau moteur.

Résumé

Entre les deux guerres, le moteur à piston et hélice était le modèle de conception dominant de l'aéronautique. Néanmoins, des travaux des aérodynamiciens ouvraient une brèche pour la turbine à gaz aéronautique grâce à trois arguments majeurs : 1) le potentiel des architectures avions qui pourraient doubler leur vitesse mais dont la puissance sur masse nécessaire dépassait celle des moteurs à piston 2) des limites des vitesses en bout de pales des hélices qui remettaient en question les moteurs à piston et hélice pour y arriver 3) des travaux théoriques aérodynamiques permettaient très sérieusement d'envisager des turbines à gaz à haut rendement.

Franck Whittle fut le premier à proposer un concept de turbine à gaz aéronautique : un turboréacteur. Il proposa de s'affranchir de l'hélice pour effectuer la propulsion en utilisant une détente de gaz dans une tuyère. Il supprima aussi le moteur à piston au profit d'une turbine à gaz. Son nouveau concept était donc une turbine à gaz pour générer des gaz chauds à haute pression qui seraient détendus dans une tuyère.

Son premier prototype fut mal reçu par la communauté aéronautique. L'intervention de Tizard, impliqué dans le projet militaire de radar proposant une nouvelle application, permit de valoriser le potentiel du concept. Ainsi, la rupture dans l'énergétique implique une révision profonde des usages historiques.

En conclusion, l'analyse historique montre que l'apparition d'un nouveau moteur porte à la fois 1) un nouveau concept de transformation de l'énergie 2) une (re) conception de son application 3) une révision des critères de performance du modèle de conception dominant.

3. La généalogie des capacités de conception innovante à Turbomeca

Après avoir considéré l'héritage technologique, les chemins de conception et le contexte ayant soutenu l'apparition de la turbine à gaz aéronautique, nous étudierons dans la présente section l'évolution des capacités de conception innovante de Turbomeca autour de cet objet. Cette section, à travers une relecture de l'histoire de Turbomeca, a pour objectif de comprendre la situation d'innovation radicale de l'entreprise en 2008. Tout au long de cette partie, nous utiliserons la théorie C-K et le cadre d'analyse D-I-M pour rendre compte de l'évolution des capacités de conception innovante au regard de l'évolution des produits de l'entreprise. Ce travail permettra enfin de fournir un matériau important pour saisir les caractéristiques de l'organisation pour la conception vis-à-vis de trois périodes clés.

Tout d'abord, proposons ici un résumé de l'histoire de Turbomeca. L'entreprise fut fondée en 1938 par Joseph Szydlowski¹⁷ pour exploiter des brevets de turbocompresseur pour moteur à piston. Après la Seconde Guerre mondiale, il participa à une large opération de récupération des experts allemands de l'aéronautique, qui lui apporteront la connaissance nécessaire à la conception de son premier moteur : une turbine à gaz aéronautique. Dès lors, il déploiera des efforts conséquents pour valoriser ce moteur et l'utiliser sur le plus grand nombre d'applications possibles et ainsi transformer Turbomeca en un des plus grands motoristes aéronautiques de son domaine. Après sa mort en 1988, Turbomeca fit perdurer cette expertise sur la turbine à gaz, notamment pour les applications hélicoptères. C'est justement sur cette dernière application que se focalisa Turbomeca exclusivement à partir des années 2000, pour enfin devenir le leader mondial de la motorisation d'hélicoptère. Cependant, la crise financière de 2007 et les nouveaux enjeux environnementaux (augmentation du prix du pétrole, nouvelles normes environnementales) déclenchèrent une prise de conscience du besoin de préparer différemment l'arrivée de ses produits futurs.

Afin de dresser un aperçu des activités de l'entreprise, nous avons représenté sur la Figure 15 ci-dessous les lignées de produits et quelques applications que Turbomeca mit en œuvre de 1938 à 2008, année précédant le démarrage de nos recherches. Le premier élément à gauche de la figure est un compresseur innovant qui fut l'objet de la création de Turbomeca. En 1948,

¹⁷ Ainsi qu'André Planiol, mais le rôle joué par ce dernier, bien que très important aura été plus éphémère (à peine dix ans) que celui de J. Szydlowski dans l'entreprise Turbomeca.

Turbomeca créa sa toute première turbine à gaz l'Oredon (un auxiliaire de puissance APU). À partir de ce cœur thermodynamique, Turbomeca déploya d'importants efforts pour en développer des variantes moteurs pour des applications sur terre, mer et air : turboréacteur pour avions, turbomoteur pour hélicoptère, voiture, ou train, auxiliaire de puissance pour avion, bateau ou char... Sur cette figure, l'épaisseur des traits représente l'importance (en production) de chacune de ses lignées. Ainsi, nous pouvons remarquer que le turboréacteur fut l'un des principaux produits de l'entreprise jusqu'aux années 1980, période à laquelle le turbomoteur pour hélicoptère prit le dessus jusqu'à devenir en 2000 sa lignée exclusive.

Lors du démarrage de notre recherche, deux éléments nous intriguaient particulièrement :

- 1) Comment, Turbomeca, parvint, à travers la turbine à gaz, à participer aux plus grandes révolutions technologiques de l'histoire de France – voir sur la Figure 15 ci-dessous : premier vol d'un hélicoptère avec turbine à gaz, record de vitesse avec une voiture Renault équipée d'une turbine à gaz, record de vitesse avec le TGV, et bien d'autres.
- 2) Cette expertise technologique de la turbine à gaz, construite par Turbomeca, qui a fait de cette entreprise un leader mondial des motoristes d'hélicoptère quelques décennies plus tard, nous emmène à notre deuxième interrogation. Pourquoi et comment une entreprise pionnière, ayant mené à bien tant d'innovations technologiques, se retrouve après soixante-dix ans d'histoire, à devoir rechercher rapidement des voies technologiques ruptures ?

Dans notre contexte de recherche, ces éléments nous ont incités à mener une investigation profonde des capacités de conception innovante de cette entreprise, que nous présentons ici.

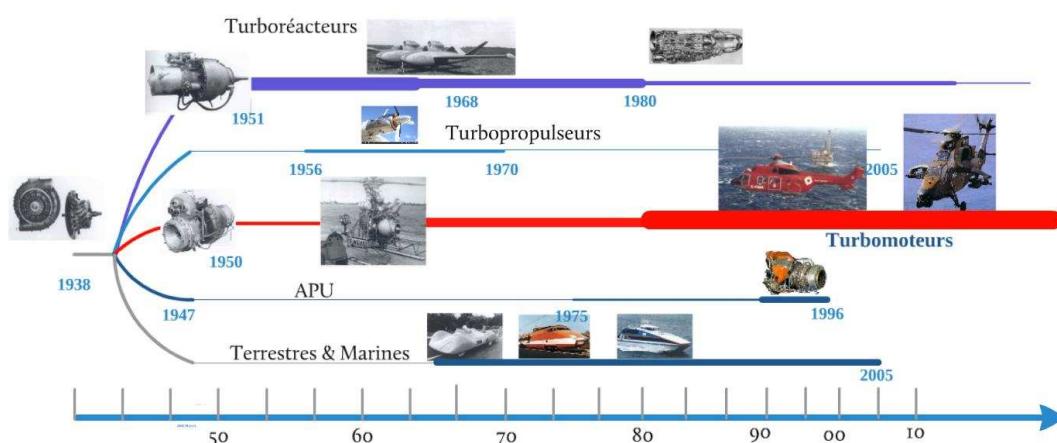


Figure 15 – Lignées de produits et principales innovations de Turbomeca de 1938 à aujourd'hui.

Notre examen de l'histoire de Turbomeca, pour en analyser l'évolution des capacités de conception, est décomposée en récits de quatre périodes clés de l'entreprise. La première concerne la construction des capacités de conception de Szydlowski, le fondateur de Turbomeca, et la récupération des technologies allemandes pour concevoir sa propre turbine à gaz aéronautique. La deuxième met en évidence les capacités de conception innovante mises en œuvre par Turbomeca pour continuellement améliorer la TAGA et créer de nouveaux moteurs. La troisième concerne la restructuration de ces capacités et l'orientation de la stratégie de Turbomeca vers le monde de l'hélicoptère. Enfin, la dernière rapportera les nouveaux moyens de conception innovante au service de la conception réglée. – voir Figure 16 ci-dessous.

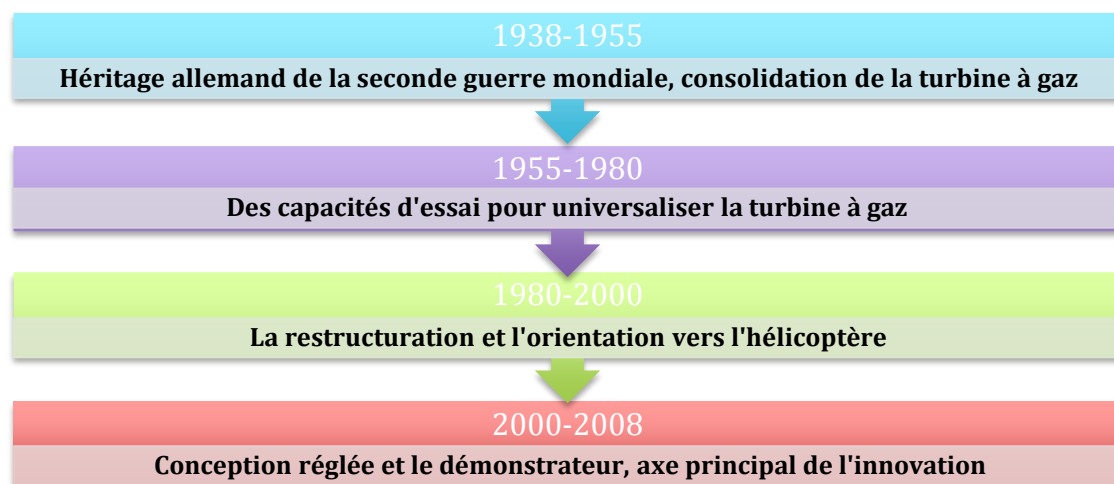


Figure 16 – Synoptique du récit des capacités de conception innovante à Turbomeca

Cette section sera complétée par un exposé de la prise de conscience des nouveaux enjeux rencontrés par Turbomeca à partir de 2007 et de la démarche de conception innovante mise en œuvre en 2009.

3.1. 1945-1955 : Szydlowski et l'héritage allemand de la Seconde Guerre mondiale, consolidation de la turbine à gaz aéronautique

Dans cette section, nous nous focaliserons sur l'acteur qui a joué le plus grand rôle dans cette entreprise : Joseph Szydlowski, le fondateur de Turbomeca. Nous essaierons d'expliquer comment les théories de la TAGA ont été acquises et enrichies par cet entrepreneur et scientifique polonais. Pour cela, nous rapporterons les faits qui nous semblent avoir permis la construction des capacités de conception innovante de J. Szydlowski : la construction de ses capacités cognitives et de son réseau relationnel industriel et scientifique.



Figure 17 – Joseph Szydlowski devant une tuyère de turbine à gaz

3.1.1. Études et formation

Commençons tout d'abord par caractériser le profil de M. Szydlowski à partir des ouvrages écrits à son sujet (Claveau, 2008; Decôme, 1999; Michelet, 1968). La liste des qualificatifs est longue pour décrire la personnalité de cet homme : intelligent, polyglotte, acharné, obstiné des essais, bourreau de travail, bon vivant et sportif, furieux, paternaliste et socialiste, créatif et borné, homme de terrain et des calculs, amoureux de l'aéronautique et ayant une peur bleue de l'avion... De même, les contradictions qu'elle révèle confirment les dires de certains journalistes ou biographes quant à la difficulté de la tâche (Michelet, 1968). Bien que J. Szydlowski eût plutôt la réputation d'avoir un ego important, il restait très discret quand il s'agissait de parler de sa vie privée, ce qui rendait l'exercice encore plus compliqué. Nous essaierons tout de même de rester le plus proche de la réalité possible, en gardant à l'esprit que certains éléments trouvés dans la littérature, notamment narrant le début de sa vie,

relèvent parfois de l'hypothèse. En effet, peu de données existent sur son passé antérieur à la fondation de Turbomeca. Cependant, quelques faits et discours de personnes l'ayant connu ont permis à son biographe (Decôme, 1999) et à certains journalistes (Michelet, 1968) d'exposer les grandes lignes de cette période. Ces précautions étant posées, rentrons maintenant dans la vie de cet homme afin de comprendre comment ce juif d'origine polonaise a inscrit son nom au panthéon de l'aviation française.

Joseph Szydlowski est né en Pologne, alors province de la Russie, en 1896. Il aurait suivi des études en électricité, mais semblait plus reconnu pour ses compétences en dessin industriel : *« Il lui arrivait de corriger des dessins de ses employés tel un professeur corrigeant celui de ses élèves »* (Decôme, 1999). Sa formation initiale ne semble pas avoir été très longue, d'après Decôme (1999), deux ans tout au plus entre 1918 et 1920, probablement à Dantzig. Donc, contrairement à ce que l'on aurait pu penser, la formation de ce grand chercheur, scientifique et entrepreneur a été courte. De même, bien qu'il se présentât comme ingénieur, aucun témoignage ou archive n'atteste de ce fait. Par contre, les cours qu'il aurait suivis en candidat libre à l'université de Göttingen entre 1925 et 1930 ont probablement joué un rôle clé dans la construction du savoir et des relations de Szydlowski. En effet, cette université renommée était à l'époque dotée d'un département en mécanique des fluides à la pointe de la recherche. Ce département avait pour directeur Ludwig Prandtl¹⁸ à l'origine, entre autres, des théories sur la couche limite et de modèles mathématiques permettant de modéliser l'écoulement aérodynamique sur les profils d'ailes. D'ailleurs Hans Von Ohain¹⁹, l'un des deux grands protagonistes de la TAGA, fut son élève et s'inspira de ses travaux. Ces éléments ne sont pas anodins, car ils permirent de donner à Szydlowski la connaissance la plus aboutie dans le domaine de l'aérodynamique et plus particulièrement des compresseurs, technologie qui fut le fil conducteur de ses travaux. En effet, Turbomeca put rentrer dans le cercle très fermé des grands de la turbomachine aéronautique grâce à son excellence sur ce composant.

À partir de ses compétences techniques solides, Szydlowski a su profiter de son talent pour nouer des liens dans le monde de l'industrie et parfaire ses projets d'entrepreneur. D'après Decôme (1999), dans les années 1920, il avait élu domicile à Baden-Baden, une station thermale dans laquelle il était au *« contact de nombreux chefs d'entreprises et politiciens allemands qu'il rencontrait autour d'une table de jeu ou dans les bains thermaux »*. À travers ce lieu géographique, il pouvait donc se tisser un réseau dans un milieu encore en pleine

¹⁸ **Ludwig Prandtl** (1875 – 1953) était un scientifique allemand. Il était pionnier dans le développement d'analyses rigoureuses mathématiques pour les sciences de l'aérodynamique.

¹⁹ **Hans Joachim Pabst von Ohain** (1911-1998) était un ingénieur allemand et l'un des inventeurs de turboréacteur. Son premier concept tourna en 1937 et ce fut l'un de ces moteurs qui effectua le tout premier vol à réaction de l'histoire sur un Heinkel He 178 en 1939.

expansion – contrairement aux idées reçues de certains politiciens français de l'époque. Le fondateur de Turbomeca avait d'ailleurs dit ceci à propos de son lien au contexte de l'époque (Ouvrage Collectif Interne Turbomeca, 1987): « *J'ai vu naître l'aviation, j'y ai cru, j'ai voulu y participer, de cette volonté est née Turbomeca voici un demi-siècle.* » L'inventeur avait très bien compris l'importance de ses relations pour diffuser ses inventions.

Car des inventions, il en conçut énormément dans les années 1920, comme en témoignent les 63 brevets qu'il déposa en un peu moins de dix ans. Ce nombre très important de brevets peut-être expliqué par le fait qu'il était à l'époque consultant pour des sociétés comme Krupp²⁰, Gaggenau²¹ ou encore Junkers. Nombre de ces brevets déposés entre 1929 et 1933 concernaient un moteur à cycle Diesel ressemblant particulièrement à un moteur Junkers²² (Decôme, 1999). Ils sont importants dans l'histoire de Szydlowski pour deux raisons : d'une part, comme le déclare son biographe, ils illustrent sa détermination à vouloir concevoir son propre moteur et, d'autre part, comme pour la plupart des moteurs à huile lourde, il va devoir trouver un moyen de le suralimenter. C'est chez Rateau, société renommée dans la turbomachinerie, qu'il trouva ce composant (Michelet, 1968), dont l'inventeur du même nom fit faire au monde des turbomachines et des compresseurs des avancées significatives. Un document d'archives retrouvé par Decôme (1999) permet justement d'attester une commande et un schéma de suralimenteur fourni par la société Rateau à Szydlowski le 12 septembre 1929. Bien qu'il n'utilisât jamais ce composant, ces éléments nous permettent de confirmer l'hypothèse selon laquelle Szydlowski était à l'époque en relation avec les travaux théoriques (Université de Göttingen) et industriels (Rateau, Junkers) les plus avancés dans le domaine de l'aérodynamique, des compresseurs et de la turbomachine.

À partir de cette période, il se rapprocha de plus en plus de la France, à la fois parce qu'elle faisait partie des pays pionniers de l'aéronautique, mais aussi parce qu'elle lui offrait un refuge face à la montée du nazisme en Allemagne. Il avait déjà noué quelques relations en France, probablement de l'époque où il était consultant, et en habitant à Baden-Baden situé à quelques pas de la frontière (Decôme, 1999). À Paris, il fit des rencontres qui lui permirent non seulement d'accéder à la communauté industrielle de haut niveau de l'époque, mais plus important encore, de nouer des liens avec l'administration française.

Camille Martinot-Lagarde, un administrateur français issu de l'Ecole polytechnique, et professeur à l'Ecole supérieure de l'aéronautique et de l'espace (Sup'Aéro), fut pour

²⁰ **Krupp**, entreprise allemande de conception et fabrication de camions

²¹ **Gaggenau**, entreprise allemande d'électroménager

²² **Junkers** était une entreprise allemande qui concevait et fabriquait, entre autres, des avions. Durant la deuxième guerre mondiale l'entreprise concevait aussi des moteurs à piston et des turboréacteurs.

beaucoup. À l'époque de leur rencontre, en 1930, il était ingénieur en chef hors classe et chef de la section moteur des Services Techniques Aéronautiques (STAé). D'après Decôme (1999), citant Martinot-Lagarde, « *il a découvert Szydlowski* ». Decôme précise que cet homme aurait fait le lien entre « *l'immigré polonais oeuvrant dans les coulisses de l'Allemagne, et le fondateur d'une des grandes entreprises françaises : Turbomeca* ».

En 1930, suite à une nouvelle politique axée sur les prototypes, le ministère français de l'Air, nouvellement créé, fit signer un contrat pour la conception d'un moteur prototype à Szydlowski. Sous le n° 39/0 (Claveau, 2008), celui-ci faisait référence au moteur Diesel du brevet cité précédemment et comprenant un système de suralimentation en option. Ce fut l'occasion pour lui de venir s'installer en France – avec sa famille deux ans plus tard – dans les Hauts-de-Seine actuels, qui était le terreau fertile de l'industrie française. Ce lieu abritait des entreprises de l'aéronautique comme Gnome et Rhône, Hispano-Suiza, Renault, Citroën ou encore Bloch-Dassault pour ne citer que celles-ci. Ainsi, Szydlowski venait s'installer dans le berceau français de l'aviation. Une des raisons majeures qui le poussa à s'installer à Courbevoie vient d'une des clauses de la commande qu'il signa avec le ministère de l'Air, dans laquelle était stipulé : « *L'exécution de la fourniture aura lieu dans les usines de la Société Anonyme de Mécanique Automobile Cozette (SAMAC).* » Cette entreprise était installée dans les Hauts-de-Seine (Decôme, 1999; Michelet, 1968).

L'intégration de cette entreprise comme fournisseur dans la commande ne fut pas sans conséquence. André Planiol, un des fondateurs de SAMAC, devint plus tard le cofondateur de Turbomeca avec Joseph Szydlowski. Ingénieur diplômé de Sup'Aero, il avait aussi un certain goût pour la recherche. Il déposa 26 brevets en 23 ans (Claveau, 2008). Planiol, fils d'un grand juriste, était discret, très pointu en science et en calcul, mais n'était pas aussi passionné que le futur PDG de Turbomeca pour les essais (Michelet, 1968).

À partir de 1931, ensemble, ils se mirent à travailler sur des compresseurs pour le moteur à huile lourde de la commande citée plus haut. Cette collaboration fit faire un pas de plus à ces deux hommes vers la création de Turbomeca. Le moteur de démonstration passa des essais concluants et en commanda d'autres à Szydlowski les années suivantes, notamment un moteur à 18 cylindres, le SH18 en 1933. Moteur pour lequel Planiol et Szydlowski développèrent une nouvelle version de compresseur. Alors que les essais sur le SH 18 furent un échec en 1936, les compresseurs de Szydlowski et Planiol firent des progrès notables. De 1928 à 1936, leurs composants passèrent d'un débit de 150 litres par seconde pour un rendement de 0,48 à un débit de 1 200 litres par seconde pour un rendement de 0,79. Ces caractéristiques étaient très élevées pour l'époque où la majorité des composants avait des rendements proches de 0,5 !

Les travaux effectués par ce nouveau couple de chercheurs durant ces années débouchèrent

certes sur des améliorations techniques, fruits d'expérimentations et d'instrumentations minutieuses de leurs compresseurs, mais elles permirent aussi à Szydlowski de développer des théories et formules pour la conception de moteurs à turbocompresseur. Par exemple, un des théorèmes rapportés par Decôme (1999) indiquait : « *Pour un moteur équipé d'un turbocompresseur à admission axiale, le régime de la turbine ne varie pas en fonction de la pression ambiante (donc de l'altitude).* » Ce théorème avait une importance significative dans l'étude des moteurs à piston de l'époque, sachant les problèmes qu'ils rencontraient avec les variations d'altitude.

Cette expertise leur permit de développer une innovation majeure dans le monde de la suralimentation. Ainsi, en 1936, ils déposèrent un brevet, le brevet 820.404, sur le compresseur à circulation variable. Ce compresseur leur permit l'année suivante de décrocher un marché pour un moteur développé par Hispano-Suiza, le moteur français le plus puissant de l'époque (Claveau, 2008). Dans son ouvrage, Marchal (1946) explique les avantages de ce compresseur (Szydlowski, 1975). Son principe de base, tourner à vitesse constante, n'était pas nouveau. Mais ce qui en faisait un compresseur si léger, c'était qu'il pouvait s'affranchir des systèmes mécaniques à étages pour le changement de vitesse – voir Encadré 4.

L'innovation technologique à l'origine de Turbomeca

En fait, pour un compresseur à aubages fixes, étant donné qu'à une vitesse de rotation donnée le rapport de compression est constant, il suffit de jouer sur la pression d'entrée pour obtenir la pression désirée. Dans leur concept, ils utilisaient un système d'aubages orientables permettant de transformer l'énergie cinétique en vitesse. Les pales orientaient le flux d'air en rotation autour de la roue. Lorsque le flux d'air était orienté dans le sens inverse de rotation de la roue, la pression d'entrée de cette dernière augmentait, et donc la pression de sortie aussi. Par contre, quand le flux d'air était orienté dans le sens de la roue, elle poussait celle-ci. Ainsi, quand le moteur n'avait pas besoin de pression augmentée à l'admission, il récupérait de l'énergie mécanique sur le compresseur. Marchal (1946) prend comme analogie le freinage d'un tramway avec renvoi de courant dans la caténaire.

Encadré 4 : Description de l'innovation technologique à l'origine de la création de Turboméca

3.1.2. 1938, la création de Turbomeca

Turbomeca fut créé pour l'exploitation de cette invention : le compresseur à circulation variable. L'assemblée constituante eut lieu le 29 août 1938 à Paris avec comme président de séance J. Szydlowski. Les deux actionnaires majoritaires, parmi les sept souscripteurs, étaient Szydlowski et Planiol. Ils détenaient ensemble 90 % des actions, à égalité. La société fut ainsi créée pour l'exploitation des inventions des deux créateurs à travers les brevets amenés dans les apports concernant la circulation variable, mais aussi pour l'étude, l'achat, la mise en valeur, l'exploitation et la vente de tous brevets de perfectionnement, procédés, inventions, marques de fabrique, modèles, moyens et secrets de fabrication de *turbomachines, turbines, compresseurs, et toutes réalisations mécaniques* s'y attachant (Decôme, 1999). Il faut comprendre turbomachine, ici, comme toute machine permettant le transfert d'énergie entre un rotor – une roue – et un fluide, et incluant aussi bien les turbines à gaz que les suralimenteurs à entraînement mécanique ou les turbocompresseurs. D'ailleurs, il est à noter que l'activité de conception des moteurs à piston, qui étaient les premières inventions de Szydlowski, n'est pas inscrite dans le statut de la société. Nous l'avons vu plus haut, le moteur à piston aéronautique atteint ses limites en performance pour les applications aéronautiques. Mais à cette période, les suralimenteurs permettaient de pousser encore plus loin leur performance, et en parallèle, certains projets de turbines à gaz aéronautiques voyaient le jour. Les fondateurs de Turbomeca étaient convaincus que le futur de l'aéronautique appartiendrait au monde de la turbomachine. Pourtant, les turbocompresseurs qu'ils développaient tendaient à améliorer le concurrent de la turbine à gaz aéronautique : le moteur à piston. Szydlowski (1975) parla en ces termes de cette période : **« À cette époque, il n'y avait plus aucune raison valable, surtout en ce qui concerne les propulseurs aéronautiques, pour ne pas entreprendre l'étude et la réalisation des turbines à gaz. Malheureusement, on trouve dans la technique, comme dans toute action humaine, un effet d'inertie, une tendance à céder à la facilité... »** Les fondateurs de Turbomeca étaient probablement en avance sur leur temps, mais le monde de l'aéronautique n'était pas encore prêt à accueillir un nouveau moteur.

Au milieu de l'année 1938, les essais du compresseur à circulation variable, le S39, eurent lieu au banc et s'avérèrent très concluants. Le compresseur était plus performant que ceux de chez Rateau et avait un encombrement moindre (Claveau, 2008). Au point qu'en 1939, le Service Technique Aéronautique (STAé) décida d'équiper le moteur 12Y45 avec ce compresseur. Ce moteur d'Hispano-Suiza équipait l'avion de chasse français le plus performant de son époque, le Dewoitine D 520. Cette commande transforma Turbomeca de

simple bureau d'études composé de dix personnes en une entreprise destinée à la production en série. En effet, la commande comprenait près de 1 200 compresseurs à livrer en un an. Ce fut un tournant dans l'histoire de Szydlowski et de son entreprise, qui grandit en conséquence. En 1940, elle comprenait déjà 75 personnes et des locaux de 1300 m² furent achetés à Mézières-sur-Seine (Claveau, 2008). Mais en 1940, alors que l'usine était tout juste exploitable, les Allemands bombardèrent la capitale et détruisirent plusieurs usines de la région parisienne. Les usines d'armement furent alors évacuées dans le Midi de la France. Turbomeca s'établit ainsi dans une usine à Saint-Pé-de-Bigorre, près de Lourdes, puis déménagea l'année suivante à Bordes, un village situé près de Pau.

Cette nouvelle situation géographique lui permit non seulement de s'éloigner de la zone occupée, mais en plus de rester proche d'Hispano-Suiza dont les installations de Paris avaient été déménagées dans leur usine de Tarbes. Turbomeca pouvait donc continuer de fournir les compresseurs S39 pour les moteurs 12Y, dont la demande avait largement augmenté durant cette période. Ainsi, à la fin de l'année 1942, l'usine de Bordes comptait près de 300 personnes. Mais très vite, la même année, l'invasion allemande de la zone libre ralentit le rythme des commandes de Turbomeca et l'effectif diminua en conséquence. La production aéronautique militaire française n'avait plus lieu d'être.

Pourtant, malgré le climat difficile de cette période, Szydlowski et Planiol continuaient d'innover. La zone libre manquait de pétrole. L'utilisation du gazogène²³ inventé au XIX^e siècle redevenait intéressante. Cette machine possédant un mauvais rendement, l'idée des fondateurs de Turbomeca était de l'alimenter avec un compresseur. Un brevet de compresseur pour gazogène fut déposé par Szydlowski. Cette activité, très marginale, donnait tout de même aux salariés un peu d'activité durant cette période de récession. Szydlowski parlait d'ailleurs de cette activité comme la plus ancienne activité extra-aéronautique pour Turbomeca : « *Avec ce turbocompresseur, monté dans ma Ford Mercury équipée d'un moteur à gazogène, j'ai pu atteindre la vitesse étonnante de 120 kilomètres à l'heure.* » (Szydlowski, 1975).

Cette invention n'était pas la seule déclinaison du savoir de Szydlowski sur la turbomachinerie à cette époque. Les pannes d'électricité étaient fréquentes à l'usine et empêchaient le déroulement des essais nécessitant de l'électricité pour faire tourner les compresseurs au banc. Szydlowski eut donc l'idée de mettre en œuvre une technologie déjà

²³ Le **gazogène** est une machine permettant d'alimenter un moteur à piston en gaz CO à partir de la combustion incomplète de combustible solide contenant du carbone.

utilisée par les moines au XII^e siècle : utiliser l'eau du gave de Pau pour faire tourner ses compresseurs au banc à l'aide d'une turbine à eau²⁴. Bien que ces deux anecdotes eussent peu d'influence pour la suite de l'histoire de Turbomeca, elles permettent cependant, ici, de souligner les capacités d'exploration que possédait Joseph Szydlowski. Cette qualité est probablement celle qui le conduisit à s'intéresser de près à la turbine à gaz aéronautique.

3.1.3. La récupération des BE allemands et la naissance de la turbine à gaz française

En novembre 1942, pour échapper à la politique du régime de Vichy, Szydlowski, d'origine juive, s'exila en Suisse. Début septembre 1944, il quitta le pays helvétique pour reprendre son entreprise affaiblie par la guerre. Un an plus tard, en avril 1945, une circulaire du service central d'information technique fit « *appel aux techniciens les plus compétents de l'industrie aéronautique et des services officiels [pour prospecter des laboratoires, des services d'études et des usines de l'industrie aéronautique allemande situées dans certaines parties des territoires occupés]* » (Decôme, 1999). Elle lançait une opération officieuse française pour démarrer la course à la récupération des cerveaux allemands. En effet, avant même la fin du conflit, les Américains avaient lancé la fameuse opération « *paperclip* » visant à rapatrier aux Etats-Unis la majorité des ingénieurs de haut niveau ayant participé au complexe militaro-industriel d'outre-Rhin. À cette course, et via cette opération, les Américains furent d'ailleurs largement vainqueurs, avec une évacuation de plus de 1 800 scientifiques. Certains de ces derniers étaient parmi les plus renommés dont par exemple : von Braun qui fut l'un des pères des fusées allemandes longue portée V2, puis plus tard responsable des programmes Apollo ; von Ohain l'un des inventeurs du turboréacteur en Allemagne ; Wagner le concepteur des bombes planantes Hs 293 A. Szydlowski devait donc aussi participer à ces opérations très rapidement. Il partit avec deux ingénieurs et un acheteur pour faire la tournée des groupes de l'aéronautique allemande, fin octobre 1945 (Decôme, 1999). Compte tenu du caractère non-officiel de ces opérations, leur séjour fut très peu documenté, mais un contrat prenant effet le 1^{er} novembre 1945 fut signé entre la société Turbomeca et Friedrich Nallinger, un ingénieur de renom, concepteur du DB 601, le moteur à injection directe de Daimler-Benz qui équipait les Messerschmitt 109. Nallinger était à cette époque un des directeurs de Daimler-Benz (Decôme, 1999). Ce dernier prit la tête de Turbomeca Allemagne, un bureau d'études formé à l'occasion, utilisant une usine de l'avionneur Dornier situé près du lac de Constance en

²⁴ Les moines au XII^e siècle utilisaient des roues à eau. Les premières turbines à eau n'apparurent qu'au XIX^e avec les travaux de Fourneyron. Elles différaient des roues à eau en ce sens qu'elles étaient composées d'un stator et d'un rotor et permettaient ainsi des rendements largement supérieurs.

Autriche. Par ailleurs, à la même période, le service technique aéronautique créait un bureau d'études dirigé par le Dr Oestrich et regroupant une centaine d'hommes. C'est l'atelier aéronautique de Richenbach, l'ATAR, qui fut plus tard récupéré par Snecma et motorisa les fameux avions de combat Mirage. Szydlowski faisait donc partie d'un groupe très restreint de privilégiés ayant accès à ces scientifiques expérimentés.

Quelques mois seulement après sa création, l'effectif de Turbomeca Allemagne atteignait déjà près de 150 personnes. Ces personnes venaient toutes des plus prestigieuses entreprises de l'aéronautique allemande : Daimler Benz, BMW, Junkers, Heinkel, Zeppelin... Szydlowski se trouvait donc en 1945 à la tête d'un bureau d'études plus grand et plus expérimenté que tout ce qu'il avait connu jusqu'alors.

Durant cette année, alors que Planiol, qui était parti pendant la guerre pour des missions techniques aux USA, lui conseillait de se lancer dans les petites turbines et compresseurs pour le conditionnement et la pressurisation des avions de ligne, Szydlowski, s'appuyant sur son nouveau bureau d'études, voulut se lancer dans des projets de turbines à gaz aéronautiques gigantesques.

Nallinger avait le profil adéquat pour répondre aux ambitions et compléter les capacités sur la turbomachine du fondateur de Turbomeca. Il avait non seulement une expertise extrêmement pointue sur le sujet, mais, en plus, sa folie des grandeurs le pousser à proposer des projets plus gigantesques les uns que les autres (pour l'époque) et disposait de concepts originaux par dizaines. Il voyait l'avenir dans le vol transatlantique (Decôme, 1999). Il imaginait donc un appareil, l'UR1, qui pourrait transporter plus de cent passagers entre Bordeaux et New York en 7 heures. Pour ce faire, cet aéronef de 200 tonnes devait disposer d'une poussée de 42 tonnes. Nallinger imagina donc six moteurs, B 701, de 7 tonnes de poussée, montés en barillet (Claveau, 2008). Pour le démarrage de ces moteurs, le système comprenait aussi une petite turbine, le B781. Pour Szydlowski, les concepts et l'expertise des ingénieurs allemands étaient une aubaine. C'était l'occasion de mettre tout son savoir acquis durant une vingtaine d'années sur les compresseurs et les turbines au service de la conception d'un moteur, son moteur. La turbine à gaz était composée d'un compresseur, d'une chambre de combustion et d'une turbine. Ainsi, comme le souligne Decôme (1999), Szydlowski possédait déjà un tiers de la machine. Il disait même qu'il en possédait les deux tiers en y incluant la turbine (Szydlowski, 1975), bien que cette dernière, se trouvant à la sortie de la chambre de combustion, possédât des caractéristiques bien plus contraignantes que celles d'un turbocompresseur du fait de la tenue aux hautes températures. Quoi qu'il en soit, la

turbomachinerie était son domaine, et la société Turbomeca avait, depuis sa création, construit des capacités de conception dans ce domaine.

3.1.4. La première Turbine à gaz de Szydlowski, TT782

En 1946, le STAé donna à Szydlowski le cadre pour se lancer dans les turbines à gaz aéronautiques, en commandant deux prototypes de B 701 de 7 tonnes de poussée d'une part (les concepts de Nallinger), et en établissant le bureau d'études allemand à Nay, non loin de l'usine de Turbomeca située à Bordes d'autre part (Claveau, 2008). Cependant, l'année suivante, le STAé lui préféra le prototype ATAR 101 qui avait été développé simultanément par l'atelier du même nom grâce aux compétences d'ingénieurs de BMW. Nallinger quitta Turbomeca suite à cette décision du STAé. Il donna sa démission le 3 novembre 1947.

En outre, durant cette période, pour compléter sa faible activité sur les turbocompresseurs, Turbomeca fabriqua des compresseurs pour une marque célèbre de l'électroménager : Frigidaire. Ce sont près de 75 000 compresseurs qui furent fabriqués pour cette filiale de General Motors et qui permirent à Turbomeca de faire vivre ses ateliers série durant l'après-guerre. Encore une fois, à travers cet exemple, nous pouvons voir que Szydlowski, tout en poursuivant son aspiration à créer son propre moteur, ne s'interdisait pas des activités série, utilisant l'expertise de son entreprise dans la turbomachinerie pour financer ses activités de recherche. Nous retrouverons cette caractéristique majeure tout au long de l'histoire de l'entreprise.

Mais le projet qui scella le sort de Turbomeca dans le monde des turbomachines de petites et moyennes puissances est le démarreur central du barillet des 6 moteurs B 701. Ce moteur, le B781, d'une puissance de 250ch, était l'œuvre de Oberländer, un jeune projeteur d'origine polonaise et ancien pilote de planeur d'assaut pour la Luftwaffe. Ce moteur intéressait les services officiels pour plusieurs applications, allant du petit turbopropulseur pour avion léger au turbomoteur pour hélicoptère, en passant par les groupes auxiliaires de puissance pour faire tourner un alternateur de bord. C'est pour cette dernière application que le STAé proposa à Turbomeca de travailler sur un moteur du type du B781 pouvant fournir une puissance de 60ch jusqu'à 6000m d'altitude. L'architecture de ce moteur était très complexe pour sa taille, car il comprenait six étages de compresseurs axiaux. Szydlowski insista pour le simplifier (Claveau, 2008). L'architecture finale était totalement différente et donna lieu à un moteur nommé le TT782. Il était composé d'un compresseur centrifuge, d'une chambre de combustion annulaire avec injection centrifuge de carburant et d'une turbine à deux étages liés.

3.1.5. L'ADN des moteurs de Turbomeca

Le compresseur centrifuge était l'empreinte de Szydlowski. Ce dernier savait que ce système était plus intéressant pour les petites turbomachines. En outre, l'injection centrifuge permettait de s'affranchir de certaines pompes pour mettre le carburant en pression et la chambre de combustion annulaire, d'invention allemande, engendrait un encombrement moindre. Ainsi, Szydlowski, en combinant ses compétences sur les turbocompresseurs et les savoirs allemands sur les parties chaudes (chambre et turbine), concevait l'architecture dominante de ses futures lignées de produits. Il fallut attendre les années 1975, et l'arrivée de l'ARRIEL avec sa turbine libre, pour voir apparaître chez Turbomeca une architecture significativement différente de celle de la TT 782. Ainsi, en 1950, après de nombreuses heures d'essais au banc, la turbine fut appelée l'Orédon et homologuée à 160 ch de puissance pour un poids de 75 kg. Avec l'Orédon, le cœur des lignées de produit de Turbomeca était né.

Explicitons ce dernier point ici. Comme nous l'avons rappelé en première partie, les turbines à gaz sont ainsi faites qu'à partir d'un même générateur de gaz on peut décliner plusieurs typologies de moteurs selon le module de détente qui est placé derrière celui-ci. Avec une turbine, on pourra faire de l'énergie mécanique, et ainsi fournir de la puissance sur un arbre pour faire tourner une hélice, un rotor d'hélicoptère, un alternateur ou encore un compresseur de charge ; avec une tuyère, on pourra obtenir de l'énergie cinétique et ainsi créer une poussée pour propulser un avion. Ceci était bien entendu connu dans le domaine de la turbine à gaz aéronautique depuis les années 1930. Szydlowski appliqua donc ce principe des lignées de produits au générateur de gaz de la TT782. Ainsi, par la simple suppression d'une turbine, l'Orédon devint le réacteur Piméné. Il fut homologué en 1950 pour une poussée de 110 kg. La turbine à gaz, au début des années 1950, est une technologie qui a largement montré son potentiel. L'Orédon, par exemple, fournit en 1950 160 ch pour 75 kg, soit un rapport puissance sur masse de 1,6 kW/kg !

Durant cette période, les constructeurs de l'aéronautique l'avaient bien compris : l'avenir appartenait à la turbine à gaz. Dans le monde des moyennes et petites puissances, la formule semblait intéressante : développer des générateurs de gaz performants et les décliner sur de nombreux moteurs pour augmenter la rente. Pourtant, le potentiel de ces moteurs dans cette gamme de puissance restait encore à démontrer comme l'illustrent les nombreuses participations et publications de Szydlowski qui participa aux débats sur l'intérêt de la turbine à gaz jusqu'à un âge avancé (Szydlowski, 1950, 1952, 1958, 1965, 1966). Nous verrons dans le paragraphe suivant à travers le cas de Turbomeca comment les motoristes se sont organisés pour soutenir le développement de la turbine à gaz aéronautique dans cette gamme.

Résumé de la construction des capacités de conception innovante de J. Szydlowski

Nous avons reconstruit le raisonnement de conception de Szydlowski avec une cartographie CK en considérant que le concept de départ, son concept voulu était : « Un moteur aéronautique nouveau ». Sur la cartographie C-K, Figure 18 ci-dessous, nous avons mis en évidence le chemin de conception qui l'a mené à concevoir sa propre turbine à gaz aéronautique. Sur les branches de gauche, on peut voir ses travaux autour du moteur à piston à cycle Diesel commandé par le STAé, mais dont les essais n'avaient pas été concluants. Néanmoins, un moteur à piston à huile lourde nécessitait de la suralimentation, donc un turbocompresseur. L'expérience scientifique et technique que Szydlowski avait acquise durant ses études et sa carrière en Allemagne lui permit, avec l'aide A. Planiol, de concevoir l'un des compresseurs les plus performants de l'époque qui allait équiper les meilleurs avions de chasse français durant la guerre : c'était la naissance de Turbomeca.

Au sortir de la guerre, étant considéré comme l'un des meilleurs scientifiques français, et grâce aux relations professionnelles construites en France avant-guerre, le ministère de l'air lui proposa de participer à une grande opération de récupération des experts aéronautiques allemands. Ces experts, dont Nallinger, lui apportèrent les connaissances qui lui manquaient pour concevoir sa propre turbine à gaz aéronautique : des compétences sur les parties chaudes (turbine et chambre de combustion). En combinant les expertises des bureaux d'étude allemands et son expertise sur le compresseur (1/3 de la machine), il parvint à développer une turbine à gaz de petite puissance pour le démarrage des moteurs principaux des avions à réaction. C'était la naissance de la TT782, rebaptisée plus tard l'Orédon.

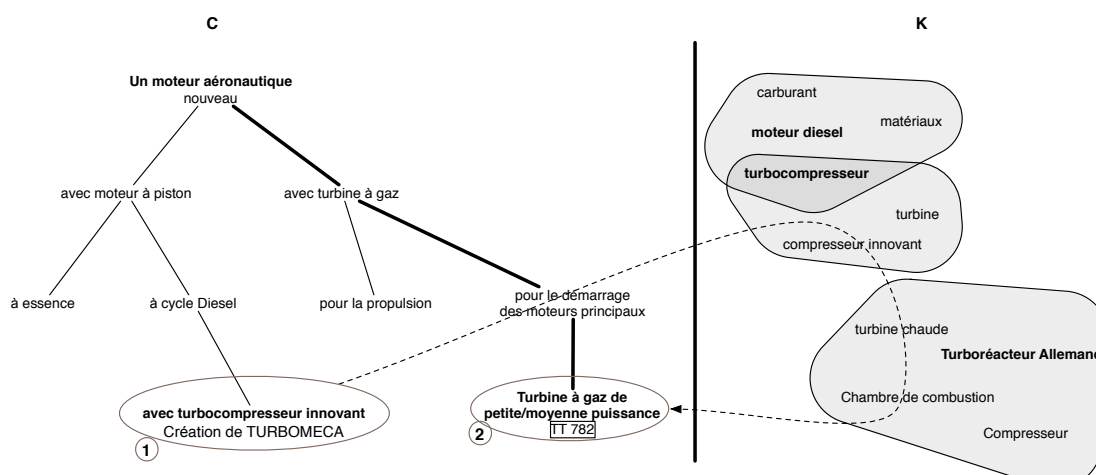


Figure 18 - Cartographie C-K du raisonnement de conception menant à la conception de la turbine à gaz de petite puissance la TT 782 par J. Szydlowski et Turbomeca

Le Tableau 7 ci-dessous est la synthèse des capacités de conception innovante de la période 1945-1955 à travers le cadre théorique D-I-M. Ce cadre nous permet de mettre en évidence les données que nous avons relevées selon chacune des trois capacités : raisonnement de conception (Design), moyens d'incubation (Incubation), et interaction avec l'écosystème (ecosysteM).

	Design	Incubation :	ecosysteM :
	Raisonnement de conception	Moyens d'incubation	Interaction avec l'écosystème
Contexte	La turbine à gaz aéronautique présente un fort potentiel pour le futur de l'aéronautique	Turbomeca a déjà une usine à Pau pour fabriquer des compresseurs en série	Fin de la guerre, centralisation de l'industrie française aéronautique pour acquérir une défense aérienne de taille
Données	<u>Connaissances</u> : Association des compétences sur les compresseurs de Szydlowski avec celles des ingénieurs allemands sur le turboréacteur <u>Concepts</u> : Conception d'une toute nouvelle architecture de turbine à gaz qui sera le cœur des lignées futures de Turbomeca.	-Utilisation des ateliers de fabrication des compresseurs pour développer les nouveaux prototypes - Conception et fabrication de Bancs d'essai	-Des liens forts construits avant-guerre avec le ministère de l'air -Liens importants avec les industriels français depuis les travaux sur les turbocompresseurs dans les Hauts-de-Seine

Tableau 7 - Synthèse des capacités de conception innovante de Turbomeca sur la période 1938-1955 selon le cadre analytique D-I-M

3.2. 1955-1980 : le modèle exploratoire : des capacités d'essais pour universaliser la turbine à gaz

Une fois le modèle de la turbine à gaz stabilisé, à partir des années 1950, l'équation pour le motoriste semblait assez simple : développer le meilleur générateur de gaz possible puis motoriser autant d'applications que possible en le déclinant en différents moteurs : turbomoteur, turbopropulseur, turboréacteur, groupe auxiliaire de puissance (générateur électrique). **L'enjeu du motoriste de l'aéronautique était donc double : construire un moteur performant, donc améliorer le générateur de gaz, mais le faire aussi polyvalent que possible pour le décliner en différents moteurs.**

Il est à noter que peu de motoristes eurent à faire face à un tel dilemme. Il fut surtout l'apanage des motoristes de petites et moyennes puissances, ceux ayant le plus d'applications correspondant à leur gamme de puissance. En effet, l'histoire a montré que la plus grande variété d'applications aéronautiques pour la turbine à gaz était dans la gamme 300-2 000 kW, celle de Turbomeca. En deçà, on lui préférait le moteur à piston pour sa consommation, et au-delà, l'application la plus répandue était le turbofan pour aviation civile.

Cette double expansion « amélioration du générateur de gaz » et « possibilités d'utilisation de la turbine à gaz » fut très tôt mise en avant en conférence par Szydlowski (1950). Afin de mieux la comprendre, nous nous inspirerons de la généalogie proposée par l'ouvrage collectif de Turbomeca (2008). Comme nous l'avons décrit à plusieurs reprises, à partir d'un générateur de gaz peuvent être déclinés un ensemble de moteurs : turboprop, turbomoteur, etc. Une famille de moteurs a donc en commun son générateur de gaz. Ce dernier se caractérise par son architecture et sa taille. Cependant, pour réduire la masse des générateurs de gaz, un des critères prédominants de l'aéronautique, il faut entre autres augmenter les vitesses de rotation (Claveau, 2008). Un générateur de gaz, pour une taille donnée, tournera donc à la vitesse maximale possible par la technologie. Il est ainsi caractérisé par son architecture et sa vitesse de rotation. Sur la Figure 19 nous avons représenté une famille fictive pour des générateurs de gaz d'architecture X tournant à N tr/min. Cette figure met en évidence les deux voies d'expansion des produits de Turbomeca : axiale et radiale. Une famille de produit évolue à la fois en nouvelle version de générateur de gaz (expansion axiale sur la figure) et en variante de moteur (expansion radiale sur la figure).

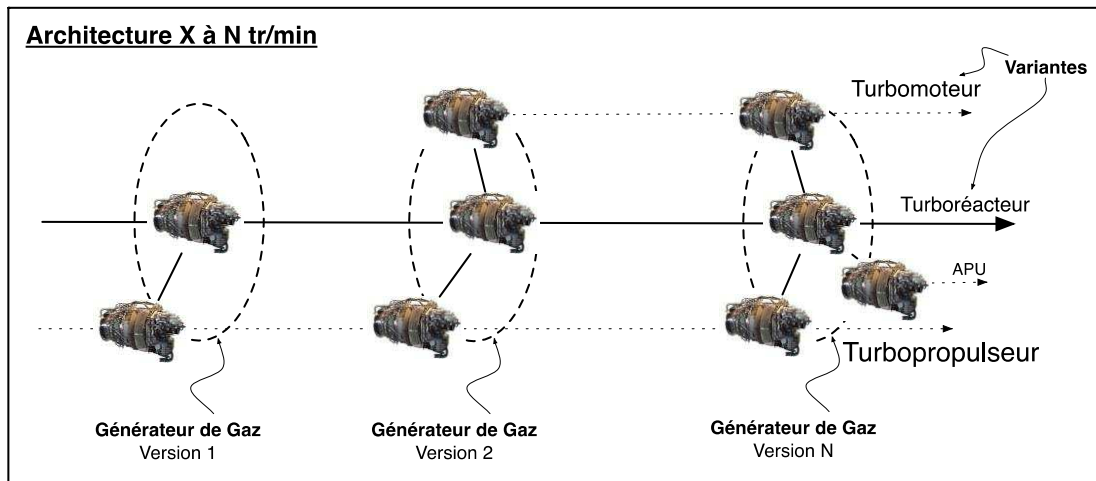


Figure 19 - Représentation d'une famille de moteur de Turbomeca

Dans cette section, nous traiterons cette double expansion en trois parties :

3.2.1) nous expliciterons les voies d'amélioration du générateur de gaz qui ont structuré l'orientation de l'amélioration de la turbine à gaz aéronautique jusqu'à aujourd'hui.

3.2.2) nous mettrons en évidence à travers les articles de conférence et quelques exemples les efforts de diversification via les déclinaisons des moteurs en variantes.

3.3.3) nous proposerons une analyse/description des deux entités organisationnelles structurantes pour la conception innovante à Turbomeca : l'atelier de fabrication des moteurs prototypes ainsi que les moteurs de conception.

3.1.1. L'amélioration du générateur de gaz : l'expansion axiale

Dans un premier temps, essayons de comprendre la logique de performance du générateur de gaz, et donc ses leviers d'amélioration. Pour améliorer les turbomachines, il faut (Szydlowski, 1966):

- améliorer les caractéristiques principales du cycle,
- augmenter les rendements des composants individuels : compresseurs, chambres de combustion et turbine.

Deux voies d'innovation incrémentales du cycle Brayton : le taux de compression et la température

Le cycle thermodynamique d'un générateur de gaz est le cycle dit de Brayton-Joule. Illustré sur la Figure 20, il possède trois étapes. Décrivons-les ici. Étape 1-2 : Une compression adiabatique, effectuée par un compresseur rotatif, qui élève la température et la pression de l'air. Étape 2-3 : Une combustion à pression constante permettant de récupérer l'énergie comprise dans le carburant. Contrairement au moteur à piston, elle est continue. Étape 3-4 : Une détente adiabatique qui permet de récupérer l'énergie thermique. Une partie de cette détente s'effectue dans la turbine pour entraîner le compresseur et l'autre partie s'effectue dans une tuyère pour un turboréacteur ou une deuxième turbine pour un turbomoteur à turbine libre.

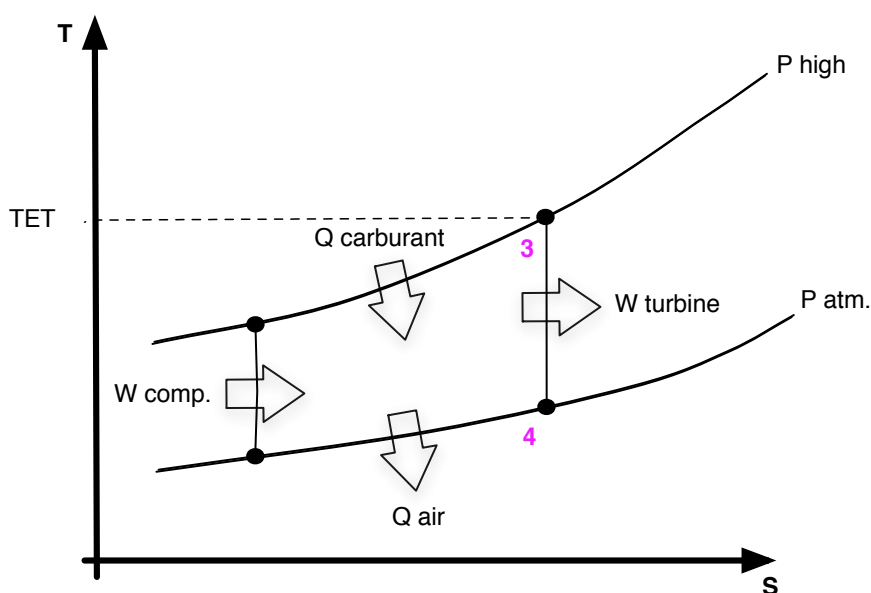


Figure 20 – Cycle de Brayton dans le diagramme température / entropie (T, S)

L'amélioration d'un cycle thermodynamique passe essentiellement par l'amélioration de son rendement, c'est-à-dire, dans le cas de la turbine à gaz, par la récupération d'un maximum de puissance sur l'organe de détente pour une quantité de carburant donnée. Deux leviers majeurs permettent d'améliorer le rendement. Le premier passe par l'augmentation du taux de compression (1->2) et le second par l'augmentation de la température entrée turbine TET (3).

L'augmentation du taux de compression pour une taille de turbomachine donnée permet de fournir une détente plus importante à une TET donnée – Figure 21. Sur cette figure sont représentés deux cycles dans le diagramme TS pour une TET donnée. Le cycle' possède un taux de compression plus important. On peut voir que la détente 3' - 4' est plus grande que la détente 3-4.

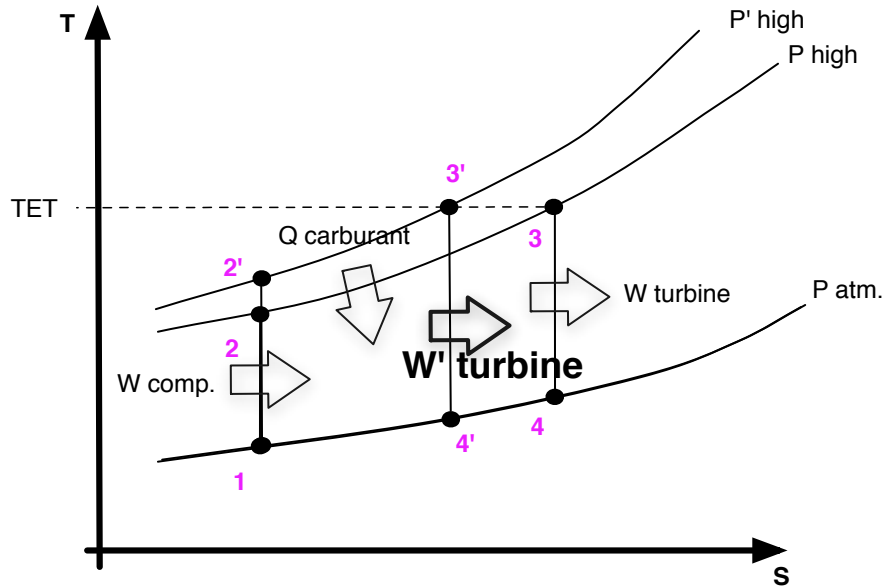


Figure 21- Comparaison de 2 cycles de Brayton pour des isobares différentes dans le diagramme (T, S)

L'augmentation de ce taux résidera principalement dans l'architecture du compresseur et dans l'aérodynamique de ses composants. L'enjeu à cette époque²⁵ sera donc de trouver les architectures les plus adaptées à chaque gamme de puissance et de développer des composants ayant le meilleur rendement possible pour ces architectures

²⁵ A TET donnée et puissance donnée, il existe un optimum de taux de pression, le rendement ne monte pas indéfiniment car les rendements composants s'écroulent. Tant que les matériaux progressent, la TET et le taux de pression peuvent être augmentés (le taux de pression optimal croît avec la TET). Quand on atteint des limites dues aux matériaux, on ne peut plus augmenter la TET et il n'y a plus d'intérêt d'augmenter le taux de pression. Par ailleurs, dans les premières années de l'histoire de la turbine à gaz les limitations des composants empêchaient de se placer à l'optimum du taux de pression mais les progrès de l'aérodynamique interne ont progressivement permis d'utiliser le taux de pression optimal.

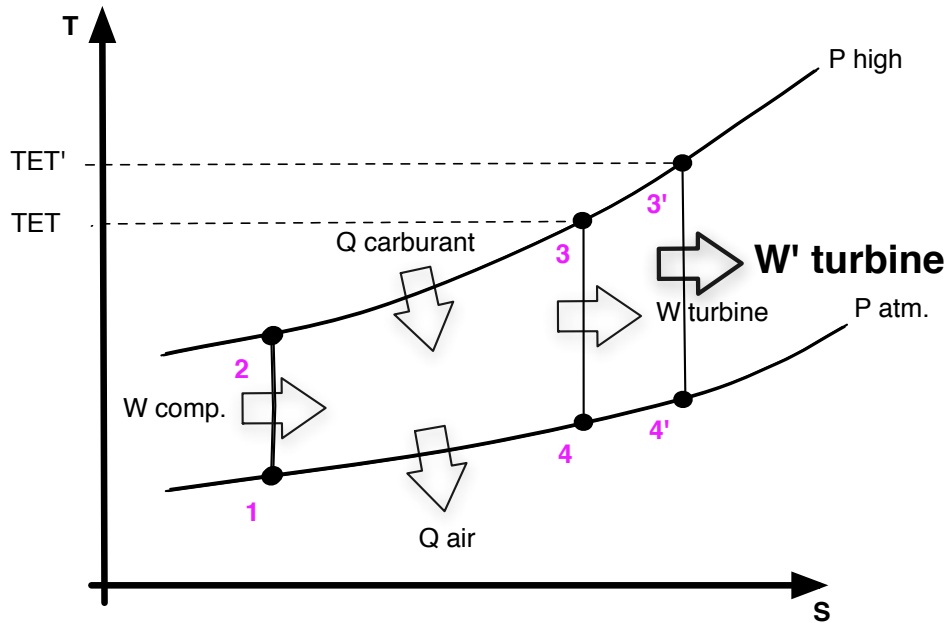


Figure 22– Comparaison de 2 cycles de Brayton pour des températures d'entrée turbine différentes dans le diagramme (T,S)

Le second levier, l'augmentation de la température entrée turbine, permet lui aussi d'augmenter le taux de détente, mais à taux de compression donné. Sur la Figure 22 sont représentés deux cycles pour un taux de compression donné. Le cycle' possède un taux de détente plus important avec une $TET' > TET$. **La course de tout motoriste est donc de chauffer plus²⁶ !**

Le défi réside donc dans le développement et la mise en œuvre industrielle de matériaux capables de résister à des températures très élevées qui peuvent être de plus de 1 300 °C. **En d'autres termes, pour faire un bon générateur de gaz, il est nécessaire de disposer de matériaux performants à très hautes températures ou d'alternatives technologiques comme les pales de turbine refroidies.** Malheureusement, la faible taille (puissance) des turbines Turbomeca interdit longtemps l'accès aux pales creuses refroidies. Quant à la première voie, les progrès incrémentaux des matériaux hautes températures sont très lents (retenons +20 °C tous les dix ans). **L'un des deux leviers d'amélioration de la turbine à gaz était donc difficilement accessible dans cette société.** Ce constat fut fait dès les années 1950 par Szydlowski (1950) : « Si l'industrie métallurgique réussissait à développer des

26 Il existe de même ici des limites, car pour une puissance donnée, plus la TET augmente, plus la machine est petite et plus les rendements de ses composants se dégradent.

aciers garantissant une résistance au fluage suffisante à 1 000°C, il serait possible d'atteindre des rendements allant jusqu'à 30 %. »

Ceci explique probablement pourquoi Szydlowski concentrait la majorité des efforts de l'entreprise sur l'amélioration du compresseur. Jusque dans les années 1980, les ingénieurs du bureau d'études travaillant pour le compresseur étaient beaucoup plus nombreux que ceux œuvrant pour la turbine.

En plus de l'amélioration incrémentale s'effectuant selon ces deux leviers, taux de compression et température entrée turbine, la turbine à gaz de Turbomeca connut plusieurs ruptures importantes sur ses composants au cours de son histoire.

1) Architecture du compresseur

La première est le compresseur axialo-centrifuge. En effet, pour augmenter le rapport de compression, une des solutions choisies par Rolls-Royce était de monter deux compresseurs centrifuges en série. Mais *« considérant cela comme une solution de facilité, [Szydlowski] décida de prendre une voie différente – voie jugée trop difficile et même impossible par certains spécialistes »* (Szydlowski, 1975). Il entreprit donc, en 1952, l'étude d'un compresseur axial monté en amont du compresseur centrifuge sans utiliser de réducteur. S'affranchir du réducteur posait un problème de *compatibilité des vitesses de rotation pour un débit massique identique*. Pour résoudre ce problème, il effectua 200 essais et développa des compresseurs transsoniques. Une première pour l'époque, car jusque-là, les compresseurs axiaux étaient subsoniques avec une vitesse relative de l'air par rapport à la pale d'environ Mach 0,75. Ceci permit d'augmenter les rendements des générateurs de gaz de manière radicale, et ainsi, à partir de l'Orédon, de développer la lignée des Astazou. Pour augmenter la puissance de ces derniers, il lui suffisait par la suite d'augmenter le nombre de compresseurs axiaux et de rajouter un étage de turbine.

2) La turbine libre

La deuxième rupture fut le passage à la turbine libre, en 1957, avec le Turmo.

Il faut savoir qu'à l'époque, les turbines à gaz étaient à turbine liée c'est-à-dire mécaniquement couplées au générateur de gaz. Or un rotor d'hélicoptère, une hélice ou un alternateur nécessitent une vitesse de rotation constante. De ce fait, le générateur de gaz doit tourner à vitesse constante quelque soit la puissance demandée. Ceci a pour conséquence de faire chuter les rendements à charge partielle à cause d'une faible TET (le débit d'air est

inchangé par rapport à la pleine puissance) et d'un faible rendement compresseur (qui est utilisé loin de son point de fonctionnement optimal).

Le découplage mécanique de la turbine de travail appelée turbine libre, connu depuis 1945, permettait de résoudre ce problème. Ainsi, la turbine haute pression entraînait le compresseur uniquement et était régulée en vitesse en fonction de la charge. La turbine de travail, quant à elle, pouvait tourner à vitesse de rotation constante et ainsi ne pas dégrader le rendement du générateur de gaz. Ce qui équivalait à passer d'un embrayage mécanique à un embrayage pneumatique.

3) La régulation numérique

Enfin, la troisième rupture fut la régulation numérique. Le système de régulation d'un moteur est son cerveau. C'est le système qui permet de fournir la puissance désirée par le pilote tout en conservant le moteur à l'intérieur des limites (de température, vitesse, etc ...) pour lesquelles son bon fonctionnement a été démontré. Pour le turbomoteur à turbine libre pour hélicoptère, son principe est très simple, et tient en une phrase : « *Le système de régulation adapte le débit de carburant pour maintenir la vitesse de rotation constante quelle que soit la puissance demandée* » (Claveau, 2008). Cette rupture, se traduisant par l'arrivée du numérique sur les moteurs de Turbomeca, eut lieu chez les hydromécaniciens qui concevaient historiquement les systèmes de régulation ! Pourtant, il existait des métiers de l'électricité pour le démarrage des moteurs. – Encadré 5

La mutation d'un service – La régulation numérique chez les hydromécaniciens

Jusqu'au début des années 1980, la régulation des moteurs s'effectuait avec des composants hydromécaniques utilisant comme fluide de travail l'huile ou le carburant. En 1968, Turbomeca embaucha Jacques Martin, un technicien en électronique, pour faire de la veille sur l'électronique dans le bureau d'études régulation. Afin de monter rapidement en compétences, il s'isola plusieurs mois dans une salle de l'usine pour acquérir toute l'expertise nécessaire sur les systèmes électroniques.

L'année 1971 fut le début de l'ère du numérique avec l'invention par Intel du tout premier calculateur numérique, le 4004 !

Le service régulation commença d'abord par réaliser une régulation sur table avec calculateur analogique pour représenter les systèmes de régulation hydromécaniques. Et à la même période, le système de régulation du tout dernier turbomoteur de Turbomeca, l'Arriel, arriva aux limites de la technologie hydromécanique.

Ainsi, ingénieurs et techniciens conçurent et développèrent un banc de simulation électronique analogique pour tester le système de régulation hydromécanique de l'Arriel. Puis entre, 1972 et 1976, ils créèrent un système électronique analogique pour le moteur Makila servant uniquement à récupérer une mesure de vitesse qui sera utilisée par le système de régulation hydromécanique. En parallèle, ils développèrent un système de régulation pour l'Arriel, mais pour une application terrestre, plus tolérante aux défaillances.

À la fin des années 1970, le service régulation savait programmer sur des microprocesseurs. Il fit d'abord tourner un turbopropulseur Astazou au banc avec un système de régulation numérique. Puis, en 1980, au centre d'essai en vol de Turbomeca, fut effectué le premier vol de turbomoteur sur hélicoptère. Et l'année suivante, Turbomeca développa un FADEC (Full Authority Digital Electronic Control) pour le moteur TM 333, c'est-à-dire un système de régulation entièrement numérique sans secours manuel.

Enfin, en 1988, la société obtint la première certification civile au monde pour un moteur avec un FADEC. Ainsi, 20 ans après l'embauche de Jacques Martin, le service régulation avait permis à Turbomeca de devenir le premier motoriste au monde à développer des systèmes électroniques pour turbomoteurs. Cette nouvelle technologie non seulement permettait un pilotage plus optimisé de la turbine à gaz, mais en plus, elle possédait un potentiel très important pour l'ajout de nouvelles fonctions de commande ou de contrôle.

Encadré 5 : La mutation du service régulation

La lecture du cycle de Brayton dans le diagramme entropique, ainsi que les trois grandes ruptures autour de la turbine à gaz, nous ont permis de comprendre les logiques d'amélioration du rendement global des turbines à gaz, premier axe d'expansion des produits de Turbomeca.

Étudions maintenant le second axe d'expansion des produits de Turbomeca : la déclinaison du générateur de gaz en différents moteurs (Compte-rendu interne de la stratégie de Turbomeca, 1969).

3.1.2. La génération de nouvelles variantes de moteurs : expansion radiale

La déclinaison des générateurs de gaz en différents moteurs était l'apanage des motoristes des petites et moyennes puissances²⁷. Voyons quelles sont les applications de cette gamme de puissance sur lesquelles pouvaient être installées des turbines à gaz :

- les plateformes aéronautiques : avions voilure fixe, hélicoptères, engins cibles ;
- les véhicules terrestres : trains, voitures, chars ;
- les navires : hydroglisseurs, navires de guerre ;
- installations fixes : production d'électricité, chauffage...

La liste est loin d'être exhaustive. De plus, pour chacune des applications mobiles, la turbine à gaz pouvait être utilisée soit pour de l'énergie propulsive soit pour de l'énergie non propulsive.

En 1946, pour les raisons évoquées dans les paragraphes précédents, « *la turbine à gaz était, pour ainsi dire, un mal nécessaire pour les très grandes puissances, mais pour les petites puissances, il fallait en rester au moteur à piston* » (Szydlowski, 1975). À la sortie de la guerre, alors que les travaux de Turbomeca sur les grosses puissances étaient très concurrencés par d'autres motoristes (en France par Snecma) Szydlowski « *acquiesce la conviction qu'il serait plus utile, du point de vue de la technique, aussi bien que celui du rapport économique, de commencer à l'autre extrémité de l'échelle des puissances, c'est-à-dire de construire de toutes petites unités* » (Szydlowski, 1975).

²⁷ À l'exception des applications industrielles où l'on retrouve des puissances équivalentes à celles des générateurs de gaz des gros porteurs de l'aviation civile.

Imposer la turbine à gaz dans les petites puissances coûta à Szydlowski de lourds efforts. En effet, alors que la turbine à gaz avait définitivement sorti le moteur à piston des applications aéronautiques de moyennes et grandes puissances, il restait un grand concurrent sur la gamme des petites puissances de Turbomeca. Dans le monde terrestre, par ailleurs, le moteur à piston restait un concurrent sur toute la gamme, même pour les grandes puissances.

1) Les petites puissances aéronautiques : un fort potentiel de diversification

La difficulté à s'imposer sur les petites puissances dans l'aéronautique réside dans le fait que la réalisation d'une turbine à gaz à haut rendement est de plus en plus difficile lorsque sa puissance diminue. Ceci est dû à des jeux relatifs plus importants entre rotors et stators, à des vitesses de rotation plus grandes et à des épaisseurs minimales de parois. En conséquence, les rapports masse sur puissance, prix sur puissance, ainsi que la consommation spécifique ont tendance à croître en dessous d'une certaine puissance de la machine.

Les nombreux papiers de conférence de Szydlowski attestent de l'effort qui devait être entrepris pour convaincre les intégrateurs²⁸ de l'intérêt de la turbine à gaz (Szydlowski, 1950, 1951, 1952, 1957, 1958, 1960, 1963, 1965, 1966, 1974b, 1975) pour les petites puissances aéronautiques ou pour les applications terrestres. Un de ses premiers articles sur ce sujet s'intitulait *La turbine à gaz moteur de demain* (Szydlowski, 1950).



Figure 23– Un Fouga Magister en vol motorisé par des Marborés de Turbomeca

Quel discours majeur ressort de ces conférences ?

28 Clients de Turbomeca intégrant les turbine à gaz sur une plateforme (avion, hélicoptère...). Airbus et Eurocopter sont des intégrateurs

Chacun de ces documents est ainsi structuré : **une généalogie de la turbine à gaz, des éléments techniques sur les voies d'amélioration de ce produit, et des éléments de performances pour les applications auxquelles il pourrait être destiné**. Ces papiers peuvent aussi bien faire référence : à une architecture en particulier préférée par Turbomeca vis-à-vis d'une autre – c'est le cas des turbopropulseurs mono-corps (Szydlowski, 1974c) ou des réacteurs double-flux (Szydlowski, 1974a) ; à une comparaison entre performance des turbines à gaz et des moteurs à piston pour les avions légers (Szydlowski, 1960) ; ou encore à des propositions d'applications pour le train ou l'industrie devant des ingénieurs israéliens (Szydlowski, 1975).

Szydlowski, d'ailleurs, ne s'interdisait pas de citer certains de ses confrères avionneurs. Pour l'application turboréacteur, M. Mauboussin, directeur de la société Fouga – Figure 23, explique que *« la comparaison avec les avions d'entraînement équipés de moteurs à pistons n'est pas nécessaire, la supériorité de performance de l'avion léger à réaction est évidente »* (Szydlowski, 1957). Pour ce qui est de l'hélicoptère, c'est M. Marchetti, ingénieur en chef de Sud-Aviation, qui indique, dans (Szydlowski, 1957), que *« les inconvénients majeurs de la turbine à gaz, consommation élevée et bruit, se sont révélés moins gênants qu'on aurait pu le craindre. Compte tenu de l'augmentation de charge payante et de la vitesse de vol, la consommation par tonne/kilomètre est du même ordre que celle d'un appareil avec moteurs à pistons. Le kérosène étant meilleur marché que l'essence, le prix au kilomètre du combustible est en fait plus faible. Le seul inconvénient est la nécessité de réservoirs volumineux »*.



Figure 24– Hélicoptère Alouette II motorisé par un Astazou

Et ainsi, M. Szydlowski de rapporter les propos de M. Marchetti sur les avantages de la petite Turbine à gaz après les expérimentations sur hélicoptère Alouette II - Figure 24:

- *« un fonctionnement régulier et sans vibrations qui épargne l'hélicoptère;*
- *une facilité de régulation qui épargne au pilote de "garder ses tours";*

- *facilité d'installation ;*
- *facilité d'entretien avec une disponibilité de près de 100 % alors que les moteurs à pistons n'étaient que de 60 %;*
- *suppression du ventilateur de refroidissement;*
- *rapidité de mise en route;*
- *sécurité de la turbine, d'une part, car moins sujette aux pannes et sécurité de l'hélicoptère d'autre part, car la turbine peut, au prix de dégâts internes, fournir en cas d'urgence, une puissance supérieure à la normale, pour éviter des accidents graves. »*

Dans certains articles (1960, 1963), Szydlowski, pour soutenir son discours, en intégrant les caractéristiques globales du moteur à pistons et de la turbine à gaz, alla même jusqu'à proposer des modifications dans le business model de l'opérateur. En effet, en faisant une comparaison économique, **il expliquait qu'un opérateur de Porter, pour effectuer une mission à Courchevel, pouvait réduire les billets d'avions proposés de 20 francs en utilisant une turbine à gaz !**

Malgré ses avantages face au moteur à piston, puissance massique et fiabilité, sa consommation n'en demeura pas moins un critère quasi éliminatoire pour les puissances en dessous de 200 ch pour les raisons évoquées plus haut sur les effets de taille.

Finalement, grâce aux efforts déployés par les protagonistes de la turbine à gaz ce moteur réussit à s'imposer dans les puissances supérieures à 300 kW sur l'ensemble des variantes de moteurs citées plus haut, mais les petites puissances restèrent le domaine du moteur à piston aéronautique.

Un exemple de création de variantes de moteur – L’auxiliaire de puissance APS3200

La première turbine à gaz conçue et réalisée par Turbomeca était l’auxiliaire de puissance (APU) TT782. Puis, pendant les Trente Glorieuses, il y eut peu d’investissements dans ce domaine. À partir de 1977, quelques projets d’APU virent le jour, notamment les AST600 et AST950, qui furent vendus à quelques exemplaires seulement.

Mais il fallut attendre la fin des années 1980 pour voir le projet phare de Turbomeca dans le monde des APU : l’APS3200. En 1989, Turbomeca et Sundstrand, un fabricant d’APU, créèrent la *joint venture* APIC pour Auxiliary Power International Corporation pour le développement de l’APS3200 pour avion monocouloir.

Lors de son démarrage, ce projet profitait d’un contexte favorable. D’abord, il intéressait fortement les avionneurs et les compagnies aériennes qui y voyaient une alternative au monopole du fabricant d’APU Garrett. Ensuite, il s’insérait parfaitement dans le programme, qui venait de démarrer à cette époque, de l’Airbus A320, un monocouloir dont Sundstrand connaissait bien le marché pour lequel elle avait développé un APU quelques années auparavant. Enfin, la technologie de l’Arrius, le dernier né de Turbomeca, était disponible pour le générateur de gaz.

Ce moteur fut l’un des moteurs développés le plus rapidement à Turbomeca. Il s’est écoulé 43 mois exactement entre la pré-étude lancée en novembre 1989 et la certification américaine du moteur – aujourd’hui, un moteur est développé en plus de 50 mois. En 1994, le moteur était déjà en service chez United Airlines. Non seulement ce moteur avait été développé très rapidement, mais de plus il intégrait de nombreuses technologies nouvelles. Il permit à Turbomeca d’intégrer des connaissances nouvelles sur : les arbres surcritiques sur le générateur de gaz, les pales traversantes, les compresseurs allégés ou encore l’acoustique. La majorité de ces connaissances fut récupérée sur l’ensemble des familles de produits Turbomeca.

Quelles capacités possédait Turbomeca à la fin des années 1980 pour pouvoir conduire un projet renfermant autant d’innovations dans un délai aussi court ?

Comme nous le verrons plus loin, ce projet profitait probablement des dernières années des moyens de conception innovante des années 1960-80 mis en place par Szydlowski.

Encadré 6 : Exemple de conception alternative de moteur

2) Les turbines terrestres et marines : les aérodérivés

L'autre axe de diversification portait sur les turbines à gaz terrestres et marines. Ce sont les aérodérivés, c'est-à-dire des turbines à gaz qui ne volent pas, mais dont le générateur de gaz est issu d'une turbine aéronautique. Ces aérodérivés étaient destinés à : des groupes de pompes, des turbogénérateurs d'air, des machines frigorifiques, des moteurs de traction, des turbo alternateurs...

Pour ces applications, la turbine à gaz pouvait être valorisée à travers sa simplicité – une seule pièce tournante – conduisant à une fiabilité plus importante et des besoins de maintenance inférieurs au moteur à piston. En revanche, du fait de leur meilleur rendement, les moteurs Diesel ont une consommation de carburant plus intéressante que les turbines à gaz. Pour concurrencer ces derniers sur ce point, les motoristes valorisaient les gaz d'échappement – très chauds - dans un second cycle. C'est ce que l'on appelle la cogénération. Bien entendu, ces dispositifs étaient très lourds, et ne pouvaient être utilisés que sur des applications fixes.

En fait, dès la conception de ses premiers générateurs de gaz, Szydlowski a toujours cru en la filière non aéronautique pour ces moteurs. Nous l'avons vu dans les premières étapes de la création de Turbomeca, de nombreuses tentatives furent lancées dans cette perspective. Certains des projets ayant été entrepris font partie des grandes inventions historiques françaises. Parmi ces projets de motorisation, nous pouvons citer, entre autres :

- l'Étoile filante de Renault ayant battu un record de vitesse à 308 km/h motorisée par un Turmo I (en 1956),
- le Naviplane de Bertin, un aéroglisseur marin qui était motorisé par des Astazou II P (en 1966),
- l'Aérotrain de Bertin, dont la sustentation était réalisée par un Turmastazou et la propulsion par un Turmo IIIE6 (en 1969),
- le premier TGV 001 motorisé par un turbomoteur Turmo IIIG, ayant atteint la vitesse de 318 km/h (en 1972),
- un projet de turbine à gaz marine (Eurodyn) pour propulser un catamaran haute vitesse pour le transport de passagers.
- un projet de turboalternateur de 1800 kW pour des frégates du MOD britannique qui était le premier moteur de Turbomeca n'étant pas un aéro-dérivé (en 2000).

Afin de réaliser ces projets, Turbomeca créa une entité autonome regroupant l'ensemble des métiers de l'entreprise (fabrication, vente, achat, maintenance). Cette entité était appelée « les

TTM » (turbines terrestres et marines). C'était l'unique lignée de produits organisée de la sorte. Ce statut était principalement dû au fait que ces moteurs non aéronautiques devaient répondre à des exigences spécifiques. En effet, pour ces applications, le financement, la réglementation et les marchés différaient grandement de l'aéronautique. Une autonomie était donc nécessaire pour une entité qui devait s'attaquer à des marchés aussi divers et variés que ceux cités plus haut, dont la plupart étaient eux-mêmes des projets exploratoires.

Ces explorations profitèrent grandement à Turbomeca. Cet attribut « non-volant » de ces moteurs permit d'intégrer de nombreuses connaissances qui n'auraient jamais pu être travaillées dans le cadre de projets aéronautiques bien plus contraints. Ce fut le cas des travaux sur les échangeurs pour les blindés, mais aussi sur l'électronique de puissance avec les turboalternateurs, ou encore les chambres de combustion Low Nox. Cette petite entité abritant de nombreux métiers de Turbomeca était en fait un vrai laboratoire d'exploration en marché et compétences (mais non intentionnel pour ce dernier).

Mais l'exploration sur ces deux axes paraît bien plus simple en théorie qu'en pratique. Nous verrons en effet dans le paragraphe suivant que, pour améliorer à la fois ses générateurs de gaz et les dériver en de nombreux moteurs, Turbomeca dut se doter de moyens de conception innovants.

3.1.3. Des moyens pour améliorer le cœur thermodynamique et explorer de nouvelles applications

La lecture du cycle de Brayton peut être trompeuse. En effet, elle pourrait laisser croire que pour faire de bons générateurs de gaz, le motoriste n'aurait qu'à se doter d'architectes moteurs expérimentés, d'experts en aérodynamique et d'une fonderie de pointe. La formule, certes, paraît simple, mais comme toujours, la pratique est bien plus complexe. En effet, une turbine à gaz est un système dont les paramètres de conception sont très couplés au sens de Suh (1990). À plusieurs paramètres de conception sont associées plusieurs fonctions. Ainsi, l'ajustement de l'un de ces paramètres aura un impact sur l'ensemble du moteur. Bien entendu, l'art des architectes moteurs réside justement dans leur capacité à optimiser l'ensemble de ces paramètres de conception dans un souci d'amélioration du rendement global du moteur. Mais il n'en demeure pas moins qu'un grand nombre d'inconnues restent importantes durant la conception. La place des essais dans la conception des moteurs est donc

prépondérante. En témoigne le pourcentage important des essais dans le coût de développement des moteurs, de l'ordre de 50%.

Par ailleurs, non seulement la mise au point d'un générateur de gaz est longue et complexe, mais sa conception est étroitement dépendante de son application finale. Ainsi, un bon générateur de gaz pour un turbomoteur d'hélicoptère ne sera pas nécessairement optimisé pour un turbopropulseur destiné à un avion d'affaires. De même, un générateur de gaz qui se veut très standard aura de fortes chances d'être moyen partout.

Avec sa grande expérience dans le monde du moteur, pour Szydlowski, l'importance des essais dans le développement d'un nouveau moteur ne faisait pas de doute. Sa forte considération pour les hommes de terrain témoignait dans ce sens : « *Szydlowski payait plus ses employés d'atelier que son personnel de bureau* » (Decôme, 1999). D'autres citations du fondateur de Turbomeca soutiennent ce point : « *Si vous me demandez ce qu'il faut faire pour obtenir des résultats, je vous répondrai : libérez-vous d'abord de toutes idées préconçues et observez les phénomènes qui se produisent au cours d'un essai. Introduisez des modifications et notez les résultats obtenus : s'ils sont positifs, continuez dans cette voie ; s'ils sont négatifs, partez dans la direction diamétralement opposée* » (Szydlowski, 1975). Aussi Joseph Szydlowski possédait-il une lampe dans sa chambre qui était reliée au banc d'essai. Quand un essai important s'arrêtait, elle s'éteignait ! Cela lui permettait d'aller vérifier la manière dont s'était déroulé un essai critique²⁹.

En plus des nombreux bancs d'essai dont il disposait, et afin d'accélérer la mise à l'essai des moteurs, Szydlowski se dota de deux structures organisationnelles : un atelier de réalisation des moteurs prototypes et un centre d'essai en vol. Ces deux structures étaient les pivots de l'innovation chez Turbomeca. Nous les avons retrouvés dans l'ensemble des projets de nouveaux produits que nous avons étudiés.

1- La « NASA » : l'atelier de réalisation des moteurs prototypes

Avant 1969, à Turbomeca, il n'y avait pas de cellules dédiées aux moteurs prototypes. Ce travail était confié à un ingénieur de fabrication qui se débrouillait avec les moyens série. Mais, en août de cette même année, fut démarrée une petite structure comprenant 18 ouvriers pour réaliser des pièces de bancs compresseurs et des turbines. Cette structure permettait dans un premier temps de concrétiser les demandes du patron. Elle comprenait un responsable, 17

²⁹ Pour l'anecdote, un de ses responsables des essais à l'époque aurait trafiqué les branchements pour qu'elle reste allumée tout le temps et pour éviter de se faire passer un savon en pleine nuit par le patron.

opérateurs et 10 machines-outils conventionnelles (tours parallèles, machines à pointer, rectifieuses et machines à étinceler). Afin de mieux structurer cette activité, **en 1973, fut créé, à la demande du directeur général de l'époque, M. Pertica, un atelier de réalisation des moteurs prototypes. L'idée était de réaliser les pièces des moteurs prototypes de façon plus rapide, plus structurée et mieux gérée. Tous les programmes d'industrialisation, de fabrication et d'approvisionnement de ces moteurs étaient gérés par cet atelier avec la responsabilité de respecter les délais de livraison, quelles que soient les contraintes. Cet atelier était surnommé la « NASA » à Turbomeca.**

Cette activité de prototypage était soumise à beaucoup d'aléas dus aux dessins du bureau d'études, aux approvisionnements de matière ainsi qu'au manque de disponibilité des machines. Il était donc demandé un effort particulier aux opérateurs pour faire des heures supplémentaires et rattraper les retards. D'après l'ancien responsable de la NASA, qui devint plus tard directeur de production : *« Dans l'atelier on partait du principe qu'il n'y avait ni nuit, ni week-end, ni congé. On pouvait faire des heures supplémentaires à toute heure du jour ou de la nuit. »* Cela semblait par ailleurs être bien accepté par les personnes concernées. À titre d'exemple : le moteur pouvait être essayé le jour puis démonté la nuit pour refaire des pièces et remonté le lendemain pour relancer les essais. L'ancien responsable de la NASA d'ajouter : *« On faisait ce que l'on voulait, il n'y avait pas de contraintes particulières. »* Bien évidemment, *« ces pratiques entraînaient des abus »* (Claveau, 2008). Ce dernier gérait les achats en direct. Il avait accès aux fournisseurs sans passer par le service achats. À cette entité était laissée une grande autonomie tant au plan humain que financier, favorisant ainsi la flexibilité et la rapidité requises pour l'activité prototypage.

Cet atelier permit de soutenir le développement de nombreux moteurs dont l'APS 3200 –voir Encadré 6- qui fut le dernier à en profiter. En effet, nous le verrons dans le paragraphe suivant, à cause de contraintes industrielles et réglementaires, cette activité de prototypage dut peu à peu disparaître.

2- La CGTM : le centre d'essais en vol de Turbomeca

La CGTM, Compagnie Générale des Turbomachines, fut créée en 1956. Cette société était l'une des solutions du gouvernement après la guerre pour réorganiser l'industrie aéronautique française. En effet, à l'époque, l'État était l'unique financeur (et acheteur pour beaucoup d'applications) de Turbomeca et Hispano-Suiza, les deux entreprises françaises opérant dans les turbines à gaz de petites et moyennes puissances. Il lui semblait donc plus approprié de

rapprocher les deux entreprises. Cette association serait construite à travers une filiale à parts égales des deux entreprises (Decôme 1998). D'après Claveau (2008), le caractère imprévisible de Szydlowski n'était pas vraiment apprécié par le ministère, qui préférait « *le bon sens et la loyauté du PDG d'Hispano-Suiza* ». Un rapprochement des deux entreprises semblait donc plutôt être défavorable à Turbomeca, ce que Szydlowski sentit dès le début de ce projet.

L'objet de cette société était « *l'étude, l'expérimentation, la mise au point et la réalisation des turbomachines et turbopropulseurs [...] tout ensemble pouvant être utilisé pour la propulsion ou fourniture d'énergie [...] à un matériel quelconque* » (Decôme, 1999). Les bureaux d'étude de cette entreprise étaient situés à Levallois-Perret, près des bureaux d'études d'Hispano-Suiza, et un centre d'essai en vol était localisé à Marignane, dans les hangars du centre d'essai en vol d'Hispano-Suiza. Le fait que ces deux entités étaient principalement constituées de personnels issus de cette dernière, et que la création de cette entreprise semblait lui avoir été imposée, était vu d'un mauvais œil par Szydlowski.

Les activités de la CGTM furent finalement majoritairement centrées sur de la modification avion et des essais en vol. Rares ont été les projets de conception de turbomachines. Au début, les travaux comprenaient aussi bien des essais de givrage en vol sur Super Constellation, dont la CGTM était spécialiste, que de la remotorisation d'avions de Lockheed avec des turboréacteurs. Finalement, cette filiale se spécialisa dans la mise au point des turbomachines sur les applications auxquelles elles étaient destinées. Ces dernières pouvaient comprendre aussi bien les aéronefs que des turbines marines ou des turbopompes pour pétroles et gaz.

À la fin des années 1960, le vent tourna de nouveau en faveur de Szydlowski, car, d'une part, Hispano-Suiza se détachait des activités de la CGTM et allait être absorbée par la Snecma et, d'autre part, la confiance que Szydlowski accordait aux équipes de la CGTM s'était renforcée depuis l'arrivée de son nouveau PDG. Dès lors, en 1967, Szydlowski demanda le rapprochement physique à côté de l'usine de Turbomeca. Ces bureaux d'études ainsi que le centre d'essai en vol furent installés à Uzein sur l'aéroport de Pau. Par la suite, Hispano-Suiza joua uniquement son rôle d'actionnaire dans la CGTM. Ainsi, alors que cette dernière avait été créée pour absorber Turbomeca dans les 1950, c'est le contraire qui se produisit...

Les activités de la CGTM après les années 1970 permirent d'accompagner Turbomeca dans la mise au point de ces turbomachines sur un ensemble d'applications très larges et pour la quasi-totalité des types de moteurs de l'entreprise : du turbomoteur pour hélicoptère au turbopropulseur pour avion, en passant par les auxiliaires de puissance pour véhicule blindé.

Mais les travaux de la CGTM permirent surtout de supporter fortement la stratégie de Turbomeca visant à devenir un « grand » dans le monde des hélicoptères.

En plus de la mise au point des moteurs sur leurs applications respectives, cette filiale était aussi un vrai moyen de promotion des moteurs de Turbomeca sur des plateformes motorisées par la concurrence. C'est le cas du projet sur l'hélicoptère S76 de Sikorsky, dont les opérateurs demandèrent une remotorisation avec un turbomoteur Turbomeca l'Arriel 1S. Cette remotorisation fut entièrement opérée par la CGTM. C'était la première fois dans son histoire qu'elle devait concevoir tous les modules permettant l'adaptation du moteur à une cellule pour laquelle il n'était pas prévu de réaliser tous les essais en vol permettant la certification ainsi que les nouvelles performances et les procédures d'emploi de la cellule ainsi modifiée. Après ce projet, Turbomeca possédait ainsi une compétence clé qui était jusque-là l'apanage des avionneurs : le retrofit d'hélicoptère. D'autres activités importantes étaient aussi entreprises par la CGTM, telles que le projet EDF – voir Encadré 7 – pour lequel la CGTM conçut non seulement des accessoires adaptés à la réalisation de la mission, des recommandations aux autorités de certification, des instruments de vol pour la qualification de la mission, mais aussi de la formation aux pilotes.

L'exploration d'une nouvelle mission – la Mission EDF

Au début des années 1980, la CGTM participa à la création d'une nouvelle mission, la maintenance des lignes électriques d'EDF en hélicoptère.

C'est lors d'un repas que le chef d'exploitation des hélicoptères d'EDF évoqua les problèmes d'interventions en hélicoptère sur les lignes haute tension en montagne. La CGTM proposa donc sa contribution. Le diagnostic de la mission permit de constater qu'EDF ne travaillait pas en sécurité avec son hélicoptère monomoteur. Les ingénieurs du centre d'essais en vol proposaient trois axes de travail mettant en avant le spectre sur lequel s'étendaient leurs compétences :

- D'abord, utiliser un bimoteur pour pouvoir tenir le vol stationnaire après une panne moteur.
- Ensuite, amener de la stabilité à la nacelle (transportant les opérateurs EDF) qui devait rester perpendiculaire à l'hélicoptère avec un système trois-points.
- Enfin, proposer un système permettant d'aligner l'hélicoptère sur la verticale de la nacelle afin de réduire la fatigue du pilote en montagne.

Après deux ans de travaux sur ce projet, la CGTM fournit une nouvelle nacelle répondant aux exigences d'EDF, un instrument de bord d'aide au pilotage avec charge héliportée externe (APACHE), une norme pour le travail sur ligne héliporté, ainsi que des modules de formation aux pilotes.

Ainsi, le centre d'essai en vol proposait à EDF un package complet, allant de la sélection de l'aéronef et de sa motorisation à la validation de la mission par les autorités de certification, en passant par le matériel de travail adéquat.

Encadré 7 : La mission EDF

Pourtant, alors que la NASA, la CGTM et les turbines terrestres et marines semblaient être trois moyens clés pour soutenir l'innovation chez Turbomeca, elles étaient amenées à disparaître. En effet, alors qu'elles étaient très adaptées pour les deux expansions des produits Turbomeca, sur 1) le générateur de gaz et 2) les déclinaisons en variantes de moteurs, elles s'avérèrent inappropriées dans le contexte qui apparut à partir des années 1980 – 90.

Résumé

À partir des années 1960, la turbine à gaz de moyenne puissance suscitait un fort intérêt de la part des intégrateurs. Turbomeca développa donc ses capacités de fabrication pour suivre cette nouvelle demande. Pour améliorer ses produits, Turbomeca poursuivait une double expansion : innovation sur le générateur de gaz et déclinaison en variantes moteurs. Pour soutenir cette double expansion et éviter des conflits sur les ressources, l'entreprise dû se munir d'activités et moyens parallèles à la série : l'atelier de fabrication de moteur prototype, un centre d'essai en vol et une entité pour les turbines terrestres et marines. Dans la cartographie C-K, ci-dessous, nous avons représenté les différentes voies d'amélioration de la turbine à gaz. Bien entendu, cette cartographie est très simplifiée, nous n'avons par reporté toutes les voies d'amélioration et connaissances en jeu dans le processus d'amélioration des turbines à gaz. Commentons cette cartographie. Dans l'espace C, les deux premières partitions A et B représentent les deux voies d'expansions des produits de Turbomeca : l'amélioration du générateur de gaz ou la déclinaison en variantes moteur. Dans la première, les deux chemins d'amélioration du générateur de gaz sont l'augmentation du taux de compression et/ou de la température en améliorant respectivement l'aérodynamique et les matériaux. Une autre voie d'amélioration du générateur de gaz est de jouer sur la régulation. Ces voies d'amélioration classiques ont cependant connu les trois innovations de ruptures décrites dans cette section : 1) nouvelles architectures compresseurs, 2) architecture à turbine libre, 3) régulation numérique.

Sur la cartographie Figure 25 – Cartographie C-K représentant le raisonnement de conception dans la période 1955-1980 à Turbomeca sont aussi représentées les entités organisationnelles sur lesquelles l'entreprise pouvait s'appuyer pour conduire ses améliorations de produits. À savoir un atelier de fabrication de moteurs prototypes pour « aller vite à l'essai », une centre d'essai en vol CGTM permettant de tester les turbines à gaz sur de nombreuses applications, ainsi qu'une entité spécialisée dans les aérodérivés à savoir la déclinaison de moteurs aéronautiques en turbines terrestres marines ou industrielles.

Dans l'espace K, on remarque que les connaissances sont organisées autour des métiers. Par exemple, les aérodynamiciens sont regroupés et travaillent à la fois sur l'aérodynamique des compresseurs et des turbines. Par ailleurs, le centre d'essai en vol a été représenté comme l'interaction entre la turbine à gaz et les applications auxquelles elle devait s'appliquer.

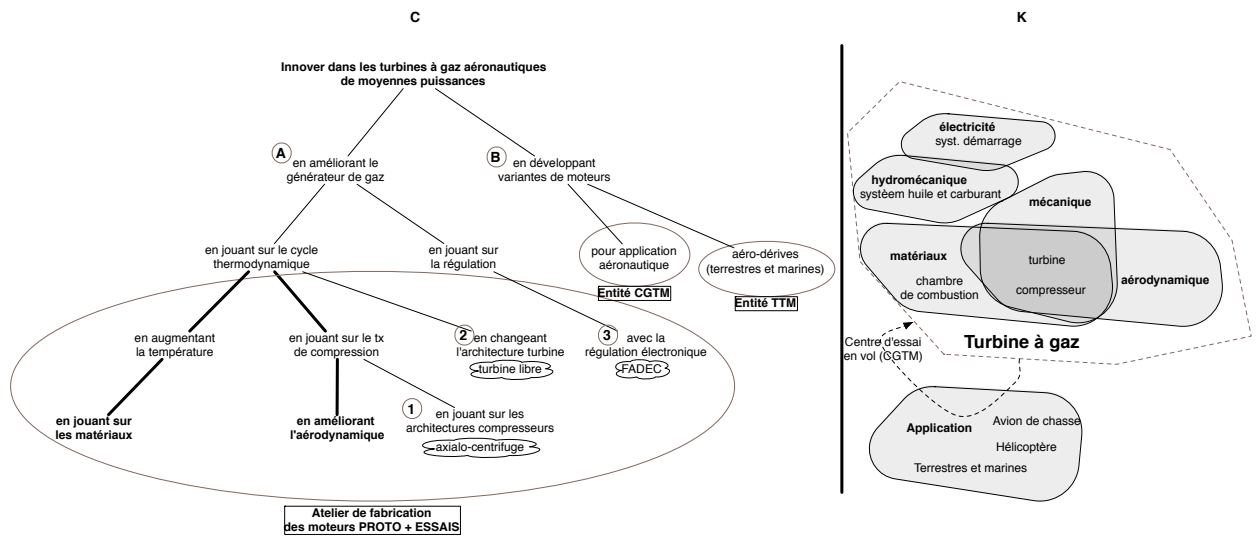


Figure 25 – Cartographie C-K représentant le raisonnement de conception dans la période 1955-1980 à Turbomeca

Le cadre D-I-M ci-dessous fait la synthèse de données collectées selon chacune des capacités d'innovation sur le raisonnement de conception, les moyens d'incubation et l'interaction avec l'écosystème.

	Design :	Incubation:	Mutation:
	Raisonnement de conception	Moyens d'incubation	Interaction avec l'écosystème
Contexte	- La turbine à gaz est appliquée dans l'aéronautique sur quasiment toutes les plateformes - Sur les petites puissances, elle reste cependant en concurrence avec le moteur à piston	Nombreuses inconnues dans les paramètres de conception → Besoin de nombreux essais	- Industrie aéronautique en forte croissance - Importants financements pour les applications militaires - Un marché majoritairement français avec une faible concurrence
Données	<u>Connaissances :</u> Amélioration du générateur de gaz : augmentation de la température et augmentation du taux de compression <u>Concepts :</u> Générateur de gaz et ses variantes moteur à intégrer sur différentes applications	- Bancs d'essai (comme tout motoriste) - Atelier de fabrication de moteur prototype « NASA » - Centre d'essais en vol : la CGTM : pour debugger les moteurs sur leur application - Département des Turbines Terrestres et Marines : un monde d'applications « non-volantes » simplifiant certains apprentissages technologiques	- Dans un marché militaire fermé, liens importants entre motoristes et intégrateurs - Participation au débat scientifique de l'aéronautique pour démontrer la supériorité de la turbine à gaz - Utilisation du Centre d'essai en vol, CGTM pour faire de la démonstration en vol à destination des opérateurs et des intégrateurs

Tableau 8– Synthèse des capacités de conception innovante durant la période 1955-1980.

3.3. 1980-2000 : la restructuration et l'orientation vers l'hélicoptère

À la fin des années 1970, Turbomeca connut de nombreux changements qui structurèrent l'évolution des produits de l'entreprise pour les années suivantes (Ouvrage Collectif Interne Turbomeca, 1986, 1998).

D'abord, les années 1980 marquèrent un tournant dans les lignées de produits pour ce motoriste. Jusqu'en 1980, le nombre de turbomoteurs pour hélicoptère et de turboréacteurs produits était sensiblement équivalent. Puis, de 1981 à 2007, le nombre de turbomoteurs fut de 13 000 contre 2 200 turboréacteurs. Lors de cette période, Turbomeca devint donc majoritairement un motoriste d'hélicoptère. Plusieurs raisons furent évoquées par la société (Claveau, 2008). La première était l'échec dans le monde des turbopropulseurs dû, entre autres, à la faillite d'Handley-Page³⁰ ; la deuxième un non-renouvellement du marché des avions à réaction d'entraînement, qui était le marché de Turbomeca dans le monde des turboréacteurs ; et la troisième de fortes difficultés pour trouver des marchés pérennes dans le monde des turbines terrestres et marines. Par ailleurs, Turbomeca, à cette époque, pouvait compter sur ces nouveaux turbomoteurs très fiables qui lui permirent d'acquérir une renommée mondiale dans le monde de l'hélicoptère (*ibid*).

Dans le domaine de l'hélicoptère, le principal client de Turbomeca jusqu'à aujourd'hui a toujours été l'hélicoptériste français Sud Aviation, devenu Aérospatiale en 1970, puis Eurocopter en 1992. Cet avionneur, une entreprise française, inscrite dans une politique de développement de l'industrie aéronautique de défense française de l'après-guerre, n'avait qu'un seul motoriste à sa disposition pour ces nouvelles plateformes : Turbomeca. Mais avec la diminution des financements publics dans la défense, cette entreprise s'orienta vers le développement de plateformes pour le marché civil dont la motorisation était soumise à des normes internationales de la concurrence bien plus strictes. Ainsi, à la fin des années 1990, Turbomeca n'était plus le motoriste automatique de l'intégrateur français. L'entreprise se retrouvait donc en concurrence avec de grands motoristes d'hélicoptère, comme Pratt & Whitney Canada et, pour la première fois dans son histoire, dans une situation où elle devrait démontrer à ses clients hélicoptéristes que ses moteurs étaient les meilleurs.

³⁰ La **Handley Page Aircraft Company** était la première entreprise britannique à concevoir et fabriquer des avions à une échelle industrielle, elle fut fondée en 1909 par Handley Page et fit volontairement faillite en 1970. Certains des avions de cette entreprise étaient motorisés par Turbomeca.

Étant donné qu'à partir de cette époque, les principaux développements de nouveaux moteurs concernaient les plateformes hélicoptères, la majorité des turbines à gaz développées étaient des turbomoteurs. Les générateurs de gaz étaient donc conçus et optimisés pour les turbomoteurs bien que pour chaque variante de moteur développé, une déclinaison en turbopropulseur ou TTM n'était jamais vraiment écartée (on ne sait jamais !).

3.3.1. La turbine à gaz, une technologie mature

Les voies d'amélioration des générateurs de gaz citées plus haut restaient inchangées. L'objectif était toujours d'augmenter les puissances spécifiques et consommations spécifiques en second lieu. Les voies d'amélioration étaient toujours à l'augmentation du taux de compression et à l'amélioration de la température entrée turbine. Mais dans les deux cas, la technologie tendait vers une asymptote.

En premier lieu, pour ce qui est du taux de compression, les architectures optimales pour chaque gamme de puissance étaient connues dès le début des années 1980. Ainsi, dans la gamme des 500 kW fut utilisé un compresseur centrifuge, dans celle des 1 000 kW un bi-centrifuge et dans celle de 1 500 kW l'axialo-centrifuge. Ces *roadmaps* étaient très finement étudiées dans la littérature. Le reste du *travail* consistait à mettre au point ces technologies sur les machines pour en tirer le meilleur taux de compression possible.

Pour ce qui est de la température entrée turbine, les avancées dans le domaine des matériaux et les différentes ruptures apportées par les décennies précédentes réduisirent progressivement ce potentiel d'amélioration. L'optimisation des turbines à gaz devint donc de plus en plus coûteuse. Les motoristes se battaient pour gagner ce petit pourcent de puissance ou de consommation pouvant faire perdre ou gagner un contrat avec un avionneur. Avec la disparition des financements publics, et pour un ticket d'entrée de l'ordre de plusieurs dizaines de millions d'euros, un tel échec constituait un risque important pour l'entreprise. Les efforts de l'entreprise se concentraient donc majoritairement sur l'amélioration incrémentale des turbines à gaz afin d'être assuré de pouvoir rester dans la course.

3.3.2. L'arrivée de l'industrialisation unique : la disparition des capacités de prototypage

En parallèle, à partir des années 1980, la réglementation internationale aéronautique se durcit. Elle s'étendit au-delà de la conception des pièces. Ainsi, les autorités nationales et internationales se mirent à certifier les pièces avec leurs moyens de fabrication. L'impact sur

le développement d'un moteur fut très important, car il existait deux industrialisations différentes : une industrialisation prototype dont nous avons parlé au § précédent et une industrialisation série. Cette séparation entre les deux moyens de fabrication pouvait entraîner des augmentations significatives de délais et de budget pour les développements. Dans certains cas, des pièces qui avaient été fabriquées avec les moyens prototypes ne pouvaient être certifiées avec les moyens série.

Plus tard, dans les années 1990, l'implication de la direction de la qualité devint prédominante dans le processus de conception. Dans un objectif de réduction des délais de développement et d'amélioration de la qualité vis-à-vis des autorités de certification, **Turbomeca passa à l'industrialisation unique, soit la disparition des moyens de fabrication prototypes !** Toutes les pièces devaient être faites avec les moyens de la série, quelle que soit l'étape de la conception. À cette époque, le management de l'entreprise bannit quasiment le mot « prototype » de l'entreprise. C'était la fin de l'atelier de fabrication de moteurs prototypes ! La NASA disparut avec l'industrialisation unique.

Pourtant, la dualité dans les objectifs de prototypages et les objectifs de série subsistait. Le directeur industriel de l'époque nous l'affirma en ces termes : *« En série, l'entreprise était dans de la planification alors que pour le prototypage, sur des demandes spontanées. »* Ce constat fait, ce dernier mit en place, à la fin des années 1990, des postes d'ingénieurs de marque production pour suivre les programmes à la fois en développement puis en série. Ils permettaient de garder une vue globale sur le développement et d'anticiper les difficultés de fabrication ainsi que les modifications de conception pour intervenir le plus en amont possible³¹.

³¹ Ces postes furent supprimés en 2005.

Résumé

Ainsi, à son entrée dans le XXI^e siècle, Turbomeca était désormais un motoriste dont la principale lignée de produit était le turbomoteur pour hélicoptère, avec comme client principal Eurocopter. La mise en place de l'industrialisation unique et le renforcement de la qualité permirent à Turbomeca de répondre aux impératifs de qualité, de coûts et de délais imposés par des clients intégrateurs et opérateurs toujours plus exigeants. Celle-ci fit néanmoins disparaître les capacités de prototypage rapide de l'entreprise avec l'arrêt de l'activité historique de l'atelier de fabrication des moteurs prototypes. L'exploration pour se diversifier sur d'autres lignées de produit était cependant toujours d'actualité. C'était le cas de la TM 1800 pour la génération électrique à bord de frégates ou encore l'APS 3200, l'auxiliaire de puissance dont les activités furent cédées à Sundstrand.

La cartographie C-K, Figure 26 ci-dessous, est issue de la cartographie de la période 1955-1980. Sur celle-ci nous mettons clairement en évidence que les voies d'amélioration sont stabilisées : on ne voit plus apparaître de rupture majeure dans l'amélioration du générateur de gaz. Néanmoins, bien que la déclinaison en variantes moteur, qu'elles soient aéronautiques marines ou terrestres, soit toujours d'actualité à cette période, la préférence est cependant clairement donnée à l'hélicoptère. Par ailleurs, on peut remarquer que l'atelier prototypage rapide a disparu au profit des moyens série, qui assuraient à la fois la fabrication des moteurs séries et des moteurs de recherche et développement. En ce qui concerne les connaissances, la régulation hydromécanique est devenue numérique suite à l'apparition de l'électronique chez les hydromécaniciens.

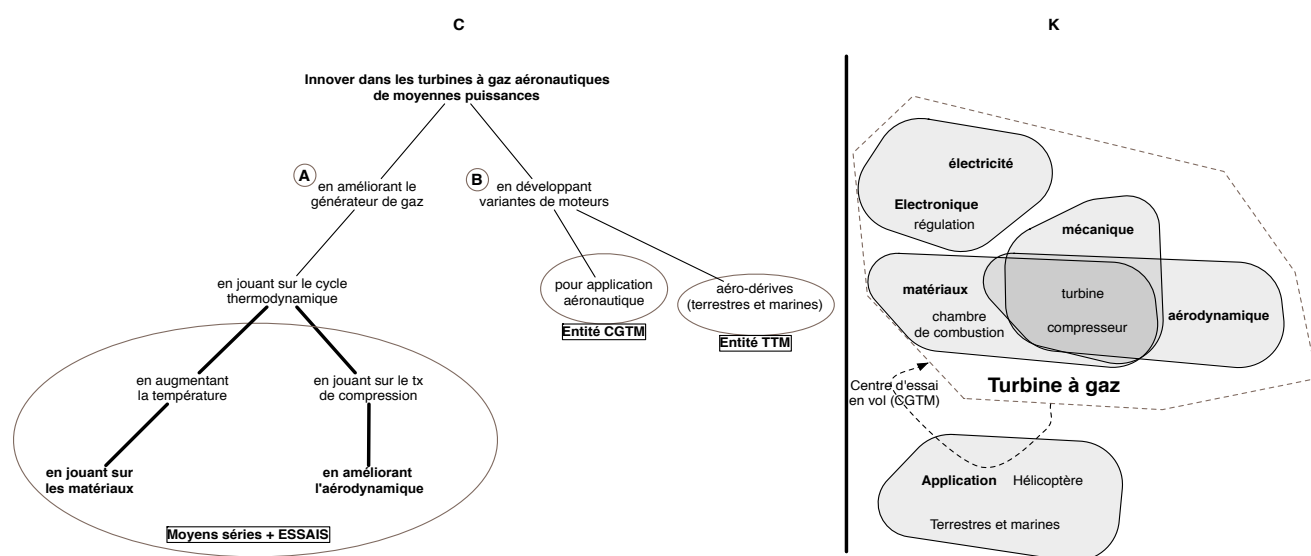


Figure 26 – Cartographie C-K représentant le raisonnement de conception de 1950 à 1980

Le Tableau 9 ci-dessous fait la synthèse à travers notre cadre théorique D-I-M des capacités de conception innovante durant la période d'orientation vers les applications hélicoptères.

	Design : Raisonnement de conception	Incubation : Moyens d'incubation	ecosystemM : Interaction avec l'écosystème
Contexte	- Quarante ans après son invention, la turbine à gaz est une technologie qui arrive à maturité - Les voies d'amélioration sont inchangées depuis son invention	La turbine à gaz a des paramètres de conception et fonctions très couplées → Besoin de nombreux essais	- Industrie aéronautique en forte croissance - Importants financements pour les applications militaires - Un marché majoritairement français avec une faible concurrence
Initiatives	<u>Connaissances :</u> Amélioration du générateur de gaz : augmentation de la température et augmentation du taux de compression <u>Concepts :</u> Générateur de gaz et ses variantes moteurs à intégrer sur différentes applications	- Bancs d'essai (comme tout motoriste) - Atelier de fabrication de moteur prototype « NASA » - Centre d'essais en vol : la CGTM : pour « débayer » les moteurs sur leur application - Département des Turbines Terrestres et marines : des applications « non-volantes » simplifiant certains apprentissages technologiques	- Dans un marché militaire fermé, liens importants entre motoristes et intégrateurs - Utilisation du Centre d'essai en vol, CGTM pour faire de la démonstration en vol à destination des opérateurs et des intégrateurs

Tableau 9– Synthèse de la période 1980-2000 à travers le cadre théorique D-I-M

3.4. 2000-2008 : conception réglée et politique de démonstrateurs, principal vecteur pour l'innovation

La maturité technologique de la turbine à gaz ainsi que la focalisation sur le monde de l'hélicoptère constituaient le contexte idéal pour renforcer la qualité dans le développement et la fabrication des moteurs de Turbomeca. Les produits à concevoir, les turbines à gaz, maîtrisés depuis près de 50 ans, arrivaient à maturité. Du point de vue de Turbomeca, les plateformes pour lesquelles elles étaient destinées évoluaient de manière incrémentale par une amélioration progressive du ratio puissance installée sur charge utile. Ce cadre, combiné au développement des démarches qualité venues du Japon, permit 1) une structuration du processus de conception 2) s'appuyant sur un processus d'innovation bien connu des motoristes : le démonstrateur.

3.4.1. Une stratégie monolignée, la turbine à gaz d'hélicoptère

Au début des années 2000, la croissance du marché des hélicoptères dans le monde accentua ce recentrage sur les hélicoptères. Cette croissance avait deux sources majeures. La première était le renouvellement de la flotte civile vieillissante dans les pays développés. Les hélicoptères des années 1970-80 arrivaient en fin de cycle de vie, et les plateformes devaient être renouvelées. La seconde était la croissance des pays émergents. En effet, à partir d'un certain seuil de PIB par habitant, un pays commence à pouvoir s'équiper en hélicoptères militaires ou civils. C'est le cas notamment des BRIC – Brésil, Russie, Inde, Chine- dont la demande en hélicoptères militaires et civils n'a pas cessé de croître durant les années 2000. Ainsi, la turbine à gaz d'hélicoptère devait suivre cette croissance.

L'entreprise construisit donc sa stratégie et son processus de conception avec le soutien des maisons mères auxquelles elle appartenait depuis la mort de Szydlowski à la fin des années 1980 : Labinal en 1987 revendu à Snecma en 2000, devenu SAFRAN à l'issue de la fusion avec SAGEM en 2005. Dans un domaine technologique de plus en plus exigeant, et en forte croissance, Turbomeca dût arrêter définitivement la conception et la fabrication de turbines terrestres et marines, activité dans laquelle elle n'aura finalement jamais réellement réussi à trouver un marché pérenne. La fin de cette lignée de produits en 2005, venant s'ajouter à la cession de l'activité APU à Sundstrand en 1997, confirma le tournant dans la stratégie de l'entreprise.

En 1998, Turbomeca définissait ainsi son activité : « *Vente et maintenance de turbines de moyenne puissance aéronautiques, terrestres et marines, couvrant une gamme complète de 450 à 3000 ch.* » En 2005, elle devint « *Turbomeca, motoriste de choix des hélicoptéristes* ».

Ainsi, le virage enclenché dans les années 1980 avec la prédominance de l'hélicoptère conduisit à une stratégie mono-lignée de produits totalement axée sur le monde de l'hélicoptère.

3.4.2. Restructuration du processus de conception

Cette focalisation sur le monde de l'hélicoptère avec une technologie mature demandait d'importants efforts en conception pour pousser à son maximum le potentiel du cycle thermodynamique de la turbine à gaz, tout en maîtrisant qualité, coûts et délais. À partir de 2005, une restructuration du processus de conception fut mise en œuvre, tendant vers le modèle de conception réglée de Palh & Beitz (2006), largement déployé dans l'automobile. L'organisation matricielle qui avait fait son apparition dans les années 1990 fut complétée d'une réorganisation des métiers suivant deux axes : les principaux organes des moteurs et les fonctions transverses, et non plus par sciences de l'ingénieur telles que : aérodynamique, mécanique, etc... L'organisation est ainsi passée d'une structuration input vers une structuration output. Pour accompagner la structuration de la conception, Turbomeca fit apparaître une fonction programme R&T. Encore existante, elle permet de piloter les activités de recherche dans les métiers, de la recherche amont aux avant-projets, mais aussi de réalisation des démonstrateurs.

Jusqu'en 2008, les axes d'amélioration des turbines à gaz étaient les mêmes que ceux cités précédemment : l'amélioration du taux de compression et de la température entrée turbine pour optimiser le rendement, et donc la puissance et la consommation spécifique du moteur. Les projets R&T étaient donc majoritairement orientés autour de ces deux axes. Ils étaient pilotés par le programme R&T et mis en œuvre par les métiers. Afin de mesurer la maturité des technologies en développement, était intégrée une échelle de mesure bien connue dans l'industrie aéronautique, les TRL – Technology Readiness Level. Celle-ci permet de mesurer le niveau de maturité d'une technologie clé de 1 – la genèse du concept à 9- la qualification du matériel série en vol.

3.4.3. Le renforcement de l'activité «démonstrateurs»

La rationalisation du processus de conception et le pilotage du projet en qualité coût délai laissaient peu de places aux incertitudes. Ainsi, pour minimiser les risques du processus de conception, Turbomeca fit porter l'ensemble des innovations critiques par les démonstrateurs. Ces derniers sont des projets prototypes de moteur complet ou de parties de moteur permettant de faire monter en TRL certaines technologies considérées comme clés pour l'avenir technologique de l'entreprise. Dans l'histoire de Turbomeca, nous pouvons

considérer que les toutes premières commandes de turbines à gaz par le ministère de l'Air étaient des démonstrateurs (le prototype de sept tonnes de poussée le B701 ou encore l'étude du démarreur le B781) en ce sens qu'elles ne devaient pas déboucher directement sur de la série. Cependant, il fallut attendre la fin des années 1970 pour voir réapparaître ce type de projet à Turbomeca. En effet, les démonstrateurs redevenaient nécessaires dans ces années pour plusieurs raisons. La mise en concurrence généralisée, les besoins de raccourcissement du *time to market*, les exigences croissantes des clients en terme de maîtrise qualité / coût / délai, furent autant de facteurs qui imposèrent le lancement de projets moteurs démonstrateurs.

L'intérêt de ces démonstrateurs était double. D'abord, pour Turbomeca, un démonstrateur complet offrait un niveau de représentativité important pour faire monter en TRL ses technologies innovantes. Pour les clients intégrateurs, il permettait de les convaincre de la maîtrise technologique sur laquelle il s'engageait lors de la signature du contrat.

Compte-tenu de l'ampleur de ce type de projet, le nombre de démonstrateurs effectivement lancés est réduit. Entre 1980 et 2008, on n'en dénombre pas plus de six : Delta, Delta 2, Vesta, Athéna, Tech 600 et Tech 800. Le premier projet de démonstrateur lancé dans ce sens était Delta, à la fin des années 1970. Il permettait de préparer les technologies pour les moteurs à venir, comme celui du Tigre d'Eurocopter. Puis Delta 2 fut créé pour continuer à mûrir les technologies du précédent démonstrateur. La série de démonstrateurs suivante était celle de Vesta puis Athena. Le premier démarra en juillet 1987 et prit fin en 1994. Le second prit la relève en janvier 1999 sur les mêmes bases technologiques pour finir en 2009. Ces deux démonstrateurs devaient permettre un rattrapage sur des technologies critiques maîtrisées chez d'autres motoristes comme MTU ou Rolls Royce. Ces motoristes avaient pris une avance technologique importante sur les parties chaudes des moteurs militaires développés en collaboration avec Turbomeca qui ne développait que les parties froides du fait de son expertise avérée dans les compresseurs.

Les résultats des premiers démonstrateurs de Delta à Athéna furent contrastés : d'excellents résultats furent atteints sur les technologies parties froides, permettant de valider de nouvelles architectures dans la classe 1 000 kW, mais les résultats sur certaines technologies parties chaudes ne furent pas suffisants pour les appliquer en série, ce qui était pourtant l'objectif premier de ces démonstrateurs. Les derniers essais d'Athéna se déroulèrent en 2009. Ainsi, trente ans après les premiers essais, certaines technologies n'étaient toujours pas assez maîtrisées pour le marché de l'hélicoptère « civil » – voir Encadré 8. Fort heureusement, les concurrents de Turboméca rencontraient les mêmes difficultés pour appliquer dans le domaine civil, ces technologies adaptées aux moteurs militaires.

Pales refroidies – Une technologie éternellement émergente pour l'hélicoptère civil

Ce qui était marquant pour nous dans les différents projets de démonstrateurs est la similitude des technologies clés entre les démonstrateurs des années 1970 et ceux des années 1990, voire des années 2000. L'exemple le plus marquant est celui des pales refroidies. En effet, cette technologie, dans le monde de l'hélicoptère civil, semble être, depuis près de 20 ans, une technologie d'avenir. Mais le problème est plus complexe qu'il n'y paraît. Alors que cette technologie est largement répandue dans l'aviation civile pour les moteurs civils de grandes tailles (turbofan) et les moteurs militaires, les motoristes aujourd'hui ne savent pas décliner cette technologie de pale refroidie pour des moteurs de petite taille tout en restant abordable pour le marché de l'hélicoptère civil. Persuadés, à tort, qu'il y avait là les quelques pourcents de gain de consommation spécifiques qui pourraient justement faire perdre des contrats avec les intégrateurs si la concurrence y parvenait, les motoristes considèrent que « **le risque de ne pas le faire est trop important** ». C'est pourquoi les motoristes continuent d'investir dans cette technologie des millions d'euros, et qu'elle est donc systématiquement réintroduite sur l'ensemble des démonstrateurs qui ont été développés depuis les années 1970.

Encadré 8 : Une technologie éternellement émergente

Un autre élément critique sur ces démonstrateurs était le délai de développement : 7 ans pour Vesta et 10 ans pour Athena. Le démonstrateur censé préparer l'avenir technologique avait des délais de développement deux à trois fois supérieurs à ceux d'un moteur de série ! Aussi, les ingénieurs des bureaux d'études eux-mêmes parlaient du manque d'objectif de marché autour de ces projets. En parlant d'Athéna, un technicien relevait : « *Le projet était issu de la direction technique de Turbomeca. Il y a eu peu de liens avec le programme et les commerciaux. Les techniciens voulaient tester des technologies.* » En fait, sur un programme comme Athéna, alors que les objectifs technologiques étaient très élevés, le délai de développement n'était pas assez ambitieux, et donc les progrès très lents.

À partir de 2003, suite à la réorganisation de la conception à Turbomeca, le modèle du démonstrateur fut quelque peu revu. Il fut désormais acté que le démonstrateur devait *permettre de s'engager avec un client hélicoptériste en proposant un produit intégrant des technologies ayant une maturité technologique à TRL 6*³².

³² **TRL 6** = Technologie testée dans un environnement représentatif.

Le premier démonstrateur de ce type était le Tech 800. C'était un turbomoteur pour hélicoptère de la gamme des 800 kW et plus. Son démarrage effectif eut lieu en 2008 et le projet était encore en cours lors de nos recherches. Sur ce nouveau projet, Turbomeca avait appris des démonstrateurs précédents ; l'objectif de marché était clarifié avec pour cible technologique la préparation du renouvellement du produit phare de Turboméca, l'Arriel et les innovations technologiques proposées furent revues à la lumière des projets Vesta et Athena.

3.4.4. Un processus de conception unique

En 2008, la conception réglée mise en place à Turbomeca était le seul et unique processus de développement d'un moteur quel qu'il soit. Le démonstrateur devait donc suivre ce processus comme n'importe quel projet de développement de moteurs pour la série. Il se trouvait ainsi être un projet très contraint avec des objectifs divergents. Il devait permettre à la fois de préparer l'avenir technologique de l'entreprise avec des technologies innovantes, de prendre en compte les exigences industrielles et de maintenabilité de la série, mais aussi d'être piloté au travers du processus très contraint de la conception réglée. Il devait permettre de lever l'ensemble des incertitudes possibles sur un développement moteur pour réduire au maximum les risques lors du lancement d'un nouveau projet moteur. Les démonstrateurs devinrent un support clé à la conception maîtrisée en qualité / coûts / délais des nouveaux turbomoteurs d'hélicoptère.

Résumé

Dans les années 2000, la rationalisation du processus de conception des moteurs de Turbomeca permettait de suivre un marché de l'hélicoptère en croissance et toujours plus exigeant, en proposant des moteurs parmi les meilleurs au monde avec un niveau de qualité jamais égalé depuis la première turbine en 1950. Pour continuer à améliorer ses moteurs en proposant des technologies toujours plus innovantes, Turbomeca s'est appuyé sur un modèle qu'elle connaît bien depuis sa création : le démonstrateur. La revue historique du démonstrateur montre cependant quelques points critiques : 1) le risque que le démonstrateur soit une plateforme de « technologies éternellement émergentes » (ex. *la turbine refroidie civile pour petits moteurs*) 2) la difficulté de disposer des ressources et priorités pour les démonstrateurs se traduisant par des rythmes de développement longs et conduisant à des technologies validées tardivement par rapport aux besoins du marché. Grâce aux modifications d'organisation de 2003, le dernier démonstrateur en cours à Turbomeca évite ces difficultés. Cependant, nous relevions que la conduite du projet de démonstrateur avec 3) le processus de conception réglée classique risquait de stériliser l'innovation.

Sur la cartographie C-K, ci-dessous, nous mettons en avant que le vecteur d'innovation principal, le démonstrateur, est mis au service de l'innovation incrémentale pour soutenir une concurrence importante sur les deux voies d'amélioration du rendement du générateur de gaz. Dans l'espace des connaissances, nous mettons en avant la réorganisation des métiers effectuée à partir des années de 2000 afin d'améliorer l'efficacité des processus de développement, les métiers étant regroupés par organe du moteur : compresseur, turbine et chambre de combustion, et fonctions transverses : performances, intégration mécanique, intégration système de régulation, etc.

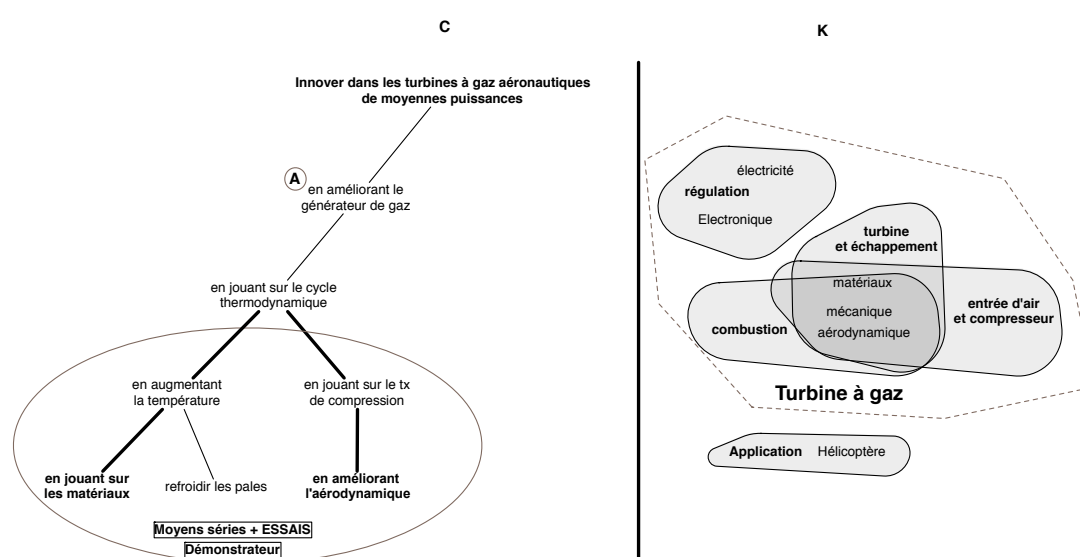


Figure 27 - Cartographie CK représentant les concepts et connaissances sur la période 2000-2008

Le Tableau 10 ci-dessous, fait la synthèse des capacités de conception innovante accompagnant la période de conception réglée de Turbomeca à travers le cadre théorique D-I-M.

	Design : Raisonnement de conception	Incubation : Moyens d'incubation	ecosysteM : Interaction avec l'écosystème
Contexte	Le rendement de la turbine à gaz aéronautique s'approche des limites théoriques	L'industrialisation unique mise en place pour satisfaire des normes de réglementation drastiques a conduit à la disparition des moyens historiques de prototypage	- Industrie de l'hélicoptère en forte croissance - Des appels d'offres encadrés pour la motorisation des plateformes hélicoptères - Diminution du marché militaire et financement restreint aux démonstrateurs
Initiatives	<u>Connaissances :</u> Amélioration du générateur de gaz : des efforts de R&T très importants pour soutenir une concurrence intense sur les performances <u>Concepts :</u> Une stratégie monolignée de produit sur le turbomoteur d'hélicoptère	- Bancs d'essai (comme tout motoriste) - Structuration de la filière démonstrateurs - Restriction de la mission du centre d'essai en vol au développement de moteur	- Utilisation des démonstrateurs pour prouver la maturité technologique aux clients hélicoptéristes

Tableau 10- Synthèse des capacités de conception innovante à Turbomeca durant la période 2000-2008.

3.5. 2008 : Nouveaux défis et mise en place d'une démarche de conception innovante

En 2008, Turbomeca dispose d'un processus de développement de nouveaux produits performant et supporté par un processus R&T permettant d'améliorer le rendement de la turbine à gaz aéronautique pour hélicoptère. Cependant, cette année, qui marque les 70 ans d'existence de l'entreprise, est aussi l'année de la prise de conscience par son management de nouveaux défis l'ayant incitée, pour les relever, à la mise en place d'une démarche de conception innovante. Nous présenterons dans cette section successivement ces nouveaux défis ainsi que la démarche de conception innovante en question.

3.5.1. Une prise de conscience de nouveaux défis par Turbomeca

En effet, en 2008, était né chez Turbomeca un sentiment d'impuissance face aux bouleversements de l'écosystème de l'entreprise. Tout d'abord, le mythe du *zéro prototype* que laissait espérer la révolution de la CAO des années 1990 n'était clairement pas applicable chez les motoristes. Encore aujourd'hui, le développement d'une turbine à gaz nécessite des centaines d'heures d'essais, non seulement pour l'ajustement des différents paramètres de conception, mais aussi pour la certification du moteur. Malgré les puissances de calcul à disposition des ingénieurs et le demi-siècle d'expérience dans ce domaine, malgré le développement de règles métier issues du *knowledge management*, il arrive que la première rotation d'un moteur s'accompagne de phénomènes non désirés tels qu'un contact rotor / stator, une fuite d'huile ou une instabilité au niveau du compresseur ou de la chambre de combustion. Le métier du motoriste est un métier de mise au point qui, de nos jours, comme à l'époque de Whittle ou Szydlowski, passe par les bancs d'essai. En 2008, le terme « prototype » était banni chez Turbomeca. Pourtant, même pour le développement d'un nouveau moteur de type bien connu, mais s'attaquant à une nouvelle gamme de puissance, un nombre très important d'inconnues demeure dans le processus de conception.

L'entreprise était, cette année-là, réglée dans son processus de conception comme elle ne l'a jamais été dans son histoire. Pourtant, ce qui paraissait indispensable pour faire face aux exigences du nouveau contexte technico-économique du marché de l'hélicoptère se trouva être un modèle totalement inadapté au contexte de l'aéronautique à venir. De fait, deux typologies de bouleversements demandèrent une remise en question du modèle de conception et d'organisation de l'entreprise.

1) Bouversements à design constant

Les premiers faisaient partie des bouleversements à design constant. **Nous appelons « bouleversements à design constant » des facteurs externes ou internes qui imposent des objectifs de performance en rupture sur des objets du modèle de conception dominant.** Ils sont dans notre cas de deux types : 1) la raréfaction des ressources pétrolières fossiles, et 2) le réchauffement climatique d'origine anthropique. Bien qu'intimement liés, ces deux facteurs ne produisent pas les mêmes effets sur les produits et les acteurs du monde de l'aéronautique.

Considérons dans un premier temps le cas des ressources pétrolières. Les réservoirs de pétrole mettent entre 100 et 1 000 millions d'années pour se former. Compte tenu de cette échelle de temps, et face à la croissance de l'extraction pétrolière, le pétrole est considéré comme une ressource finie. Ainsi, aujourd'hui, l'enjeu principal réside dans l'estimation de la quantité de pétrole restant à extraire, c'est-à-dire l'estimation des réserves ultimes sur Terre et de la quantité de pétrole extractible sur celle-ci, depuis l'origine de l'extraction pétrolière jusqu'à la dernière goutte de pétrole (Jancovici, 2010). Ces estimations permettent donc de connaître le pic pétrolier : le maximum de la production pétrolière mondiale avant un déclin inéluctable du fait de son non-renouvellement. Malheureusement, l'ensemble des puits pétroliers n'ayant pas été trouvés à ce jour, le débat sur le pic pétrolier reste globalement ouvert. En témoigne la Figure 28 répertoriant l'ensemble des estimations privées et publiques de l'atteinte du pic.

Source of Projection	Projected date	Source of Projection	Projected date
Individual Experts		Governments	
A. Bakthiari	2006-2007	Dutch Government (IEA HI copy)	After 2030
M. Simmons	2007-2009	French Government	2020-2030
C. Skrebowski	2007-2010		
K. Deffeyes	2005-2009	Analyst firms	
J. Laherrère	2010-2020	IHS Energy*	2011-2020
P. Odell	2060	Douglas Westwood	2010-2020
B. Pickens	2005-2007	Energy Files	2010-2020
M. Lynch	After 2030	PFC Energy	2014-2025
C. Campbell	2010		
S. Al-Husseini	2015	Energy advisory organisations	
J. Gilbert	2010	World Energy Council	After 2020
T. Petrie	Before 2010	Energy Research Center Netherlands	2010-2035
		CERA	After 2020
Oil Companies		ASPO	2010
CNOOC	2005-2010	IEA deferred investment scenario	Around 2020
Total	2020-2025	IEA high resource case	After 2030
Shell	After 2025		
BP	We cannot know	Other Organizations	
Exxon-Mobil	After 2030	Volvo	2010-2015
		Ford	2005-2010

Figure 28 - World oil peaking estimates as of October 2005 ; * prediction means that the demand of oil will probably not be met. (Koppelaar, 2005)

Selon ces estimations, le pic pétrolier peut aussi bien être derrière nous que dans 20 à 30 ans. Cependant, son atteinte risque de créer pour la première fois dans l'histoire de l'humanité une augmentation du prix relatif de l'énergie. Cela signifie que, sans ressources énergétiques alternatives, après le pic, un kWh devrait coûter plus cher aux générations à venir qu'à leurs parents. Ainsi, le coût à iso-système d'énergie d'une heure de vol devrait augmenter. De plus, l'hélicoptère, bien qu'étant le moyen de transport le plus polyvalent, n'en reste pas moins un moyen très énergivore. L'année 2008, qui a vu des records jamais atteints jusqu'alors du prix du baril, a été un premier cri d'alarme de l'impact du prix du carburant sur le monde de l'hélicoptère. En effet, **la part du prix du carburant dans l'exploitation d'un hélicoptère devint d'une importance telle que la consommation spécifique était devenue un critère prédominant dans le choix des opérateurs devant même la puissance spécifique (dans les mentalités uniquement !).**

Par ailleurs, l'impact sur l'aéronautique du réchauffement climatique d'origine anthropique est quelque peu différent. « *Le réchauffement du système climatique est sans équivoque* » (GIEC, 2007). La hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, ainsi que la fonte des neiges et l'élévation du niveau moyen de la mer sont déjà constatées (GIEC, 2007). Et bien que le débat soit toujours ouvert, le lien de causalité entre gaz à effet de serre anthropiques et réchauffement climatique fait quasi-consensus dans la communauté. De même, il est aussi largement admis que des efforts notables sont à développer et généraliser dans l'ensemble des secteurs d'activités pour atténuer les changements climatiques.

Le secteur aéronautique ne représente qu'une faible part du gâteau dans les émissions tous secteurs confondus (env. 2 %) et même du transport en général (env. 6 %) (ACARE, 2010). Pourtant, malgré sa part peu importante dans les émissions de gaz à effet de serre global, l'aéronautique n'en est pas moins l'un des secteurs les moins bien perçus par l'opinion publique à ce sujet. En outre, la croissance démographique à l'échelle planétaire ainsi que la forte croissance des pays émergents vont générer une augmentation du trafic aérien de l'ordre de 2,3 à 3,5 % par an jusqu'en 2030 (ACARE, 2010). En 2030, le trafic aérien sera alors 1,7 à 2,2 fois supérieur à celui de 2008. De ce fait, afin d'accompagner cette forte croissance et de ne pas être victime de son propre succès, l'aéronautique a été une industrie pionnière dans les actions à mener pour inscrire son activité dans une logique durable. C'est dans le cadre de l'initiative européenne « Vision for Aeronautics and Air Transport in 2020 », lancée en 2000, que furent inclus des objectifs très ambitieux de réduction de l'impact environnemental du secteur aéronautique. Cette Vision 2020 a conduit à la formation de ACARE (the Advisory Council for Aeronautics Research in Europe) comme réseau de recherche pour définir les

contenus du Strategic Research Agenda. Cet agenda permettait de transformer cette vision en actions concrètes.

Ce conseil proposa en 2002 une feuille de route dans laquelle furent inscrits des objectifs très ambitieux en termes d'émissions de gaz à effet de serre (ACARE, 2002, 2004). Les deux plus ambitieux étaient les suivants :

- La réduction de 50 % des émissions de CO₂ par passager par kilomètre pour 2020.
- La réduction de 80 % des émissions de NO_x par passager par kilomètre pour 2020.

Ventilés sur les deux contributeurs principaux (avionneurs et motoristes), ces objectifs impliquaient, pour les motoristes, une réduction de 20 % de consommation spécifique des moteurs pour 2020.

Ainsi, dans un souci de réduction de la consommation spécifique à la fois pour satisfaire les nouvelles exigences des clients dues à une élévation du prix du carburant et pour atteindre les objectifs ACARE, Turbomeca élaborait en 2008 une nouvelle *roadmap* pour l'évolution de ses produits. Cette *roadmap* était la suivante :

- Une réduction de 15 % en consommation spécifique en 2015.
- Une réduction de 22 % en consommation spécifique en 2020.
- Une réduction de 35 % en consommation spécifique en 2030.

Pour Turbomeca, les seuls objectifs atteignables avec le modèle de conception dominant actuel étaient ceux de 2015. Afin d'illustrer cette rupture, sur la Figure 29, nous avons représenté, par année de certification, l'impact environnemental des turbomoteurs d'hélicoptère de Turbomeca de la première turbine jusqu'au démonstrateur en cours de développement³³.

³³ Grâce à une formule développée au service avant-projet de Turbomeca, nous avons pu comparer les caractéristiques des moteurs pour une puissance de 1000 kW. Car des consommations de moteurs de tailles différentes ne peuvent être comparées : un petit moteur a une consommation spécifique plus importante que celle d'un gros moteur.

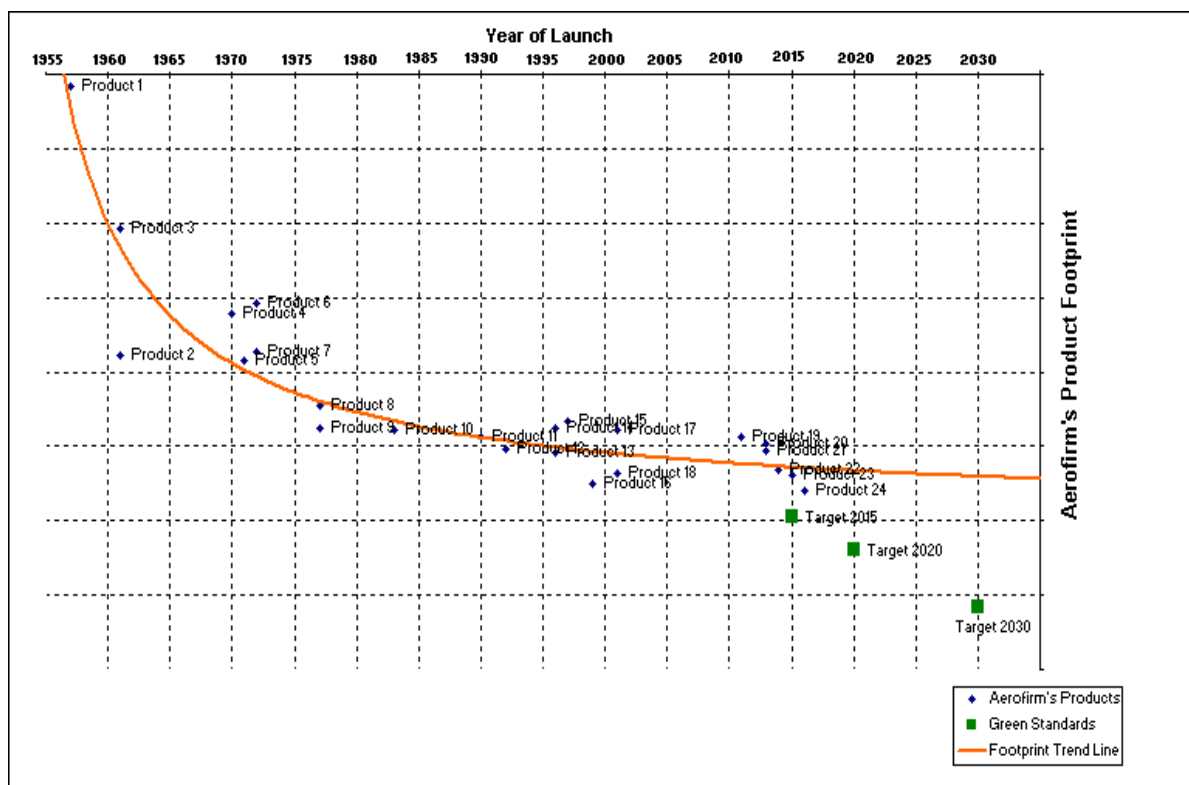


Figure 29 – Impact environnemental des moteurs de Turbomeca de 1955 à nos jours.

Sur la Figure 29, les losanges bleus représentent l'impact environnemental des turbomoteurs d'hélicoptère par année de certification. Bien entendu, on recherche un impact environnemental le plus faible possible. Les carrés verts représentent les objectifs que s'est fixé Turbomeca sur sa feuille de route pour correspondre à ACARE. La courbe de tendance en orange met en évidence des gains importants des années 1955 aux années 1980, puis le début d'une asymptote à partir des années 1990. Il est à noter que notre représentation met en évidence le fait que l'objectif de 2015 peut être atteint en poussant le modèle de conception dominant actuel à son maximum selon les leviers d'amélioration discutés dans les paragraphes précédents. Cependant, 2020 et 2030 sont des objectifs qui ne peuvent clairement pas être atteints sans rupture technologique.

2) Bouleversements à design non-constant

Les seconds bouleversements sont à design non-constant. Nous entendons par « bouleversements à design non-constant » les facteurs internes ou externes qui imposent des changements modifiant les attributs du modèle de conception dominant : valeurs, identités des objets, *business model*.

À partir de 2008, ces bouleversements perturbèrent l'écosystème de Turbomeca à plusieurs niveaux : carburants, systèmes d'énergie, aéronefs, missions.

A) L'avènement des carburants de 2^{ème} et 3^{ème} génération

Au niveau des carburants, la raréfaction des ressources fossiles obligea les acteurs du monde de l'énergie dans son ensemble à étudier des carburants alternatifs. Le rêve de tout motoriste étant d'avoir à disposition, après l'atteinte du pic pétrolier, un carburant de type « drop-in ». Les carburants dits « drop-in » ont les mêmes caractéristiques que les carburants fossiles (en termes d'allumage, de densité énergétique et de point de congélation). Ce sont des carburants pouvant se substituer au Jet Fuel conventionnel (le carburant des turbines à gaz) en partie ou en totalité, avec un nombre limité de modifications des architectures moteur ou avion conventionnels. Ces carburants alternatifs peuvent être, entre autres, produits à partir de charbon ou de biomasse (par exemple par procédé Fischer-Tropsch). Cette dernière permet de réduire les émissions de CO₂, car l'absorption du gaz par la plante est comptabilisée dans le bilan. Les initiatives dans le monde de l'aéronautique autour de ce principe sont nombreuses. À partir de 2008, plusieurs compagnies aériennes firent d'ailleurs voler des avions contenant un mélange de Biofuel et de carburants conventionnels sur un ou plusieurs moteurs. Ces carburants, bien que qualifiés de drop-in, possèdent, en pratique, quelques différences et demandent peut-être à repenser certains composants des moteurs, avions et logistiques.

B) Avionnage de sources énergétiques à rendement élevé

Bien que les années 2000 virent très peu de nouveaux cycles énergétiques ou d'invention de système d'énergie, les initiatives pour faire voler des systèmes énergétiques autres que turbine à gaz furent nombreuses. Ainsi, l'atteinte de l'asymptote sur les rendements du cycle de Brayton (la turbine à gaz) poussa des acteurs de l'aéronautique à explorer de nouvelles sources énergétiques : pile à combustible sur un drone par Pratt & Whitney ; maquette d'hélicoptère d'hybride Diesel et électrique par EADS Innovation Works ; avion tout électrique par la même entité ; avion à propulsion solaire (le solarimpulse). Ces nouveaux objets avionnés par la concurrence font appel à de nouvelles expertises tant sur les systèmes eux-mêmes que sur leur avionnage et leur comportement en vol.

C) Nouveaux objets volants et modification des architectures conventionnelles

Du côté des aéronefs, le XXI^e siècle vit également l'apparition de nouveaux objets. De nouvelles architectures de VTOL (Vertical Take Off and Landing), comme le V22 Osprey, ont accumulé de nombreuses heures de vol sur les champs de bataille du Moyen-Orient. Cet aéronef, d'une architecture hybride entre l'hélicoptère et l'avion à voilure fixe, pourrait voir son application étendue à une grande variété de missions. Une autre typologie qui a cru ces

dernières années est celle des drones. Le concept d'aéronef non piloté n'est pas récent, et les missiles inventés il y a plus de 50 ans en sont un bon exemple. Cependant, les avancées dans le monde des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication firent exploser le champ des possibles pour les engins volants non pilotés. Leur efficacité militaire pour la reconnaissance n'est plus à prouver. Dans le domaine civil, le potentiel de ces systèmes est infini tant sur les applications que sur les aéronefs eux-mêmes, allant de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres. Ce large spectre représentait autant de menaces que d'opportunités pour Turbomeca. En effet, le fait par exemple de pouvoir porter une caméra avec un aéronef de quelques kilogrammes pourrait faire disparaître des missions qui, autrefois, nécessitaient des hélicoptères de plusieurs tonnes. Toutefois, les avions de combats et de surveillance Moyenne Altitude Longue Endurance correspondent à la gamme de puissance du motoriste de turbine à gaz pour hélicoptère. Encore faut-il posséder des générateurs de gaz adaptables pour ces avions.

D) Apparition de nouvelles missions aéronefs

Les missions des hélicoptères sont aussi amenées à évoluer. Les exemples les plus marquants en 2008 sont ceux de la maintenance des parcs éoliens off-shore ou encore la multiplication des missions VIP dans les mégapoles comme Sao Paulo. Chacune de ces nouvelles missions a des caractères bien spécifiques, et demande à repenser une gestion de l'énergie et de la sécurité de manière optimale.

En résumé, en 2008, année de son soixante-dixième anniversaire, Turbomeca prit conscience d'une multiplicité de menaces et d'opportunités comme cette entreprise n'en avait jamais connu. Certes, Turbomeca avait su, dans son histoire, travailler sur des types de missions ou aéronefs totalement nouveaux, mais jamais la turbine à gaz n'était apparue aussi limitée depuis sa naissance pour affronter les challenges du lendemain. De surcroît, les capacités de conception innovante de Turbomeca en 2008 n'étaient plus les mêmes que par le passé. A cette date, elles permettaient un renforcement du cœur de lignée uniquement : le turbomoteur pour hélicoptère pour des missions connues. En matière de conception innovante, la situation de Turbomeca à cette période était donc délicate. D'une part, face aux bouleversements à design constants, l'entreprise n'avait pas de solutions pour atteindre les objectifs de réduction de l'empreinte environnementale qu'elle s'était fixée, mais en outre, ses capacités à traiter des objets nouveaux avaient disparu à la fin des années 1990.

Ainsi, en 2008, Turbomeca était confrontée à l'un des plus grands défis d'innovation de son histoire, alors même que sa conception et ses processus étaient réglés comme ils ne l'avaient

jamais été. En outre, la crise financière allait frapper, à partir de 2009, le monde l'hélicoptère civil.

Sur la cartographie **C-K**, Figure 30 ci-dessous, on remarque que les voies d'amélioration de la turbine à gaz, ainsi que les connaissances en jeu, ne sont pas encore affectées par ces bouleversements à cette période. Elle est donc strictement identique à la précédente, ce qui implique que dans un premier temps, Turbomeca aura été tenté par une sur-optimisation des deux voies principales en s'appuyant sur les démonstrateurs, notamment le Tech 800.

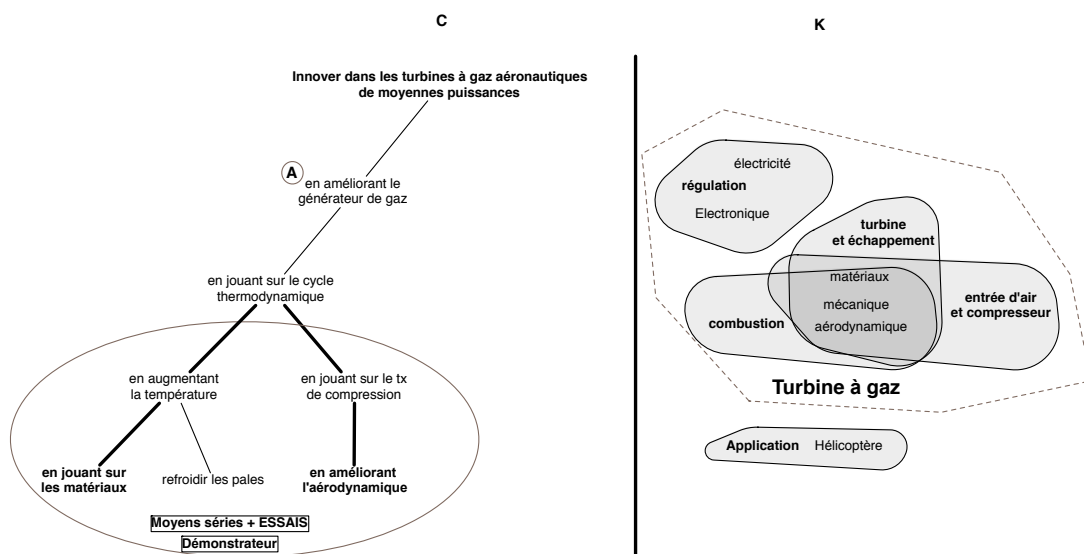


Figure 30 - Cartographie CK représentant un raisonnement de conception inchangé après la prise de conscience des bouleversements externes

Le Tableau 11 ci-dessous résume les changements de contexte et des capacités de conception innovante à travers le cadre théorique D-I-M.

	D esign :	I ncubation :	ecosyste M :
	Raisonnement de conception	Moyens d'incubation	Interaction avec l'écosystème
Contexte	Les voies d'amélioration de la turbine à gaz demeurent les voies historiques d'amélioration	Le démonstrateur comme seul moyen d'incubation	- Contexte de crise et stabilisation du marché de l'hélicoptère - Une pression importante de la part des acteurs du monde de l'hélicoptère pour une diminution des coûts d'opérations - Bouleversements à design constant : des objectifs en rupture pour faire face à la crise énergétique et aux nouvelles normes environnementales. - Bouleversements à design non constant : nouveaux objets (missions, aéronefs, systèmes énergétiques)
Initiatives	<u>Connaissances :</u> Amélioration du générateur de gaz : hyper-optimisation du générateur de gaz pour atteindre les premiers paliers de la <i>roadmap</i> <u>Concepts :</u> Pas de voies d'amélioration identifiées pour atteindre les nouveaux objectifs	Le démonstrateur	- Première prise de conscience de la R&T d'un besoin d'interagir différemment avec les entreprises de son écosystème

Tableau 11– Synthèse des capacités de conception innovante en 2008

3.5.2. Vers la réintégration de capacités de conception innovante : mise en place d'une démarche de conception innovante

« *Je ne veux pas être le General Motors de l'aéronautique* », « *Faites-moi la Prius de l'aéronautique* ». En faisant référence au monde de l'automobile que le PDG de Turbomeca, demanda, en 2008, au directeur technique ainsi qu'au directeur de l'innovation récemment nommé de s'engager immédiatement dans une réflexion sur l'évolution à long terme de Turbomeca. À la suite de cette demande, le responsable innovation proposa d'utiliser une méthode collaborative de conception innovante KCP[®], détaillée dans la partie suivante. On retiendra une phrase prononcée lors de la réunion de démarrage en janvier 2009. À un consultant qui lui demandait d'être plus ambitieux sur les objectifs à 30 ans, le responsable du département intégration répondit : « - 30 % de consommation spécifique ! Je ne sais pas faire. »

Cette phrase mettait clairement en avant les limites du modèle de conception et l'état d'esprit de Turbomeca pour atteindre les nouveaux objectifs au démarrage de cette méthode. Le responsable des architectes moteurs de l'entreprise soulignait par là que les voies d'amélioration existantes ne permettaient pas d'atteindre des réductions aussi importantes. Par la suite, un groupe de travail fut créé pour explorer un périmètre très large au travers de cette méthode. Ce dernier comprenait les systèmes d'énergie aéronautiques et leurs services pour 2030. Le déroulement du KCP s'étala sur deux ans. Mais nous reviendrons en profondeur sur sa mise en œuvre et son analyse dans la partie suivante.

En parallèle de ce « black project » fut lancée la présente thèse sur l'innovation radicale. Le responsable de l'innovation pensait que la mise en place ponctuelle de ce « black project » ne serait pas suffisante pour préparer l'avenir de l'entreprise. La perte de capacités pour générer de l'innovation de rupture, bien qu'elle ne fût pas partagée par tous avant la thèse, avait été largement pressentie par ce dernier.

L'objectif de la thèse était triple : 1) effectuer un diagnostic de l'innovation à Turbomeca, 2) analyser la mise en œuvre de la méthode KCP[®], 3) proposer une organisation pour la conception innovante à Turbomeca.

L'analyse historique de Turbomeca, depuis l'émergence de la turbine à gaz jusqu'aux bouleversements de 2008, a permis de proposer le diagnostic présenté dans le paragraphe suivant.

Résumé du CHAPITRE 3 :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une relecture de l'apparition de la turbine à gaz et de l'histoire de la conception à Turbomeca. Dans la première section, le récit de l'invention du turboréacteur en Angleterre, présenté en s'appuyant sur la théorie C-K, nous a permis de comprendre quelles étaient les conditions d'émergence d'une innovation radicale. Dans la deuxième section nous avons proposé un récit détaillé de Turbomeca relatant l'évolution de cette entreprise au travers du cadre d'analyse D-I-M. Cette approche historique a contribué à rapporter différentes capacités d'innovation radicale dont Turbomeca était doté et à souligner la disparition de certaines de ces capacités dans un contexte, en 2008, où l'entreprise rencontrait les bouleversements les plus importants de ses 70 ans d'histoire.

CHAPITRE 4

INTERPRETATION DE LA GENEALOGIE DES CAPACITES DE CONCEPTION INNOVANTE A TURBOMECA

1. La turbine à gaz, un potentiel d'innovation de rupture	185
2. Analyse des capacités d'innovation radicale à Turbomeca : le pouvoir explicatif du cadre D-I-M.....	189
2.1. Modèle 1 : La structure entrepreneuriale, Turbomeca 1945-1965	189
2.2. Modèle 2 : La structure exploratoire pour une diversification, 1965-1990.....	191
2.3. Modèle 3 : La structure technocentrée, 1990-2000	192
Résumé du CHAPITRE 4	197

Dans la première section de ce chapitre, nous caractérisons une innovation radicale à partir de l'histoire de la turbine à gaz. Nous proposons la notion de *potentiel d'innovation de rupture* pour comprendre les conditions d'apparition d'une innovation radicale. Dans la deuxième section, nous proposons trois modèles organisationnels permettant de relire la généalogie des capacités d'innovation radicale de Turbomeca. Puis nous mettons en évidence le pouvoir explicatif de notre cadre d'analyse D-I-M pour rendre compte de l'évolution d'une entreprise et de ses capacités d'innovation radicale.

1. La turbine à gaz, un potentiel d'innovation de rupture

L'histoire de Whittle rappelle la figure de l'inventeur isolé telle qu'elle avait été instrumentalisée par les Anglais aux XVII^e et XVIII^e siècles : Watt et la machine à vapeur, Stephenson et la locomotive... Ces récits biographiques masquent bien souvent l'héritage technologique et industriel dont a bénéficié celui à qui on attribue la paternité d'une innovation. Henry Ford évoquait ce phénomène en ces termes : *"I invented nothing new. I simply assembled into a car the discoveries of other men behind whom were centuries of work...Had I worked fifty or ten or even five years before, I would have failed. So it is with every new thing. Progress happens when all the factors that make for it are ready, and then it is inevitable. To teach that a comparatively few men are responsible for the greatest forward steps of mankind is the worst sort of nonsense."*

A première vue, les mots d'Henry Ford peuvent sous-entendre une vision déterministe du processus d'innovation, mais de notre point de vue, ils révèlent plutôt l'intérêt de concentrer l'étude des innovations sur la combinaison entre l'héritage du concepteur à instant t (variables exogènes au processus de conception) et les efforts qu'il produit à partir de cet instant pour générer une innovation radicale (variables endogènes au processus de conception). Notre analyse de l'histoire de la turbine à gaz aéronautique révèle justement trois éléments majeurs dans l'apparition d'une innovation radicale. Le premier concerne la structuration du concept de turboréacteur par le concepteur combinant une turbine à gaz et une propulsion par réaction. Le second concerne la base technologique et scientifique dont héritait le concepteur du turboréacteur : les technologies en turbomachines sur les turbines et turbocompresseurs, les travaux sur la propulsion ainsi que les avancées dans la tenue aux hautes températures des matériaux grâce aux moteurs à piston, allaient profiter au turboréacteur. Le troisième comprend les démonstrations théoriques des limites du moteur à piston et hélice qui ouvraient une brèche dont de nombreux scientifiques avaient connaissance. Ces trois éléments construisent ce que nous nommons ici un ***potentiel d'innovation de rupture***, qui peut être converti ou non en innovation radicale. Nous soulignons, justement, le caractère simultané des histoires anglaises et allemandes de la turbine à gaz, qui valide selon nous la thèse selon laquelle les protagonistes ne font que participer à un effort de construction d'un potentiel d'innovation de rupture, puis de transformation de ce potentiel en innovation radicale. En effet, Whittle proposa son premier concept en 1928, tandis que Von Ohain, indépendamment, commença à travailler sur la propulsion et à mettre au point son moteur seulement cinq ans plus tard. Aussi, alors que Whittle fut le premier à matérialiser le moteur à réaction, les équipes de Von Ohain furent les premiers à faire voler un avion à turboréacteur... avec une

avance de seulement 21 mois, ceux-ci n'ayant presque aucune connaissance de leurs travaux respectifs !

Cependant, l'apparition de la turbine à gaz aéronautique ne tenait pas qu'à ces éléments de construction du potentiel d'innovation de rupture. Deux autres éléments viennent se rajouter à cette liste pour concourir à la transformation d'un potentiel en une innovation radicale. Le quatrième relevant de l'effort de production de connaissances fourni par le concepteur. Le cinquième, de l'usage. L'histoire de la turbine à gaz aéronautique illustre, à notre sens, l'importance de l'usage dans l'émergence d'une innovation radicale. En effet, cette technologie portait de nouveaux critères de performances : haute altitude et grande vitesse, qui ne furent valorisés qu'après avoir été associées à un nouvel usage, l'intercepteur du projet Biggin hill trials. Ce dernier permit à la turbine à gaz d'être valorisée à une période où elle était moins performante que les moteurs à piston du point de vue de la consommation (critère alors dominant).

À partir de ce récit, **nous pouvons caractériser l'apparition d'une innovation radicale comme « l'utilisation » d'un potentiel d'innovation de rupture, résultat d'un héritage de connaissances, d'une perturbation d'un modèle dominant, ainsi que d'un effort de construction d'une proposition nouvelle et de production de connaissances.**

Cette notion de potentiel d'innovation de rupture pourrait être caractérisée à partir de plusieurs variables. **Pour les variables exogènes on pourrait évaluer la maturité des connaissances héritées vis-à-vis de la proposition, le degré de perturbation du modèle dominant, ainsi que la valeur associée au nouvel usage en question. Pour les variables endogènes au processus de conception on pourrait évaluer l'originalité de la proposition nouvelle, ainsi que la robustesse des connaissances produites.** Ces évaluations pourraient permettre de caractériser un effort de conception à fournir pour la transformation d'un potentiel d'innovation de rupture en innovation radicale. Sur la Figure 31, nous représentons le potentiel d'innovation de rupture associé à trois éléments (la proposition nouvelle, l'héritage en connaissances et la perturbation du modèle de conception dominant) ainsi que sa transformation en innovation radicale, qui résulte d'un effort de conception associé à un nouvel usage.

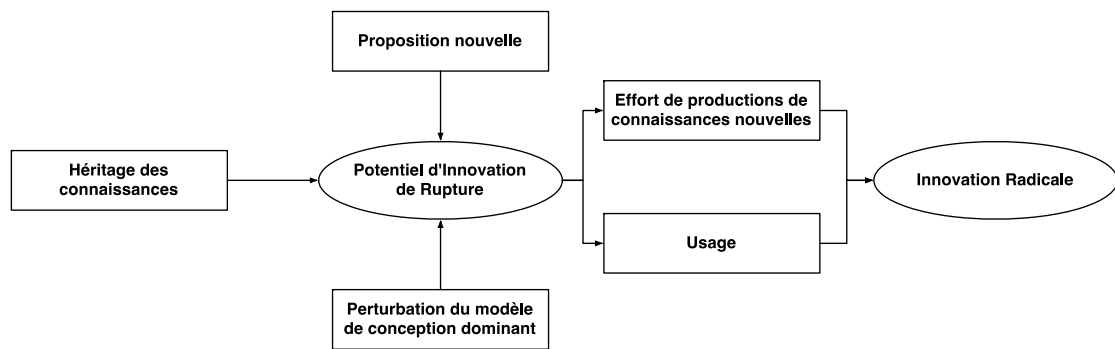


Figure 31 – Représentations des éléments associés à un *potentiel d'innovation de rupture*

Ainsi pour l'entreprise établie, l'apparition d'un potentiel d'innovation de rupture est critique. Car, plus il approche de son maximum, plus il devient identifiable et saisissable par d'autres. L'enjeu pour l'entreprise établie est donc double : l'identification du potentiel d'innovation à partir des paramètres proposés, et l'intégration de capacités de construction de potentiel d'innovation pour contrôler les rythmes d'innovation radicale.

2. Analyse des capacités d'innovation radicale à Turbomeca : le pouvoir explicatif du cadre D-I-M

Le cadre d'analyse des capacités d'innovation radicale nous permet de proposer une relecture de l'histoire de Turbomeca par les approches de la conception. Dans la période 1945 – 2008, trois modèles organisationnels ont été isolés et interprétés à travers le cadre théorique D-I-M : la structure entrepreneuriale dans la période 1945-1965, la structure exploratoire dans la période 1965-1990, et la structure technocentrée pour la période 1990-2008. Etant donné que Turbomeca a été, depuis sa naissance, un acteur majeur dans le monde des turbines à gaz aéronautique, nous pouvons supposer que chacun de ces modèles était adapté à son contexte, et ainsi caractériser les activités nécessaires à chacun des contextes. Cette analyse nous amène à proposer un diagramme d'évolution des capacités de conception innovante, et à nous interroger sur leur évolution future.

2.1. Modèle 1 : La structure entrepreneuriale, Turbomeca 1945-1965

En 1945, Szydlowski a l'occasion de récupérer des compétences allemandes pour concevoir un tout nouveau moteur : la turbine à gaz aéronautique. Après la guerre, l'ensemble de ses ressources est consacré à cette activité.

Du point de vue du raisonnement de conception, le modèle 1 correspond à une phase d'exploration à travers **l'acquisition d'un nouvel objet**. L'objet correspond à une technologie non maîtrisée dont l'acquisition doit passer par sa mise au point en intégrant des compétences externes. Son acquisition sera d'autant plus facile que les compétences relatives à l'objet sont similaires à celles de l'entreprise. Dans le cas de Turbomeca, l'entreprise ne conçut pas de nouvelles classes d'objets, contrairement aux pionniers du turboréacteur. En effet, Szydlowski profita des opérations de récupération de bureaux d'études allemands pour se doter d'experts lui permettant d'acquérir les capacités de conception de la turbine à gaz aéronautique. Cette acquisition passait par la mise un point d'un nouveau moteur à savoir une turbine à gaz de moyenne puissance. Elle fut simplifiée grâce à l'expertise de Turbomeca en turbomachines.

En ce qui concerne l'incubation, l'acquisition de capacités de conception nouvelles s'accompagne de **l'intégration de moyens de fabrication permettant une mise au point la plus rapide possible**. Évidemment, plus les technologies requises pour la conception de l'objet sont proches des objets conventionnels de l'entreprise, plus rapide sera l'intégration de

ces capacités. Chez Turbomeca, ces moyens étaient ceux des ateliers de fabrication des turbocompresseurs, à cette époque activité principale de Turbomeca, qui lui permirent de fabriquer et tester rapidement la première turbine à gaz de Turbomeca : la TT782.

Pour ce qui concerne l'interaction avec l'écosystème, l'intégration et la conception d'un nouvel objet dans le modèle exploratoire requièrent **des activités de construction de liens forts avec les récepteurs de l'innovation**. L'objet étant nouveau, il ne peut être pensé indépendamment des applications réceptrices. La récupération des turbines à gaz par Turbomeca avait largement bénéficié du réseau construit autour de Szydlowski dans le monde de l'aéronautique public et privé. Ce qui permettait au fondateur de l'entreprise de décrocher des contrats publics et de trouver des applications pour intégrer ses nouveaux moteurs.

La Figure 32 ci-dessous met en évidence les activités de conception innovante caractéristiques du modèle 1, la structure entrepreneuriale. Dans chaque case sont indiquées les activités principales concernant les capacités D, I ou M en question.

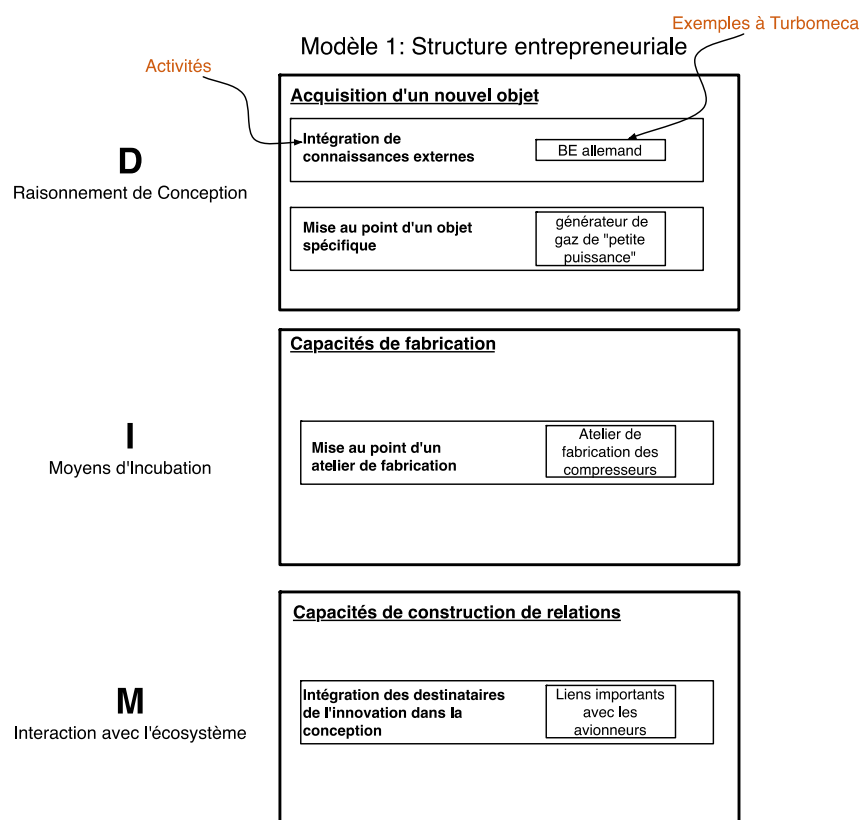


Figure 32 – Activités de conception innovante du modèle entrepreneurial de Turbomeca 1945-1965

2.2. Modèle 2 : La structure exploratoire pour une diversification, 1965-1990

À partir de 1960, la turbine à gaz aéronautique connaît une forte expansion et les activités série s'intensifient. Un besoin de structuration de l'exploration se fait ressentir afin de compenser cette intensification de la série.

La rationalisation de l'exploration s'appuie sur deux axes d'amélioration : **l'amélioration du cœur de lignée et la déclinaison du cœur de lignée en variantes en dehors du cœur de lignée**. Cette double expansion permet de fournir des produits toujours plus compétitifs, tout en maximisant la rente avec de nouvelles lignées. Dans le cas de Turbomeca, cette double expansion passait par l'amélioration du générateur de gaz et la conception de variantes à partir des nouveaux moteurs.

En ce qui concerne l'incubation, afin de soutenir cette double expansion, l'entreprise doit se doter de capacités de prototypages rapides, parallèles au processus série, ainsi que de capacités d'essais pour accélérer le débogage. En plus de ses nombreux bancs d'essai, Turbomeca mit en place à la fin des années soixante un **atelier de fabrication de moteurs prototypes** ainsi qu'un **centre d'essai en vol**, la CGTM. Grâce à cette filiale, des mises au point des turbomachines pouvaient être faites sur les plateformes auxquelles elles étaient destinées.

Du point de vue de l'interaction avec l'écosystème, la structuration de l'exploration s'appuie sur des capacités de modification des plateformes réceptrices du nouvel objet. En effet, le succès du projet passe par d'importants efforts d'intégration de cet objet dans les plateformes réceptrices, mais aussi par des activités de démonstrations à destination des clients. Ainsi chez Turbomeca, deux projets illustrent particulièrement bien ce fait. Le premier est l'APS 3200, pour lequel la CGTM avait recréé une queue d'A320 afin de tester et démontrer l'amélioration de l'acoustique. Le deuxième était la mission EDF, mission que la CGTM avait entièrement créée, et qui comprenait des activités d'intégration aéronef telles que la modification des instruments de vol de l'aéronef, ou encore de la formation des pilotes.

Nous mettons en avant ces activités dans la Figure 33 ci-dessous à travers le modèle D-I-M.

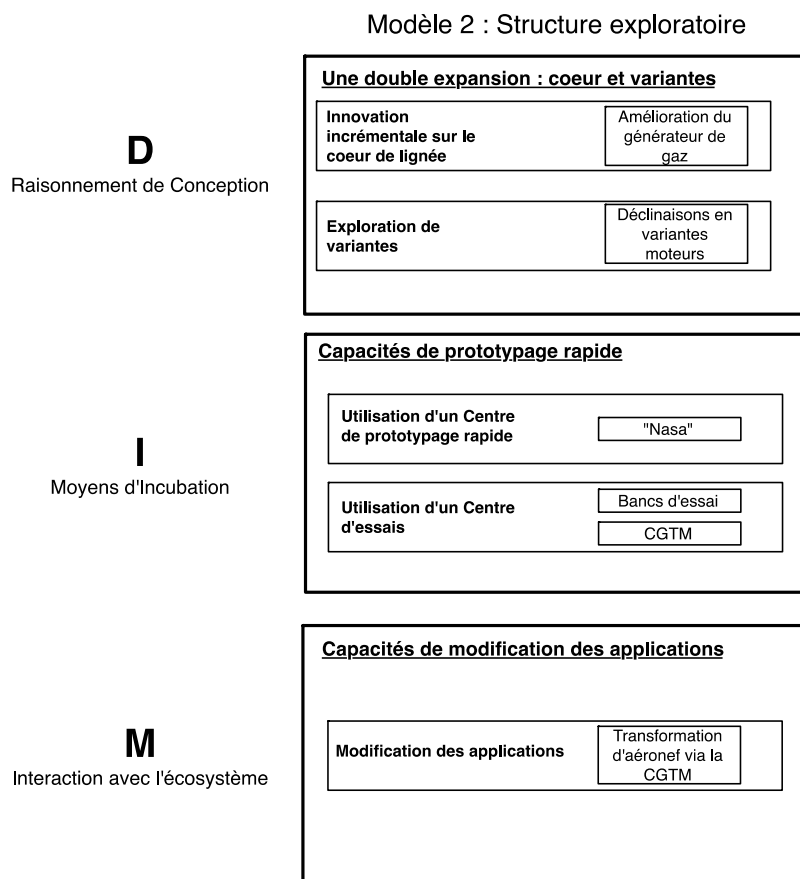


Figure 33 - Activités de conception innovante du modèle exploratoire de Turbomeca 1965-1980

2.3. Modèle 3 : La structure technocentrée, 1990-2000

À partir des années 1980, plusieurs changements importants interviennent dans l'écosystème de Turbomeca : une forte croissance du marché civil devenu très concurrentiel, une diminution des financements publics, une réglementation drastique qui inclut la certification des moyens de fabrication, et la structuration des spécifications des intégrateurs.

En matière de raisonnement de conception, le modèle d'exploitation impose des efforts d'optimisation importants du cœur de lignée. Ces efforts passent par la **focalisation sur le cœur de lignée, la structuration de la R&T pour l'amélioration de technologies matures, ainsi que la mise en place de projets de présérie exploratoire**. Turbomeca, pour soutenir la croissance du marché des hélicoptères civils et répondre à une concurrence toujours plus forte, avait focalisé ses activités sur l'hélicoptère tout en structurant les projets démonstrateurs pour être capable de démarrer des programmes moteurs avec des technologies très performantes et industrialisables, le tout à moindre risque qualité / coût / délai.

En ce qui concerne l'incubation, ces activités de présérie exploratoire sont contraignantes, car leur finalité est double : elles visent à proposer des innovations, tout en démontrant leur faisabilité industrielle. Ainsi ces activités s'appuient-elles sur des capacités de prototypage pour la démonstration technologique, ainsi que sur des moyens série pour démontrer leur faisabilité. À Turbomeca, l'industrialisation unique avait contraint l'entreprise à n'utiliser que les moyens série déjà très chargés, de ce fait les projets de démonstrateurs ne remplissaient pas toujours les objectifs d'anticipation sur les besoins du marché.

En ce qui concerne l'interaction avec l'écosystème, dans un contexte de forte concurrence sur les activités d'exploitation, l'entreprise devait être en mesure de faire la démonstration de ses capacités techniques et industrielles à travers les **préséries exploratoires**. Les projets démonstrateurs de Turbomeca portaient aussi une mission de démonstration à destination des clients intégrateurs.

Nous mettons en avant, Figure 34 ci-dessous, les activités de conception innovante pour le modèle d'exploitation, à travers le cadre d'analyse D-I-M.

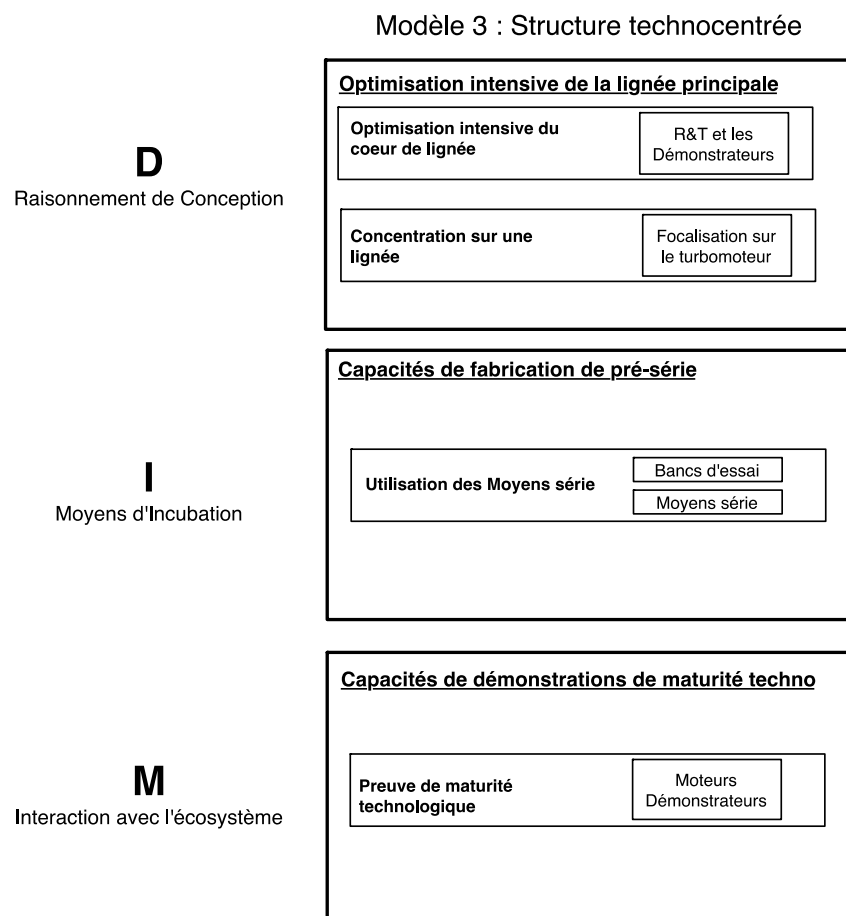


Figure 34– Activités de conception innovante du modèle technocentré de Turbomeca 1965-1980

La matrice, Figure 35, suivante propose une synthèse de l'ensemble des activités de conception innovante de Turbomeca. Elle permet de caractériser l'évolution des capacités de conception innovante sur une période de 60 ans, au travers de trois modèles organisationnels. Les modèles sont disposés en colonnes, et mettent en avant les activités de conception innovante en jeu selon les capacités D-I-M disposées en ligne. Sous cette matrice, nous avons illustré la part d'exploration et exploitation mise en œuvre pour chacun des modèles.

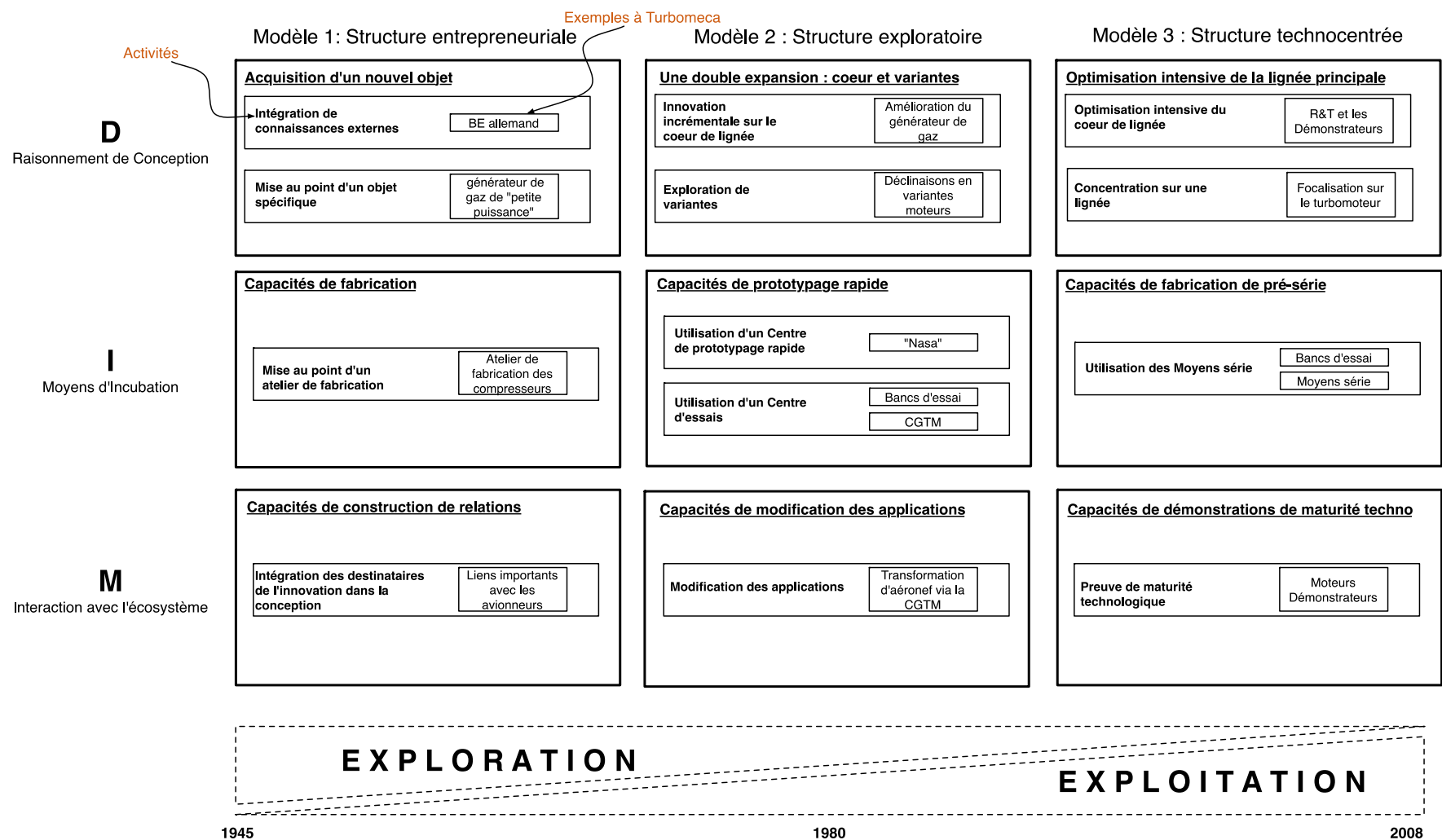


Figure 35- Evolution des capacités de conception innovante à Turbomeca durant la période 1945 - 2008

Le regroupement des trois modèles des différentes périodes de l'entreprise présentées à travers le cadre d'analyse D-I-M nous permet de proposer un *diagramme d'évolution des capacités d'innovation radicale d'une entreprise*. Dans la Figure 36 ci-dessous nous proposons une représentation de l'évolution d'une entreprise selon le cadre D-I-M. Chacune des cases représente les capacités de l'entreprise selon D, I ou M. Ce tableau met en avant le pouvoir explicatif du modèle D-I-M pour étudier l'histoire des capacités d'innovation radicale d'une entreprise.

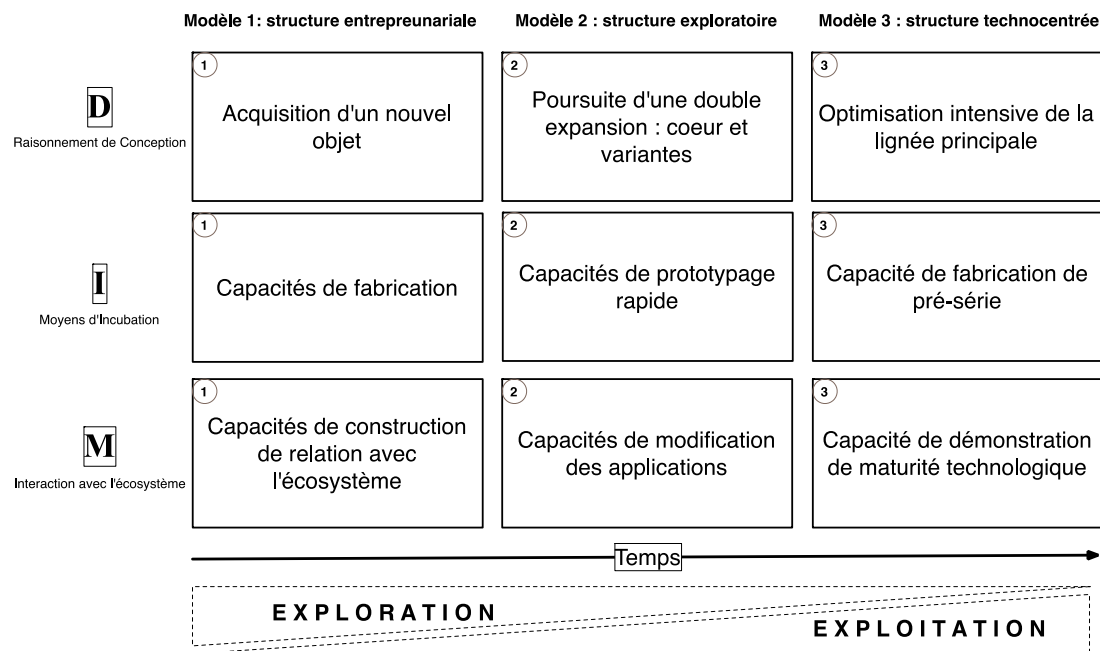


Figure 36 – Diagramme d'évolution des capacités de conception d'une entreprise

Par ailleurs, il est à noter que de cette logique d'évolution ne nous permet pas de définir le *modèle 4*, qui serait celui adapté au contexte de 2008 et qui permettrait de répondre aux nouveaux enjeux de l'aéronautique. Cependant, la littérature permettrait de formuler deux hypothèses opposées à propos l'évolution à venir de l'entreprise.

H1) D'après la littérature sur les structures organisationnelles, le modèle 4 devrait consister en la création d'une structure *ad hoc*, caractérisée par la création d'une *spin-off* chargée des activités de conception innovante.

H2) D'après la littérature sur la conception, le modèle 4 consisterait en une transition organisationnelle permettant d'*intégrer* des capacités d'innovation radicale dans l'entreprise

Résumé du CHAPITRE 4

Dans ce chapitre, à partir de l'histoire de la turbine à gaz, nous avons caractérisé la notion de *potentiel d'innovation de rupture*, et mis en avant sa portée explicative des phénomènes d'innovation radicale. Nous avons défini les éléments exogènes et endogènes au processus de conception qui caractérisent l'apparition d'une innovation radicale à partir d'un *potentiel d'innovation de rupture*. Nous suggérons plusieurs variables qui permettraient à une entreprise d'identifier et d'évaluer l'intérêt de ces potentiels, et les efforts à fournir pour les transformer en innovation radicale. Dans la deuxième section de ce chapitre, nous avons dégagé plusieurs modèles organisationnels dans l'histoire de Turbomeca, et avons mis en évidence les capacités de conception de l'entreprise associés à chacun d'eux en nous appuyant sur le cadre d'analyse D-I-M. Trois modèles ont pu être ainsi caractérisés : la structure entrepreneuriale, la structure exploratoire et la structure technocentrée. Nous concluons cette partie en proposant deux hypothèses concernant « un modèle 4 », qui serait le modèle organisationnel adapté aux nouveaux enjeux de l'aéronautique : H1) une intégration des capacités d'innovation radicale via une *spin-off* ; H2) une intégration de capacités d'innovation radicale via une transition organisationnelle.

Conclusion de la PARTIE II

La revue de littérature avait fait apparaître l'intérêt d'étudier les capacités de conception innovante pour comprendre les situations d'innovation radicale. À travers notre terrain d'étude, nous avons eu accès à un ensemble très riche de données relatives à une histoire de conception autour d'un objet de haute technologie, la turbine à gaz aéronautique. À partir de ces soixante-dix ans d'histoire, nous avons mené une investigation approfondie, comprenant l'analyse de la genèse de la turbine à gaz et la généalogie des capacités de conception innovante de Turbomeca, depuis sa création jusqu'à la période de bouleversements que cette entreprise rencontrait en 2008.

Dans un premier temps, l'analyse de la genèse de la turbine à gaz aéronautique nous a amenés à caractériser l'apparition d'une innovation radicale dans le domaine de l'énergétique en proposant la notion de *potentiel d'innovation radicale*, caractérisée par un héritage technologique, une proposition créative et une perturbation du modèle de conception dominant. Cette notion permet de mieux comprendre l'apparition d'une innovation radicale à partir de plusieurs éléments.

Le deuxième temps de l'analyse s'est concentré sur les capacités de conception innovante de Turbomeca. Cette étude de l'histoire de l'entreprise nous a permis de caractériser trois modèles de conception innovante à travers le cadre théorique D-I-M : la structure entrepreneuriale, la structure exploratoire et la structure technocentrée. Nous avons mis en évidence, pour chacun de ces modèles, les capacités correspondantes ayant été mises en œuvre. À partir de cette analyse, nous avons mis en avant le pouvoir explicatif du modèle D-I-M pour analyser l'évolution des capacités d'innovation radicale d'une entreprise.

Ce pouvoir explicatif a pu être mis à contribution lors de la restitution aux cadres de l'entreprise, en séance plénière, de notre analyse des capacités d'innovation radicale, appelée « diagnostic de l'innovation ». Cette restitution a permis de sensibiliser le management aux enjeux de l'innovation radicale sur deux dimensions. D'abord du point de vue cognitif, le récit de la genèse de la turbine à gaz a contribué à perturber certaines idées concernant l'immuabilité de la turbine à gaz comme source d'énergie exclusive pour l'aéronautique, dans une période de forte instabilité pour l'entreprise. Ensuite, du point de vue organisationnel, ce diagnostic a mis en évidence le besoin d'intégrer des capacités de conception innovante plus adaptées à l'effort d'exploration nécessaire dans cette période de bouleversements. De même, le rappel des capacités « perdues » semblait être un élément moteur pour la réintégration de ce type de capacité. Ce type de diagnostic semblait aussi être attendu par le management de

l'entreprise et des filiales de Safran. Nous avons en effet été sollicités pour effectuer une dizaine de présentations au sein de ce groupe.

Cependant, bien que cette analyse fût très pertinente pour préparer un terrain sociocognitif pour la transformation des capacités de conception de l'entreprise dans un contexte de bouleversements importants, elle ne permettait pas de suggérer la nature concrète des capacités de conception innovante à intégrer. En effet, le nouveau contexte semblait *a priori* rendre nécessaire la remise en place du modèle 2 de conception innovante, une structure exploratoire. Mais les moyens historiques de conception innovante (par exemple l'atelier de fabrication des moteurs prototypes) n'étaient, à l'époque, utilisés que sur la base d'un design constant, sans remise en question de l'identité des objets. À partir de 2008, compte tenu des signes d'instabilité du modèle de conception dominant, l'intégration des capacités de conception innovante ne pouvait passer que par la mise en place d'un nouveau modèle, supportant des activités adaptées aux nouveaux enjeux. Aussi dans cette partie nous avons posé deux hypothèses concernant le modèle 4 : **H1) D'après la littérature sur les structures organisationnelles le modèle 4 sera la création d'une structure *ad hoc* caractérisée par la création d'une *spin-off* chargée des activités de conception innovante. H2) D'après la littérature de la conception, le modèle 4 passera par une transition organisationnelle permettant d'intégrer des capacités d'innovation radicale dans l'entreprise.**

PARTIE III

LES LECONS DE L'EXPERIENCE KCP : UNE *TRANSITION ORGANISATIONNELLE PAR LA CONCEPTION*

CHAPITRE 5 - ORIGINE, DESCRIPTION ET ANALYSE DE LA METHODE KCP CHEZ TURBOMECA	205
1. Intérêt et motivation pour la mise en œuvre de la méthode KCP	207
2. Déroulement de la méthode KCP	222
3. Impacts organisationnels et cognitifs de KCP	228
4. Impact libérateur de la méthode KCP : l'émergence de trois projets de conception innovante	239
Résumé du CHAPITRE 5	248
 CHAPITRE 6 – INTERPRETATION DES IMPACTS DE LA METHODE : UNE <i>TRANSITION ORGANISATIONNELLE PAR LA CONCEPTION</i>	249
1. Interaction des processus organisationnels et cognitifs durant la méthode KCP	251
2. Notion de <i>Transition Organisationnelle par la Conception</i>	254
Résumé du CHAPITRE 6	255
 Conclusion de la PARTIE III	256

La partie II caractérisait l'apparition d'une innovation de rupture à partir de l'histoire de la turbine à gaz et proposait un cadre interprétatif pour l'étude de l'évolution des capacités de conception innovante. Cette étude a permis de mettre en évidence trois modèles de conception à Turbomeca. Cependant, bien que cette étude nous révélait un contexte de rupture nouveau pour l'entreprise, associé à une disparition de certaines capacités historiques, elle ne permettait pas de proposer les activités d'innovation radicale adaptées à ces nouveaux enjeux.

L'objectif de la présente partie relève d'un effort de modélisation des transitions organisationnelles et des activités à piloter pour la conception innovante. Nous nous intéressons pour cela à l'intégration des capacités d'innovation radicale par la mise en œuvre d'une méthode collaborative de conception innovante, la méthode KCP. Nous proposons d'étudier l'intégration de ces capacités à travers l'étude longitudinale d'un large processus d'innovation radicale mené à Turbomeca et auquel nous avons participé pendant trois ans. Cette recherche nous a permis à la fois de caractériser ce type de transition, et de faire émerger un modèle générique d'activités pour l'innovation radicale.

Dans le chapitre 5, nous revenons dans un premier temps sur la situation d'innovation radicale de Turbomeca en 2008. Puis, après avoir présenté les intérêts industriels et académiques de la méthode KCP, nous détaillons en profondeur le déploiement de cette méthode, et en décrivons les différents effets cognitifs et sociaux sur l'entreprise, à différents niveaux organisationnels. Par la suite, à partir de trois projets³⁴ de conception innovante issus de la méthode, nous mettons en évidence les lacunes capacitaires cognitives et organisationnelles de l'entreprise pour l'innovation radicale.

Dans le chapitre 6, nos résultats nous permettent de caractériser la double transformation des processus cognitifs et organisationnels, en démontrant que l'impact des processus cognitifs sur l'organisation avait été largement minimisé dans la littérature. Nous proposons ensuite, à partir de nos données, la notion *de transition organisationnelle par la conception* qui vise à caractériser le type de transformation que la méthode KCP permet de piloter.

³⁴ Pour des raisons de confidentialité les noms des projets ont été modifiés

CHAPITRE 5

ORIGINE, DESCRIPTION ET ANALYSE DE LA METHODE KCP CHEZ TURBOMECA

1. Intérêt et motivation pour la mise en œuvre de la méthode KCP	207
1.1. Une réponse au contexte de rupture : la mise en œuvre de la méthode KCP	208
1.2. Apports et présentation de la méthode KCP	211
1.2.1. Limites des théories et méthodes usuelles pour l'étude de l'innovation radicale.....	211
1.2.2. Méthode KCP: Description et Organisation.....	215
1.2.3. Méthodologie de l'étude de cas.....	219
1.2.4. Description de la mise en œuvre de la méthode et de ses impacts sur l'entreprise	221
2. Déroulement de la méthode KCP	222
3. Impacts organisationnels et cognitifs de KCP	228
3.1. Impacts cognitifs : nouveau raisonnement de conception et régénération des voies de conception historique	229
3.2. Impacts organisationnels des voies en rupture	234
3.2.1. Nouveau rôle de l'expert dans le processus de conception	234
3.2.2. Transformation de <i>l'équipe de travail</i> et des avant-projets.....	235
3.2.3. Transformation du réseau et de la fonction du chef de projet	236
3.2.4. Mutation du positionnement stratégique de l'entreprise	237
4. Impact libérateur de la méthode KCP : l'émergence de trois projets de conception innovante	239
4.1. PowerPlus : démonstration des limites de la conception réglée pour conduire l'exploration	239
4.2. Le projet FlyingCar : un <i>crazy concept</i> comme plateforme d'apprentissage.....	243
4.3. SuperFast : explorations parallèles sur un verrou technologique.....	245
Résumé du CHAPITRE 5	248

Dans ce chapitre, nous rappelons dans un premier temps le contexte dans lequel se trouvait Turbomeca à partir de 2008, et qui suscitait des attentes importantes de la part de la direction générale pour l'intégration de nouveaux processus d'innovation radicale. Nous soulignons ensuite l'intérêt, pour l'industriel, de mettre en œuvre une méthode collaborative de conception innovante KCP afin de répondre aux nouveaux enjeux de l'entreprise, et, pour nos recherches sur les transitions organisationnelles, d'étudier ce type de méthode qui permet de piloter à la fois les processus sociaux et les processus cognitifs en situation d'innovation radicale. Puis, après avoir présenté notre méthodologie pour l'étude de cas, nous détaillons de manière chronologique chacune des phases de la méthode, et mettons en avant ses effets sociocognitifs sur l'entreprise. Enfin, à partir de l'étude de trois projets de conception innovante issus de la méthode KCP, nous identifions les lacunes capacitaires de l'entreprise pour l'innovation radicale et proposons 6 grands types d'activités de conception innovante répondant à ces lacunes.

1. Intérêt et motivation pour la mise en œuvre de la méthode KCP

Dans cette section, nous rappelons la situation de Turbomeca qui, en 2008, a fait naître au niveau du *top management* l'ambition d'intégrer dans l'entreprise de processus visant à gérer l'innovation radicale. Dans une deuxième section, à travers une courte revue de la littérature, nous présentons l'intérêt industriel des méthodes de type KCP, et explicitons l'opportunité que présentait l'analyse de cette méthode pour étudier les processus sociocognitifs en jeu dans les transitions organisationnelles

1.1. Une réponse au contexte de rupture : la mise en œuvre de la méthode KCP

Comme nous l'avons montré dans la partie II, du point de vue des capacités de conception innovante, le contexte de 2008 était critique. Rappelons brièvement en quoi. Turbomeca était alors leader mondial des turbomoteurs pour hélicoptère. Pour suivre ce marché en pleine croissance, l'entreprise avait dû fortement structurer son processus de conception et de fabrication. La mise en application de la conception réglée permettait à l'entreprise de fournir des produits toujours plus performants et de meilleure qualité. Pour innover, l'entreprise s'appuyait principalement sur son processus R&T, qui pilotait à la fois la recherche opérée dans les métiers et les projets de démonstrateurs. Cette organisation a, certes, contribué à d'importantes améliorations sur les critères de performance des turbomoteurs pour hélicoptère, à savoir la fiabilité, la puissance spécifique et la consommation spécifique. Mais, nous l'avons montré, cette structuration s'est faite au détriment de plusieurs activités et entités exploratoires que l'entreprise avait su mettre en œuvre par le passé. La première à disparaître fut l'atelier de fabrication des moteurs prototypes, à la suite de la mise en place de l'industrialisation unique dans les années 1990. La deuxième perte résulta du ralentissement des activités du centre d'essai en vol de l'entreprise, la CGTM. Enfin, la troisième enfin fut l'arrêt des activités des turbines terrestres et marines. Ces dernières avaient permis à l'entreprise d'explorer de nouvelles technologies sur des applications qui ne possédaient pas la contrainte de devoir *voler*. Ainsi, la restructuration nécessaire au contexte des années 2000 fit perdre à ce motoriste des capacités d'innovation radicale qu'il avait constituées par le passé.

Or, en 2008, Turbomeca prit conscience de bouleversements importants. Ceux-ci étaient de deux types : les bouleversements à design constant et les bouleversements à design non constant.

Les bouleversements à design constant étaient ceux associés à la pression sur l'impact environnemental des moteurs ainsi que sur les coûts d'utilisation de ces derniers corrélés à la consommation spécifique. Les diminutions d'émissions de CO₂ et de NO_x proposées par un agenda stratégique établi par ACARE, un conseil aéronautique européen, suggéraient des efforts considérables de la part des motoristes pour suivre, entre autres, les réglementations futures de l'aéronautique, à savoir une réduction de 15 % en 2015, de 22 % en 2020 et de 35 % en 2030 de la consommation spécifique des turbomoteurs. Sur la courbe, Figure 37 ci-dessous, nous avons tracé l'impact environnemental (en abscisse) de l'ensemble des turbomoteurs d'hélicoptère de Turbomeca depuis sa création. Les losanges bleus représentent les moteurs, et les carrés verts sont les objectifs que s'était fixé Turbomeca pour suivre la feuille de route ACARE. En observant la courbe de tendance orange de l'impact environnemental des produits de Turbomeca, on remarque une forte diminution de l'impact environnemental au cours des trente premières années, puis une asymptote les dernières années. Cette courbe, que nous avons construite *ex post* (après le démarrage de la méthode), illustre la situation dans laquelle est Turbomeca en 2008 : les objectifs de 2030 semblent inatteignables en conservant le processus de conception et les axes de conception classiques de la turbine à gaz.

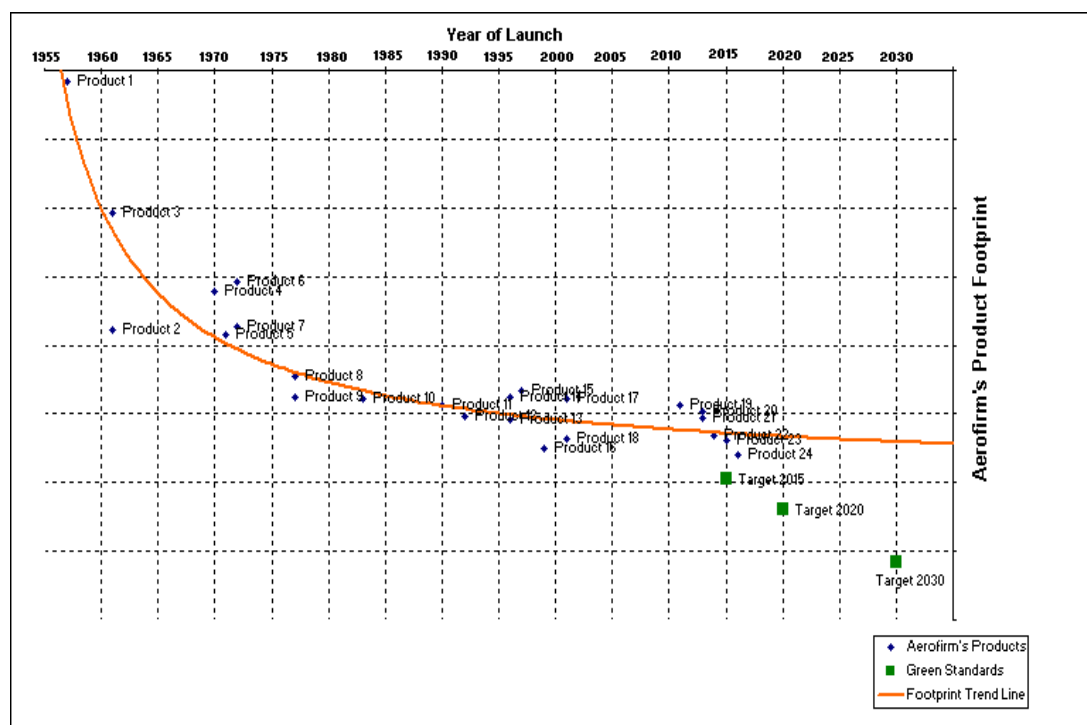


Figure 37 – Impact environnemental des moteurs de Turbomeca de 1950 à aujourd'hui et cibles ACARE

Le deuxième type de bouleversements que nous avons identifié était à design non constant. Ces bouleversements sont les facteurs externes qui remettent directement en question l'identité de l'objet et son écosystème, comme les nouveaux carburants, les sources énergétiques avionnées autres que la turbine à gaz, les nouveaux aéronefs, ainsi que les nouvelles missions.

En réponse à ces nouveaux enjeux, et suite aux demandes de la direction, le responsable sélectionna une méthode collaborative de conception innovante (MCCI), la méthode KCP, pour conduire un large projet d'innovation radicale nommé *Propulsion 2030*. Ce projet visait, dans un premier temps, à repenser les produits de l'entreprise à l'horizon 2030. Ainsi, de la MCCI était attendue la découverte de nouvelles voies pour concevoir des produits ayant un impact environnemental fortement diminué. Début janvier 2009, le responsable innovation fut appelé à d'autres fonctions, et le projet fut alors repris par le chef de service des avant-projets, qui poursuivit la démarche engagée par son prédécesseur.

1.2. Apports et présentation de la méthode KCP

Nous présentons dans la section ci-dessous les apports d'une MCCI en situation d'innovation de rupture ; puis nous détaillons les différentes étapes de la méthode KCP dans la section suivante.

1.2.1. Limites des théories et méthodes usuelles pour l'étude de l'innovation radicale

En situation d'innovation radicale, l'entreprise fait face à deux formes de défis. Les premiers sont d'ordre cognitif : la génération de concepts et les connaissances nouvelles pour faire face à cette situation. Les deuxièmes sont d'ordre organisationnel : la mise en place et la gestion des idées ou concepts en rupture qui lui sont proposés (Arnoux & Béjean, 2010; Arnoux, Béjean, & Hooge, 2013). Cependant, les modèles gestionnaires en place stérilisent la capacité d'expansion nécessaire à ce type de démarche : les règles de conception sont figées, les processus sont très structurés, l'architecture des produits, le marché et les modèles d'affaires sont souvent établis depuis de nombreuses années.

Une première approche en situation d'attente d'innovation radicale est d'utiliser la créativité collective comme source d'innovation. L'analyse se situe donc au niveau de l'individu et de ses interactions au sein du groupe de conception, ce qui se traduit par l'étude des processus cognitifs et psychologiques en situation de conception. Dans ce sillage, de nombreuses méthodes et techniques de créativité ont émergé à partir des années 1950. Dans le management de la créativité, les plus connues sont les techniques de *Creative Problem Solving (CPS)* et de brainstorming développées par Osborn (1957). Leur principe de base est de générer des idées créatives en sessions de groupes dans lesquelles plusieurs règles permettent de suspendre le jugement. Néanmoins, malgré leur succès dans le monde de l'industrie, plusieurs études démontrent que les *brainstormings* conduisent aussi à la génération de troubles d'attention durant les sessions de groupe (Mulligan & Hartman, 1996), à la génération d'anxiété sociale (Camacho & Paulus, 1995), ainsi qu'à des effets négatifs dus à l'expertise (Collaros & Anderson, 1969). Dans cette lignée, des techniques de CPS³⁵ ont également été développées pour accélérer la résolution de problèmes en utilisant des connaissances existantes pour résoudre des contradictions techniques. Ainsi, les travaux sur la créativité de groupe proposent un large champ d'outils et de méthodes visant à se dégager des règles de conception dominantes, et à générer des idées créatives dans les entreprises

35 Pour un état de l'art de ces techniques voir e.g. McFadzean, E. 1998. The Creativity Continuum: Towards a Classification of Creative Problem Solving Techniques. *Creativity and Innovation Management*, 7(3): 131-139.

existantes. Cependant, l'intérêt de ces séances est centré sur la fédération d'idées nouvelles à travers un groupe plutôt que sur l'originalité des propositions. Dans la Figure 38, ces méthodes sont placées à droite sur l'axe « niveau d'adhésion requis ».

Une seconde approche est d'utiliser des méthodes et des techniques visant à générer des solutions techniques concepts de produits ou stratégie en rupture. Dans les sciences de l'ingénieur, les méthodes les plus utilisées sont TRIZ (Altshuller, 1984) et ses dérivées qui ont pour but de générer des solutions créatives à partir d'un algorithme reposant sur une base de données de brevets (Cavallucci, Rousselot, & Zanni, 2009). Dans le domaine du design, il existe plusieurs méthodes collaboratives pour générer de l'innovation radicale. Les plus connues sont les *deep dives*. Ce sont des méthodes de conception qui regroupent une combinaison de techniques de brainstorming, de prototypage et de boucle d'apprentissage pour développer des solutions de nouveaux produits ou services. Ce type de méthode a été popularisée par un documentaire sur IDEO, une entreprise spécialisée dans le design (ABC-News, 1999), et permet de proposer aux entreprises des concepts de nouveaux produits dans des délais très courts. Une autre forme de méthode provient des travaux Kim et Mauborgne (2005) en stratégie, proposant la combinaison d'outils développés pour créer des *Blue Ocean Strategies*. Ces auteurs proposent des techniques qui permettent de repenser le positionnement des produits et des offres d'une entreprise, afin de les placer sur des marchés sans concurrence dits « océan bleu » (par opposition à l'océan rouge, lieu de la compétition entre les autres concurrents). Ces travaux permettent aux managers dans le domaine de la stratégie et du marketing de réviser leurs stratégies grâce à des nouveaux concepts de produits ou d'offres. Ces méthodes obéissent cependant uniquement à des logiques de rupture cognitive, qui s'affranchissent des aspects sociaux. Cependant, de notre point de vue, la diffusion des propositions en rupture peut souffrir par la suite d'un manque d'adhésion dans l'entreprise. Dans la Figure 38, ces méthodes sont placées le long de l'axe « niveau de rupture cognitive ».

Une troisième approche utilisée est d'étudier comment les outils de gestion peuvent aider à faire face à une situation d'innovation radicale. En effet, les recherches dans le domaine du management ont mis en avant le fait que les processus d'innovation radicale ne peuvent être soutenus par les activités dites d'exploitation de l'entreprise, mais doivent au contraire faire intervenir des processus à caractère exploratoire (Benner & Tushman, 2003; March, 1991; Tushman & O'Reilly III, 1996). Au niveau organisationnel, les stratégies pour l'innovation radicale généralement proposées consistent en la mise en place de petites équipes dédiées,

opérant hors des règles conventionnelles de l'entreprise, souvent identifiées comme des groupes « commandos ». Ainsi, il est communément admis que pour se faire une place au sein d'entreprises établies, les processus exploratoires nécessitent une organisation séparée et identifiable, la mise à leur disposition de compétences et de « talents » adéquats, ainsi qu'un soutien important de la part de la direction générale (Leifer et al., 2000; O'Connor, 2008; O'Connor & DeMartino, 2006). Toutefois, ces formes d'organisation rencontrent également certaines limites. En effet, la réintégration des projets ou des produits nouveaux ainsi développés dans l'entreprise mère suscite parfois quelques difficultés, car les projets en rupture issus de ces groupes requièrent d'importants changements organisationnels, et les logiques de fédération des projets ont souvent été délaissées pour favoriser l'originalité des produits. Ces groupes « commandos » peuvent donc faire l'objet d'un important isolement. Sur la Figure 38, ces groupes seraient placés en haut sur l'axe « niveau de rupture cognitive ».

À partir des éléments de la Figure 38, on peut comprendre les limites que peuvent rencontrer les trois types de méthodes et outils organisationnels décrits plus haut (Agogue, Arnoux, Brown, & Hooge, 2013). D'une part, les méthodes de créativité permettront effectivement de socialiser un grand nombre d'idées, mais seront marquées par des effets de fixation (2) qui filtreront les plus originales d'entre elles. D'autre part, les méthodes de conception, de design ou de stratégie, et les groupes « commando », de type Skunk Works seront très adaptés pour générer des ruptures, mais se heurteront à de l'inertie organisationnelle (2) lors de leur réintégration, ce qui risque de menacer les projets générés.

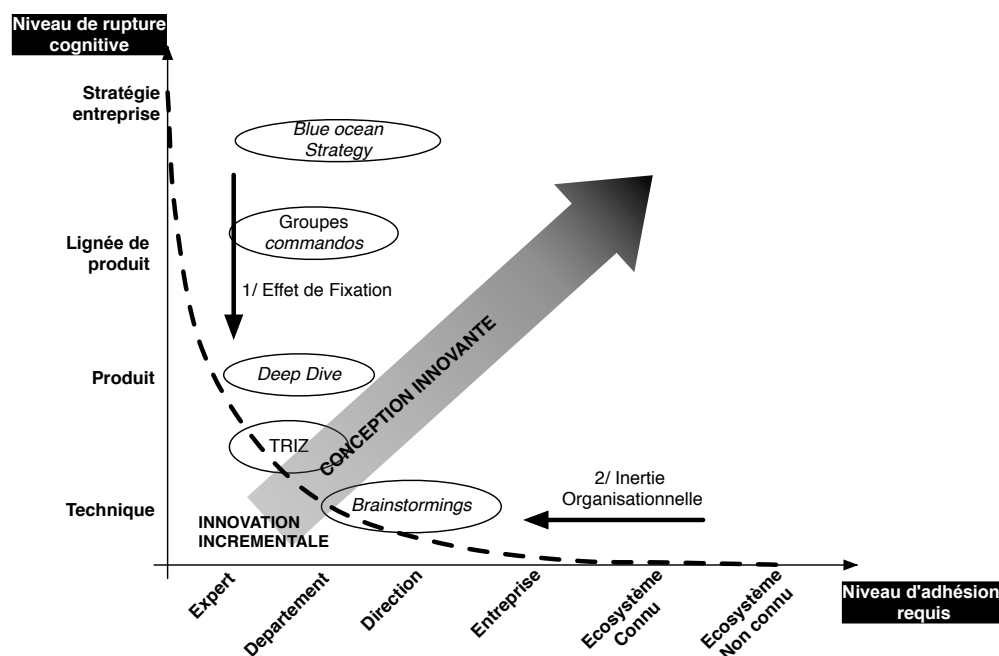


Figure 38 – Objectifs cognitifs et organisationnels pour l'innovation radicale

Il apparaît donc, comme nous le résumons dans le Tableau 12 issu de notre publication dans la 17^{ème} édition de *l'International Conference of New Product Development* (Arnoux & Béjean, 2010), que l'intégration de capacités d'innovation radicale doit faire intervenir de façon conjointe des processus cognitifs et des processus organisationnels.

Characteristics	Social Perspectives	Cognitive Perspectives
Theoretical Foundations	Organization theory Management	Psychology, Creative cognition
Definitions and approach to radical innovation	Radical innovation is the outcome of successful deviant processes in established organizations.	Radical innovation is the outcome of successful processes of creative thinking and rule breaking.
Emphasized issues	- Tools, methods and organization used for exploitation are not adapted for exploration and RI. - RI needs an organic structure, top-management support, cross-functional teams. - Main strategic objective: to build a network and avoid organizational isolation	- Traditional ways of reasoning (e.g.: problem-solving, optimization) are not adapted to rule breaking and RI. - RI needs divergent thinking to prevent effects of fixation. - Main strategic objective: to generate creative ideas and avoid cognitive repetition
Fundamental Work	(Leifer et al., 2000; O'Connor, 2008) (Cooper, 1994)	(Osborn, 1957) (Jansson et al., 1991)

Tableau 12– Approches organisationnelles et cognitives pour l'innovation radicale (Arnoux & Béjean, 2010)

L'intérêt de coupler les approches organisationnelles et cognitives a été pour la première fois mis en avant par Woodman et al. (1993). Leurs travaux proposent un modèle interactionniste traitant la manière dont les relations intra-organisationnels et intra-individuels influencent la créativité. Dans ce cadre, Bharadwaj and Menon (2000) suggèrent d'associer des aspects managériaux à la créativité individuelle afin de favoriser l'innovation dans l'entreprise. Par ailleurs, les travaux sur l'interaction entre aspects cognitifs et organisationnels ont permis de caractériser l'effet des paramètres organisationnels sur la créativité. Les chercheurs ont identifié des variables dans l'environnement de travail influençant la créativité de groupe ou individuelle dans l'entreprise (Amabile, 1996; Ekvall, 1996; Moultrie & Young, 2009). Par exemple, Bakker et al. (2006) ont étudié l'influence des stratégies politiques sur la créativité et le management des idées dans les organisations, et mis en évidence que le succès des idées reposait en partie sur des jeux d'acteurs.

Ainsi, alors qu'il existe de nombreux travaux qui ont étudié l'effet des paramètres organisationnels sur les processus cognitifs au niveau du groupe (Amabile, Conti, Coon, Lazenby, & Herron, 1996), et mis à part quelques travaux (Elmqvist & Segrestin, 2009), peu de recherches ont été menées sur la façon dont les aspects cognitifs peuvent, en retour, agir sur les paramètres sociaux et organisationnels pour l'innovation, à tous les niveaux de l'entreprise. Nous pensons pourtant que l'étude de l'effet de propositions créatives sur

l'entreprise et son organisation est un élément clé pour la compréhension et l'intégration des capacités d'innovation radicale.

Afin de comprendre ces phénomènes, nous avons étudié une méthode collaborative de conception innovante, la méthode KCP, déjà définie par ses auteurs comme une méthode stimulant à la fois les niveaux organisationnels et les niveaux cognitifs dans le *fuzzy front end* de l'innovation (Hatchuel, Le Masson, & Weil, 2009). Sur la Figure 38, la méthode KCP se situe le long de la flèche centrale. Aussi, peu de travaux ont été publiés sur ces méthodes, et nos recherches sont notamment destinées à enrichir ce champ.

L'enjeu de cette recherche est à la fois de contribuer à ces domaines de recherche, à travers l'analyse des effets cognitifs et organisationnels de la méthode KCP à différents niveaux de l'entreprise, et d'analyser comment ces transformations peuvent permettre d'intégrer des activités nouvelles pour l'innovation radicale.

1.2.2. Méthode KCP: Description et Organisation

Nous décrivons dans cette section la méthode qui fut sélectionnée à Turbomeca pour répondre aux nouveaux enjeux d'innovation de rupture : la méthode KCP. Cette méthode fut développée à partir de 2003 conjointement par le Centre de Gestion Scientifique de Mines ParisTech et la direction innovation de la RATP. Cette méthode visait à concilier objectifs cognitifs et organisationnels en conception innovante. Ci-dessous sont décrits le cadrage de la méthode, les différentes phases de son déploiement, puis ses conditions de réussite.

Mise en place de la méthode :

Nous présentons ici les éléments de préparation et de mise en place de la méthode, à savoir : la sélection du périmètre d'exploration, la construction et la sélection des équipes à mobiliser pour la méthode.

Le *périmètre d'exploration* est un espace conceptuel dans lequel va s'opérer le travail de conception innovante. Il doit contenir la problématique de départ, tout en étant suffisamment large pour permettre une exploration riche. La nature de ce périmètre ne peut pas être clairement spécifiée, car en pratique il est très dépendant du contexte. Il peut être de plusieurs types : une réflexion sur les produits ou la stratégie de l'entreprise pour le futur ; un champ d'innovation issu d'une réflexion en amont dans l'entreprise ; un problème technique à résoudre par une démarche de conception innovante ; la structuration de stratégies multipartenaires...

Les participants opérant dans la méthode KCP sont répartis en quatre sous-groupes intervenant à différentes étapes et différents niveaux dans la méthode : le comité de pilotage, l'équipe d'animation, le groupe élargi et le groupe de travail.

Le comité de pilotage prend l'ensemble des décisions stratégiques relatives au processus d'exploration. Par exemple c'est lui qui, en principe, valide le périmètre d'exploration, les connaissances à intégrer, ainsi que les axes d'exploration. Ce comité est composé de cadres supérieurs concernés par la démarche. Le groupe est de préférence transverse pour favoriser des prises de décision partagées dans les différentes directions de l'entreprise. Il doit posséder au moins un représentant participant aux deux premières étapes du processus KCP.

L'équipe d'animation est garante du raisonnement de conception innovante et pilote l'exploration à l'aide de la théorie C-K. Dans le cas présent, le doctorant en conception innovante a été intégré à ce groupe pour assurer le suivi théorique du raisonnement de conception. Cette équipe est composée d'un chef de projet, ayant une grande culture générale de l'entreprise - technologie, modèle d'affaires, marché... - et d'un expert en conception innovante, théorie C-K et méthode KCP.

Le *groupe élargi* est garant de la diffusion de la rupture cognitive dans l'entreprise tout au long de la méthode. Il apporte expertise et propositions nouvelles durant les phases K et C. Il est composé d'experts et de managers (internes ou externes), qui peuvent contribuer ou être concernés par l'exploration – changements technologiques, industriels... Les participants de ce groupe sont impliqués intégralement dans les phases K et C, et peuvent être appelés à intervenir sur certains sujets en phase P.

Le *groupe de travail* participe à toutes les phases : K, C et P. Il participe de la même manière que le *groupe élargi* aux phases K et C, puis est chargé de développer les axes d'exploration en phase P, en s'appuyant sur sa propre expertise ainsi qu'en activant des partenaires internes et externes –laboratoires, fournisseurs, communauté d'experts. Ce groupe aide aussi à la préparation des phases C et P en participant à l'élaboration des axes d'exploration. Le groupe de travail est composé d'experts ayant des domaines de compétences qui couvrent le périmètre d'exploration. A titre d'exemple, une exploration dans le monde des moteurs nécessite forcément un expert en énergétique.

Déroulement de la méthode

Nous présentons ici l'enchaînement des étapes, ainsi que l'implication des groupes et leurs contributions aux différentes phases. Deux niveaux organisationnels sont à considérer pour

l'établissement de cette méthode, le management de la méthode, ainsi que les groupes opérationnels qui suivent l'ensemble des étapes K, C et P, même-si, en pratique, leurs interactions rendent la séparation de ces deux niveaux moins évidente. L'ensemble de ces éléments est synthétisé dans la Figure 39 ci-après.

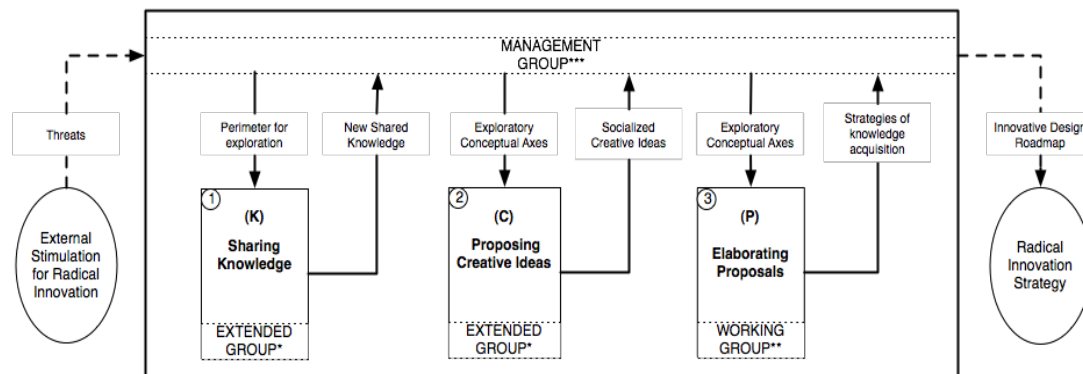


Figure 39– Processus de la méthode KCP et visualisation des deux niveaux opérationnels

Le processus se décompose en trois phases séquentielles : la phase K pour intégration de connaissances, la phase C pour l'élaboration conceptuelle, la phase P pour la construction de propositions.

La phase K doit permettre de balayer le plus large champ de connaissances possible dans le périmètre d'exploration. Ceci consiste d'abord dans le partage des connaissances internes, qui sont normalement cloisonnées dans les différents métiers et non partagées. Puis à intégrer des connaissances externes pouvant être apportées par des experts industriels ou académiques. Cette phase est composée de plusieurs journées de séminaires dans lesquelles des présentations sont faites par des experts au groupe élargi. À la fin de cette étape, l'équipe d'animation est en mesure de restructurer l'espace K du périmètre d'exploration, d'isoler les voies classiques de conception et de mettre en évidence les voies en rupture abandonnées.

Nous pouvons proposer ici quelques exemples de poches K qui peuvent être présentées selon le contexte : la stratégie actuelle de l'entreprise, le portfolio de projet R&D, l'historique des technologies innovantes de l'entreprise, des présentations par des experts externes sur une technologie, des présentations de nouvelles formes de modèles d'affaires...

La phase C consiste en des séminaires résidentiels de 1 à 2 jours auxquels participe le groupe élargi. Ces séminaires ont pour objectif de construire collectivement un raisonnement de conception innovante, en partageant des voies en rupture pour couvrir le périmètre d'exploration. Ils se différencient des techniques de créativité de type brainstorming en ce que les voies en rupture sont suggérées en amont par des axes d'exploration, afin de cadrer la créativité. Ces axes sont élaborés à partir des connaissances intégrées en phase K et d'espaces de valeurs définis par *l'équipe d'animation*. Ils permettent de guider l'exploration. Concrètement, à chaque axe d'exploration est associé un petit groupe qui doit reconstruire un raisonnement de conception en proposant des pistes / concepts / connaissances à explorer. Ce travail en petits groupes est encadré par *l'équipe d'animation*. Ces séances alternent entre phases de créativité en petits groupes et restitutions plénières, afin d'enrichir mutuellement les axes d'exploration.

Les données de sortie de ce séminaire C sont caractérisées par des fiches concepts détaillées. Dans ces fiches, les participants renseignent une définition générale du concept, la valeur nouvelle dont il est porteur, les moyens à mettre en œuvre pour le développer, les connaissances qu'il requiert de développer, ainsi qu'une mise en action du concept (présentation d'un scénario). En préparation de la phase P, *l'équipe d'animation* reconstruit et transforme les axes d'exploration à partir de ces fiches.

La phase P permet de construire des feuilles de route de conception innovante à partir des travaux des séminaires des phases K et C. C'est à cette étape que va se concentrer le travail sur les voies en rupture, à savoir la mise en évidence de la valeur de ces différentes voies et la consolidation des voies d'apprentissages. Cette phase nécessite une équipe dédiée chargée de piloter des axes d'exploration : le groupe de travail. Elle peut prendre des formes organisationnelles diverses selon la nature des axes et du périmètre. Par exemple, cette organisation aura une forme différente s'il s'agit d'une réflexion sur la stratégie de l'entreprise à long terme, qui peut nécessiter plusieurs centaines d'heures-homme, **ou** d'une réflexion dans un champ d'exploration déjà institué dans l'entreprise où quelques dizaines d'heures-homme suffiront.

Le pilotage de la méthode KCP est assuré par *l'équipe d'animation* responsable du raisonnement de conception. Il consiste, dans un premier temps, à définir un périmètre d'exploration adapté à la problématique de départ, à sensibiliser les participants à la conception innovante, puis à planifier et organiser l'ensemble de la méthode. Durant tout le

processus d'exploration, ce groupe est responsable de la construction et de l'évolution des cartographies C-K de conception, ainsi que de la sélection des poches de connaissances à intégrer et de l'élaboration des axes d'exploration pour les phases C et P avec l'aide du *groupe de travail*.

1.2.3. Méthodologie de l'étude de cas

Nous présentons dans cette section, notre méthodologie d'intervention pour l'étude de l'effet de la MCCI sur l'entreprise. Nous explicitons d'abord le déroulement de notre recherche-intervention à Turbomeca, puis nous précisons nos différentes interventions ainsi que notre méthode de collecte de données.

Recherche - intervention

L'étude d'un processus d'innovation radicale dans une entreprise établie est un travail complexe. En effet, étudier un tel processus nécessite une connaissance approfondie du champ d'investigation pour appréhender, dans son ensemble, son impact sur les différents paramètres de l'entreprise. En effet, ce type de processus interfère avec différentes composantes de l'entreprise, et notamment avec une multitude de métiers. Pour mieux saisir ces interactions multiples, nous avons mené l'ensemble de notre investigation sous la forme d'une « recherche-intervention » (Hatchuel & David, 2007).

Par ailleurs, le format de la thèse CIFRE nous a permis de conduire une étude longitudinale de la méthode KCP et de son impact sur l'entreprise à plusieurs niveaux organisationnels. A Turbomeca, les travaux étaient suivis par le chef de service des avant-projets, qui tenait le rôle de chef du projet d'innovation de rupture *Propulsion 2030*. Nous étions physiquement sur le plateau des avant-projets, et en position de support méthodologique durant toute la durée de la thèse. Cette position avait un double avantage : d'abord, en nous permettant, d'être au cœur de la préparation des nouveaux produits de l'entreprise, en étant quotidiennement en relation avec les architectes des nouveaux moteurs et des systèmes d'énergie du futur ; deuxièmement, en étant à la source même des processus cognitifs et managériaux du processus *Propulsion 2030*, en tant qu'assistant à la mise en œuvre et au pilotage de la méthode KCP. Notre participation au projet *Propulsion 2030* nous a aussi permis, dès le tout début de nos recherches, de faire connaître notre sujet de thèse, de tisser un réseau multi-métiers et multi-niveaux hiérarchiques. L'activation de ce réseau a, par la suite, facilité le pilotage de la méthode, la collecte de données pour nos recherches ainsi que la diffusion de nos travaux dans l'entreprise. Aussi notre participation à tous les ateliers de la méthode ainsi que l'accès aux comités de pilotage nous aura permis à la fois d'acquérir des connaissances technico-

économiques sur Turbomeca et sur le monde de l'aéronautique, mais aussi donné accès à des données décisionnelles centrales concernant la préparation de l'avenir de l'entreprise.

Objets d'intervention et Collecte de données

Le statut de salarié nous a permis d'intervenir à plusieurs niveaux organisationnels de l'entreprise : au niveau des experts à la direction technique et à la direction des services ; au niveau du management intermédiaire dans toutes les directions de l'entreprise ; au niveau stratégique de l'entreprise.

- Au niveau des experts, nous avons mené trois séances de créativité et de conception sur des projets de conception innovante issus de la méthode KCP durant la deuxième année de nos recherches. Lors de ces séances, nous proposons de l'aide pour la génération de propositions nouvelles sur certains projets, ou bien nous aidions les experts à structurer leur raisonnement de conception. Ces séances nous permettaient à la fois d'étudier la genèse même des propositions en rupture, et de suivre leur évolution tout au long du processus. En outre, sur la base des entretiens présentés en partie II nous complétions notre compréhension du déroulement de certains projets de conception innovante.
- Au niveau du management intermédiaire, nous aidions à la dissémination des propositions créatives sur la base des cartographies C-K construites avec les experts ainsi qu'au pilotage du raisonnement de conception innovante pour la méthode KCP. Comme pour le niveau de l'expert, nous complétions notre connaissance des projets sur la base des entretiens semi-directifs présentés en partie II. Durant la deuxième année nous avons effectué un total de dix entretiens semi-directifs. Aussi, nous assistions à l'ensemble des réunions de pilotage de projets de conception innovante et à la construction des *roadmaps* stratégiques pour l'innovation de rupture par les responsables de la R&T et du service des avant-projets. Par ailleurs, le statut de chercheur-salarié a aidé de manière informelle à collecter des données sur les jeux d'acteurs et le ressenti de certains managers, au travers des différentes discussions que nous avions avec nos collaborateurs.
- Au niveau stratégique, nos interventions furent multiples. Tout d'abord, nous avons contribué à travailler avec le chef de projet à la préparation des présentations à destination du *top-management* dans l'entreprise durant toute la durée de la méthode. Ensuite, nous avons eu l'opportunité de piloter et organiser deux séminaires stratégiques avec la direction des services pour la construction des feuilles de route à long terme avec l'ensemble des cadres de cette direction. L'organisation et la

participation à ces séminaires nous permettaient d'analyser en direct la réaction des directeurs vis-à-vis des propositions issues de la méthode. Concernant la diffusion des résultats de la méthode, nous avons réalisé un film d'animation avec le chef de service des avant-projets afin de présenter les enjeux futurs pour l'aéronautique ainsi que les propositions de la phase P sur lesquelles l'*équipe de travail* avait œuvré pendant près de 2 ans. Ce film fut projeté au plus haut niveau de l'entreprise, à la direction générale lors d'un séminaire de préparation de l'avenir de l'entreprise, et a été l'occasion symbolique pour la direction générale de clôturer la méthode KCP. D'autre part, nous avons eu, du fait de notre statut de salarié, de nombreux échanges informels tout au long de nos recherches avec le directeur de la stratégie de l'entreprise.

Nous faisons la synthèse des différents aspects de notre intervention dans la Figure 40 ci-dessous :

Niveau organisationnel	Statut du chercheur	Objets d'intervention	Matériaux
Expert (niveau individuel)	Acteur	Structuration du raisonnement de conception des experts Animation de séminaire de créativité	Méthode KCP Projets de conception innovante Séminaires et réunions préparatoires
Management intermédiaire (niveau de l'équipe)	observateur	Construction de roadmaps stratégiques	
	acteur	Assistance au pilotage de la méthode KCP	
	entretiens	Collecte et diffusion de propositions créatives dans l'entreprise	
Top-management (niveau stratégique)	acteur	Réalisation d'un film <i>Propulsion 2030</i> à destination de la direction générale Construction et assistance au pilotage d'un séminaire stratégique	

Figure 40 - Synthèse de notre recherche-intervention dans le cadre de Propulsion 2030

1.2.4. Description de la mise en œuvre de la méthode et de ses impacts sur l'entreprise

Dans cette section, nous présentons dans un premier temps le déroulement des étapes de la méthode KCP dans l'entreprise de manière chronologique. Nous détaillons ensuite les effets sociocognitifs sur l'entreprise de l'utilisation de cette méthode, en présentant d'abord les

ruptures opérées sur le raisonnement de conception de l'entreprise, puis en mettant en avant l'effet de ces ruptures sur l'organisation. L'ensemble des données qui sera présenté ici nous permettra dans le chapitre 6 d'analyser la méthode et comprendre les processus en jeu dans ce que nous appellerons *les transitions organisationnelles par la conception*.

2. Déroulement de la méthode KCP

Nous suivons ici la logique de déroulement du processus. Ainsi, nous présentons en premier lieu la phase de mise en place de la méthode, puis la phase d'intégration de connaissances nouvelles et la phase d'exploration conceptuelle, pour finir avec l'étape la plus riche en matière de données : la phase de construction de propositions.

La phase de mise en place a démarré fin janvier 2009, lors de la réunion de lancement de la méthode KCP. A cette réunion participaient deux consultants en conception innovante, le chef de service des avant-projets, le chef du département intégration, le directeur technique et nous-même. Au cours de cette réunion, le débat sur la définition du périmètre d'exploration nous a semblé primordial. Concernant ce périmètre, le consultant en conception innovante demanda au chef de l'intégration (architecture des moteurs) de revoir à la hausse l'objectif de réduction de consommation qu'il s'était fixé à horizon 2030, car il ne le trouvait pas assez ambitieux pour une initiative d'innovation de rupture. Le chef du département intégration répondit : « **-30 % de consommation spécifique, je ne sais pas comment faire !** ». Cette phrase démontrait la situation dans laquelle se trouvait Turbomeca à cette période, en matière de disposition à l'innovation radicale. Le chef de l'intégration, à travers cette phrase, pointait du doigt l'insuffisance des voies conventionnelles d'amélioration des produits de Turbomeca pour atteindre les objectifs que la R&T de l'entreprise s'était fixée afin de suivre la feuille de route d'ACARE.

À l'issue de cette réunion, trois périmètres d'exploration furent proposés au PDG : le premier était restreint au turbomoteur pour hélicoptère avec des performances en rupture ; le second couvrait un périmètre élargi toujours cantonné à l'application hélicoptère ; et enfin un périmètre plus large encore, et qui fut celui sélectionné par le PDG pour Propulsion 2030 : ce périmètre incitait à étudier conjointement les dimensions produit et service, et à considérer une plus grande variété de véhicules à équiper. La direction générale était donc intéressée par

l'investigation du périmètre d'exploration le plus ambitieux des trois, tout en le restreignant à une certaine gamme de puissance³⁶.

La sélection du périmètre était la première étape d'un long processus s'appuyant sur la méthode KCP. Les équipes qui allaient contribuer à la méthode étaient ainsi constituées :

- L'équipe d'animation était composée du chef de service avant-projet, de 2 consultants, et de nous-même ;
- Le comité de pilotage était composé du responsable du département intégration, du directeur de la stratégie, du directeur technique, du directeur des services, du responsable R&T et de son ingénieur en chef ;
- Le groupe élargi était composé de 30 personnes : ingénieurs, cadres et experts de toutes les directions de l'entreprise. 50% du groupe était à dominante technique, et ses membres furent sélectionnés, en connaissance de leur réputation dans l'entreprise, pour leur affinité pour des activités d'innovation.
- Le groupe de travail était composé de deux experts du domaine avant-projets, l'un en mécanique et l'autre en énergétique, dont les fiches de postes avaient été adaptées pour être à plein temps sur le projet pour une durée indéterminée ; de personnes allouées à temps partiel sur le projet en fonction de leur activité dans leur service d'origine : un expert en navigabilité, un manager de la direction des services ; un manager de la direction de la stratégie et un responsable des motorisations innovantes. Il est à noter que, dans la composition de ce dernier groupe, seuls les experts dont les fiches de poste avaient été modifiées suivirent le projet du début à la fin du 01 mars 2009 au 15 novembre 2011. Il y eut une forte rotation sur les autres métiers représentés. **Il est à noter que, bien que ces rotations diminuent l'efficacité du groupe à cause du temps d'adaptation des nouveaux arrivants, elles sont cependant très intéressantes quant à la diffusion de la démarche d'innovation de rupture et aux diffusions des propositions nouvelles dans leur service d'origine.**

Une fois la mise en place de l'ensemble de la méthode terminée, le processus entre dans la phase suivante, la phase K d'intégration de connaissances nouvelles, et le groupe élargi fut réuni pour la première fois en mars 2009 pour le premier atelier d'intégration de connaissances.

³⁶ Cette restriction permettait d'exclure des réflexions sur des gros moteurs de l'aviation civile ou de lanceurs spatiaux par exemple.

Les premiers ateliers de la phase K démarrèrent donc en mars 2009, deux mois seulement après la validation du périmètre d'exploration par le PDG. Il y eut sept journées d'ateliers K, qui s'étalèrent du mois de mars au mois de juin, à deux semaines d'intervalle chacun. Ce qui est une cadence élevée pour un groupe aussi important. Le *groupe élargi* participa à l'ensemble de ces séances avec un taux de présence de plus de 80 %. La densité en connaissances fut remarquablement élevée : trente présentations de 40 min furent présentées au *groupe*. À la demande du directeur technique, et avec une forte recommandation des consultants, 30 % de ces présentations étaient réalisées par des experts externes.

En matière d'impact, nous remarquons, durant ces phases, que les présentations réalisées par des industriels externes avaient un effet plus important sur les participants, car étant plus appliquées, elles correspondaient davantage aux attentes de ces derniers. Aussi l'appropriation de connaissances nouvelles était-elle meilleure, notamment quand la technologie présentée était proche du monde de l'aéronautique. Nous notons que les présentations de connaissances internes étaient essentielles, car beaucoup d'expertises ou projets de l'entreprise étaient inconnus de certains membres du *groupe élargi*. Par ailleurs, certaines présentations des experts de Turbomeca permirent de réintégrer d'anciens concepts de produits, que la plupart des personnes du *groupe élargi* avaient oublié. Ces concepts se trouvèrent justement être des propositions très utiles pour la préparation des ateliers de créativité à venir. Cette phase permit également de fournir une vue d'ensemble de l'écosystème de Turbomeca à tout le *groupe élargi* : famille de produits, modèle d'affaires, clients, programme R&T, menace interne et externe future... Cela permettait de sortir d'une vision individuelle de la représentation de l'entreprise, et de partager une nouvelle vision commune.

La phase K se termine par la reconstruction de cartographies C-K par l'*équipe de pilotage*, qui permet de construire des axes d'exploration pertinents pour la phase suivante, la phase C.

La phase conceptuelle, était constituée de deux ateliers de conception consécutifs qui eurent lieu quinze jours après la dernière séance K, soit trois mois après le démarrage de la méthode. Afin de guider le travail de ces séances, plusieurs axes d'exploration furent proposés par l'*équipe d'animation*. Ils se présentaient sous la forme de planches de tendance contenant le titre de l'axe d'exploration et des éléments visuels et textuels en relation avec le sujet. Elles permettaient de stimuler la créativité des participants selon l'axe qui leur était attribué.

Le *groupe élargi* fut séparé en 5 groupes travaillant chacun sur un axe d'exploration différent. Les groupes alternèrent durant deux journées successives entre séances de travail et séances de restitution aux autres membres du *groupe élargi* ce qui leur permettait de générer et développer des propositions autour de leur propre axe, qu'ils restituaient ensuite en séance plénière afin d'enrichir et de fertiliser les travaux de chacun des autres groupes. Entre la première et la deuxième journée, *l'équipe d'animation* régénéra de nouveaux axes d'exploration à partir des propositions de la première journée. Ces nouveaux axes permettaient de restructurer l'exploration ; soit sur des propositions pressenties comme à forte valeur, soit sur des domaines n'ayant pas été couverts dans le périmètre d'exploration de la méthode.

En ce qui concerne l'effet de cette phase, bien qu'il n'y ait pas eu consensus autour de l'originalité des propositions soumises pendant son déroulement, ces ateliers furent capitaux pour la fédération autour de celles-ci pour la suite du processus. Par exemple, nous avons pu noter que beaucoup de propositions créatives existaient déjà dans l'entreprise avant les ateliers de créativité, mais qu'elles n'avaient pas été partagées. Elles étaient soit isolées dans des projets innovants, soit détenues par certains individus isolés. Par exemple, à la fin des séances C, alors que pas moins de 140 propositions furent générées, l'originalité et la valeur de ces propositions ne semblaient pas pouvoir être évaluées par le groupe élargi. En fait, à la fin de la seconde journée, nous relevions de nombreuses frustrations parmi les experts participants à ces groupes. Ainsi un expert technique nous a-t-il confié : « Je suis franchement déçu, je pensais que nous irions plus loin dans les concepts » ; un autre expert a rapporté ceci : « j'ai l'impression que nous n'avons rien trouvé de nouveau ». De fait, l'intérêt des séances de créativité comme processus de génération et fédérations des idées n'avait, semble-t-il, pas été suffisamment explicité par *l'équipe d'animation*. Par conséquent, les experts techniques qui connaissaient déjà certaines des idées les plus créatives auraient préféré développer de la connaissance autour des plus pertinentes. Il apparaît donc que le fait de ne pas avoir assez décrit les objectifs de cette phase ne permettait pas aux experts de percevoir la fédération des idées comme un résultat, et du même coup de saisir l'intérêt de prolonger un processus divergent.

La phase C permit finalement de générer un grand nombre de concepts et idées, et de fédérer les membres du *groupe élargi* et du *groupe de travail* autour de ces concepts avant de rentrer dans la phase de construction de propositions, la phase P.

La phase de construction de propositions (P) démarra par une reconstruction des axes d'exploration à partir des propositions issues des deux jours de séminaire de créativité, ainsi que des connaissances explorées. Cinq axes d'exploration furent proposés au groupe de travail, et chaque participant était responsable d'un ou plusieurs d'entre eux. Étant donné que les axes étaient intentionnellement en rupture avec les connaissances usuelles de l'entreprise, les participants avaient pour mission de mener des actions d'apprentissage ou d'analyse à partager avec le reste du groupe lors des réunions hebdomadaires. Le chef de projet proposait de nouvelles actions chaque semaine en fonction des apports des experts à ces réunions. Ces actions pouvaient être de l'ordre de la simple prise de contact avec un partenaire, de calculs sur des systèmes énergétiques, ou même d'analyses économiques de certaines propositions.

En matière d'acquisition de connaissances, nous avons remarqué des changements dans la manière dont les experts lisaient et analysaient la presse spécialisée. Nous pouvions l'observer en comparant les différences d'interprétation entre le groupe de travail et les collaborateurs qui n'étaient pas impliqués dans la méthode KCP. Nous observions aussi que les membres du groupe de travail recevaient des mails ou des visites à propos de propositions ou de connaissances en rupture de la part du groupe élargi, qui avait pourtant été dissout à la fin des ateliers C, et que la fréquence de ces échanges ainsi que le nombre de personnes intéressées augmentait. Par la suite, ce ne furent plus seulement les membres du groupe élargi qui participaient à ces échanges, mais d'autres personnes de l'entreprise, notamment du management, qui s'y intéressaient. Ces éléments mettaient en évidence deux faits majeurs : le premier concernait une diffusion de l'intérêt pour l'innovation de rupture dans l'entreprise, mais surtout il soutenait **le besoin d'un point focal pour la gestion de propositions en rupture, qui ne trouvaient jusqu'ici pas leur place dans l'entreprise**. De fait, les axes d'exploration fonctionnaient comme des aimants pour de nouvelles connaissances exotiques, qui n'avaient jamais été considérées par les experts de Turbomeca.

A l'extérieur de l'entreprise, dès le début de la phase P, le *groupe de travail* présenta les axes d'exploration à quatre filiales de SAFRAN (société mère de Turbomeca) pour intégrer de nouvelles connaissances : Snecma, Snecma Vernon, Microturbo, Hispano-Suiza. Les présentations permettaient de disséminer le travail d'exploration à l'échelle du groupe, et conduisirent au lancement de plusieurs synergies nouvelles autour de ces axes. Plusieurs partenariats furent aussi lancés avec des petites entreprises. L'un d'entre eux, PowerPlus³⁷, concernait un dispositif qui avait déjà été identifié avant la méthode, mais qui n'avait pas trouvé sa place dans les feuilles de route de la R&T de l'époque (voir description section suivante). Il est à noter que les premiers partenariats furent lancés six mois seulement après le

³⁷ Pour des raisons de confidentialité le nom du projet a été modifié.

lancement de la méthode, un laps de temps très court compte tenu des objectifs long terme de l'initiative. Aussi, à la fin de la méthode, le directeur technique présenta une nouvelle feuille de route de conception innovante à la direction de SAFRAN en décembre 2010. Celle-ci permit d'acquiescer de la part du management de la holding, un fort soutien pour lancer de nouveaux projets.

Cette phase dura près de deux ans. Sa conclusion fut officialisée le 10 novembre 2011 à l'occasion de la présentation d'un film d'animation à la direction générale, que nous avons réalisé avec le chef de projet de *Propulsion 2030*. Ce film d'une durée de 10 minutes présentait en première partie des animations concernant les nouveaux enjeux de l'aéronautique en général et de Turbomeca en particulier, puis exposait de manière scénarisée plusieurs concepts de mission aéronautique, et concluait par la présentation des cinq axes d'exploration. Ce film fut ensuite utilisé ultérieurement en interne à différentes occasions (vœux du directeur technique à ses équipes, communication à des équipes qui avaient entendu parler de la démarche, etc.), constituant un vecteur de dissémination des concepts en rupture.

En résumé, la méthode collaborative de conception innovante a amené une trentaine de personnes à collaborer sur un sujet de conception innovante de l'entreprise de mars 2009 à novembre 2011. Malgré un investissement financier assez faible (en comparaison, par exemple, d'un développement de nouveau moteur : un rapport de 1/100), la méthode permit de préparer l'entreprise aux produits et services pour le long terme. Comme nous le verrons dans la partie suivante, la méthode permit en effet une transformation cognitive et organisationnelle à plusieurs niveaux de l'entreprise, ainsi que le lancement de projets en rupture, révélateurs des lacunes initiales de l'entreprise en matière d'innovation radicale.

3. Impacts organisationnels et cognitifs de KCP

Nous présentons dans cette section les effets de la méthode KCP sur les processus cognitifs et sur les processus organisationnels. Nous rappelons que cette méthode a finalement donné lieu à la construction de cinq axes d'exploration autour desquels s'est organisé le travail de conception innovante. Cependant, pour des raisons de répartition des efforts par l'*équipe de travail* et d'enjeux stratégiques, l'axe d'exploration sur *la réduction de l'impact environnemental* est le plus riche et celui qui a eu, à court terme, les répercussions les plus significatives dans l'entreprise. Sur le plan sociocognitif, c'était également l'axe le plus facilement appréhendable par l'équipe, car tourné en partie vers un objectif « traditionnel » de l'entreprise, à savoir l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes. Nous notons que les autres axes continuent de faire l'objet d'explorations, mais à un rythme moindre compte-tenu des priorités fixées par le *top management*. Ainsi, par souci de clarté et pour éviter au lecteur de la redondance dans notre propos, nous ne présenterons ici que les impacts associés à cet axe. Il faut néanmoins noter que notre participation active dans l'ensemble des axes d'exploration nous permet de confirmer les impacts organisationnels et cognitifs développés ici. D'autant que notre importante implication dans l'axe d'exploration sur les services nous a permis de valider nos conclusions pour des activités autres que les activités de conception des moteurs.

En ce qui concerne l'axe d'exploration sur l'impact environnemental, la Figure 41 représente dans la zone verte le potentiel des voies d'exploration résultant de la phase P. On peut voir sur cette figure que le nuage de points représenté par zone en vert va même au delà des objectifs fixés par le conseil européen ACARE. Ainsi, elle montre que des chemins de conception élaborés avec la méthode permettaient désormais d'envisager l'atteinte des objectifs que l'entreprise s'était fixée. Bien que peu de ressources fussent engagées durant le KCP, la méthode permit de construire une stratégie de conception innovante partagée.

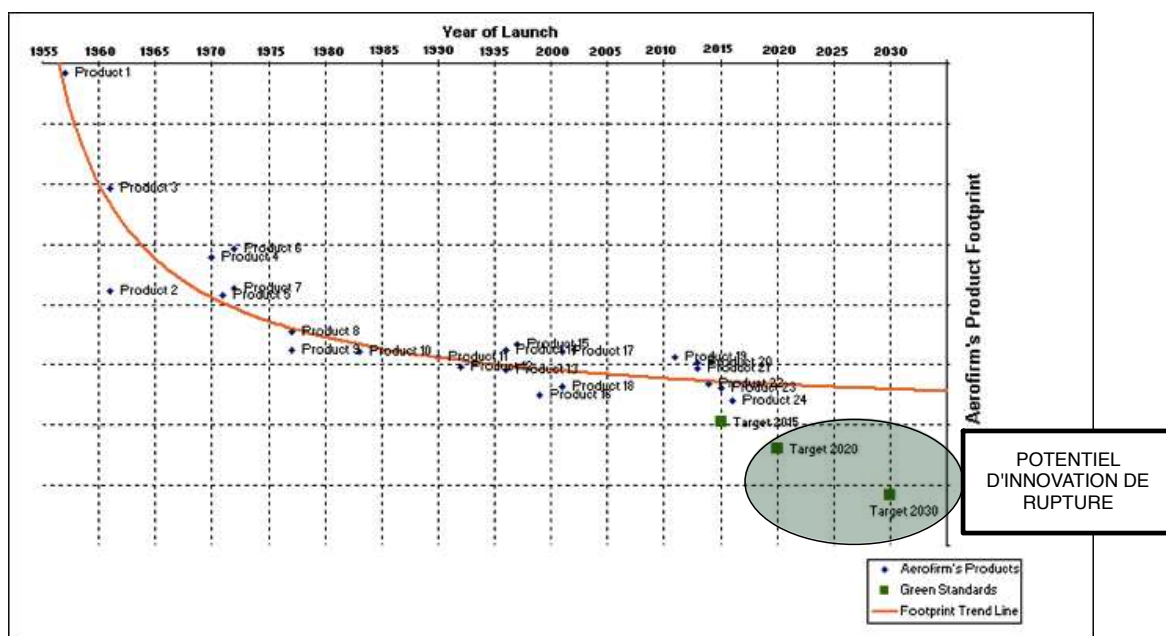


Figure 41– Potentiel d’innovation de rupture construit à partir de la méthode KCP

Dans la suite de cette section nous présentons les effets cognitifs et organisationnels de la méthode. Par souci de clarté, ces éléments sont développés dans deux paragraphes différents. Nous montrons dans un premier temps l’évolution du raisonnement de conception de l’entreprise, ainsi qu’une première analyse à partir de la théorie C-K, puis nous mettons en évidence l’impact du renouvellement des voies en rupture (et des plans d’acquisition de connaissances associées) sur le réseau d’acteurs de la conception innovante internes et externes à l’entreprise.

3.1. Impacts cognitifs : nouveau raisonnement de conception et régénération des voies de conception historique

En 2008, les voies d’amélioration des produits de Turbomeca étaient cantonnées à l’augmentation du rendement des générateurs de gaz. L’architecte d’un turbomoteur, aux avant-projets, pouvait jouer sur deux leviers pour avoir le meilleur rendement possible du cycle de Brayton – le cycle de la turbine à gaz. Le premier était l’augmentation du taux de compression, le second l’élévation de la température d’entrée turbine ou température en sortie de la chambre de combustion. Or les taux de compression optimaux dans chaque plage de puissance étaient connus depuis les années 1980, et furent atteints progressivement dans les années 2000. L’amélioration du rendement des turbines à gaz se limitait donc depuis à l’amélioration de l’aérodynamique des compresseurs et des turbines. L’élévation de la

température entrée turbine, quant à elle, passait par une meilleure tenue des matériaux aux hautes températures, ce qui impliquait une forte dépendance vis-à-vis des élaborateurs de matériaux et des fonderies. Dans le premier cas, les travaux sur les modèles de calculs ont permis des avancées considérables pendant des décennies, et les compresseurs et turbines atteignent désormais des rendements très élevés. Dans le deuxième cas, grâce aux progrès de la métallurgie, les matériaux atteignent aujourd'hui les limites de la physique en tenue en température pour les matériaux métalliques conventionnels. De fait, ces avancées ont permis de pousser le cycle de Brayton à sa quasi-asymptote sur le plan du rendement.

Par conséquent, avant le KCP, déjà quelques voies en rupture bien connues dans les turbines à gaz chez les motoristes d'hélicoptère avaient été envisagées par les architectes moteurs. La première était de réutiliser les gaz d'échappement pour réchauffer l'air en entrée de la chambre de combustion, permettant ainsi d'augmenter le rendement global du cycle. Mais les technologies d'échangeurs étaient trop lourdes pour l'aéronautique. Donc peu d'ingénieurs croyaient à cette solution. La deuxième était le refroidissement des pales de turbines haute pression. Cette technologie, bien que largement diffusée dans le monde des « gros » moteurs de l'aviation civile, fut très difficile à appliquer dans le monde des « petits » moteurs de l'hélicoptère civil, et présentait des gains peu importants par rapport au coût supplémentaire qu'elle induisait. En 2008, à l'exclusion de ces deux propositions, il n'existait presque pas de voies en rupture considérées et partagées dans l'entreprise pour des applications dans le monde de l'hélicoptère. Nous avons représenté sur la cartographie C-K, Figure 42 ci-dessous, ces chemins de conception « classiques » pour améliorer la turbine à gaz d'hélicoptère, ainsi que les deux voies de rupture (en gras). « Chauffer air avant combustion » est à rattacher à « en jouant sur le cycle thermodynamique »

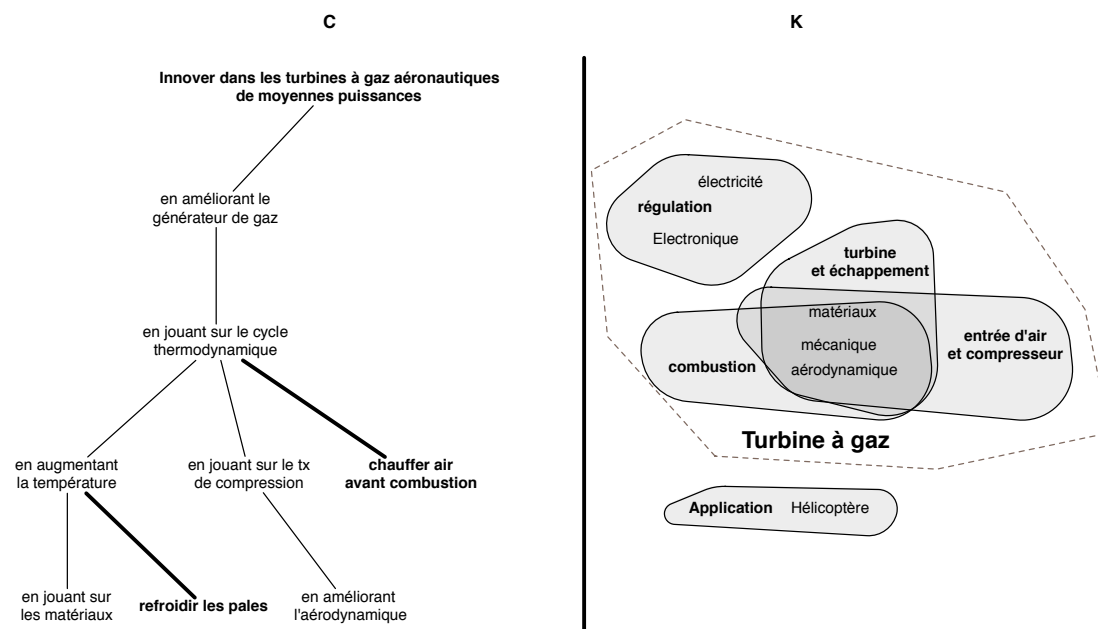


Figure 42 - Cartographie C-K représentant des voies d'amélioration de la turbine à gaz étudiées chez Turbomeca avant la méthode KCP

Le premier impact important de la méthode KCP aura été de déplacer le terrain de jeu au niveau systémique. En effet, alors que, jusque-là, Turbomeca avait poussé l'amélioration de la turbine à gaz d'hélicoptère en donnant la priorité à l'amélioration de son rendement et de ses coûts d'exploitation, le périmètre d'exploration ouvrit un vaste champ à investiguer sur « les systèmes d'énergie ». En ouvrant ce champ, la voie pale refroidie devenait une rupture ayant un faible potentiel d'amélioration des performances en comparaison des nouvelles voies possibles telles que l'hybridation. Pour le *groupe de travail*, elle n'était plus perçue que comme une « petite » rupture au niveau des métiers de la turbine.

Sur la cartographie CK, Figure 43 ci-dessous, sont représentées les nouvelles voies³⁸ intégrées dans l'entreprise pendant la phase P. Dans la partie C, le concept de départ concerne désormais le système énergétique pour hélicoptère dans son ensemble. En traits fins sont représentées les voies d'améliorations classiques de la conception réglée. La ligne en pointillés représente la frontière en terme de concepts et de connaissances requises associée aux voies d'amélioration conventionnelles de la turbine à gaz. La flèche dégradée du rouge (faible) vers le vert (fort) représente le potentiel des voies en rupture à chaque niveau systémique, ces voies étant représentées en gras. On remarque que les voies comportant les plus forts potentiels sont celles qui dépassent les frontières de l'entreprise. Dans l'espace des

³⁸ Pour des raisons de confidentialité, la cartographie reste vague quant au contenu de ces voies et des connaissances auxquelles elles font appel.

connaissances, ces voies sont par conséquent associées pour partie à des connaissances dont l'entreprise ne dispose pas. De même, on remarque sur la cartographie que, pour l'exploration, la poche de connaissances concernant la turbine à gaz n'est plus qu'une poche parmi d'autres que l'entreprise doit explorer pour ces produits du futur.

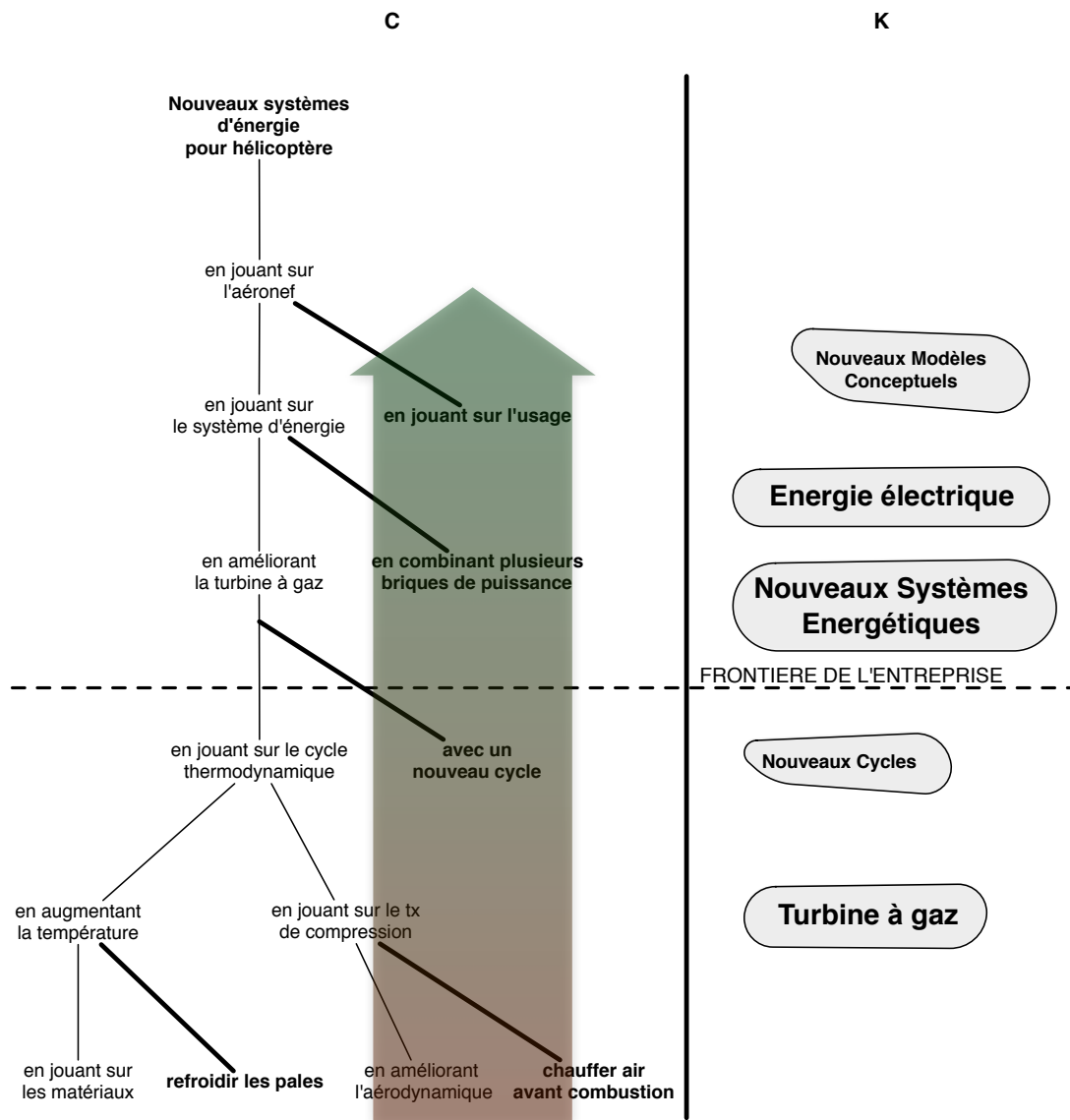


Figure 43 - Cartographie C-K représentant les voies d'amélioration des systèmes énergétiques et connaissances associées après la méthode KCP

Finalement, les propositions issues de la phase C, analysées en profondeur deux années durant par les experts, permirent de faire émerger des voies d'innovation de rupture à fort potentiel. Nous parlons ici de « potentiel », car au moment de la rédaction de ce mémoire, le développement de ces voies est en cours. Cependant, la manière de concevoir est déjà

profondément repensée. En effet, alors que, jusque-là, l'entreprise ne jugeait pertinentes que les voies d'innovations relatives à l'amélioration du rendement et des coûts d'exploitation, afin de répondre aux spécifications des avionneurs, après le KCP les énergéticiens étudièrent de nouveaux concepts en termes d'intérêt global pour les missions aéronautiques, et cette démarche est aujourd'hui intégrée.

Le deuxième effet structurant fut donc le changement des règles du jeu. Le travail des concepteurs ne réside plus dans l'amélioration des turbines à gaz, mais dans la conception, plus ouverte, de systèmes énergétiques. La turbine à gaz est alors plus qu'un composant d'un système plus large qu'une pièce du puzzle des connaissances parmi d'autres.

Cependant, comme pour toute innovation radicale, l'enthousiasme généré lors de la structuration et de l'intégration des voies en rupture dans l'entreprise est à considérer avec prudence. Ainsi, si l'originalité et la robustesse des voies générées firent consensus dans l'entreprise (la cartographie C-K ci-dessous appuie ce propos) cette rupture semble toutefois partagée par d'autres acteurs hors de l'entreprise. En effet, durant l'ensemble de notre investigation, nous avons noté des efforts importants de certains acteurs de l'industrie, et ce de manière simultanée sur la plupart des voies en rupture considérées plus haut. Par exemple, nous avons relevé dans la presse spécialisée que plusieurs concurrents et hélicoptéristes travaillaient également sur des propositions de rupture ayant été formalisées à Turbomeca durant la méthode KCP. Nous avons constaté des « lieux communs de la rupture » pour l'ensemble de l'industrie de l'hélicoptère. L'hybridation ou l'énergie électrique en sont des exemples. Cependant, bien que certains concepts étaient connus des différents acteurs de l'écosystème, les enjeux stratégiques associés à ces voies en rupture ont contraint les acteurs à des efforts indépendants et non partagés, entraînant des exigences accrues de confidentialité, parfois déroutantes pour les acteurs de l'entreprise.

En résumé, sur le plan cognitif, le déploiement de la méthode KCP eut des répercussions importantes, qui remirent en question à la fois les critères de performance, les logiques d'évaluation et les feuilles de route pour conduire l'innovation de rupture. Ces nouvelles propositions et connaissances à explorer pour devancer ou suivre l'effort d'innovation radicale de l'écosystème stimulèrent aussi une importante transformation de Turbomeca sur le plan organisationnel.

3.2. Impacts organisationnels des voies en rupture

Comme nous avons pu le constater dans la section précédente, la génération des axes d'exploration suggérait de nouveaux enjeux cognitifs pour concevoir les systèmes énergétiques du futur, et nécessitait l'acquisition de connaissances totalement en rupture avec les savoirs historiques de l'entreprise. Le travail sur ces axes d'exploration imposait donc une transformation de l'organisation de l'entreprise à plusieurs niveaux, que nous détaillons à présent.

3.2.1. Nouveau rôle de l'expert dans le processus de conception

Le travail sur les axes d'exploration a « forcé » les experts à acquérir de nombreuses connaissances dans des champs dépassant leurs compétences de départ. En fait, avant les premières phases de déploiement de la méthode KCP, la direction de la stratégie de Turbomeca tablait sur une certaine stabilité de son écosystème industriel et de sa chaîne de valeur même à long terme. Mais les études sur les propositions créatives ont obligé les experts à reconsidérer cette représentation. Pour les développer, ils ont dû progressivement revisiter les interfaces usuelles des acteurs du monde de l'aéronautique. Leur nouvelle manière de concevoir les a amenés à explorer des fonctions originales pour les aéronefs et leur mission, remettant en question la nature même de la valeur ajoutée proposée par l'entreprise. Leur travail sur les nouvelles voies en rupture permit de mettre en avant de nouvelles valeurs à un haut niveau stratégique de Turbomeca. Néanmoins, nous avons également noté qu'en rapport à ces nouveaux enjeux, les stratégies se trouvaient démunies. En effet, nous avons constaté durant les comités de pilotage qu'en raison de la révision de l'identité des objets, et des critères de performance issus de la méthode, qu'aucune décision ne pouvait être prise par les cadres supérieurs tant les logiques d'évaluation s'en trouvaient bouleversées. Ces réunions s'étaient donc plutôt transformées en réunion d'information à destination du *top management* (*bottom-up*) qu'en réunion de pilotage (*top-down*) à destination de l'équipe d'animation ou de travail. Pourtant, les propositions élaborées par l'équipe de travail étaient totalement intégrées par le management dans les différents départements. Le département R&T, par exemple, transforma profondément ses *roadmaps* tout au long de la phase P autour des axes d'exploration et des propositions en rupture de l'équipe de travail. En retour, les experts devinrent plus réactifs à des signaux ou des opportunités d'innovation auxquels ils n'auraient même pas réagi quelques mois plus tôt.

L'expert, en tant que porteur référent d'un axe de conception innovante, s'est retrouvé fortement impliqué dans la construction de la stratégie de l'entreprise. Par exemple, le rôle de l'expert en énergétique dans cette phase fut étendu aux propositions des nouveaux métiers à intégrer pour s'adapter aux nouvelles feuilles de route de la R&T. Notre étude montre par

conséquent que les experts devenaient *de facto* les porteurs de propositions hautement stratégiques, d'ordinaire réservées au *top management*. Nous avons par exemple relevé, lors d'un comité de pilotage, une conversation entre le PDG et l'un des experts de l'énergie dans laquelle le PDG questionnait l'expert à propos de l'avenir de l'entreprise sur des éléments techniques. Pour l'expert, c'était la première fois qu'il se retrouvait à discuter d'éléments aussi stratégiques.

Il en est ressorti que l'expert en énergie ne se positionnait plus seulement comme un concepteur de nouveaux moteurs, mais que son travail sur les voies en rupture lui permettait également de repenser la stratégie de l'entreprise. De notre point de vue, ces résultats montrent qu'à travers la méthode KCP, la régénération des axes d'exploration replace l'expert au cœur du travail d'élaboration stratégique.

3.2.2. Transformation de l'équipe de travail et des avant-projets

Au niveau du groupe, nos résultats montrent que l'exploration conceptuelle contribue à créer un nouvel *espace organisationnel*.

Dans cet espace, une *équipe de travail* est mandatée par le comité de pilotage de la méthode KCP pour générer des stratégies d'innovation radicales partagées dans l'entreprise. Nous avons observé que le pilotage de l'*équipe de travail*, qui avait initialement été conçue comme une simple équipe transverse, fut largement influencé par l'activité d'exploration conceptuelle. En effet, les axes d'exploration furent utilisés par le chef de projet dans le management de l'équipe de travail. Ils permirent de guider l'équipe avec des objectifs d'exploration, et non plus simplement d'après des spécifications, comme il est de coutume dans la conduite de projets conventionnels dans l'aéronautique. De même, nous avons constaté que la génération d'axes d'exploration pouvait avoir des conséquences importantes sur la redistribution du travail dans l'entreprise. Durant la phase P, le *work-break-down structure*³⁹, qui est habituellement approprié à la gestion de projet chez Turbomeca, s'est avéré inadapté pour traiter les propositions les plus créatives générées grâce à la méthode. Le chef de projet proposa donc d'attribuer les axes d'exploration à chacun des experts dont les compétences se rapprochaient le plus du domaine à explorer. Aussi, ces changements au niveau du *groupe de travail* eurent des conséquences importantes sur le service avant-projets, du fait de sa forte représentation dans les projets issus de la méthode KCP.

³⁹ Le *Work Breakdown structure* (WBS), en management de projet est une décomposition hiérarchique d'un projet en plus petits composants. Cette décomposition est axée sur les tâches et activités à réaliser, par l'équipe projet, pour atteindre les objectifs du projet.

3.2.3. Transformation du réseau et de la fonction du chef de projet

La transformation du rôle du chef de service des avant-projets, cumulant les rôles de chef de service et de chef de projet de la méthode KCP, est également marquante. En effet, jusque-là, sa fonction consistait en la gestion de l'équipe chargée des phases préliminaires et d'avant-projet pour la conception d'un nouveau turbomoteur d'hélicoptère. Ses interlocuteurs dans l'entreprise étaient donc les responsables de programme, pour le lancement d'un nouveau moteur, le responsable R&T pour les études amont, ainsi que les différents métiers de la direction technique. Nous avons noté que l'exploration forcée s'appuyant sur les voies en rupture avait peu à peu fait évoluer le réseau du chef de projet. En premier lieu, la phase K permit de construire une communauté interne de personnes sensibilisées et impliquées dans le processus d'innovation de rupture, que le chef de projet put activer par la suite. Au cours de cette même phase, les présentations faites par des intervenants externes permirent aussi au chef de projet de se rapprocher de laboratoires ou d'entreprises dont les connaissances allaient inspirer largement les nouvelles propositions ainsi que les axes d'exploration.

Ensuite, durant la phase P, le chef de projet devient l'interlocuteur quasi systématique de toute proposition en rupture ne trouvant pas sa place dans les processus de l'entreprise. Il est devenu le principal porteur du discours de rupture, en interne comme à l'extérieur de l'entreprise.

En interne, les axes d'exploration l'amènent à construire des propositions à des niveaux stratégiques auxquels il n'était parfois pas convié auparavant : construction de la feuille de route R&T de Turbomeca, séminaires stratégiques de la direction générale de l'entreprise, construction de la stratégie à court, moyen et long terme à la direction des services. Par ailleurs, les synergies créées autour des axes d'exploration dans le groupe SAFRAN, ainsi que la dizaine de partenariats lancés avec des laboratoires et PME, accrurent fortement le nombre et la nature des interlocuteurs externes avec lesquels il avait à traiter. Ainsi, peu à peu, il est devenu le responsable d'une cellule émergente en charge de la conception innovante, comprenant à la fois *le groupe de travail de la phase P*, mais aussi une partie des activités des avant-projets. La Figure 44 représente les nouveaux interlocuteurs du chef de service des avant-projets dans le cadre de l'instauration de cette nouvelle organisation émergente.

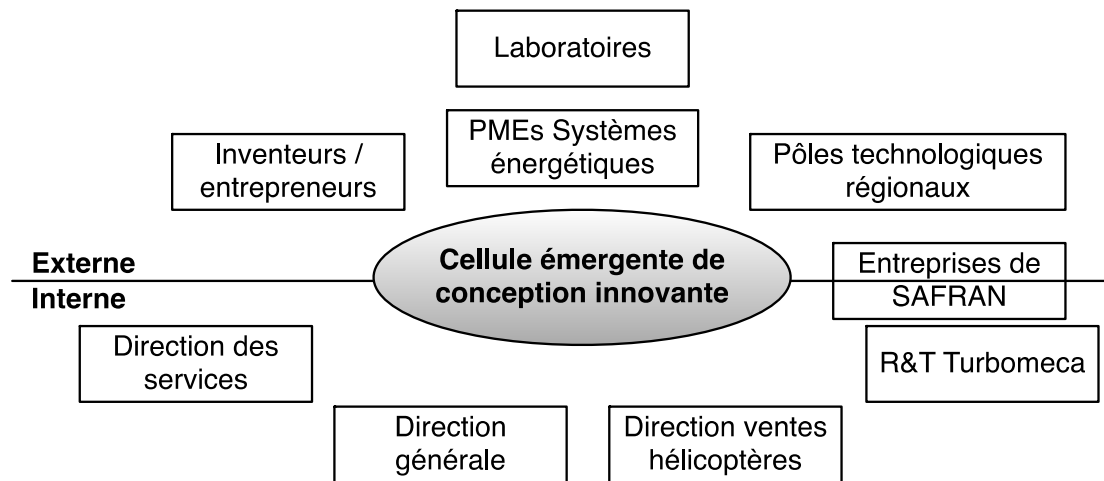


Figure 44– Évolution du réseau des avant-projets et de l'équipe de travail après le KCP

3.2.4. Mutation du positionnement stratégique de l'entreprise

Au niveau de l'entreprise, la démarche de conception innovante aura contribué à remettre en question sa stratégie à long terme. En interne d'abord, la direction prit conscience du besoin d'ouvrir des explorations conceptuelles pour le futur. Lors de la présentation au directeur des services d'une cartographie C-K illustrant notre exploration, il parlait en ces termes de la démarche *Propulsion 2030* : « Ces axes d'explorations me permettent de prendre des décisions aujourd'hui pour des services du futurs, sur lesquels je ne savais pas me positionner avant la démarche *Propulsion 2030* ». Ces nouvelles voies montrèrent également à la direction générale le besoin de disposer d'organisations internes agiles, permettant de réintégrer certaines capacités historiques de l'entreprise, mais surtout d'en développer de nouvelles. En externe, les différents projets d'apprentissage lancés autour des axes d'exploration permirent à Turbomeca de construire de nouveaux partenariats avec des entités agiles⁴⁰, lui permettant ainsi de constituer un réseau sur lequel s'appuyer pour ses projets de conception innovante et de R&T. Par ailleurs, la remise en question du périmètre de conception portée par les experts amena les cadres supérieurs à remettre en question leur propre perception de certains marchés ou de certaines technologies innovantes. Pour investiguer leur potentiel, des partenariats stratégiques avec des nouveaux acteurs furent construits autour de projets nouveaux. Les propositions créatives, ainsi que les compétences à intégrer proposées pendant le déploiement de la méthode KCP, permirent ainsi au top management d'explorer de nouvelles formes de stratégie à long-terme.

⁴⁰ Dans l'ensemble de ce document, on définira l'**agilité** comme la capacité d'une entité ou d'une organisation à répondre rapidement à des sollicitations de son environnement par la flexibilité des ressources et/ou la mise en œuvre de synergies.

En résumé, dans cette section, nous avons mis en évidence les transformations opérées par la mise en œuvre de la méthode KCP. Nous avons montré comment les principes managériaux et organisationnels de la méthode ont contribué à la révision du raisonnement de conception de l'entreprise. En retour, nous avons exposé et détaillé pour chaque niveau organisationnel, individuel, de l'équipe et stratégique, la transformation induite par l'intégration de ce nouveau raisonnement de conception dans l'entreprise. Ces résultats nous permettront, dans le chapitre 6, de caractériser la méthode KCP et la notion de *transition organisationnelle par la conception*. Cependant, l'étude des effets cognitifs et organisationnels de cette méthode ne nous renseigne pas sur les activités de conception innovante à intégrer pour gérer l'innovation radicale. Pour traiter ce point, nous étudierons dans la section suivante trois projets de conception innovante issus de la méthode KCP, qui nous permettront de mettre en évidence les lacunes capacitaires de l'entreprise.

4. Impact libérateur de la méthode KCP : l'émergence de trois projets de conception innovante

Les nombreuses propositions portées par les axes d'exploration durant la phase P ont amené l'entreprise à réinterroger ses connaissances conventionnelles et à intégrer des connaissances nouvelles pour enrichir ou développer ces propositions. A cet effet, le *groupe de travail* a lancé plusieurs projets exploratoires. Nous présentons ici, trois de ces projets qui, à notre sens, permettent de saisir l'ensemble des lacunes cognitives et organisationnelles de l'entreprise. A travers une présentation détaillée de chacun de ces projets, que nous avons pu observer durant les deux dernières années de nos recherches, nous dégagerons six grands types d'activités nécessaires à l'intégration de capacités d'innovation radicale.

4.1. PowerPlus : démonstration des limites de la conception réglée pour conduire l'exploration

En avril 2009, un expert trouva dans la presse scientifique un article relatif à un dispositif permettant d'augmenter de manière importante le rendement d'une turbine à gaz. Il proposa ce dispositif au management de la R&T et des avant-projets. Pour l'expert, les managers ne semblaient pas vouloir prêter attention à cette technologie. D'après nos entretiens, ces derniers ne savaient en réalité pas comment l'évaluer. Un mois plus tard, un participant à la méthode KCP **rencontra les inventeurs du dispositif** au cours d'un salon aéronautique. A cette époque, les séminaires de la phase C de la méthode venaient d'avoir lieu. Celui-ci sollicita les mêmes personnes des avant-projets et de la R&T, mais cette fois dans le cadre de la méthode KCP. Ceux-ci donnèrent rapidement suite, et une première réunion fut organisée quelques semaines plus tard pour rencontrer les inventeurs. La direction technique fut intéressée par le projet pour plusieurs raisons. La première était que ce dispositif répondait parfaitement aux interrogations portées par l'un des axes d'exploration déjà construit, et témoignait d'un potentiel théorique d'amélioration du rendement très important. La seconde était qu'une première occasion de concrétisation technologique, à la suite des quelques mois d'incertitudes dans lesquels étaient plongés participants et managers durant les phases K et C, était la bienvenue par le *comité de pilotage*. En effet, **à travers la méthode, les membres du groupe élargi avaient pris conscience de l'urgence à travailler sur ce type de technologie**. La troisième relevait du fait que, durant cette première réunion, les inventeurs ne se privèrent pas de parler de **l'intérêt d'un autre acteur pour leur dispositif**.

Afin de convaincre la direction générale de Turbomeca de lancer un projet pour étudier ce dispositif, une équipe composée du management de la R&T et de la direction des ventes monta un *business case*. Ce *business case* permit de convaincre la direction générale de lancer un projet de 2 M€ sur une technologie qui n’existait jusque-là que sur le papier, et ce en une semaine. Cette technologie comportait, à l’époque, de nombreuses incertitudes quant à ses performances promises et son marché potentiel pour prétendre élaborer rigoureusement une telle analyse de rentabilité. Mais le *business case* semblait être, à cette époque, le seul outil permettant à la direction générale de décider le lancement d’un projet d’un tel budget.

Le projet fut lancé un mois plus tard, en janvier 2011. Il consistait en un **partenariat avec un bureau d’études externe et l’inventeur de la technologie**. Le bureau d’étude avait pour mission de fournir les études préliminaires et détaillées pour une « preuve de concept⁴¹ ». À Turbomeca, c’est le *groupe de travail* de la méthode KCP qui fut chargé du pilotage et du suivi des études du projet, car il avait largement contribué à l’évaluation initiale du concept. Dans ce cadre, un expert en énergétique et un expert en mécanique eurent pour mission de gérer ce projet. Néanmoins, cette situation était contraignante pour deux raisons : les ressources de la phase P de propulsion 2030 furent totalement absorbées par ce projet, et les experts se retrouvèrent dans une position de gestion de projet R&T en partenariat, métier qui n’était pas le leur. Aussi, malgré un démarrage très rapide, dû à une prise de conscience collective du besoin de rupture, les études faites dans le projet furent difficiles à piloter et s’avérèrent peu concluantes. Les gains théoriques potentiels s’amenuisèrent à mesure que projet avançait. La situation semblait critique, tant du point de vue des résultats des études technologiques que de la gestion du partenariat, et le pilotage du projet fut transféré à la R&T, plus habituée à ce type de projet.

Nombreux sont les enseignements que nous pouvons tirer de cet exemple. Citons ici quelques-uns des plus instructifs d’entre eux dans le cadre de la réintégration de capacités de conception innovante.

⁴¹ Une **preuve de concept** (POC), est la réalisation d’une méthode ou d’un concept visant à démontrer sa faisabilité ou démonstration de principe, dont l’objectif est de vérifier que certains principes ou aspects théoriques ont le potentiel d’être utilisés. En générale une POC est courte dans la durée et incomplète.

Le premier enseignement tiré fut celui relatif à **l'intérêt de reconstruire un raisonnement de conception, afin d'inscrire au niveau de l'entreprise des moyens de lecture des mouvements des technologies nouvelles de l'écosystème**. Ensuite, au niveau stratégique, l'étude de ce projet a permis de démontrer qu'en **faisant prendre conscience à la direction de l'intérêt stratégique d'un projet de rupture, une prise de décision rapide était possible**. En terme d'apprentissage, le projet n'a pas été arrêté malgré les résultats décevants des études menées. Ceci peut s'expliquer par la volonté du management de poursuivre un projet pour réaliser des apprentissages stratégiques. Par exemple, cette étude a permis à *l'équipe de travail* de trouver un concept dérivé de ce dispositif, mais avec une technologie de Turbomeca. Quand on posa la question à un expert pour comprendre la raison pour laquelle un tel dispositif, pouvant être fait avec des technologies de l'entreprise, n'avait jamais été découvert, il répondit avec humour : « Je ne sais pas, on aurait dû me licencier pour ça ! » Cette phrase souligne certaines lacunes au niveau de l'expert pour identifier, évaluer le potentiel et être capable de construire un argumentaire visant à faire valider une technologie avec les outils de l'entreprise avant le KCP.

Par ailleurs, ce projet fit ressortir plusieurs points critiques pour la gestion de la conception innovante à Turbomeca. D'abord, **les outils utilisés pour la prise de décision** ont permis une prise de décision rapide, **mais se sont avérés inadaptés pour la construction du projet**. En effet, l'analyse marché associée aux évaluations économiques a conduit à vouloir appliquer le concept sur le moteur où la mise en œuvre du concept était la plus complexe. De même, ce *business case* a masqué les vrais enjeux de cette démonstration technologique qui devait uniquement servir à l'évaluation de la faisabilité d'une technologie. Ces outils ont aussi conduit à allouer un budget important à un projet sur lequel l'incertitude technologique était encore très importante. En ce qui concerne le projet, le bureau d'études qui était impliqué semblait bien plus coutumier des projets de conception réglée que des projets exploratoires. Tout ceci a fortement nui à la bonne conduite du projet dans un environnement aussi incertain. Par exemple, dans ce projet tous les efforts auraient dû porter sur la preuve de concept, c'est-à-dire sur une validation concrète du potentiel théorique qu'aurait pu permettre ce système. Mais il sembla que, durant le projet, ni Turbomeca ni le partenaire n'étaient coutumiers de la preuve de concept, et les participants au projet s'enfermèrent dans des considérations techniques pertinentes en conception réglée, mais inadaptées dans une perspective d'exploration.

Nous synthétisons les lacunes identifiées dans le Tableau 13 ci-dessous, en nous appuyant sur le cadre d'analyse D-I-M. En ce qui concerne les capacités associées au raisonnement de conception (D), le projet aura mis en évidence **l'intérêt de la construction d'un raisonnement de conception innovante pour donner du sens aux technologies en rupture**. Nos observations ont également permis de mettre en évidence le **besoin de savoir capter des technologies nouvelles**. Du point de vue de l'incubation, nous confirmons aussi le besoin d'activités pour concevoir, fabriquer et tester des preuves de concepts. Concernant les capacités de mutation de l'écosystème, nous mettons en avant le besoin de faire prendre conscience des mutations de l'écosystème à tous les niveaux de l'entreprise pour aider à la prise décision.

	Design	Incubation	Mutation de l'écosystème
	Raisonnement de conception	Moyens d'incubation	
Lacunes identifiées	Besoin de savoir capter les technologies nouvelles Besoin de reconstruire un raisonnement de conception pour donner sens aux propositions nouvelles	Besoins de concevoir, fabriquer et tester rapidement une preuve de concept	Besoin de rendre compte des mutations de l'écosystème

Tableau 13– Synthèse des lacunes identifiées durant le projet PowerPlus

4.2. Le projet FlyingCar : un *crazy concept*⁴² comme plateforme d'apprentissage

En 2007, un inventeur prit contact avec les avant-projets de Turbomeca en proposant un *crazy concept*. Celui-ci sollicita un avis technique des ingénieurs de ce service au sujet d'un concept de voiture volante qu'il avait développé, et proposait une collaboration potentielle sur ce projet. Après étude de son projet, les ingénieurs des avant-projets lui retournèrent des commentaires mettant en avant que plusieurs éléments étaient sujets à caution dans son projet : en premier lieu, les calculs de motorisation n'étaient pas convaincants ; ensuite, son principe semblait être assez énergivore ; enfin, le concept de voiture volante appliquée au grand public semblait en décalage avec la tendance actuelle de retour aux modes de transport collectifs. Suite à cela, Turbomeca décida donc de ne pas s'investir dans ce projet.



Figure 45 – Illustration d'un concept de voiture volante

Trois ans plus tard, durant la phase P de la méthode KCP, cet inventeur se présenta à nouveau Turbomeca avec ce même projet, mais en exploitant un concept de propulsion différent. Ce fut la même équipe qui réévalua le concept. Seulement, depuis, certains de ces experts avaient

⁴² Un *Crazy concept* est un concept qui paraît absurde dans une logique de marché mais qui peut se révéler intéressant dans un contexte d'exploration et d'apprentissage.

intégré le projet *Propulsion 2030*. Des trois objections précédentes, l'équipe en conserva deux : énergivore, et restant à l'opposé des tendances actuelles de la mobilité. Cependant, les voies d'exploration **tirées de *Propulsion 2030* montraient justement que la motorisation portée par ce concept avait un fort potentiel** pour l'amélioration des performances. La voiture volante leur est apparue comme un *crazy concept* permettant de guider l'exploration d'un champ d'innovation identifié comme pertinent pendant la phase P. Aussi, quelques mois plus tard, **Turbomeca rejoignait un projet en partenariat avec une PME et un laboratoire de recherche autour de ce concept**. A Turbomeca, le projet fut monté par le chef de projet *Propulsion 2030*, mais piloté directement par le service métier à qui bénéficiait principalement l'apprentissage. Ce fut l'occasion de bâtir un projet associant les forces de différents acteurs : un industriel avec un accès au marché (Turbomeca), une PME compétente pour la réalisation flexible de prototypes, et **un laboratoire disposant d'installations d'essais pour tester une preuve de concept**. L'échéance des premiers essais, due à une maturité technologique très faible, dépassait la durée de notre intervention.

Nous synthétisons les résultats de nos observations de ce projet dans le Tableau 14 ci-dessous en, nous appuyant sur notre cadre d'analyse D-I-M. Du point de vue des capacités associées au raisonnement de conception, ce projet met en évidence le besoin de **savoir identifier et d'évaluer des formes de *crazy concepts* présents dans l'écosystème**. Au niveau des capacités d'incubation, nous notons que ce projet atteste de l'intérêt à utiliser des ***crazy concepts* comme « plateforme d'apprentissage »**, et de conduire ou externaliser **des essais avec des laboratoires spécialisés**. En matière de capacités d'interaction avec l'écosystème, ce projet a également contribué à mettre en évidence la nécessité de **savoir intégrer les métiers de l'entreprise concernés par le *crazy concept***.

	Design	Incubation	Mutation de l'écosystème
	Raisonnement de conception	Moyens d'incubation	
Lacunes identifiées	Identification, évaluation de <i>crazy concepts</i>	Savoir utiliser des <i>crazy concepts</i> comme « plateforme d'apprentissage » Besoin de faire des essais via des laboratoires spécialisés	Besoins d'intégrer les métiers de l'entreprise concernés par le projet

Tableau 14- Synthèse des lacunes identifiées lors du projet FlyingCar à travers D-I-M

4.3. SuperFast : explorations parallèles sur un verrou technologique

En début de phase P, **l'expert en énergétique mit en évidence que les gains potentiels portés par les voies en rupture n'étaient atteignables qu'à condition de lever un « verrou technologique » sur le moteur.** Un projet fut monté et piloté par un ingénieur des avant-projets : le projet SuperFast. C'était le début d'un long processus exploratoire. En effet, une dizaine de PME et de centres de recherches furent approchés pour lancer des études parallèles. L'objectif de ces petites études était de connaître des ordres de grandeur en termes de puissance, de masse et de coût de dispositifs qui seraient susceptibles de lever ce verrou technologique.

Au total, **sept projets de ce type furent lancés, allant de la simple étude à des preuves de concept de certains dispositifs.** Le budget de chacune de ces études n'était que d'une à plusieurs dizaines de milliers d'euros pour une enveloppe totale de plusieurs centaines de milliers d'euros. Ce projet permit d'acquérir des rudiments sur plusieurs technologies nouvelles pour l'entreprise, qui permettraient de lever le verrou technologique en question. **Mais un des résultats inattendus de ce projet fut qu'il permit à Turbomeca de tisser un réseau de partenaires agiles sur lesquels l'entreprise pourrait s'appuyer pour des projets d'innovation de rupture, et d'accéder à des moyens d'essai sur des technologies de nature nouvelle dont l'entreprise n'aurait jamais pensé avoir besoin quelques mois auparavant.**

En matière d'effets cognitifs, nous soulignons **l'intérêt de petits projets d'apprentissage parallèles sur des technologies très éloignées du modèle de conception de l'entreprise, afin de lever un verrou technologique.** En effet, à partir de l'exploration d'un seul concept ; l'entreprise pouvait intégrer les prémices de plusieurs poches de connaissance jusque là laissées en jachère. En termes d'effets sur l'organisation, alors que le projet PowerPlus s'était focalisé sur un seul dispositif technologique avec un partenaire peu agile et impliquant d'importants moyens, ce projet se proposait de multiplier les petits projets exploratoires s'appuyant sur des partenaires réactifs. Ce projet abordait également un point important concernant l'implication des communautés d'utilisateurs de cette nouvelle innovation. En effet, alors que les ingénieurs étaient unanimes quant à l'intérêt de lever ce verrou technologique pour envisager les voies en rupture, il leur semblait que l'appropriation par les utilisateurs finaux pourrait être délicate. Ainsi, **une implication dans le processus de conception des destinataires de l'innovation semblait indispensable.**

Dans le Tableau 15 suivant, nous synthétisons les données collectées sur le projet SuperFast à travers le cadre d'analyse D-I-M. Du point de vue du raisonnement de conception, **l'entreprise doit être capable d'identifier des technologies permettant de lever un verrou technologique**. Au niveau de l'incubation, il s'est avéré que **la construction d'un ensemble de projets parallèles pour l'exploration** est indispensable au projet d'exploration. Par ailleurs, l'entreprise doit **disposer de capacités d'essais en interne ou en externe pour tester rapidement les preuves de concepts** afin de lever le verrou technologique. Au niveau de l'interaction avec l'écosystème, l'étude du projet nous a permis de mettre en évidence la nécessité **d'intégrer les destinataires de l'innovation dans le processus de conception innovante** : avionneurs ou utilisateurs.

	Design	Incubation	Mutation de l'écosystème
	Raisonnement de conception	Moyens d'incubation	
Lacunes identifiées	Savoir identifier des technologies permettant de lever un verrou technologique	Besoin de construire un ensemble de projets parallèles pour l'exploration Besoin des tester rapidement des preuves de concepts en interne ou via des partenaires	Besoin de co-explorer avec les avionneurs à certains moments du projet Besoins d'intégrer les destinataires de l'innovation dans la conception

Tableau 15- Synthèse des données collectées lors du projet SuperFast

En résumé, dans cette section, nous avons étudié trois projets de conception innovante issus de la méthode KCP. Cette analyse nous a permis de pointer les lacunes capacitaires de l'entreprise pour l'innovation radicale. Nous avons ainsi caractérisé ces lacunes pour chacune des capacités d'innovation radicale du cadre d'analyse D-I-M, ouvrant ainsi la voie à la définition des activités nécessaires à la conception innovante à Turbomeca. Nous listons ces activités dans le Tableau 16 récapitulatif ci-dessous, et les détaillerons de façon précise dans le chapitre suivant. Les 6 grands types d'activité ainsi proposés sont les suivants : (1) Prise de conscience des incertitudes de l'écosystème ; (2) Apprentissage sur le « non-art » ; (3) Construction d'une exploration conceptuelle ; (4) Conception de l'environnement d'incubation ; (5) Incubation agile ; (6) Dissémination interne et externe.

	Design Raisonnement de conception	Incubation Moyens d'incubation	Mutation de l'écosystème
Lacunes identifiées	Besoin de savoir capter les technologies nouvelles Besoin de reconstruire un raisonnement de conception pour donner sens aux propositions nouvelles Identification, évaluation de <i>crazy concepts</i> Savoir identifier des technologies permettant de lever un verrou technologique Besoin de reconstruire un raisonnement de conception pour donner sens aux propositions nouvelles	Besoins de concevoir, fabriquer et tester rapidement une preuve de concept Savoir utiliser des <i>crazy concepts</i> comme plateforme d'apprentissage Besoin de faire des essais via des laboratoires spécialisés Besoin de construire un ensemble de projets parallèles pour l'exploration Besoin des tester rapidement des preuves de concepts en interne ou via des partenaires	Besoin de rendre compte des mutations de l'écosystème Besoins d'intégrer les métiers de l'entreprise concernés par le projet Besoin de co-explorer avec les avionneurs à certains moments du projet Besoins d'intégrer les utilisateurs dans la conception
Types d'activités à intégrer	(2) Apprentissage sur le non-art (3) Construction d'une exploration conceptuelle	(4) Conception de l'environnement d'incubation : nidification (5) Incubation agile	(1) Prise de conscience des incertitudes de l'écosystème (6) Dissémination interne et externe

Tableau 16 - Synthèse des lacunes organisationnelles et cognitives collectées à partir des projets de conception innovante et caractérisation des 6 grands types d'activités à intégrer dans l'entreprise.

Résumé du CHAPITRE 5

Dans ce chapitre, après avoir présenté l'intérêt d'étudier les méthodes de type KCP pour comprendre à la fois les processus sociaux et cognitifs en jeu dans les transitions organisationnelles, nous avons exposé les données collectées pendant le déploiement la méthode de manière chronologique. Ces données, recueillies au cours des deux ans d'observation participante de cette méthode, nous ont permis d'analyser les effets sur le raisonnement de conception de l'entreprise ainsi que les transformations induites par ce nouveau raisonnement à tous les niveaux de l'organisation. Ces données nous permettront, dans le chapitre suivant, de souligner les apports de nos recherches à la littérature, et de montrer l'intérêt d'une méthode de type KCP pour conduire des transitions organisationnelles.

Dans la dernière section de ce chapitre nous décrivons le déroulement de trois projets de conception innovante issus de la méthode KCP. Ces projets ont permis de révéler les lacunes capacitaires de l'entreprise, que nous avons caractérisés à travers notre cadre d'analyse D-I-M, puis de dégager six grands types d'activités pour la conception innovante :

- (1) Prise de conscience des incertitudes de l'écosystème ;**
- (2) Apprentissage forcé du « non-art » ;**
- (3) Construction d'une exploration conceptuelle ;**
- (4) Conception de l'environnement d'incubation : *nidification* ;**
- (5) Incubation agile ;**
- (6) Dissémination interne et externe.**

Nous détaillerons l'ensemble de ces activités dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 6

INTERPRETATION DES IMPACTS DE LA METHODE : UNE *TRANSITION* *ORGANISATIONNELLE PAR LA CONCEPTION*

1. Interaction des processus organisationnels et cognitifs durant la méthode KCP.....	251
2. Notion de <i>Transition Organisationnelle par la Conception</i>	254
Résumé du CHAPITRE 6.....	255

Dans ce chapitre, à partir de l'analyse de la méthode KCP, nous présentons nos apports à la littérature consacrée à l'innovation radicale. Après avoir confirmé l'intérêt de certains principes managériaux proposés par la littérature pour générer des propositions nouvelles, nous soulignerons que notre étude met en évidence un champ important qui n'avait pas été analysé par cette littérature : les transformations induites par ce raisonnement de conception à tous les niveaux de l'organisation. Dans un deuxième temps, nous proposons la notion de *transition organisationnelle par la conception* pour décrire le double phénomène de transformation piloté à partir de la méthode KCP.

1. Interaction des processus organisationnels et cognitifs durant la méthode KCP

Notre analyse de la méthode de conception KCP nous a permis d'étudier la façon dont les processus cognitifs et organisationnels interagissaient en pratique. Nos recherches confirment l'importance des processus cognitifs pour l'identification et la construction d'un potentiel d'innovation de rupture. En premier lieu, elles démontrent le besoin préalable d'une prise de conscience par le *top management* des bouleversements externes. Ce fut le cas du PDG de Turbomeca, qui faisait référence à l'industrie automobile pour caractériser la direction dans laquelle il voulait engager l'entreprise. Cette prise de conscience a permis de soutenir les personnes impliquées tout au long de la méthode, et de construire ce *groupe de travail mandaté* par la direction générale pour générer des stratégies d'innovation radicale. Par ailleurs, en accord avec les travaux sur les *Creative Problem Solving processes* (Basadur, Graen, & Green, 1982; Horowitz, 1999; Osborn, 1957; Parnes & Meadow, 1959) nos résultats entérinent l'intérêt d'un périmètre d'exploration qui dépasse largement les frontières conventionnelles de l'entreprise en vue de l'intégration de nouvelles connaissances. A titre d'exemple, à Turbomeca le mandat pour l'innovation radicale et le périmètre d'exploration ont contribué à guider la phase C, et d'ainsi éviter des phénomènes d'inhibition dans la génération de propositions créatives. Aussi, compte tenu des nombreuses idées créatives générées et de la pertinence des axes d'exploration ainsi construits, nos résultats témoignent de l'intérêt des processus divergents pour favoriser la créativité.

En accord avec la littérature relative à l'innovation radicale, notre recherche a également relevé l'importance des aspects organisationnels de l'innovation de rupture. En effet, le processus associé au déploiement de la méthode KCP impliquait le détachement, pour les phases K et C, d'un groupe transverse opérant, au départ, en séances plénières, physiquement isolées, afin de se couper des contraintes usuelles de l'entreprise (O'Connor & DeMartino, 2006). Cette entité permettait aux participants de trouver un cadre de travail adapté à l'intégration et à la manipulation de propositions créatives, qui auraient probablement été inhibées dans le contexte de l'entreprise d'alors. Cependant, contrairement aux groupes « commandos » conventionnels de type Skunk Works⁴³ conduisant des projets d'innovation de rupture de la génération du concept jusqu'à la fabrication des premiers prototypes, le groupe élargi fut rapidement moins sollicité car ses membres n'avaient pas la disponibilité ou

⁴³ Le **Skunk Works** est la cellule des avant-projets de Lockheed, créée dans les années 1950 pour travailler sur des projets secret-défense d'avions de l'armée l'air américaine. Cette cellule avait pour mission de répondre à des appels d'offre sur des avions en rupture, de concevoir ces avions et de les fabriquer.

les compétences requises pour la phase P. C'était *le groupe de travail*, plus restreint en effectif et plus familier des phases amont de design et de réflexion stratégique, qui prit la suite des études. Les membres de ce groupe, pendant toute la durée du projet, sont restés physiquement situés dans leur service d'origine, et fonctionnellement rattachés à leur chef de service d'origine, confirmant l'intérêt de ce type de fonctionnement pour assurer une ambidextrie structurelle (de Visser et al., 2010). Aussi, bien que la littérature sur la créativité organisationnelle se soit majoritairement focalisée sur l'impact des paramètres organisationnels pour la production d'idées créatives (Amabile, 1996; Ekvall, 1996; Moultrie & Young, 2009), nos recherches ont permis de mettre en évidence le phénomène réciproque : l'impact d'une exploration conceptuelle sur les paramètres organisationnels de l'entreprise.

La construction d'axes d'exploration porteurs de propositions créatives a induit des transformations importantes dans l'entreprise à différents niveaux. Tout d'abord, le travail sur les propositions créatives a **permis de réintégrer l'expert dans la conception de la stratégie de l'entreprise**. Les acteurs de la méthode deviennent porteurs d'un discours en rupture aux différents niveaux de l'entreprise, au travers du raisonnement de conception innovante. La structuration de l'exploration permet aussi d'amener un nouveau mode de pilotage dans l'entreprise. Nos résultats montrent en effet **de nouvelles manières d'organiser le travail autour d'axes d'exploration pour conduire les apprentissages sur des projets en rupture**. En effet, durant la phase P et dans le cadre des premiers projets qui en découlèrent, le groupe de travail, et en particulier le chef de projet, eurent à inventer des modes de fonctionnement nouveaux, en se glissant dans les interstices laissés libres par le design et les processus réglés.

Au niveau de l'équipe d'exploration, le raisonnement de conception aura permis de structurer une équipe projet chargée de l'exploration, mais aussi de créer un réseau interne et externe pour la conception innovante. Par exemple, en interne, des interlocuteurs dans différents métiers étaient régulièrement sollicités pour des avis ou des recommandations sur les propositions créatives. En externe, l'exploration des nouvelles propositions aura forcé le tissage d'un réseau de partenaires agiles. **Enfin, du point de vue stratégique, nos résultats montrent que les actions menées sur les propositions créatives permettent de concevoir des stratégies nouvelles pour l'entreprise, pour certaines en rupture avec l'existant.**

En résumé, nos recherches mettent en évidence des phénomènes peu étudiés dans la littérature du management de projet de conception innovante ou de la créativité : la double transformation des processus cognitifs et organisationnels opérée par la mise en œuvre de la méthode KCP. Ainsi, notre étude a permis non seulement de valider les thèses de la littérature consacrée à l'innovation radicale, mais surtout de souligner l'intérêt d'un renouvellement du raisonnement de conception pour opérer une transformation à tous les niveaux de l'organisation, qui permet à l'entreprise de construire à la fois des propositions d'innovation radicale et les capacités organisationnelles associées.

2. Notion de *Transition Organisationnelle par la Conception*

Dans la partie II de ce document, nous avons caractérisé la notion de potentiel d'innovation de rupture à partir de l'histoire de la turbine à gaz. Nous avons pu ainsi caractériser l'apparition d'une innovation radicale à partir d'un effort de production de connaissances pour « utiliser » *un potentiel d'innovation de rupture*, résultant de la combinaison d'une proposition nouvelle, d'un héritage de connaissances et d'une perturbation d'un modèle dominant. Dans le cas de la méthode KCP à Turbomeca, nous avons utilisé cette notion pour comprendre la situation d'innovation radicale de l'entreprise. En effet, les différentes propositions nouvelles et les connaissances intégrées durant les phases K et C, ainsi que les bouleversements rencontrés par l'entreprise, nous permettaient de mettre en évidence le fait que l'entreprise avait participé à l'émergence d'un *potentiel d'innovation de rupture*, partagé au sein de son écosystème (rappelons que les entreprises de l'écosystème travaillaient simultanément sur certaines propositions similaires).

Contrairement aux méthodes de créativité, ou aux méthodes de type *Deep Dive* et *Blue Ocean Strategy* qui se veulent des méthodes, respectivement de génération d'idées créatives ou de produits originaux et uniques, la méthode KCP permet à une entreprise établie d'identifier et d'engager un effort de production de connaissances au travers d'un potentiel d'innovation de rupture au niveau de son écosystème. Cet effort de production de connaissances permet de transformer l'entreprise sur deux dimensions : raisonnement de conception et organisation de la conception. Ainsi, **nous pouvons caractériser la méthode KCP comme une méthode permettant de piloter des *transitions organisationnelles par la conception*.**

Sur la Figure 46 ci-dessous, nous avons construit une représentation d'une *transition organisationnelle par la conception*. Sur ce schéma l'organisation est caractérisée par un ensemble de capacités d'innovation radicale C_n . Dans la première étape est introduite une méthode KCP dans l'organisation 1, qui permet, en créant un environnement organisationnel adapté, de transformer le raisonnement de conception et d'ainsi générer des propositions nouvelles. Dans l'étape 2, cette transformation cognitive permet à l'organisation de s'inscrire dans un effort de production de connaissances autour d'un potentiel d'innovation de rupture qui peut exister ou non au niveau de l'écosystème. Enfin, ce travail modifie en retour les capacités d'innovation radicale de l'organisation. On obtient en fin de transition une organisation 2 dont les capacités organisationnelles pour l'innovation radicale ont évolué.

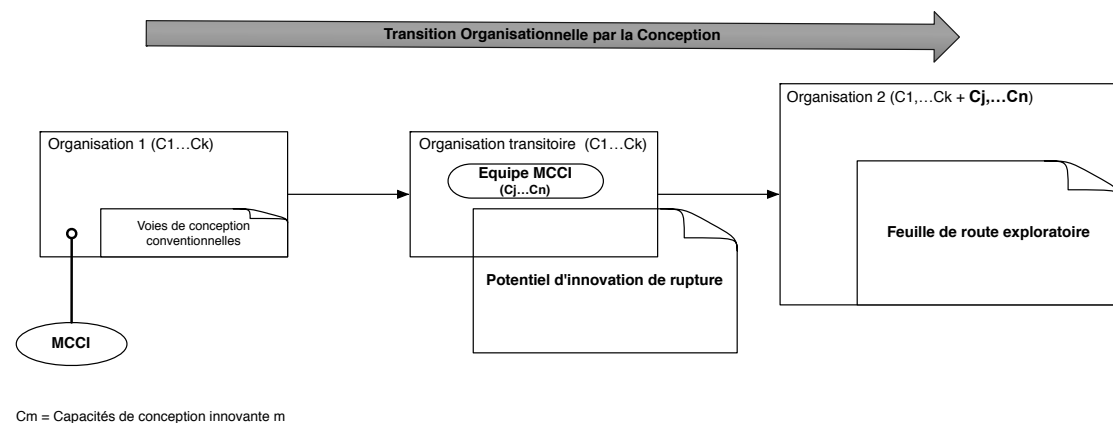


Figure 46– Modélisation d'une transition organisationnelle par la conception

Résumé du CHAPITRE 6

En résumé, nous avons montré que l'utilisation de la méthode KCP permet de piloter des *transitions organisationnelles par la conception*, en engageant l'entreprise dans un effort de production de connaissances nouvelles autour d'un potentiel d'innovation de rupture. Cette transition est, pour l'entreprise, un nouveau moyen de développer des capacités d'innovation radicale, en réponse à des sollicitations internes ou externes. Ces transitions induisent dans l'entreprise un processus de double transformation : une transformation du raisonnement de conception impliquant une transformation multi-niveaux de l'organisation - individuel de l'équipe et stratégique.

Conclusion de la PARTIE III

Dans cette partie, nous avons présenté l'étude d'une démarche d'innovation radicale à Turbomeca s'appuyant sur une méthode collaborative de conception innovante : la méthode KCP.

Nous avons montré que la méthode KCP est adaptée à l'étude de l'innovation radicale, car elle agit à la fois sur les processus organisationnels et sur les processus cognitifs en jeu dans l'innovation radicale. Ensuite, après avoir présenté l'ensemble des données collectées de manière chronologique, nous avons détaillé les effets de l'utilisation de la méthode sur le raisonnement de conception ainsi que sur l'organisation à différents niveaux : individuel, de l'équipe, et stratégique.

L'étude de cette méthode nous a permis de souligner le fait que l'intégration de capacités d'innovation radicale ne relève pas uniquement de la maîtrise de certains paramètres organisationnels et managériaux pour générer des propositions nouvelles. En effet, nos résultats ont permis de mieux comprendre les interactions entre processus cognitifs et organisationnels en conception innovante. Nous soulignons le fait que, bien que la littérature se soit intéressée aux principes organisationnels permettant de transformer le raisonnement de conception, peu d'études avaient permis de montrer que **l'intégration d'un raisonnement de conception innovante dans l'entreprise entraîne à son tour une transformation organisationnelle multi-niveaux.**

A partir de ce premier résultat, nous proposons une définition de ce type de transition nous permettant de décrire la méthode. Il ressort ainsi que **KCP est une méthode permettant de piloter des transitions organisationnelles par la conception.** Ces transitions se caractérisent par la génération ou l'identification d'un potentiel d'innovation de rupture par l'entreprise (phase K et C) et par un effort de production de connaissances (phase P) autour de ce potentiel.

Par ailleurs, notre étude de trois projets de conception innovante à Turbomeca nous a permis de caractériser les lacunes capacitaires de l'entreprise pour l'innovation radicale. A partir de cette analyse, nous proposons six grands types d'activités à piloter pour intégrer des capacités d'innovation radicale dans l'entreprise : **(1) Prise de conscience des incertitudes de l'écosystème (2) Apprentissage forcé du non-art (3) Construction d'une exploration**

**conceptuelle (4) Conception de l'environnement d'incubation : nidification (5)
Incubation agile (6) Dissémination interne et externe.**

Dans la partie suivante nous discuterons notre méthodologie de construction d'une organisation et de principes organisationnels destinés à favoriser en pratique l'intégration durable de ces différentes activités dans l'entreprise.

PARTIE IV

LA CONCEPTION INNOVANTE : PRINCIPES D'ORGANISATION D'UNE NOUVELLE FONCTION STRATEGIQUE

1. Méthodologie de construction de l'organisation de conception innovante.....	262
1.1. Analyse comparative d'organisations de conception innovante	262
1.2. Protocole de construction de l'organisation de conception innovante à Turbomeca	265
2. Proposition d'un modèle générique d'activités pour la conception innovante	268
2.1. DIMa : Conceptualisation de six grands types d'activités pour la conception innovante	268
2.2. Etapes de consolidation du modèle	275
3. Opérationnalisation du modèle pour Turbomeca	280
3.1. Proposition d'un processus pour la conception innovante	280
3.2. Opérationnalisation des activités.....	284
3.3. Détermination des ressources et budget de fonctionnement	292
3.4. Positionnement de l'entité dans l'entreprise et structure organisationnelle	294
Conclusion de la PARTIE IV	298

Dans cette partie, nous discutons la mise en œuvre d'une organisation de conception innovante dans une entreprise. L'objectif de cette partie est de présenter, puis discuter, l'intégration de capacités d'innovation radicale par la mise en œuvre d'une organisation dédiée. Pour ce faire, nous exposons dans la première section notre méthodologie ainsi que notre protocole de construction de l'organisation de conception innovante composé de trois phases. Nous présentons, dans la deuxième section, l'élaboration d'un modèle générique pour la conception innovante, en exposant successivement la phase de conceptualisation ayant donné lieu au modèle d'activités de la conception innovante DIMa ainsi que la phase de consolidation de ce modèle à partir d'un ensemble d'entretiens en interne et en externe de l'entreprise. Dans la troisième section, après avoir explicité la phase d'opérationnalisation qui a consisté en la proposition d'un processus et d'une organisation pour la conception innovante nous revenons sur les débats suscités par la création et le positionnement de cette organisation dans l'entreprise.

1. Méthodologie de construction de l'organisation de conception innovante

Dans cette section, nous détaillons notre méthodologie de construction de l'organisation de conception innovante. Nous explicitons la façon dont nous avons conçu l'entité à partir d'une analyse comparative d'organisations d'autres entreprises et de notre étude de la démarche d'innovation radicale à Turbomeca.

1.1. Analyse comparative d'organisations de conception innovante

Afin de confronter notre expérience au sein de Turbomeca à d'autres cas, et de proposer un premier référentiel de bonnes pratiques et d'écueils à éviter, nous avons procédé à une analyse comparative des organisations de conception innovante. Nous avons démarré ce tour d'horizon des entités de conception innovante en étudiant trois récits d'organisation proposés par la littérature. Le premier concernait le projet G21 de l'entreprise Toyota, qui a été à l'origine de la voiture hybride Prius (Itazaki, 2008; Magnusson & Berggren, 2001; Nonaka & Peltokorpi, 2006) ; le deuxième était la division *Advanced Development Program* plus connue sous le nom de Skunk Works de Lockheed (Johnson, 1989; Miller, 1995; Rich & Janos, 1996) ; et la troisième était le *Manhattan Project*, projet de l'armée américaine de conception de la bombe atomique pendant la Seconde Guerre mondiale (Groves, 1962; Lenfle, 2008, 2009). Les sources pour ces trois récits sont synthétisées dans le Tableau 17 ci-dessous.

Organisation ou projet étudiés	Maitre d'ouvrage	Sources
Le projet G21 (Prius)	TOYOTA	(Itazaki, 2008; Magnusson & Berggren, 2001; Nonaka & Peltokorpi, 2006)
<i>Skunk Works</i>	LOCKHEED	Works (Johnson, 1989; Miller, 1995; Rich & Janos, 1996)
<i>Manhattan Project</i>	ARMEE AMERICAINE	(Groves, 1962; Lenfle, 2008, 2009)

Tableau 17 - Synthèse des sources académiques pour l'analyse comparative des organisations de conception innovante

A partir de ces sources académiques, nous avons pu construire les guides d'entretiens semi-directifs pour la validation et l'approfondissement de ce référentiel avec des acteurs externes. Nous avons en tout conduit cinq entretiens, le premier chez Thales Avionics, une entreprise française de l'aéronautique ; le second chez Visteon, une entreprise américaine, équipementier international, spécialisée dans la conception et la fabrication de systèmes de climatisation, d'éclairage et de composants électroniques pour automobiles ; les trois derniers chez Renault, un constructeur automobile français. Lors de ces entretiens, nous cherchions à enrichir notre étude de cas par le croisement avec des expériences d'autres organisations, notamment par la description de bonnes pratiques ou d'écueils à éviter.

Lors du premier entretien, nous avons rencontré le responsable du service prototypage et innovation chez Thalès, qui était familier des méthodes collaboratives de conception innovante. Ce service était positionné dans la direction technique, et en amont de la R&T. Sur ce point, notre interlocuteur nous avait mis en garde à propos d'un fonctionnement séquentiel avec la R&T et cloisonné à la direction technique, car il expliquait que ce positionnement ne permettait pas de disposer d'une vision assez large, et donc de réviser l'identité des objets de l'entreprise, activité au cœur de la conception innovante.

Pour le deuxième entretien, nous avons rencontré le responsable d'Auto Envision, entité de design et d'innovation de Visteon, ayant pour mission de fournir des concepts de produits et des prototypes au processus de développement de l'entreprise. Lors de notre entretien, ce responsable rapportait le besoin d'une entité physiquement intégrée dans l'entreprise. Les membres de cette entité, qui était à l'origine géographiquement éloignée de plusieurs kilomètres de l'entreprise, avaient, en raison de cet éloignement, rencontré des difficultés dans la diffusion des connaissances nouvelles dans l'entreprise, ou encore dans l'activation des ressources humaines nécessaires pour certains projets.

Nous avons eu l'occasion d'effectuer nos trois derniers entretiens dans les locaux de Renault, avec le responsable du Laboratoire Coopératif d'Innovation, la directrice du département « Créativité et Vision » de cette entreprise, la responsable du service de créativité et de veille stratégique. Ces interlocuteurs ont attiré notre attention sur la nécessité de limiter le *reporting* à quelques réunions par an avec le *top-management* de l'entreprise, afin d'augmenter l'efficacité d'exploration des équipes. Par ailleurs, ils ont confirmé la nécessité d'une certaine forme d'autonomie de la cellule et d'une certaine flexibilité vis-à-vis des ressources attribuées. Par ailleurs, nos cinq interlocuteurs, en accord avec la littérature, ont insisté sur la nécessité d'un rattachement au *top management* et d'un affranchissement des modes de pilotage issus de la conception réglée pour l'évaluation des projets d'exploration, afin d'éviter

des décision prématurées dans des contextes d'incertitudes importantes. Dans le Tableau 18 ci-dessous nous avons synthétisé l'ensemble des sources de notre analyse comparative.

Organisation ou projet étudiés	Entreprises	Sources
Service <i>Innovation et Prototypage</i> (3 personnes)	THALES AVIONNICS	Entretien téléphonique (2h) avec le responsable du service conception innovante dans le département de la R&T
Auto Envision Cellule de Design & Innovation (15 pers.)	VISTEON	2 x entretiens téléphoniques (2h) avec le responsable de cette entité
Laboratoire Coopératif Innovation (30 pers.)	RENAULT	Entretien avec le responsable (2h)
Service de créativité et veille stratégique (2 pers.)	RENAULT	Visite de l'innovation room + entretien (2h) avec la responsable
Créativité & Vision	RENAULT	2 x Entretiens avec la directrice (2h)

Tableau 18- Synthèse de nos sources pour l'analyse comparative sur l'organisation de conception

En synthèse, cette analyse comparative nous a permis à la fois de comprendre les bonnes pratiques organisationnelles de conception innovante, mais il a aussi été un support de notre argumentaire pour soutenir notre démarche en interne à Turbomeca, lorsque nous présentions notre proposition d'organisation. Dans le Tableau 19 ci-dessous, nous résumons les points clés retenus de ces cas d'organisations de conception de la littérature et de l'industrie.

7 Principes organisationnels	4 Ecueils à éviter
Compétences des experts impliqués	Complexité du <i>reporting</i>
Autonomie de la cellule	Eloignement de l'entreprise
Représentativité des métiers de l'entreprise en petit nombre	Ligne hiérarchique importante
Flexibilité vis-à-vis de l'utilisation des ressources	Utilisation des outils de gestion classiques pour le pilotage
Rattachement au top management	
Cadrage clair	
Intégration dans l'entreprise	

Tableau 19- Résumé des principes organisationnels et écueils tirés de l'analyse comparatives des organisations pour la conception innovante

1.2. Protocole de construction de l'organisation de conception innovante à Turbomeca

À Turbomeca, la construction du modèle conceptuel de l'organisation de conception innovante a été minutieux et rigoureux. Cela a conduit à des propositions de déploiement opérationnel. Notre protocole a consisté en trois phases. La première était une phase de conceptualisation, aboutissant à un modèle générique pour la conception innovante ; la seconde était une phase de consolidation, permettant de valider notre modèle en interne de Turbomeca ainsi qu'en externe avec d'autres grandes entreprises françaises. La troisième était une phase d'opérationnalisation, aboutissant à une proposition d'organisation directement applicable au sein de l'entreprise. Sur la Figure 47, les trois phases du processus de conception de l'organisation sont représentées par les trois flèches continues : 1) conceptualisation, 2) consolidation, 3) opérationnalisation. La phase de conceptualisation comprend trois étapes. Les deux premières sont les étapes concernant la généalogie des capacités de conception innovante à Turbomeca, ainsi que l'analyse de la méthode KCP, qui ont permis de mettre en évidence des lacunes capacitaires. La troisième étape est celle de la construction d'un modèle d'activité pour la conception, ayant donné lieu au modèle générique DIMa. La phase de consolidation du modèle comprend une étape qui a consisté en la diffusion et le renforcement du modèle DIMa, grâce à des présentations et réunions de travail en interne de Turbomeca et avec d'autres entreprises. La dernière phase, la phase d'opérationnalisation, a consisté en deux étapes : la construction d'une proposition

d'organisation à destination du *top management*, ainsi que la mise en place de l'organisation. En ce qui concerne ce dernier point, nous avons été limités par la durée de notre recherche-intervention pour suivre son déroulement. La Figure 47 ci-dessous détaille ce processus.

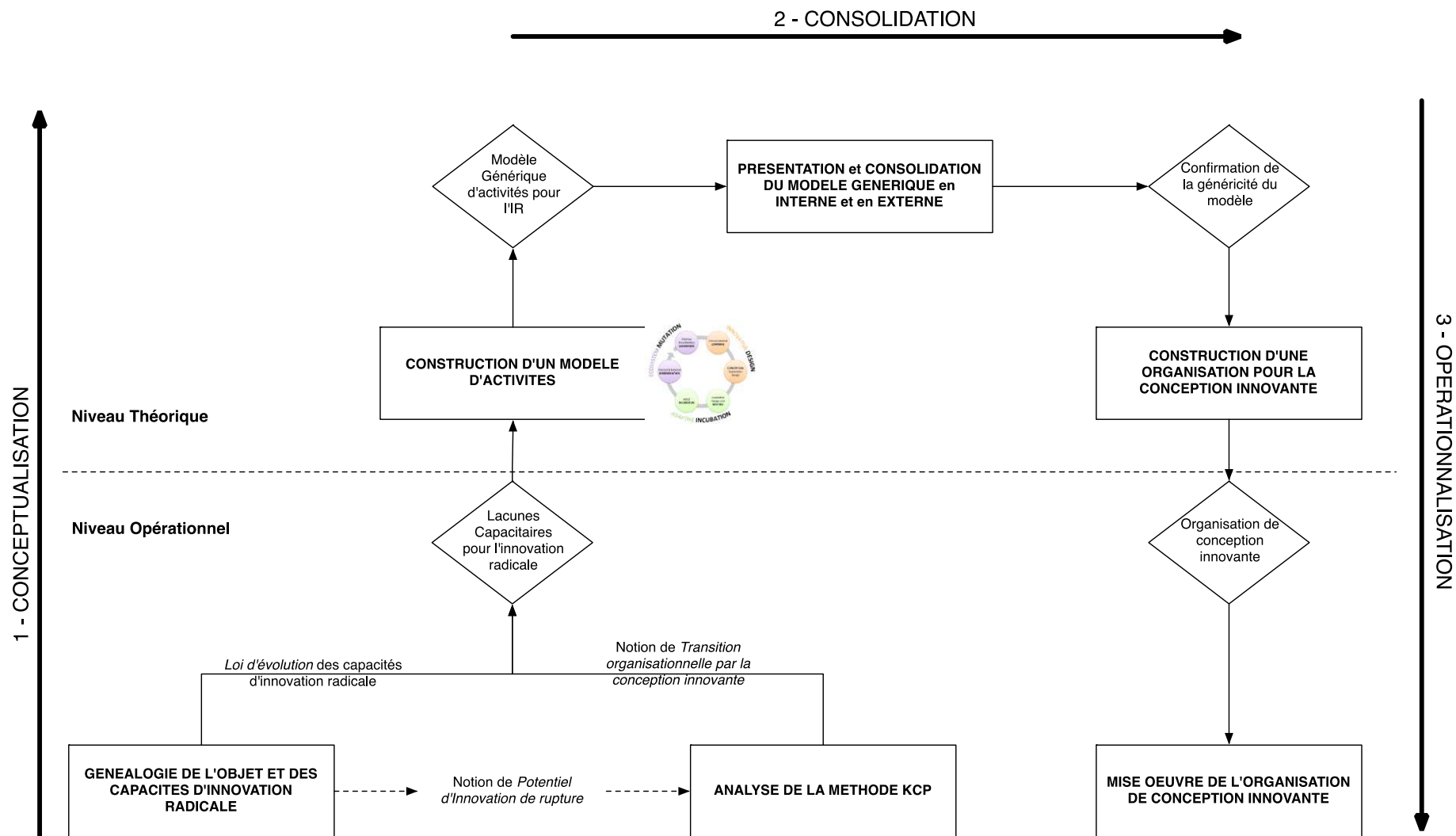


Figure 47- Protocole de construction de l'organisation de conception innovante à Turbomeca sur les deux niveaux théorique et opérationnel

2. Proposition d'un modèle générique d'activités pour la conception innovante

Dans cette section, nous présentons successivement la phase de conceptualisation ayant permis de proposer un modèle d'activités pour la conception innovante à partir de notre étude à Turbomeca et les efforts de consolidation de ce modèle avec d'autres acteurs industriels.

2.1. DIMa : Conceptualisation de six grands types d'activités pour la conception innovante

La phase de conceptualisation est le résultat de deux études parallèles, à savoir l'analyse des capacités d'innovation de rupture historiques de l'entreprise et l'analyse de la méthode collaborative de conception innovante ainsi que des projets auxquels elle a abouti. Ces deux études ont permis de mettre en évidence les lacunes capacitaires de l'entreprise. La première a mis en évidence la disparition de capacités d'innovation radicale au début du 20^{ème} siècle ; la seconde par la mise à l'épreuve des capacités de l'entreprise à travers plusieurs projets de conception. Cette étude a permis de faire prendre conscience aux différents niveaux organisationnels de l'entreprise, experts, management intermédiaire et stratégique, de la nécessité de réintégrer ces capacités d'innovation radicale « perdues ». Mais elle aura aussi permis d'éviter les écueils d'une réactivation aveugle des activités historiques d'innovation radicale, qui n'auraient pas été adaptées aux nouveaux enjeux liés à la conception innovante. La seconde étude a justement conduit à la génération des activités à mettre en œuvre pour ces nouveaux enjeux.

En effet, dans la partie précédente, nous avons étudié trois projets de conception innovante issus de la méthode KCP. En nous appuyant sur notre cadre d'analyse D-I-M, nous avons mis en évidence les lacunes capacitaires relatives au raisonnement de conception, à l'incubation et à la mutation de l'écosystème. A partir de ce travail, nous avons pu construire un modèle générique pour la conception innovante représenté ici sous la forme d'un cycle de six grands types d'activités. Dans ce modèle, il existe deux activités par capacité d'innovation radicale. La première étape du cycle est l'activité de « **Prise de conscience des incertitudes de l'écosystème** », la seconde est celle permettant d'opérer un « **Apprentissage forcé du non-**

art », la troisième permet la « **Construction d’une exploration conceptuelle** », la quatrième est relative à la « **Conception de l’environnement d’incubation** », que nous appelons aussi la « **nidification** », la cinquième est l’ « **Incubation agile** », et ce cycle s’achève par l’activité de « **Dissémination interne et externe** ». Sur la Figure 48 ci-dessous est représenté le cycle comprenant les six activités organisées par capacités du cadre d’analyse D-I-M. Nous appelons ce cycle le modèle DIMa, pour Design, Incubation, Mutation, *activities*.

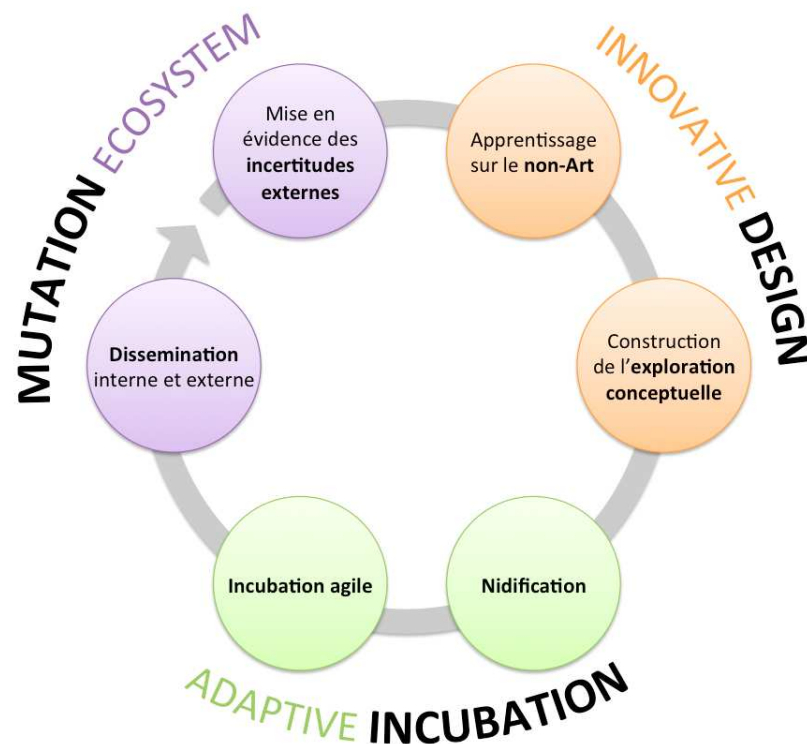


Figure 48- Modèle DIMa représentant le cycle des 6 activités de conception innovante

Afin de clarifier notre présentation, nous représentons pour chacune des activités sa fonction, les éléments d’entrée et de sortie, ainsi que sa valeur ajoutée présentée comme sur la Figure 49 ci-dessous. Puis nous montrons quels en sont les apports au regard de la littérature sur l’innovation.

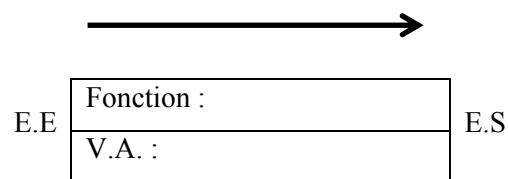


Figure 49- représentation d’une activité

La prise de conscience des incertitudes de l'écosystème (Mutation de l'écosystème)

Cette activité est la première du cycle. Sa fonction est de rendre compte des changements de l'écosystème de l'entreprise. Elle permet de mettre en évidence et de sensibiliser à tous les niveaux de l'entreprise des bouleversements et de la non-stabilité de l'écosystème à travers des médias. Le responsable de cette activité est garant de la pérennité de l'ensemble de la conception innovante. Car une entreprise ne percevant pas les évolutions d'un écosystème n'est pas incitée à investir des ressources pour l'exploration. Sur la Figure 50 est représentée l'activité.

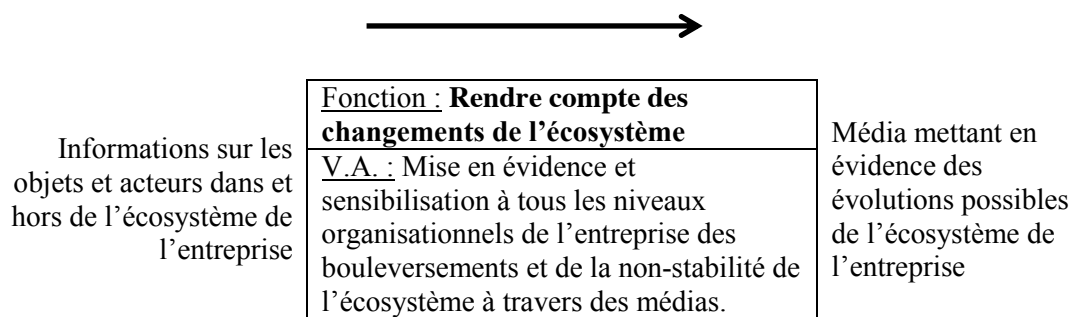


Figure 50- Activité de mise en évidence des incertitudes de l'écosystème

De notre point de vue, cette activité diffère de la prospective classique (Godet & Durance, 2008) en ce qu'elle s'inscrit uniquement dans la perspective d'une détection des mouvements « du présent » de l'écosystème qui nécessiteraient un effort de conception innovante de l'entreprise, et non pas dans la construction de scénarios du futur par exemple.

L'intégration de connaissances du non-art (Design)

Cette activité a pour fonction l'intégration de connaissances du non-art dans l'entreprise à travers l'analyse, la structuration de connaissances hors du modèle dominant de l'entreprise et leur diffusion. Le travail sur cette activité permet de démarrer le processus d'exploration à partir d'un périmètre de connaissances enrichi, et donc d'augmenter la capacité d'exploration de l'entreprise, ainsi que d'enrichir les axes d'exploration existants.

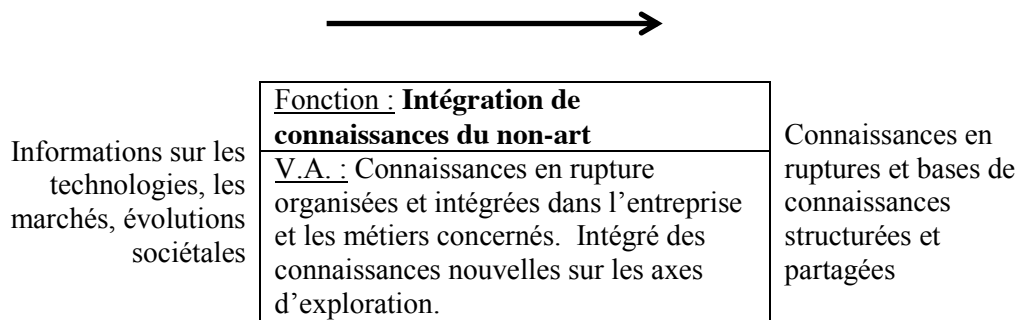


Figure 51- Activité d'intégration de connaissances du non-art

Ce type d'activité complète les modèles de l'*open innovation* (Chesbrough, 2003) pour l'innovation de rupture. A partir de notre étude, nous notons que la perméabilité des frontières est une condition nécessaire mais non suffisante de l'innovation de rupture. Pour mener un processus de conception innovante, une entreprise doit être capable de comprendre et d'analyser la connaissance nouvelle dans des domaines éloignés de ses compétences classiques. Cette capacité passe donc par des activités ouvertes à des connaissances certes externes, mais permettant une intelligence de ces connaissances s'appuyant sur un raisonnement de conception innovante.

Construction d'une exploration conceptuelle (Design)

La fonction de cette activité est la construction et le pilotage de l'exploration conceptuelle. Elle est l'activité centrale du modèle DIMa. En effet, sa valeur ajoutée est de générer, à partir des éléments de sortie de l'activité précédente, des propositions nouvelles, de nouveaux espaces de valeur, mais aussi de permettre la structuration de l'exploration au moyen d'outils managériaux adaptés à la conception innovante. Les éléments de sortie de cette activité permettent donc d'alimenter ou de piloter les cinq autres. Le responsable de cette activité porte le raisonnement de conception innovante de l'entreprise, et est garant de sa robustesse et de son originalité.

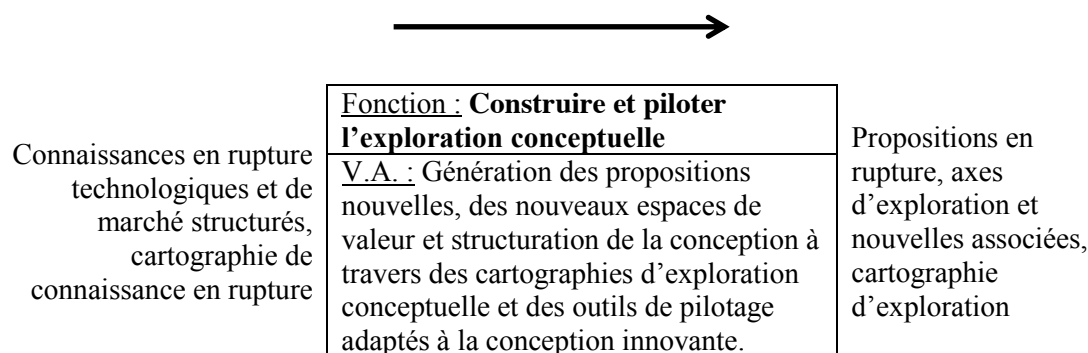
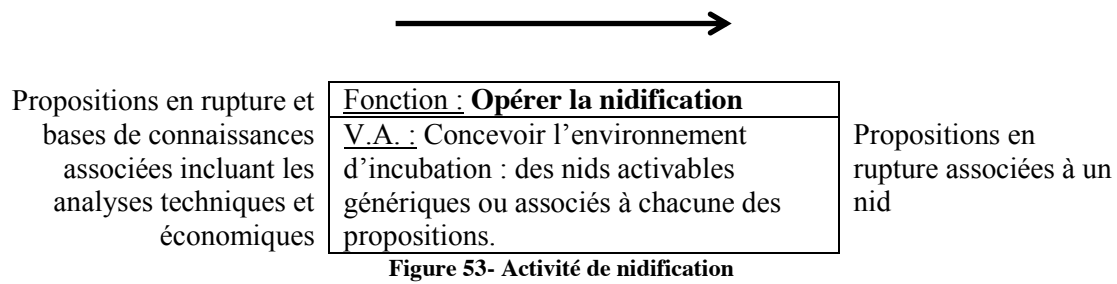


Figure 52- Activité de construction d'une exploration conceptuelle

L'activité de construction de l'exploration comprend un périmètre d'action plus large que les méthodes de créativité de type TRIZ (Altshuller, 1984) ou d'innovation stratégique de type *Blue Ocean* (Kim & Mauborgne, 2005). En effet, les premières ont pour fonction la génération de solutions à un problème donné et les secondes permettent l'identification de marchés sans concurrence et des moyens de les pénétrer. Ces méthodes ont donc pour objet, pour l'une la solution technique, pour l'autre la stratégie de positionnement. L'activité de construction de l'exploration a pour objet, en plus de la génération de propositions nouvelles, la structuration du raisonnement de conception. Les méthodes de créativité ou d'innovation stratégique peuvent, par exemple, être des outils managériaux de cette activité.

Conception de l'environnement d'incubation : la nidification (Incubation)

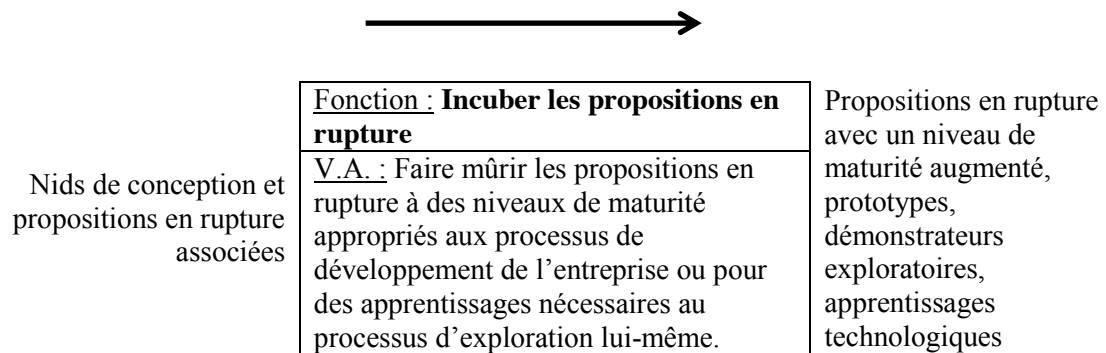
Cette activité a pour fonction de concevoir l'environnement d'incubation pour chacune des familles de propositions nouvelles ou propositions nouvelles. Ainsi, elle permet d'associer aux propositions des « nids » activables pour effectuer des apprentissages et développer ces propositions. Un « nid » est défini par sa proposition nouvelle, un réseau de partenaires activables, des moyens de fabrication ou de conception activables, ainsi que des ressources humaines internes. Il est à noter qu'en sortie de cette activité, l'incubation et les apprentissages sur la conception n'ont pas démarré. L'activation du « nid » s'effectue à l'étape suivante.



Contrairement aux activités classiques de prototypage, qui relèvent de la simple intégration de capacités de prototypage rapide, (Horton & Radcliffe, 1995), cette activité relève de la conception des moyens de prototypage avec la proposition nouvelle dont on ne pouvait connaître l'identité en amont du processus de conception innovante. Ainsi, ce résultat est essentiel, car il montre qu'en situation d'innovation radicale, l'environnement d'incubation est à co-concevoir avec les propositions créatives.

Mise en œuvre d'une incubation agile (Incubation)

Cette activité a pour fonction d'incuber les propositions en rupture. C'est-à-dire de faire mûrir ces propositions à des niveaux de maturité appropriés aux processus de développement de l'entreprise, ou pour des apprentissages nécessaires au processus d'exploration lui-même. Le responsable de cette activité assure donc la maîtrise d'œuvre de l'incubation en activant les « nids » issus de l'activité précédente. Les éléments de sortie de cette activité peuvent être de formes variées, qui vont d'un simple calcul théorique à des démonstrateurs exploratoires, en passant par des prototypes virtuels.



Contrairement aux activités d'incubation proposées par O'Connor & Demartino (O'Connor & DeMartino, 2006), cette activité permet à la fois de faire mûrir une proposition pour le développement, comme le suggèrent ces auteurs, mais elle permet également d'enrichir le processus d'exploration en réduisant les incertitudes sur certaines propositions.

Dissémination interne et externe (Mutation de l'écosystème)

L'activité de dissémination relève de l'intégration des destinataires internes et externes dans le processus de conception innovante et de la diffusion des propositions en rupture aux destinataires. La valeur ajoutée de cette activité est de transformer les propositions en rupture en objets collaboratifs de conception dans l'écosystème interne et externe de l'entreprise. En effet, à partir des propositions en rupture, l'activité permet de générer des objets représentatifs afin de favoriser la collaboration durant le processus de conception, et de fournir des propositions fédérées au reste de l'entreprise ou au processus lui-même.

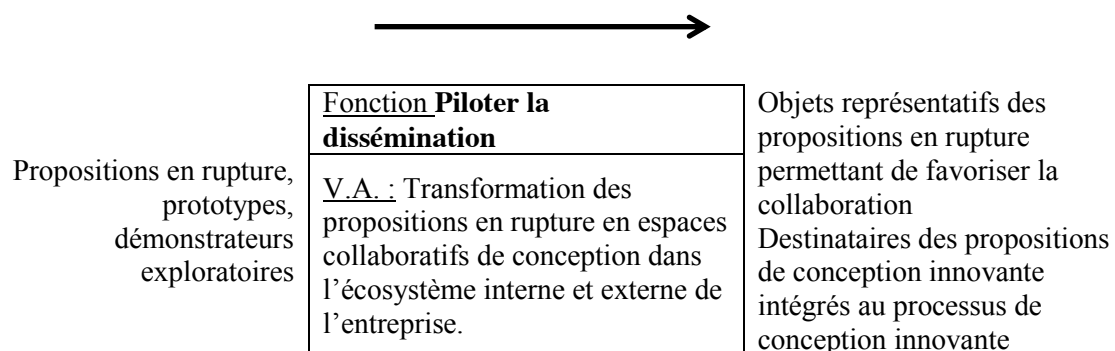


Figure 55- Activité de dissémination interne et externe

Pour résumé, l'étude des projets de conception innovante présentés au chapitre 5 a permis d'édifier un modèle théorique d'activités de conception innovante visant à intégrer de façon pérenne des capacités d'innovation radicale dans l'entreprise. Aussi, bien que, dans cette section, nous ayons présenté le modèle sous la forme de cycles comportant des activités séquentielles, il s'avère qu'en pratique, il existe des liens entre chacune de ces activités, et une approche systémique pourrait être développée pour enrichir le modèle.

Par ailleurs, ce modèle ayant été construit à partir d'un cas unique à Turbomeca, il nécessiterait, pour en valider la généralité, d'être confronté au management et à la pratique de l'innovation radicale d'autres entreprises.

2.2. Etapes de consolidation du modèle

Afin de consolider et légitimer le modèle d'activités DIMa, nous avons effectué un ensemble de séances de travail et de présentations en dehors de l'équipe de recherche en interne de l'entreprise ainsi qu'avec d'autres entreprises.

Les séances de travail consistaient en des réunions de partage de connaissances et d'expérience autour de notre diagnostic des capacités de conception innovante de Turbomeca et du modèle d'activités DIMa. Les groupes de travail étaient en général composés d'une personne de l'équipe de recherche, du responsable des avant-projets de Turbomeca, ainsi que des responsables des services ou départements en lien avec les processus d'innovation à Turbomeca : direction de l'innovation, cellule de conception innovante, service avant-projets. Les réunions se déroulaient de la façon suivante : nous présentions notre diagnostic sur les lacunes capacitaires de la conception innovante de Turbomeca, puis nous présentions les activités de notre modèle, et nous faisions intervenir les interlocuteurs sur chacune des activités en les questionnant sur la nature que ces activités prenaient dans leurs entreprises, ainsi que sur les contributions qu'ils souhaitaient proposer pour enrichir notre modèle. Ainsi, nous pouvions apprécier la généralité du modèle d'une part, en vérifiant sa pertinence pour les autres services de Turbomeca, et d'autre part nous pouvions renforcer les activités avec des éléments que notre cas ne nous avait pas permis d'identifier.

Aussi, nous avons complété l'ensemble de ces séances de travail par des présentations dans différents services de l'entreprise, uniquement à la demande et à des fins de sensibilisation aux nouveaux enjeux de la conception innovante. Ces présentations ont permis de partager nos travaux de thèse, de les discuter, et de faire connaître l'ambition de l'entreprise d'acquérir des capacités de conception innovante. Au cours de l'année 2011, nous avons présenté en interne à six services (avant-projets, intégration mécanique, services méthodes, services marketing, équipe R&T, équipe propulsion 2030). Le tout aura permis de communiquer notre

modèle à près de 70 personnes à Turbomeca. Nos différentes réunions de travail et présentations en interne sont synthétisées dans le Tableau 20 suivant.

Objets d'intervention	Participants	Entreprise	Nb. de pers.
Séance de travail autour du diagnostic et du modèle DIMa	Equipe propulsion 2030	TURBOMECA	6
Séance de travail autour du diagnostic et du modèle DIMa	Responsable et équipe R&T	TURBOMECA	6
Présentation du diagnostic des capacités de conception innovante (1950-2008)	Directeur techniques, audit technique, responsables de département, consultants Safran Innovation	TURBOMECA	25
Présentation des travaux de thèses et modèle DIMa	Service des avant-projets	TURBOMECA	8
Présentation des travaux de thèses et modèle DIMa	Service des méthodes	TURBOMECA	15
Présentation des travaux de thèses et modèle DIMa	Service marketing	TURBOMECA	7

Tableau 20- Synthèse des présentations et séances de travail à Turbomeca (hors équipe de recherche)

En externe, nous avons consolidé notre modèle avec plusieurs grands groupes de l'industrie. D'abord dans l'aéronautique, nous avons eu l'opportunité de rencontrer des responsables de la R&T des avant-projets des entreprises suivantes : la Snecma de Vernon, concepteur et producteur de moteur pour fusées et satellites, Microturbo, un concepteur et fabricant de turbines à gaz de petite puissance, ainsi qu'à la direction innovation de groupe SAFRAN. Nous avons été par la suite invité par nos interlocuteurs à effectuer des présentations de nos travaux à des réseaux d'experts de SAFRAN des entreprises suivantes Snecma, Microturbo, Hispano-Suiza ou encore Messier-Dowty. L'ensemble de ces séances de travail et présentations est résumé dans le Tableau 21 ci-dessous.

Objets d'intervention	Participants	Entreprise	Nb. de pers.
Séance de travail autour du diagnostic et du modèle DIMa	Service des avant-projets et R&T	MICROTURBO	3
Présentation des travaux de thèses et modèle DIMa	Service avant-projet et R&T	SNECMA Vernon	15
Séance de travail autour du diagnostic et du modèle DIMa	Directeur de l'innovation	Direction de l'innovation de SAFRAN	3
Présentation des travaux de thèses et modèle DIMa	Personnels du groupe Safran	Entreprises du groupe SAFRAN	60
Présentation des travaux de thèses et modèle DIMa	Réseau Knowledge Management Safran	Entreprises du groupe SAFRAN	15

Tableau 21- Synthèse des présentations et séances de travail dans l'aéronautique

Dans d'autres industries, nous avons consolidé notre modèle avec des managers de quatre entreprises différentes. Chez Renault, nous avons pu travailler sur notre modèle avec la directrice de la Créativité & Vision, ainsi qu'avec la responsable du service Créativité & Veille stratégique ; à la RATP, nous avons eu l'occasion de travailler avec le responsable du service Prospective ; à la SNCF, les équipes de la direction Innovation & Recherche ont contribué à enrichir le modèle ; et chez Visteon, nous avons pu échanger sur notre modèle avec le responsable du service Design & Innovation. L'ensemble de ces acteurs a fortement contribué à la consolidation de notre modèle. Par ailleurs, chez Renault et Visteon, nos interlocuteurs soulignaient que, bien que plusieurs des activités de notre modèle étaient déjà à l'œuvre, sous une forme ou une autre, dans leur entreprise, le modèle leur semblait pertinent non seulement pour nommer et mieux caractériser leurs activités, mais surtout pour les doter d'une approche d'ensemble des différentes formes de capacités organisationnelles pour le processus de conception innovante de leur entreprise. Notre modèle leur semblait notamment approprié pour décrire les interactions entre de nombreuses initiatives de conception innovante éparpillées dans leur entreprise, et préciser comment les faire progresser ou les compléter de façon cohérente.

Par ailleurs, à la suite de nos séances de travail, certaines entreprises nous sollicitaient pour effectuer des présentations de notre diagnostic de l'innovation de Turbomeca et de notre modèle DIMa devant un large public, leur permettant ainsi de sensibiliser leur management intermédiaire et leur *top-management* à des initiatives externes telles de ce genre. Le public de ces présentations était très souvent composé de personnes impliquées dans les processus

d'innovation de leur entreprise. Nous avons par exemple, chez Renault, eu l'occasion de présenter notre modèle à un haut niveau stratégique, comme au directeur de la DREAM (direction de la recherche et des études-amonts et des matériaux), aux équipes de la direction Créativité & Vision, ainsi qu'à un *think tank* sur la mobilité de demain de 65 personnes de la communauté d'innovation de Renault. Dans le Tableau 22 ci-dessous est résumé l'ensemble de ces présentations et travaux.

Objets d'intervention	Participants	Entreprise	Nb. de pers.
Séance de travail autour du diagnostic et du modèle DIMa	Directrice de la Créativité et Vision, et responsable de la créativité et de la veille concurrentielle	RENAULT	3
Séance de travail autour du diagnostic et du modèle DIMa	Responsable de la conception innovante, expert en management de l'innovation	SNCF	2
Séance de travail autour du diagnostic et du modèle DIMa	Responsable Cellule de Conception innovante AutoEnvision	VISTEON	2
Séance de travail autour du diagnostic et du modèle DIMa	Responsable service prospective	RATP	2
Présentation des travaux de thèses et modèle DIMa	Directeur de la DREAM (Direction de la Recherche des Etudes Amonts et des Matériaux) et Directrice de la Créativité - Vision	RENAULT	3
Présentation des travaux de thèses et modèle DIMa	Responsable du laboratoire de conception innovante	RENAULT	3
Présentation des travaux de thèses et modèle DIMa	Membres de la Communauté Renault	Communauté Renault	65
Présentation des travaux de thèses et modèle DIMa	Responsable Cellule de Conception innovante AutoEnvision	VISTEON	2

Tableau 22- Synthèse des présentations et séances de travail avec d'autres entreprises

De notre point de vue, bien qu'elles ne permettent pas nécessairement de valider scientifiquement notre modèle, les nombreuses sollicitations dont nous avons fait l'objet, que ce soit en interne ou en externe à Turbomeca (plus d'une dizaine), soulignent la pertinence de notre approche pour l'intégration de capacités de conception innovante. En effet, lors de nos présentations, nos interlocuteurs nous faisaient souvent part de leur intérêt pour notre approche globale du processus d'innovation. À Turbomeca, déjà, la construction du modèle comme le fait de *nommer* les activités de conception innovante ont permis de donner sens à

plusieurs initiatives pour la conception innovante qui prenaient forme dans différents départements et directions de l'entreprise. Deux exemples illustraient ce résultat concernant la capacité d'Incubation de notre modèle DIMa. Le premier était l'ambition de la direction des achats d'intégrer des capacités d'approvisionnement en circuit court notamment pour les activités de R&T et les projets de conception innovante issus de la méthode KCP. Pour ce projet, l'entreprise souhaitait se doter de moyens rapides pour acheter les éléments nécessaires à certains projets en s'affranchissant des panels de fournisseurs classiques et très contraignants dans une industrie critique qu'est l'aéronautique. Dans le cadre de notre modèle, ce besoin nous fut été révélé dans le cadre du projet SuperFast, pour lequel des composants d'une nature nouvelle pour l'entreprise devaient être achetés. Nous avons remarqué en effet que l'une des causes de la lenteur de ces approvisionnements provenait notamment de la rigidité des processus d'achat. De notre point de vue, les travaux à la direction des achats remplissaient une fonction nécessaire à l'activité d'incubation agile du modèle DIMa. Le deuxième exemple venait de l'initiative de la direction industrielle et de la fabrication pour intégrer une capacité de fabrication agile et rapide pour des activités de prototypage. Cette activité devait permettre de soutenir à la fois des projets de R&T, des projets de conception innovante, et même de développement de moteurs classiques dans des cas très particuliers. Nous pensons que cette fonction, qui est complémentaire de la précédente, était aussi une des pièces nécessaires permettant de compléter les activités d'incubation. De manière générale, les porteurs de projets de ces initiatives nous rapportaient que le modèle DIMa permettait de comprendre la contribution de leur projet à la démarche de conception innovante.

3. Opérationnalisation du modèle pour Turbomeca

L'objectif final de notre recherche-intervention, tel qu'il avait été formulé par Turbomeca au démarrage de nos travaux, était de fournir une proposition d'organisation de conception innovante adaptée aux nouveaux enjeux d'innovation radicale de Turbomeca. Notre effort de consolidation, présenté au paragraphe précédent, nous a permis de construire, sur la base d'un modèle légitimé dans l'entreprise, une organisation de conception innovante. La conception de cette organisation était décomposée en trois briques : la proposition d'un nouveau processus pour la conception innovante, la proposition de fiches d'activités, ainsi que la proposition des ressources requises et d'un modèle de construction du budget de fonctionnement. Dans la suite de cette section, nous présentons successivement ces trois propositions ainsi que des éléments sur le positionnement de l'entité de conception innovante dans l'organisation de Turbomeca.

3.1. Proposition d'un processus pour la conception innovante

Les premières questions que soulevait la mise en place d'une organisation de conception innovante relevaient de sa mission et des tâches qu'elle aurait à accomplir. Pour ce faire, nous avons mobilisé le modèle DIMa et proposé les six activités de la conception innovante comme tâches de l'organisation de la conception innovante à intégrer dans les processus de conception de l'entreprise. Néanmoins, la nature même de ces activités impliquait des modifications des processus de conception en place dans l'entreprise. Cinq processus étaient directement concernés par la conception innovante dont les missions peuvent être décrits de la façon suivante⁴⁴ :

- **« Piloter l'entreprise »** : ce processus a pour fonction de définir la stratégie et de mettre en œuvre les politiques pour la satisfaction des clients, des actionnaires et du personnel, en prenant en compte l'environnement et la concurrence ; de préparer l'avenir ; ainsi que de piloter pour atteindre les résultats et impulser une dynamique de progrès permanent. Ce processus est piloté par le Président Directeur Général.
- **« Préparer l'avenir technologique »** : ce processus a pour fonction d'anticiper, de développer et de rendre matures les nouveaux concepts et technologies répondant aux attentes connues et potentielles des clients de l'entreprise. Ce processus est piloté par le programme Recherche & Technologie (R&T).

⁴⁴ Il est à noter que les processus de l'entreprise étaient en train d'être refondés en même temps que nous construisions notre proposition. Ainsi, bien que nous ayons essayé autant que possible d'inclure les modifications en cours dans les processus de l'entreprise. Il se peut qu'à la date de rédaction de ce mémoire, les dénominations et périmètres des processus de l'entreprise aient plus ou moins évolués.

- « **Concevoir, développer et industrialiser** » : c'est le processus de développement des nouvelles turbines à gaz et de modification des hélicoptères en respectant les engagements pris avec les programmes en matière de spécifications, de coûts, de délais et de qualité. Ce processus est réalisé par la direction technique et la direction fabrication et industrialisation.
- « **Vendre des produits et services** » : ce processus a pour objectifs de : relayer les orientations du PDG et d'assurer l'atteinte des objectifs société ; d'assurer une cohérence entre la vision et la stratégie intégrateurs et opérateurs ; de fidéliser les clients intégrateurs et opérateurs ; de développer la rentabilité des business produits et services ; de fournir une vision moyen-terme et long-terme et une stratégie pour les produits et services. Ce processus est réalisé par la direction des ventes intégrateurs et la direction des ventes hélicoptères.
- « **Piloter les programmes** » : ce processus a pour objectif de déployer la stratégie du programme, de la décliner en objectifs opérationnels au niveau de chaque processus et de piloter les activités des différentes actions visant au respect des objectifs fixés s'appuyant sur une équipe programme constituée. Ce processus est réalisé par la direction des programmes.

En ce qui concerne notre proposition, elle consiste à intégrer un nouveau processus pour la conception innovante sur la base de notre modèle DIMa : « Générer et Piloter l'Innovation de Rupture⁴⁵ ». Ce processus a pour objectif de fournir de nouveaux concepts de produits et services en entrée du processus de « Vendre des produits et services » afin de construire les objets (produits et services) pour la vision moyen et long terme. Pour ce faire, ce processus est en interaction avec trois processus : « piloter l'entreprise », « vendre des produits et services » et « préparer l'avenir technologique ». Les interactions sont de cinq types :

- 1) Le processus « générer et piloter l'innovation de rupture » caractérise la génération et le pilotage des activités concernant les propositions sur les objets et connaissances à fortes incertitudes. Pour définir son périmètre d'activités, nous avons, à partir de la théorie C-K, créé un référentiel simplifié pour définir une proposition en rupture. **Ainsi, pour l'entreprise, nous définissons une proposition en rupture comme une proposition portant sur un objet dont l'identité et la valeur sont instables (fortes ruptures**

⁴⁵ Nous avons ici utilisé le terme « innovation de rupture » car il nous semblait plus approprié pour la diffusion et la compréhension de la fonction du processus dans l'entreprise. « Innovation de rupture » étant un terme plus diffusé dans la population non-académique que celui de « conception innovante ».

conceptuelles : ΔC) et/ou nécessitant l'acquisition de poches de connaissances entières (fort besoin de connaissances nouvelles : ΔK). Dans la Figure 56 ci-dessous elles correspondent aux propositions de la colonne de gauche et/ou ligne de droite. Le cas **ΔC - ΔK** étant le cas extrême d'innovation de rupture. Il est à noter que la grande majorité des propositions de l'entreprise se situe dans le cadre « incrémentale ».

ΔC L'identité de l'objet et la valeur de la proposition sont instables	Rupture	Rupture
	Incrémentale	Rupture
	δK Les poches de connaissances utiles sont déjà identifiées et les modes d'évaluation sont connus	ΔK Des poches entières de connaissances sont à acquérir et les modes d'évaluation à définir

Figure 56- Classification des propositions d'innovation pour Turbomeca

- 2) Le processus « piloter l'entreprise » fournit un cadrage pour les activités de la conception innovante. Ce cadrage de la direction permet de définir un périmètre plus ou moins incertain en lien avec la stratégie de l'entreprise. En effet, bien que la fonction du processus d'innovation de rupture soit, par définition, d'alimenter la stratégie de l'entreprise, compte tenu des ressources limitées des entreprises, la définition du périmètre d'exploration doit contenir des attributs de la stratégie ou des compétences de l'entreprise.
- 3) Pour conduire les activités d'apprentissage technologique indispensables à la conception innovante, le processus « piloter et gérer l'innovation de rupture » interroge le processus « préparer l'avenir technologique » et est alimenté en retour par les apprentissages technologiques permis par ce processus. Usuellement, dans les grandes entreprises, le processus d'innovation de rupture est pensé comme un processus amont du processus de recherche (R&T). **Nous proposons au contraire que le processus d'innovation de rupture gère l'ensemble des propositions en rupture, jusqu'à ce qu'elles atteignent un**

niveau de maturité suffisant pour être proposées au processus « vendre des produits et services »⁴⁶. Du coup, le processus « préparer l'avenir technologique » permet de réaliser les apprentissages technologiques contribuant à l'amélioration des propositions en rupture, **mais le pilotage de ces propositions demeure dans le processus d'innovation de rupture** jusqu'à passer dans le processus « vendre des produits et services ».

- 4) De la même manière, les connaissances sur les marchés des opérateurs et des intégrateurs sont apportées par le processus « vendre des produits et services » à travers des études de marché, par exemple concernant des propositions de nouveaux modèles d'affaires ou offres de services. Ainsi, les acteurs de ce processus sont intégrés dans le processus d'innovation de rupture.
- 5) Le processus « générer et piloter l'innovation de rupture » fournit des propositions de concepts de produits et services au processus « vendre des produits et services ». Il est à noter que les propositions peuvent être de différents niveaux de maturité selon les besoins des directions concernées. Les *outputs* peuvent aller de propositions de nouveaux produits jusqu'à des démonstrations de nouveaux services en passant par de la construction de scénarios à long terme.

La Figure 57 ci-dessous résume l'intégration du processus « générer et piloter l'innovation de rupture » dans les processus de l'entreprise.

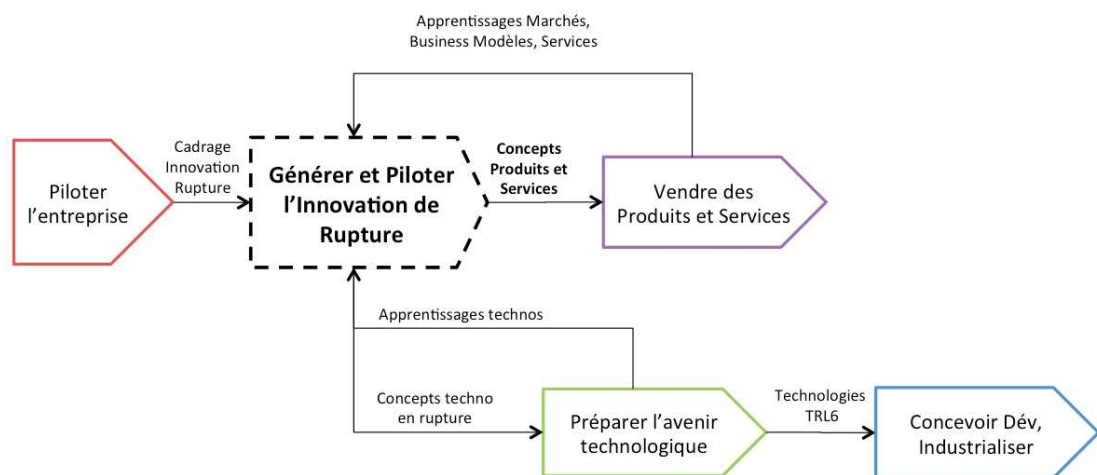


Figure 57- Proposition de cartographie de niveau 1 des processus de conception pour Turbomeca.

⁴⁶ Nous considérons que ce point est un résultat novateur pour la théorie de l'ambidextrie, et nous détaillerons ce point dans la dernière section de cette partie.

3.2. Opérationnalisation des activités

À partir du modèle DIMa, nous avons proposé une déclinaison de chacune des activités du processus « générer et piloter l'innovation de rupture » en tâches.

- L'activité « construire et piloter l'exploration conceptuelle » est centrale. À partir des éléments issus de l'activité « intégrer des connaissances du *non-art* », elle permet de générer des propositions en rupture et des axes d'exploration.
- L'activité « nidification » conçoit les moyens, ressources et réseaux de partenaires qui sont nécessaires pour augmenter la maturité des propositions en rupture.
- Les apprentissages, maquettes, démonstrateurs exploratoires conçus par l'activité « d'incubation agile » permettent de réduire autant qu'il est possible les niveaux d'incertitude associés aux propositions en rupture.
- L'activité de « dissémination » permet de diffuser, intégrer et faire adhérer les nouveaux destinataires de ces propositions dans le processus de conception.
- Ainsi, l'ensemble de ce processus fournit des propositions d'innovation de rupture pour des produits et services à un niveau de maturité assez important pour être compris et géré par le processus « vendre des produits et services ». Ce processus intègre en fait les propositions à la stratégie à moyen et long termes, et les développe avec les moyens conventionnels de la conception réglée.

Le processus « générer et piloter l'innovation de rupture » a donc pour vocation de fournir des propositions en rupture nouvelles, matures, et fédérées. La structuration d'un nouvel écosystème, incluant aussi bien les partenaires et les fournisseurs pour l'incubation que les destinataires de l'innovation lors de l'activité de dissémination, est aussi un résultat de ce processus.

Sur la Figure 58 ci-dessous, nous avons représenté cette cartographie en explicitant les données d'entrée et de sortie de chacune des tâches.

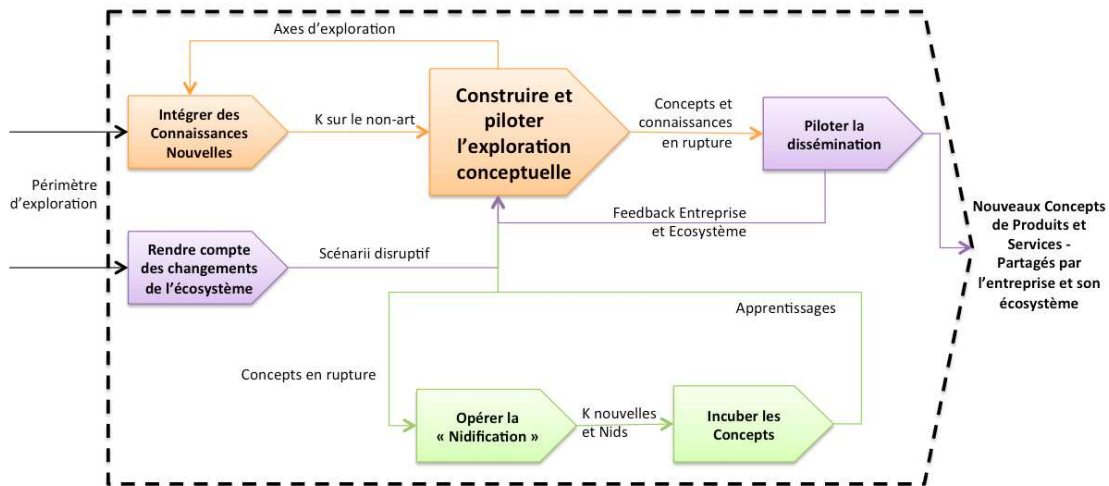


Figure 58- Cartographie de niveau 2 du processus « générer et piloter l'innovation de rupture »

Afin de rendre opérationnel ce processus, nous proposons une description systématique des différentes activités sous forme de fiches. En plus des éléments d'entrée et de sortie, ces fiches se composent d'une partie descriptive, d'une partie sur l'écosystème d'acteurs et une partie sur les ressources.

La partie descriptive comprend :

- la description de la tâche,
- une description des sous-tâches,
- la valeur ajoutée de la tâche.

La partie sur l'écosystème d'acteurs comprend :

- le pilote de la tâche,
- les parties-prenantes,
- les fournisseurs internes et externes de la tâche.

La partie sur les ressources comprend :

- les ressources matérielles
- les ressources financières.

Les six fiches du processus, correspondant à chacune des activités du modèle DIMa, sont présentées ci-après, en reprenant la logique de présentation de la section précédente.

Tache 1 : Rendre compte des changements de l'écosystème

<u>Éléments d'entrée :</u> Objets et acteurs dans et hors de l'écosystème de l'entreprise	<u>Description :</u> cette tâche permet de mettre en évidence dans l'entreprise les évolutions de l'écosystème		<u>Éléments de sortie :</u> Média mettant en évidence des évolutions possibles de l'écosystème de l'entreprise
	<u>Sous-tâches :</u> identification de signaux faibles et potentiels de rupture, construction de scénarios, communication sur les scénarios		
	<u>Valeur ajoutée :</u> mise en évidence et sensibilisation à tous les niveaux organisationnels de l'entreprise des bouleversements et de la non-stabilité de l'écosystème à travers des médias ludiques.		
	<u>Pilote :</u> responsable cellule conception innovante		
	<u>Partie-prenantes :</u> experts techniques et experts marchés		
	<u>Fournisseurs internes :</u> département marketing et veille technique	<u>Fournisseurs externes :</u> laboratoires de prospective ; entreprises spécialisées dans les médias	
<u>Matériel :</u> logiciel de construction de média (si non externalisé)	<u>Budget requis pour :</u> réalisation média pour la présentation des scénarios, études de veille technologiques, participation à des séminaires		

Tâche 2 : Intégrer des connaissances nouvelles

<u>Éléments d'entrée :</u> Informations sur les technologies, les marchés, évolutions sociétales	<u>Description :</u> cette tâche permet d'intégrer, analyser et structurer la connaissance du non-art pour l'entreprise		<u>Éléments de sortie :</u> Connaissances en ruptures intégrées Bases de connaissances structurées à travers des outils de cartographie
	<u>Sous-tâches :</u> activité de veille, organisation de séances K, diffusion des résultats de l'activité de veille, participation à des communautés d'innovation		
	<u>Valeur ajoutée :</u> connaissances en rupture organisées et intégrées dans l'entreprise et les métiers concernés.		
	<u>Pilote :</u> responsable cellule conception innovante		
	<u>Partie-prenantes :</u> experts techniques et experts marchés		
	<u>Fournisseurs internes :</u> département marketing et veille technique par les experts concernés	<u>Fournisseurs externes :</u> laboratoires pour l'analyse de certaines données techniques	
	<u>Matériel :</u> base de données, outil de représentation des connaissances	<u>Budget requis pour :</u> séminaires, veille économique et technologique	

Tâche 3 : Construire et piloter l'exploration conceptuelle

<u>Éléments d'entrée :</u> Connaissances en rupture technologiques et de marché, scénarios d'évolution de l'écosystème, cartographie de connaissance en rupture	<u>Description :</u> cette tâche permet de construire l'exploration conceptuelle au travers d'axes d'exploration et de propositions en rupture.		<u>Éléments de sortie :</u> Propositions en rupture, axes d'exploration et nouvelles connaissances associées, cartographie d'exploration
	<u>Sous-tâches :</u> génération de concepts en rupture, structurer des axes d'exploration et cartes C-K, piloter l'évolution des propositions en rupture, évaluations techniques des propositions, évaluations économiques et stratégiques.		
	<u>Valeur ajoutée :</u> génération de nouveaux espaces de valeur et structuration de la conception à travers des cartographies d'exploration conceptuelle et des outils de pilotage adaptés à la conception innovante.		
	<u>Pilote :</u> responsable cellule conception innovante		
	<u>Partie-prenantes :</u> experts techniques et experts marchés		
	<u>Fournisseurs internes :</u> experts du processus de développement	<u>Fournisseurs externes :</u> laboratoires techniques et scientifiques, partenaires innovants	
	<u>Matériel :</u> cartographie C-K, méthodes et outils de créativité	<u>Budget requis pour :</u> études internes, sous-traitance analyse technique et économique	

Tâche 4 : Opérer la nidification »

<u>Éléments d'entrée :</u> Propositions en rupture et bases de connaissances associées incluant les analyses techniques et économiques	<u>Description</u> : cette tâche permet de construire le « nid » associé à chacune des propositions innovantes pour leur maturation		<u>Éléments de sortie :</u> Propositions en rupture associées à un « nid de conception »
	<u>Sous-tâches</u> : construction des roadmaps et stratégies d'acquisition de connaissances, recherche de financement, construction des partenariats et projets, recrutement de compétences critiques, acquisition de PI, rachat de brevet		
	<u>Valeur ajoutée</u> : nids activables génériques ou associés à chacune des propositions.		
	<u>Pilote</u> : responsable nidification		
	<u>Partie-prenantes</u> : experts techniques et experts marchés		
	<u>Fournisseurs internes</u> : experts et managers concernés par les propositions	<u>Fournisseurs externes</u> : cabinet de veille technologique, PME innovantes	
	<u>Matériel</u> : modèles de construction de partenariat pour l'exploration procédures et documents de construction de contrats pour la PI rapide	<u>Budget requis pour</u> : construction d'un réseau de partenaires innovants Acquisition d'éléments d'essai génériques	

Tâche 5 : Incuber les propositions en rupture

Éléments d'entrée : Propositions en rupture et « nids de conception » associées	Description : cette tâche permet de faire mûrir les propositions en rupture à des niveaux de maturité appropriés aux processus de développement de l'entreprise ou pour des apprentissages nécessaires au processus d'exploration lui-même.		Éléments de sortie : Propositions en rupture avec un niveau de maturité augmenté, prototypes, démonstrateurs exploratoires, apprentissages technologiques
	Sous-tâches : pilotage de projet de conception innovante, réalisation d'études amonts, achats et approvisionnements pour l'incubation, fabrication de maquette, prototype, preuve de concept, montage, essai, analyse et synthèse		
	Valeur ajoutée : activation des projets de conception innovante sur la base des nids de conception proposés		
	Pilote : responsable cellule de conception innovante		
	Partie-prenantes : pilotes de projets de conception innovante avec l'aide des experts		
	Fournisseurs internes : directions des achats, R&T, direction technique, direction de la fabrication et industrialisation	Fournisseurs externes : PME's innovantes, partenaires et fournisseurs divers selon les cas	
	Matériel : interne : Moyens génériques de fabrication et d'essais externe : Réseau de partenaires ou partenaires identifiés	Budget requis pour : prototypages, achats et fabrication de pièces, études techniques, démonstrateurs HMI...	

Tache 6 : Piloter la dissémination »

Éléments d'entrée : Propositions en rupture, prototypes, démonstrateurs exploratoires	Description : cette tâche permet de diffuser les propositions innovantes et d'intégrer les destinataires de ces propositions au processus de conception innovante		Éléments de sortie : Objets représentatifs des propositions en rupture permettant de favoriser la collaboration Destinataires des propositions de conception innovante intégrés au processus de conception innovante
	Sous-tâches : communication interne sur les concepts et connaissances nouveaux, diffusion des scénarios de l'activité « incertitudes externes », préparation de l'écosystème à la réception des concepts : stratégie de communication externe, stratégie d'intégration des destinataires de l'innovation dans le processus de conception, formation et diffusion des outils de la conception innovante		
	Valeur ajoutée : transformation des propositions en rupture en espaces collaboratifs de conception dans l'écosystème interne et externe de l'entreprise		
	Pilote : responsable cellule de conception innovante		
	Partie-prenantes : experts techniques et marchés		
	Fournisseurs internes : direction communication	Fournisseurs externes : entreprises de construction de médias, prototypes, et objet d'exposition	
Matériel : media divers, outils de prototypages rapides...	Budget requis pour : outils et médias de communication, campagne de communication interne et externe démonstrateurs d'exposition...		

3.3. Détermination des ressources et budget de fonctionnement

À partir de la description des différentes tâches de ce processus, nous avons pu proposer les ressources nécessaires à la conception innovante à la direction de Turbomeca. Cette proposition se composait des ressources humaines et financières nécessaires. Afin de rester le plus proche possible du besoin de Turbomeca, nous avons croisé les besoins en ressources de chaque sous-tâche avec l'expérience de terrain que nous avons eue dans les projets de conception innovante issus de la méthode KCP.

À partir des différentes sous-tâches des activités, nous avons pu définir les compétences nécessaires à l'organisation de conception innovante. Ces compétences comprenaient aussi bien des expertises techniques que juridiques ou de marchés. Néanmoins, chacune de ces sous-tâches ne nécessitait pas la même charge. Nous avons donc tenté de définir précisément quelles seraient les charges annuelles requises pour chacune d'entre elles, puis de définir quels seraient les postes de l'entreprise les plus adaptés pour ces expertises, quand ils existaient. Sinon, nous proposons des profils types de postes à créer pour remplir ces sous-tâches.

Puis, en ce qui concerne les ressources financières nécessaires, nous avons eu deux démarches parallèles, dont nous avons comparé les résultats afin de définir le budget de fonctionnement de l'organisation : le budget de fonctionnement désiré ou requis pour effectuer les activités du modèle DIMa et le budget de fonctionnement expérimental à partir de l'expérience *Propulsion 2030*. Pour la première, les activités de conception nous ont permis de définir des équivalents temps plein à partir des ressources humaines nécessaires et un budget pour l'achat de matériels et études pour le fonctionnement de chacune des activités. Pour la seconde, nous avons additionné le budget de fonctionnement du projet *Propulsion 2030* et les budgets des études, achats de matériel des projets qui en résultaient. Pour ce faire nous avons étudié, avec l'ingénieur en chef R&T et le chef de service des avant-projets, seize projets exploratoires, pour la plupart issus de la méthode KCP. Un ajustement entre ces deux budgets nous a permis de proposer un budget de fonctionnement annuel pour l'organisation de conception innovante. Sur la Figure 59 ci-dessous, on peut voir les deux démarches parallèles.

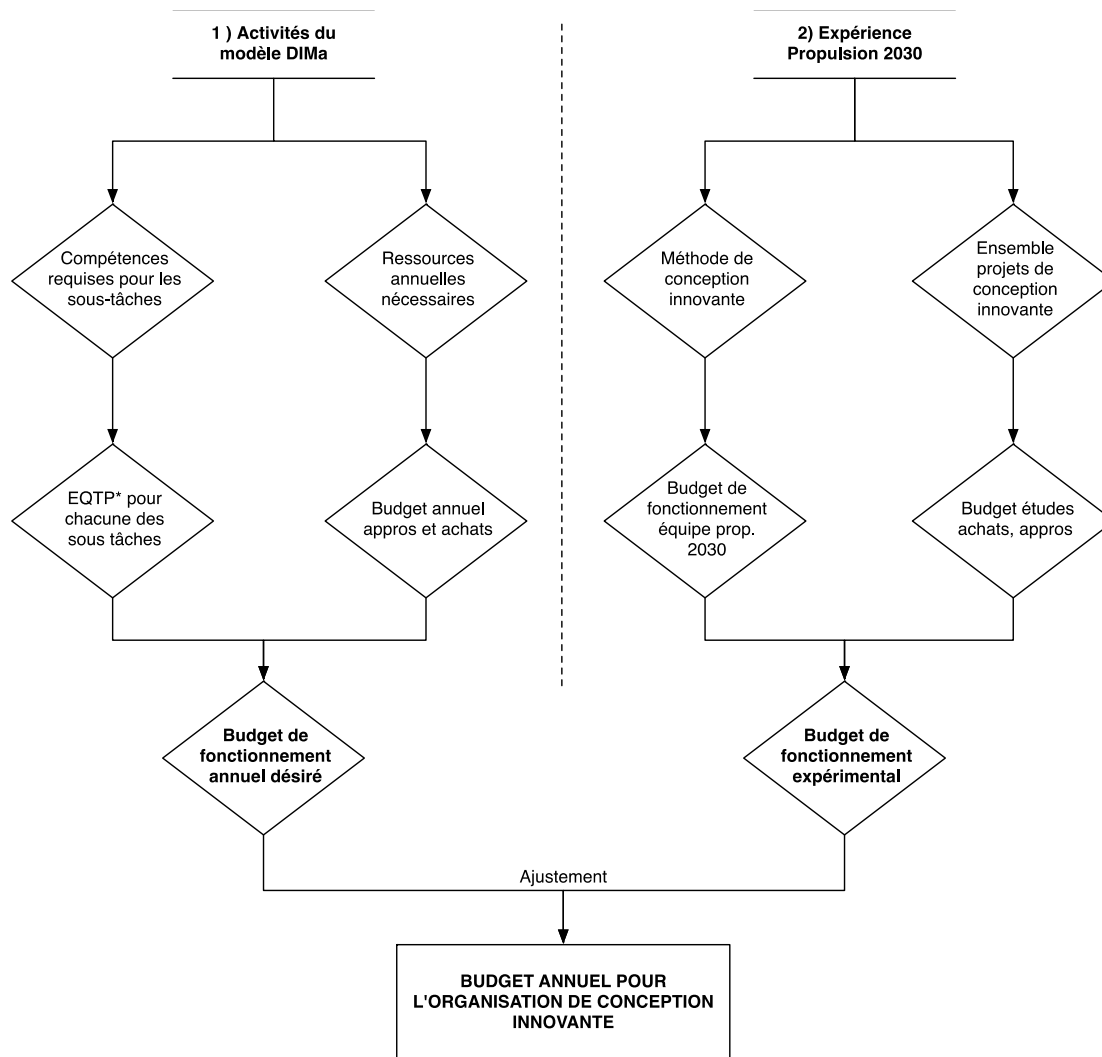


Figure 59- Méthodologie de construction du budget annuel nécessaire pour la conception innovante

3.4. Positionnement de l'entité dans l'entreprise et structure organisationnelle

Dans cette section, nous présentons la structure organisationnelle ainsi que le débat et l'argumentaire construits autour du positionnement de cette entité.

Le travail sur la structure organisationnelle et le positionnement de l'entité était finalement le dernier élément à intégrer à notre proposition d'organisation pour la conception innovante. Cependant, cette partie demeurait la plus problématique, car elle soulevait des questions très structurantes relatives à la structure organisationnelle de cette entité ainsi qu'à son positionnement dans l'entreprise. Dans l'organisation d'une entreprise établie, **quelle place doit-on donner à une entité qui participe à l'élaboration de la stratégie long-terme, mais qui n'est pas la direction stratégique ? Quelle position pour une entité proposant les nouvelles connaissances à investiguer pour demain, mais qui n'est pas la direction de la Recherche ? Quel rôle pour une entité qui conçoit les produits et services du futur, mais qui n'est ni la direction technique, ni la direction marketing ?** Ces éléments étaient critiques, car au-delà des nombreux points théoriques que ces questions soulevaient se cachaient des débats importants sur le terrain, concernant le positionnement d'une telle entité et les jeux d'acteurs que cela suppose.

Concernant l'organisation en premier lieu, compte tenu des différentes entités de conception innovante que nous avons pu étudier, ainsi que de notre expérience à travers l'analyse de la démarche *Propulsion 2030*, deux écueils nous semblaient à éviter. Le premier était celui de la *task force*, c'est-à-dire du regroupement des experts nécessaires à ce processus sous la direction d'un responsable de la conception innovante jouant un rôle hiérarchique vis-à-vis de ces personnels détachés. D'après notre analyse comparative et notre étude de la méthode KCP, nous avons montré que cette organisation ne favorisait pas la diffusion des propositions en rupture et des connaissances nouvelles associées, comme le souligne d'ailleurs la littérature (de Visser et al., 2010). Ainsi, nous avons observé, durant le déroulement de la méthode KCP, que beaucoup des travaux de conception innovante étaient diffusés dans l'entreprise durant les réunions de service hebdomadaires des participants, ce qui nous avait semblé être un des indices de la réussite de la démarche. Le deuxième écueil était de penser le processus de conception innovante comme une nouvelle fonction programme, qui aurait été rattachée à la direction des programmes. Bien que cette solution eut apporté avec elle certains des avantages de l'organisation matricielle, et surtout minimisé l'effort de transformation, il nous semblait que la flexibilité et la rapidité des décisions nécessaires à ce type d'entité n'auraient pas été possibles dans cette configuration. Aussi, nous avons proposé une structure hybride entre ces deux notions. C'est-à-dire une organisation alliant

les avantages de ces deux structures : la réactivité de la *task force* et la possibilité d'activation et de diffusion des bonnes compétences dans la structure matricielle.

Pour ce faire, nous avons proposé la création d'un poste de « responsable de l'innovation de rupture », rattaché au Président Directeur Général. Ce responsable doit assurer la maîtrise d'œuvre de la conception innovante dans l'entreprise. Il a de fait pour mission de gérer l'ensemble des activités relatives au processus « générer et piloter l'innovation de rupture ». Il propose aussi le budget annuel pour ce processus, et le fait valider par le PDG. Le deuxième composant organisationnel que nous avons proposé était un comité de pilotage de la conception innovante, comprenant le chef de programme de la R&T, le PDG, une équipe de directeurs restreinte, ainsi que les responsables du programme R&T. Cette équipe permet d'activer rapidement les ressources nécessaires dans les différentes directions de l'entreprise, elle valide les projets d'exploration proposés nécessitant des moyens importants, et peut proposer des redéfinitions du périmètre d'exploration une à deux fois dans l'année. La troisième composante organisationnelle est « une équipe de conception innovante » organisée en équipe projet avec pour chef de projet le responsable de la conception innovante. L'équipe proposée pour Turbomeca serait composée de six experts à plein temps, dont trois techniques, deux spécialistes des marchés et services et un responsable de la « nidification », ainsi que huit experts rattachés au projet à temps partiel comprenant à la fois des spécialistes juridiques que des experts des brevets, de la communication ou encore de la conception innovante. Le rôle des membres de cette équipe est de conduire les activités du processus « générer et piloter l'innovation de rupture » ainsi que de s'assurer que, dans leur domaine de compétence, les efforts de conception innovante sont entrepris et d'en promouvoir le développement dans l'équipe et à travers leur ligne fonctionnelle dans l'organisation.

Par souci d'efficacité du groupe, nous avons souhaité proposer un fonctionnement en équipe plateau où tous les membres de l'équipe pourraient être physiquement rassemblés dans un même endroit de l'entreprise dédié à la conception innovante. Cependant, pour la diffusion des compétences nouvelles dans l'entreprise, il nous semblait important que les experts puissent participer à certains projets de conception réglée intégrant les nouvelles propositions en rupture ainsi qu'aux réunions de leur service fonctionnel. Dans la Figure 60 ci-dessous, nous synthétisons les composantes de l'organisation de conception innovante proposée pour Turbomeca. Il est à noter que tous les liens de cet organigramme sont des liens opérationnels avec le responsable de la cellule de conception innovante.

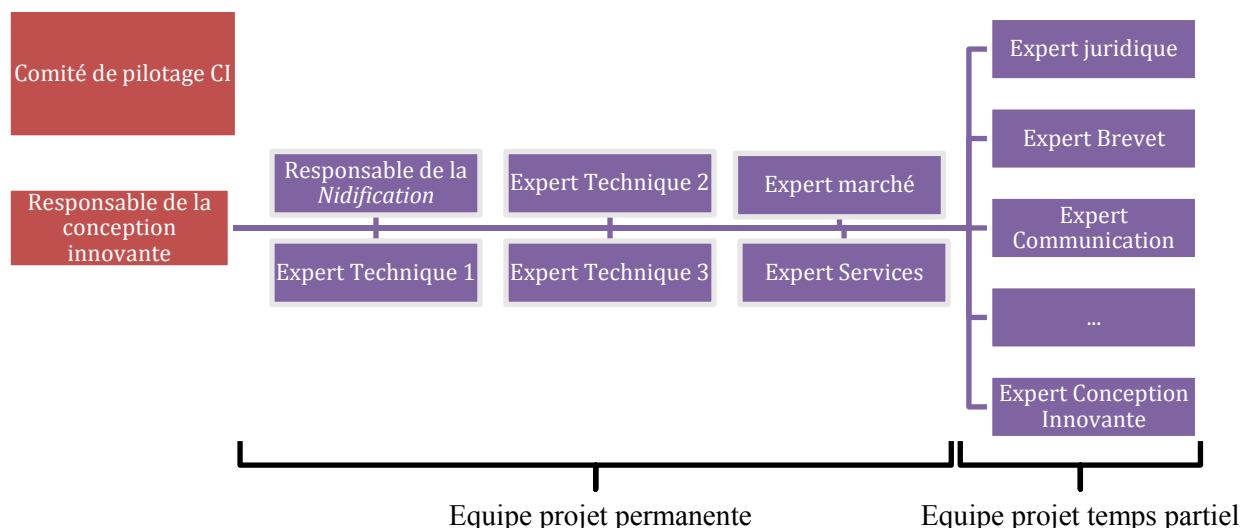


Figure 60- Proposition d'un organigramme pour la conception innovante à Turbomeca

Concernant la seconde série de questions soulevées par la construction de cette organisation, plusieurs débats sont nés, dans l'équipe de recherche puis dans l'entreprise. Tout d'abord du point de vue de sa mission. Bien qu'il y ait eu consensus sur le fait que les activités de cette entité devaient correspondre à celles du modèle DIMa, et donc du processus qui en découlait, le fait de devoir créer l'organisation pouvait être à l'origine de tensions entre les différentes entités déjà existantes dans l'entreprise. Cela aurait pu être le cas pour le projet R&T (qui gère les activités de Recherche), à la direction stratégique, ou encore pour les entités de développement de nouveaux produits et services. Pour éviter ces tensions, il était important de définir et de communiquer plus précisément sur la frontière et le rôle du processus d'innovation de rupture vis-à-vis des autres entités concernées. Le premier outil de communication que nous avons mobilisé et sur lequel nous avons communiqué était le référentiel d'innovation permettant définir l'innovation de rupture (Figure 56 précédente). À partir de ce référentiel, nous avons clairement explicité que l'entité de conception innovante ne traiterait que les propositions en rupture, à savoir des propositions portant sur un objet dont l'identité et la valeur sont instables et/ou nécessitent l'acquisition de poches de connaissances entières. Le deuxième élément que nous avons précisé durant nos présentations et réunions de travail en interne était l'objectif même du processus d'innovation de rupture. Nous avons ainsi explicité que la mission de cette entité était de réduire les incertitudes concernant des propositions en rupture, et de fournir aux différentes parties prenantes du processus de conception des objets interprétables et faisant sens pour l'entreprise. Pour ce faire, nous avons détaillé ce propos à partir d'une présentation mettant en avant, dans un premier temps, la différence considérable entre le nombre de projets d'innovation incrémentale et d'innovation de rupture dans

l'entreprise. Nous rappelions ainsi que, dans le processus de conception, les activités concernant l'innovation de rupture étaient négligeables en nombre et en ressources par rapport au reste des activités de l'entreprise. Dans un deuxième temps, nous précisions **les objectifs et le périmètre d'action du processus d'innovation de rupture, en rappelant que sa fonction principale était de gérer les propositions comportant de fortes incertitudes et de réduire ces incertitudes le plus rapidement possible afin qu'elles puissent être intégrées dans les processus de l'entreprise.**

Conclusion de la PARTIE IV

Dans cette partie, après avoir présenté notre analyse comparative des organisations de conception innovante dans l'industrie, nous avons détaillé notre protocole de construction de l'organisation de conception innovante à Turbomeca. Ce protocole consistait en trois phases. D'abord, nous avons rappelé que les études de l'histoire des capacités de conception innovante à Turbomeca ainsi que l'analyse de la méthode KCP constituaient la phase de conceptualisation qui a conduit à la **création d'un modèle générique pour l'intégration de capacités d'innovation radicale dans l'entreprise, le modèle DIMa**. Ensuite, nous avons explicité la méthodologie permettant de mettre à l'épreuve la généricité de notre modèle à travers la phase de consolidation. Nous avons, à cet effet, détaillé les présentations et sessions de travail que nous avons mené avec les parties prenantes des processus d'innovation en interne de l'entreprise, mais aussi en externe avec d'autres entreprises coutumières des processus de conception innovante. Cette phase nous a permis de légitimer notre modèle, en interne à Turbomeca grâce aux améliorations que ces réunions ont permis d'apporter, mais surtout du fait de l'intérêt qu'il a suscité dans plusieurs grandes entreprises de l'industrie. Finalement, à partir de ce modèle légitimé, nous avons pu construire un processus « générer et piloter l'innovation de rupture » s'inscrivant dans les processus de l'entreprise, ainsi qu'une organisation pour la conception innovante, comprenant un responsable de la conception innovante rattaché à la direction générale de l'entreprise, un chef de projet d'une équipe de plusieurs experts multidisciplinaires détachés de manière permanente sur le projet, ainsi qu'un comité de pilotage pour la conception innovante composé d'une équipe restreinte de membres de la direction de l'entreprise. Dans cette partie, nous avons aussi présenté les outils à partir desquels nous avons pu clarifier le rôle et le périmètre de cette entité, ainsi que notre argumentaire pour la diffusion de notre proposition de conception innovante. Ces outils comprenaient : l'analyse comparative des organisations de conception innovante de l'industrie ; un référentiel simplifié de définition de l'innovation de rupture à partir de la théorie C-K ; ainsi qu'une présentation explicitant le périmètre de la mission du processus « générer et piloter l'innovation de rupture ». Dans la conclusion, nous reviendrons sur les apports de nos recherches à la littérature sur l'innovation radicale.

CONCLUSION GENERALE

1. Synthèse de la recherche	303
2. Nouveau langage pour les « organisations orientées conception ».....	306
2.1. Confirmation de l'intérêt d'une approche par la conception et nouveau langage pour les activités de conception innovante	306
2.2. Contribution aux travaux sur les <i>organisations orientées conception</i>	309
3. Perspectives de recherches	310

1. Synthèse de la recherche

Cette recherche a étudié l'intégration de capacités d'innovation radicale dans les entreprises industrielles établies. Elle s'est appuyée sur l'étude longitudinale des processus d'innovation radicale d'un motoriste de l'aéronautique : Turbomeca. Cette entreprise, leader mondial des turbines à gaz d'hélicoptère, a connu en 2008 des bouleversements importants, qui ont incité ses dirigeants à lancer une démarche d'innovation radicale. Cette démarche a nécessité la mobilisation d'une méthode de conception innovante collective, ainsi qu'une étude scientifique des capacités d'innovation radicale de l'entreprise. Notre méthodologie de recherche s'est principalement basée sur une recherche-intervention, menée entre 2009 et 2012, et s'est appuyée sur un ensemble de méthodes et d'outils pour la collecte, la triangulation et l'analyse des données, telles que des entretiens semi-directifs, l'observation-participante, ou encore l'analyse d'archives de l'entreprise.

Nous proposons une revue de littérature synthétisant les apports des travaux de recherche internationaux sur l'innovation radicale, à travers laquelle nous avons mis en évidence la limite de la segmentation de la littérature par niveaux organisationnels pour l'étude de l'innovation. De ce fait, pour étudier ces processus dans leur globalité, nous mobilisons les approches par la conception, et proposé un cadre théorique pour étudier les capacités d'innovation radicale relatives au Design (D), à l'Incubation (I), et à la Mutation (M) de l'écosystème. Ce cadre D-I-M permet non seulement de rendre compte des nouveaux raisonnements de conception en jeu dans les processus d'innovation radicale, mais aussi d'étudier les moyens de production de connaissances nouvelles ainsi que l'interaction de l'entreprise avec son écosystème.

En mobilisant les ressources de notre terrain d'étude, nous avons eu accès à un ensemble très riche de données pour étudier l'évolution historique des capacités d'innovation de Turbomeca. Afin de mieux comprendre et caractériser cette évolution, nous avons mené une investigation longitudinale approfondie sur ses soixante-dix ans d'existence. Cela nous a permis d'analyser la genèse de la turbine à gaz et de reconstruire la généalogie des capacités de conception innovante de Turbomeca, depuis sa création jusqu'à la période de bouleversements que cette entreprise rencontrait en 2008. Dans un premier temps, notre analyse de l'apparition de la turbine à gaz nous amène à proposer la notion de *potentiel d'innovation de rupture* pour comprendre l'apparition d'une innovation radicale. Puis, à travers notre cadre d'analyse des capacités d'innovation radicale D-I-M, nous proposons une relecture de l'histoire de Turbomeca qui nous permet de **caractériser l'évolution des capacités de conception de l'entreprise en isolant trois modèles de conception, qui**

correspondent à trois périodes différentes : le modèle entrepreneurial, le modèle exploratoire, et le modèle technocentré. Cette analyse met en évidence les limites de ce dernier modèle pour répondre aux nouveaux enjeux de l'aéronautique à Turbomeca, ainsi que la nécessité de faire émerger un nouveau modèle pour s'y adapter.

Afin de comprendre les processus à piloter pour conduire les transitions organisationnelles nécessaires à l'intégration de capacités d'innovation radicale, nous avons analysé la méthode collaborative de conception innovante mise en place dans l'entreprise : la méthode KCP. Nous mettons en évidence un type de transformation dans l'entreprise induit par cette méthode, et qui n'avait pas été repéré par la littérature sur l'innovation radicale : l'interaction entre la transformation du raisonnement de conception et la transformation multi-niveaux de l'organisation. **Nous montrons, à partir de notre analyse, que l'intégration de capacités d'innovation radicale dans l'entreprise passe par une transformation de l'organisation que nous nommons *transition organisationnelle par la conception*. Nos recherches montrent ainsi que la méthode KCP permet d'outiller et de piloter ces types de transitions.** Ce point a fait l'objet d'une communication internationale à la conférence IPDMC XVIII, et est actuellement en cours de révision pour une publication dans le journal *Creativity and Innovation Management* (cf. encadré ci-dessous).

Par la suite, à partir de l'étude de trois projets de conception innovante issus de la méthode KCP, nous avons pu caractériser les processus à gérer pour conduire ce type de transformation. **Nous montrons en effet qu'une *transition organisationnelle par la conception* implique le pilotage de six grands types d'activités de conception innovante :**

- (1) la prise de conscience des incertitudes de l'écosystème;
- (2) l'apprentissage forcé du *non-art* ;
- (3) la construction d'une exploration conceptuelle ;
- (4) la conception de l'environnement d'incubation, ou *nidification* ;
- (5) l'incubation agile ;
- (6) la dissémination interne et externe.

À partir de ces activités, nous construisons une proposition d'organisation pour la conception innovante adaptée à l'entreprise. Cette proposition inclut un processus, des principes organisationnels, ainsi qu'une structure organisationnelle et l'interaction de celle-ci avec les autres entités de l'entreprise, telles que la Recherche, le Développement, ou encore la direction Stratégique. Une proposition de dimensionnement (nature et volume) des ressources nécessaires à son implantation a également été formulée sur la base d'une triangulation des ressources consommées par les projets issus de la méthode KCP. **Nous montrons finalement, au travers de la construction de cette proposition d'organisation, que la description opérationnelle des activités de la conception innovante permet de définir les principes organisationnels pour l'intégration de capacités d'innovation radicale dans l'entreprise.**

Publications scientifiques associées

3. Arnoux, F., & Béjean, M. 2010. Strategies for building Radical Innovation potential: Exploring the role of collaborative creative design methods. *International Product Development Management Conference, Murcia, Spain.*
4. Arnoux, F., Béjean, M., & Hooge, S. 2013. Organizing for Radical Innovation: From Stage-Gate control processes to Stage-Based Collaborative Exploration Methods. *Creativity and Innovation Management.* (accepté sous condition de modifications)

2. Nouveau langage pour les « organisations orientées conception »

Dans cette section, nous synthétisons les apports de nos recherches à la littérature sur l'innovation radicale. Nous confirmons, dans un premier temps, l'intérêt d'une approche par la conception pour organiser les activités de conception innovante. Puis nous mettons en avant nos contributions aux travaux sur les « organisations orientées conception » développés au Centre de Gestion Scientifique.

2.1. Confirmation de l'intérêt d'une approche par la conception et nouveau langage pour les activités de conception innovante

Dans les sciences de l'organisation, il est communément admis que pour préparer l'avenir, et donc survivre dans un contexte d'innovation radicale, le succès de l'entreprise dépend de sa capacité à gérer simultanément les ressources pour l'exploitation aujourd'hui des capacités établies, et le renouvellement des compétences pour demain (Levinthal & March, 1993; March, 1991). Dans la littérature, nous l'avons vu, une organisation capable de gérer cette tension sur les ressources est dite « ambidextre ». Aussi, alors que notre proposition d'un processus et d'une entité sous forme d'équipe projet va dans le sens de ce champ de recherche, en confirmant notamment la nécessité d'une forme d'ambidextrie structurelle (de Visser et al., 2010) pour conduire l'innovation de rupture dans l'entreprise, ce champ a peu étudié les moyens opérationnels permettant, en pratique, de rendre une organisation ambidextre.

La littérature sur les structures organisationnelles, et notamment les travaux de Burns et Stalker (1961) ou encore de Mintzberg (1982), sur les organisations organiques pour les premiers et les formes d'adhocratie pour le second, ont apporté des réponses sur le type de structure que pouvaient adopter les organisations pour l'exploration. Aussi, la littérature rapportant des récits de projets d'innovation regorge de descriptions sur des modes de fonctionnement singuliers adoptés par certaines organisations afin d'opérer des innovations de rupture. C'est le cas des récits de la Prius de Toyota (Itazaki, 2008; Magnusson & Berggren, 2001; Nonaka & Peltokorpi, 2006), ou du *Skunk Works* de Lockheed (Johnson, 1989; Miller, 1995; Rich & Janos, 1996). Néanmoins, alors que les travaux théoriques s'efforcent de fournir des modèles génériques pour les capacités d'exploration, les cas pratiques sont rarement des déclinaisons de ces travaux théoriques. En effet, ce sont souvent des structures mises en place, sous l'impulsion du *top-management*, par des acteurs de terrain. Dans

notre cas par exemple, notre proposition d'organisation, bien que fonctionnant en « mode projet », tout en possédant de nombreuses caractéristiques d'une « adhocratie », n'a pas été construite sur la base des recommandations des auteurs à l'origine de ces concepts. La littérature sur les structures organisationnelles ne nous semblait donc pas fournir les principes pour intégrer des capacités d'innovation radicale dans l'entreprise.

Par ailleurs, nos résultats sont davantage en ligne avec d'autres travaux de la littérature sur l'innovation qui proposent justement des principes organisationnels pour l'innovation radicale. C'est le cas du modèle Discovery – Incubation – Accélération, qui caractérise les activités à mettre en œuvre pour l'intégration de capacités d'innovation radicale dans les entreprises établies, et proposé par O'Connor et DeMartino (2006). De même, les études de cas de O'Connor (2008) proposent, dans ce cadre, une approche « système » pour l'innovation radicale, en présentant les sept éléments clés à intégrer pour construire une capacité à réaliser des *major innovations*. De fait, la troisième phase de nos recherches (phase d'opérationnalisation) converge sur plusieurs points avec le système proposé par O'Connor, en particulier sur la création d'une entité identifiable, de mécanismes d'interfaces, ou encore de liens avec la stratégie. Aussi, alors que de notre point de vue cette approche semble être la plus complète pour construire une organisation ambidextre, notamment en ce qu'elle fournit l'ensemble des « briques » nécessaires aux activités d'exploration, elle ne précise en aucun cas les éléments opérationnels qui permettraient à une entreprise de les intégrer en pratique. **Face à ce besoin managérial, quels seraient les objets à modéliser pour la coordination de l'ensemble des éléments du système ? Quels principes organisationnels possibles de ce système pourrait-on identifier ? Quels seraient les outils d'interface avec les autres composantes de l'organisation ?**

En réponse à ces questions de recherche, nos résultats empiriques confirment que l'approche par la conception est pertinente. En effet, la construction d'un modèle d'activités pour la conception innovante a permis de créer un nouveau langage permettant de décrire les activités de la conception innovante dans l'entreprise sous la forme de plusieurs « sous-activités » détaillées. À partir de ce langage, nous avons pu proposer un processus complet pour la conception innovante, puis en déduire à la fois les ressources nécessaires et l'organisation la plus pertinente possible pour être intégrée dans l'entreprise. Par ailleurs, les approches par la conception contribuent à mieux décrire les interactions entre les processus de conception innovante et les autres processus de l'entreprise. Dans notre cas, nous avons pu en effet clarifier les interactions entre cette organisation et les processus R&T de Turbomeca, avec la différenciation entre les *propositions en rupture* générées par l'entité de conception innovante et les *processus de production de connaissances nouvelles* pouvant être menés par la R&T. En outre, les approches par la conception permettent de proposer

des définitions précises des objets à gérer dans les processus d'innovation, et contribuent ainsi à faciliter les débats sur le rôle et le périmètre d'activité des organisations d'exploration. À Turbomeca, cette approche a rendu possible la précision des périmètres d'activité de la nouvelle organisation par rapport aux autres départements déjà existants dans l'entreprise, et de préparer un argumentaire pour les débats internes sur le positionnement de cette entité dans l'entreprise. Par ailleurs, le langage pour la conception innovante permet de donner sens à des initiatives de transformation organisationnelle isolées dans l'entreprise. Nous avons montré que le modèle d'activités a permis de donner sens à des initiatives éparpillées à Turbomeca. Par exemple, qu'il a permis de prendre en compte les initiatives de création d'un processus prototype à la direction fabrication, ou encore de création de processus d'achats « agiles » à la direction des achats. L'intérêt de ce nouveau langage pour décrire les activités de la conception innovante nous fut aussi confirmé lors de nos présentations à d'autres entreprises. En effet, nos interlocuteurs, pour la plupart managers dans des activités d'innovation, soulignaient le caractère explicatif de notre modèle d'activité pour comprendre les interactions entre les différentes initiatives d'innovation de radicale de leurs entreprises.

Aussi, bien que nos résultats confirment en partie les travaux de la littérature sur l'innovation radicale, nous défendons cependant que notre délimitation du périmètre du processus « innovation de rupture » permet d'apporter une nouvelle lecture du pilotage de l'innovation radicale. En effet, alors que la littérature adopte souvent une approche linéaire entre activités de conception innovante et activités de développement, nos recherches mettent en avant la nécessité de maintenir *l'ensemble* du pilotage des propositions d'innovation de rupture dans l'organisation de conception innovante. Ceci induit donc plusieurs configurations possibles pour une proposition en rupture dans l'organisation. La première, la plus classique, concerne une proposition en rupture technologique pour laquelle la recherche identifie une application possible sur un produit. Dans ce cas, une fois le niveau de maturité de la proposition suffisant, le pilotage est transféré à la Recherche. La seconde configuration possible concerne une proposition de rupture révisant l'identité d'un objet (produit ou service). Dans ce cas, l'organisation de conception innovante pilote la proposition jusqu'à ce qu'elle atteigne un niveau de maturité suffisant pour l'intégrer aux *business units* concernées. Elle s'appuie pour cela sur les équipes de Recherche et de Développement pour proposer un niveau de maturité permettant au *business unit* concerné de gérer la proposition en question. La troisième configuration possible concerne une proposition révisant l'identité d'un objet, mais dont la maturation et la mise sur le marché ne peuvent s'opérer avec les capacités de l'entreprise. Dans ce cas, l'organisation de conception innovante s'appuie sur un réseau externe à l'entreprise et sur la création de structures *ad hoc*. Ainsi, à travers ces trois configurations, nous mettons en avant que notre définition du périmètre de l'innovation de rupture permet d'explicitier plusieurs

configurations et combinaisons possibles quant au pilotage des propositions en rupture et aux interactions avec les autres entités de l'écosystème interne et externe de l'entreprise.

2.2. Contribution aux travaux sur les *organisations orientées conception*

Notre proposition d'organisation de la conception innovante se situe dans la lignée des travaux sur les *organisations orientées conception* proposés par Hatchuel, Le Masson et Weil (Hatchuel, 2000; Hatchuel, Le Masson, & Weil, 1999, 2002a; Hatchuel & Weil, 1999). Ces auteurs ont mis en avant les limites d'une organisation matricielle de type projets/métiers. En effet, ils ont montré que, bien que très efficaces dans un environnement stable, car les métiers sont « pensés comme des communautés de pratique » et les projets « comme des espaces d'apprentissages croisés », ces organisations ne sont plus adaptées à des contextes d'innovation radicale, car les savoirs et les identités d'objets n'y sont plus assez stables pour soutenir une telle organisation. Les auteurs mettent alors en avant que, dans de telles situations, l'entreprise doit être capable de reconstruire ses apprentissages collectifs à partir « d'objets-concepts » et de « métiers embryonnaires », dont les élaborations progressives donnent lieu à des métiers et projets plus routiniers. Les organisations favorisant ces formes d'apprentissage collectif par un renouvellement simultané des objets et des métiers sont appelées des « organisations orientées conception » par Hatchuel, Le Masson, et Weil. Néanmoins, bien que ces auteurs précisent la nécessité de piloter des processus « créateurs de concepts, objets et métiers nouveaux », leurs travaux ne détaillent pas les activités et les principes d'organisation qu'il faudrait mettre en œuvre pour construire en acte une telle organisation. De ce point de vue, **nous avançons que nos recherches fournissent une contribution significative à la notion d'organisation orientée conception, en proposant les activités et les entités constitutives d'une telle organisation.** En effet, notre modèle d'activité DIMa fournit les trois organes constitutifs d'une *organisation orientée conception*. Le premier est l'entité (D pour Design) du raisonnement de conception, en charge du renouvellement des concepts et des nouvelles connaissances. Le second est l'entité (I pour Incubation) chargée de la création des nouvelles compétences et de la conception et fabrication des nouveaux objets. Et le troisième (M pour Mutation de l'écosystème) rend compte et opère des mutations de l'écosystème. Ces entités, nécessaires à tout processus de conception, pourraient prendre des formes diverses en fonction des structures des entreprises. Par exemple, prenons le cas d'une structure fonctionnelle composée d'une fonction Recherche, d'une fonction Développement ainsi que d'une fonction Industrialisation. Pour intégrer des capacités de conception innovante, et donc une forme d'ambidextrie structurelle, cette organisation pourrait être complétée en intégrant une entité de type D dans la Recherche, une entité de type I dans l'Industrialisation ainsi qu'une entité de type M dans

pour préparer le Développement. L'ambidextrie structurelle pourrait être de cette manière répartie à travers les différentes directions de l'entreprise. Dans une organisation plus complexe, ces entités peuvent être regroupées sous une même direction de l'innovation, ou encore une fonction projet de conception innovante.

3. Perspectives de recherches

Cette recherche demanderait à être poursuivie en particulier sur les points suivants :

1/ Poursuite des travaux sur l'intégration de capacités organisationnelles pour l'innovation de rupture au sein d'entreprises industrielles établies.

Nous aimerions approfondir nos travaux sur deux dimensions.

La première voie serait de poursuivre et d'accompagner le déploiement opérationnel de notre proposition à Turbomeca afin d'analyser la transition complète vers un modèle *d'organisation orientée par la conception*. Ces travaux soulèveraient plusieurs questions et problématiques : comment adapter les processus décisionnels aux activités DIMa ? Quels sont le rôle et le statut du responsable de la conception innovante dans une entreprise ? Le modèle DIMa pourrait-il contribuer à définir ce rôle ? D'autre part, cela nous conduira à étudier la transformation des entités de Recherche et de Développement liée au déploiement d'une organisation dédiée aux activités de conception innovante. Pour cela, un rapprochement avec les travaux sur la « Recherche Conceptive », développés dans l'industrie des semi-conducteurs sur le pilotage de la conception de brevets (Felk, 2010), nous semble judicieux pour explorer ces transformations.

La deuxième voie serait l'étude des contingences et la poursuite de la généralisation par le déploiement dans d'autres entreprises industrielles établies, et donc l'accompagnement des *transitions organisationnelles par la conception* dans d'autres secteurs industriels. Ainsi, nous pourrions continuer à consolider et à enrichir notre modèle d'activités. Dans un premier temps, nous souhaitons poursuivre ces travaux avec les acteurs industriels que nous avons sollicités pour nos recherches.

2/ Outiller les méthodes collaboratives de conception innovante

Malgré le succès de l'implémentation de la méthode KCP à Turbomeca, certains éléments pour le pilotage et la mise en œuvre de ce processus restent à approfondir.

Du point de vue du pilotage de la méthode d'abord, un travail sur l'accompagnement des entreprises dans la construction d'axes d'exploration pourrait être à approfondir. Des travaux de recherche récents ont montré que l'on pouvait modéliser des effets de fixation aux niveaux individuel et collectif (Agogue, 2012). Ces recherches pourraient-elles contribuer à aider au pilotage de l'exploration dans la méthode KCP en outillant les membres de l'équipe Projet pour la génération d'alternatives conceptuelles ?

Du point de vue de la phase conceptuelle, nos données ont permis d'identifier certaines lacunes concernant les outils pour conduire ces sessions. Le champ très vaste des outils et des méthodes de créativité (Legardeur, 2009) ne pourrait-il pas contribuer à enrichir cette phase ? Par ailleurs, dans la majorité des cas, la méthode KCP est pilotée par des consultants externes à l'entreprise. Cependant, de plus en plus de grandes entreprises souhaitent intégrer le pilotage de ces méthodes en interne. La méthode KCP pourrait-elle être un outil de gestion pérenne pour une fonction d'innovation dans l'entreprise ? Quelles formes dérivées en taille de groupe et en durée pourrait prendre la méthode, sans être dénaturée sur les dimensions « fédération » et « originalité » ?

3/ Passage du niveau d'analyse de l'entreprise à l'écosystème émergent :

Nos recherches se sont focalisées au niveau d'analyse de l'entreprise. Néanmoins, ces dernières années, des chercheurs se sont intéressés à des niveaux élargis aux démarches d'exploration collective entre des entreprises de même secteur industriel (Maniak, 2009; Maniak & Midler, 2008; Segrestin, 2003). Aujourd'hui, dans certains secteurs tels que l'aéronautique, de grands groupes industriels émergent, composés de nombreuses filiales aux activités différentes. Néanmoins, ces grandes entreprises souhaitent se doter de capacités d'innovation communes pour rester compétitives face aux grands groupes internationaux de leur domaine. Afin d'élargir notre recherche, nous pourrions étudier l'intégration des capacités d'innovation radicale dans une entreprise multi-filiales, telle que le groupe SAFRAN. Par ailleurs, d'autres travaux ont commencé à investiguer la modélisation de l'organisation de l'innovation au niveau de l'écosystème dans des domaines tels que les semi-conducteurs (Le Masson, Weil, Hatchuel, & Cogez, 2012). Des auteurs ont même étudié l'exploration partagée entre des entreprises de secteurs industriels différents pour

travailler sur des technologies émergentes, comme les nanotechnologies (Gillier, 2010). On pourrait ainsi, pour étendre le cadre d'analyse de nos travaux, s'interroger sur les formes que prendraient des capacités d'innovation radicale au niveau d'un écosystème industriel, ou même de partenariats entre entreprises de secteurs différents.

Ces questions seront mises à l'épreuve dans nos prochaines activités, au travers d'accompagnement d'initiatives d'innovation radicale dans des grands groupes industriels.

BIBLIOGRAPHIE

- ABC-News. 1999. The deep dive. New York.
- Abernathy, W. J., & Townsend, P. L. 1975. Technology, productivity and process change. *Technological Forecasting and Social Change*, 7(4): 379-396.
- Acar, S., & Runco, M. A. 2012. Creative Abilities: Divergent Thinking. In D. M. Michael (Ed.), *Handbook of Organizational Creativity*: 115-139. San Diego: Academic Press.
- ACARE. 2002. Strategic Research Agenda 1.
- ACARE. 2004. Strategic Research Agenda 2.
- ACARE. 2010. Aeronautics and Air Transport : Beyond Vision 2020 (Towards 2050): ACARE Strategy Review Group.
- Agogue, M. 2012. *Modéliser l'effet des biais cognitifs sur les dynamiques industrielles : Innovation orpheline et architecte de l'inconnu*. Paris.
- Agogue, M., Arnoux, F., Brown, I., & Hooge, S. 2013. *Introduction à la Conception Innovante : éléments théoriques et pratiques de la théorie C-K*: Presse des Mines ParisTech.
- Altshuller, G. 1986. The history of ARIZ development. *Journal of TRIZ*.
- Altshuller, G., & Shapiro, R. B. 1956. On the psychology of inventive creation. *The psychological issues (in Russian)*: 37-39.
- Altshuller, G. S. 1984. *Creativity as an exact science: the theory of the solution of inventive problems* (A. Williams, Trans.): Gordon and Breach Science Publishers.
- Amabile, T., Conti, R., Coon, H., Lazenby, J., & Herron, M. 1996. Assessing the Work Environment for Creativity. *The Academy of Management Journal*, 39(5): 1154-1184.
- Amabile, T. M. 1996. *Creativity in context*. Boulder, Colorado: Westview Press.
- Anderson, P., & Tushman, M. L. 1990. Technological Discontinuities and Dominant Designs: A Cyclical Model of Technological Change. *Administrative Science Quarterly*, 35: 604-633.
- Argyris, C., & Schön, D. 1978. *Organizational Learning*. Reading, Mass.: Addison-Wesley.
- Arnoux, F., & Béjean, M. 2010. Strategies for building Radical Innovation potential: Exploring the role of collaborative creative design methods. *International Product Development Management Conference, Murcia, Spain*.
- Arnoux, F., Béjean, M., & Hooge, S. 2013. Organizing for Radical Innovation: From Stage-Gate control processes to Stage-Based Collaborative Exploration Methods. *Creativity and Innovation Management (Submitted)*.
- Avolio, B. J., & Bass, B. M. 1993. *Improving Organizational Effectiveness through Transformational Leadership*: SAGE Publications.
- Bakker, H., Boersma, K., & Oorel, S. 2006. Creativity (Ideas) Management in Industrial R&D Organizations: A Crea-Political Process Model and an Empirical Illustration of Corus RD&T. *Creativity and Innovation Management*, 15(3): 296-309.
- Barney, J. B. 2001. Resource-based theories of competitive advantage: A ten-year retrospective on the resource-based view. *Journal of Management*, 27(6): 643-650.
- Basadur, M., Graen, G. B., & Green, S. G. 1982. Training in creative problem solving: Effects on ideation and problem finding and solving in an industrial research organization. *Organizational Behavior and Human Performance*, 30(1): 41-70.
- Bejean, M. 2008. *Le management des entreprises à prestations artistiques. Activités de conception, régimes de signification et potentiel de croissance*. Ecole des Mines, Paris.
- Benner, M. J., & Tushman, M. L. 2003. Exploitation, Exploration, and Process Management: the Productivity Dilemma Revisited. *Academy of Management Review*, 28(2): 238-256.
- Betts, P. 1998. Science, Semiotics and Society: The Ulm Hochschule für Gestaltung in Retrospect. *Design Issues*, 14(2): 67-82.
- Bharadwaj, S., & Menon, A. 2000. Making Innovation Happen in Organizations: Individual Creativity Mechanisms, Organizational Creativity Mechanisms or Both? *Journal of product innovation management*, 17(6): 424-434.
- Bodie, W. M. 2001. *The Lockheed P-38 Lightning*: Motorbooks International.
- Burningham, C., & West, M. A. 1995. Individual, climate, and group interaction processes as predictors of work team innovation. *Small Group Research*, 26(1): 106-117.

- Burns, T., & Stalker, G. M. 1961. *The Management of Innovation*. London: Tavistock Publications Limited.
- Camacho, L. M., & Paulus, P. B. 1995. The role of social anxiousness in group brainstorming. *Journal of Personality and Social Psychology*, 68: 1071-1080.
- Cavallucci, D., Rousselot, F., & Zanni, C. 2009. Linking Contradictions and Laws of Engineering System Evolution within the TRIZ Framework. *Creativity and Innovation Management*, 18(2): 71-80.
- Chandler, A. D. 1989 (red. 1962). *Strategy and Structure. Chapters in the History of the Industrial Enterprise (titre édition française : stratégies et structures de l'entreprise)* (P. Schaufelberger, Trans.) (2ème édition (1ère édition de 1962, traduction de 1972) ed.). Paris: Les Editions d'Organisation.
- Chapel, V. 1997. *La croissance par l'innovation intensive : de la dynamique d'apprentissage à la révélation d'un modèle industriel, le cas Téfal*. Unpublished Thèse de doctorat en Ingénierie et Gestion, Ecole des Mines de Paris, Paris.
- Chesbrough, H. W. 2003. *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*. Harvard Business School Press.
- Christensen, C. M. 1997. *The Innovator's Dilemma. When New Technologies Cause Great Firms to Fail*. Boston, MA: Harvard Business School Press.
- Claveau, C. 2008. *Turbomeca: à la hauteur de la légende*. Ed. Larivière.
- Collaros, P. A., & Anderson, L. R. 1969. Effect of Perceived Expertness upon creativity of members of brainstorming groups. *Journal of Applied Psychology*, 53(2): 159-163.
- Compte-rendu interne de la stratégie de Turbomeca. 1969. Groupe de travail moteurs, Vol. 6.
- Conner, M. 2001. *Hans von Ohain: elegance in flight*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Constant, E. W. 1980. *The origins of the turbojet revolution*: Books on Demand.
- Constant, E. W. I. 1983. Un changement de paradigme technologique. L'exemple de la révolution du turboréacteur. *Culture Technique*.
- Cooper, R. G. 1997. Fixing the Fuzzy Front End of the New Product Process. Building the Business Case. *CMA Magazine*, October 1997: pp. 21-23.
- Cummings, J., & Kiesler, S. 2005. Collaborative Research Across Disciplinary and Organizational Boundaries. *Social Studies of Science*, 35(5): 703-722.
- David, A. 2000. *Le terrain est-il modélisable ?* Paper presented at the IX conférence internationale de management stratégique, Montpellier, 24-26 mai 2000.
- David, A. 2002. *Intervention methodologies in management research*. Paper presented at the EURAM, Stockholm.
- de Visser, M., de Weerd-Nederhof, P., Faems, D., Song, M., van Looy, B., & Visscher, K. 2010. Structural ambidexterity in NPD processes: A firm-level assessment of the impact of differentiated structures on innovation performance. *Technovation*, 30(5, 6): 291-299.
- Decôme, G. 1999. *Joseph Szydlowski et son temps*: Conseil Imprim.
- DeFillipi, R. J. 2002. Organizational models for collaboration in the new economy. *Human Resource Planning*, 25(4).
- Dell'Era, C., Marchesi, A., & Verganti, R. 2010. Mastering Technologies in Design-Driven Innovation. *Research-Technology Management*, 53(2): 12-23.
- Dell'Era, C., & Verganti, R. 2009. Design-driven laboratories: organization and strategy of laboratories specialized in the development of radical design-driven innovations. *R&D Management*, 39(1): 1-20.
- Duncker, K., & Lees, L. S. 1945. On problem-solving. *Psychological Monographs*, 58(5): i-113.
- Eisenbeiss, S. A., van Knippenberg, D., & Boerner, S. 2008. Transformational leadership and team innovation: Integrating team climate principles. *Journal of Applied Psychology*, 93(6): 1438-1446.
- Eisenhardt, K., & Tabrizi, B. 1995. Accelerating Adaptive Processes: Product Innovation in the Global Computer Industry. *Administrative Science Quarterly*, 40: 84-110.
- Eisenhardt, K. M. 1989. Making Fast Strategic Decisions in High-Velocity Environments. *Academy of Management Journal*, 32(3): 543-576.

- Ekvall, G. 1996. Organizational climate for creativity and innovation. *European Journal of Work and Organizational Psychology*, 5(1): 105-123.
- Elmqvist, M., & Segrestin, B. 2009. The challenges of managing open innovation in highly innovative fields: exploring the use of the KCP method, *Euram*: 37. Liverpool.
- Ensley, M. D., & Pearce, C. L. 2001. Shared cognition in top management teams: Implications for new venture performance. *Journal of Organizational Behavior*, 22(2): 145-160.
- Farrell, M. P. 2003. *Collaborative Circles: Friendship Dynamics and Creative Work*: University of Chicago Press.
- Fay, D., Borrill, C., Amir, Z., Haward, R., & West, M. A. 2006. Getting the most out of multidisciplinary teams: A multi-sample study of team innovation in health care. *Journal of Occupational and Organizational Psychology*, 79(4): 553-567.
- Finke, R. A., Ward, T. B., & Smith, S. M. 1992. *Creative Cognition*. Boston, MA: MIT Press.
- Floyd, S., Kellermanns, F., Pearson, A., & Spencer, B. 2008. The contingent effect of constructive confrontation on the relationship between shared mental models and decision quality. *Journal of Organizational Behavior*, 1(29): 119-137.
- Foss, N. J. 2003. Selective Intervention and Internal Hybrids: Interpreting and Learning from the Rise and Decline of the Oticon Spaghetti Organization. *Organization Science*, 14(3): 331-349.
- Galunic, C., & Eisenhardt, K. M. 2001. Architectural innovation and modular corporate forms. *Academy of Management Journal*, 44(6): 1229-1249.
- GIEC. 2007. Bilan 2007 des changements climatiques., *Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*: 103. Genève, Suisse.
- Gillier, T. 2010. *Comprendre la Génération des Objets de Coopération Interentreprises par une Théorie des co-Raisonnements de Conception. Vers une nouvelle ingénierie des partenariats d'exploration technologique*.
- Gillier, T., Piat, G., Roussel, B., & Truchot, P. 2010. Managing Innovation Fields in a Cross-Industry Exploratory Partnership with C-K Design Theory*. *Journal of product innovation management*, 27(6): 883-896.
- Gilson, L. L., & Shalley, C. E. 2004. A Little Creativity Goes a Long Way: An Examination of Teams, Engagement in Creative Processes. *Journal of Management*, 30(4): 453-470.
- Godet, M., & Durance, P. 2008. *La prospective stratégique - Pour les entreprises et les territoires: Pour les entreprises et les territoires*: Dunod.
- Golley, J. 2010. *Jet: Frank Whittle and the Invention of the Jet Engine*: BPR Publishers.
- Golley, J., Whittle, F., & Gunston, B. 1996. *Genesis of the jet: Frank Whittle and the invention of the jet engine*: Airlife Publishing Ltd.
- Griffith, A. A. 1926. An Aerodynamic Theory of Turbine Design: Royal Aircraft Establishment.
- Groves, L. R. 1962. *Now It Can Be Told: The Story of the Manhattan Project*: Da Capo.
- Hatchuel, A. 1994. Les savoirs de l'intervention en entreprise. *Entreprises et Histoire*, 7: 59-75.
- Hatchuel, A. 2000. Design oriented organization and unified theory of design: Ecole des Mines.
- Hatchuel, A. 2002. Towards Design Theory and expandable rationality: the unfinished program of Herbert Simon. *Journal of Management and Governance*, 5(3-4): 260-273.
- Hatchuel, A., & David, A. 2007. Collaborating for Management Research: from Action Research to Intervention Research in Management. In A. B. Shani, S. A. Mohrman, W. A. Pasmore, B. A. Stymne, & A. Niclas (Eds.), *Handbook of Collaborative Management Research*. Thousand Oaks, CA: Sage.
- Hatchuel, A., Le Masson, P., & Weil, B. 1999. Knowledge Management : the renewal model, beyond project and matrix, design oriented organization and "go between" actors for creation and transfer of knowledge, *knowledge management at Sekurit Saint-Gobain*. Paris, France: CGS, Ecole des Mines.
- Hatchuel, A., Le Masson, P., & Weil, B. 2002a. From Knowledge Management to Design Oriented Organizations. *International Social Science Journal, Blackwell Publishing / UNESCO*, 171(March 2002): 25-37.
- Hatchuel, A., Le Masson, P., & Weil, B. 2002b. Gestion des connaissances et organisation apprenante : de la gestion des connaissances aux organisations orientées conception. In F.

- Rowe (Ed.), *Faire de la recherche en systèmes d'information*: 155-170. Paris: Vuibert Fnege.
- Hatchuel, A., Le Masson, P., & Weil, B. 2004. *The Management of Science Based Products: Managing by Design Spaces*. Paper presented at the 11th international product development management conference, 20-22 June, Dublin, Ireland.
- Hatchuel, A., Le Masson, P., & Weil, B. 2005. The Development of Science-Based Products: Managing by Design Spaces. *Creativity and Innovation Management*, 14(4): 345-354.
- Hatchuel, A., Le Masson, P., & Weil, B. 2006. Repenser la R&D : les défis de l'innovation intensive. *Revue Economique et Sociale*, 64(Septembre 2006): 47-52.
- Hatchuel, A., Le Masson, P., & Weil, B. 2009. *Design Theory and Collective Creativity: a Theoretical Framework to Evaluate KCP Process*. Paper presented at the International Conference on Engineering Design, ICED'09, 24-27 August 2009, Stanford CA.
- Hatchuel, A., & Weil, B. 1999. *Design-Oriented Organisations, Towards a Unified Theory of Design Activities*. Paper presented at the 6th international product development management conference, Churchill College, Cambridge, UK.
- Hatchuel, A., & Weil, B. 2002a. *C-K Theory: Notions and Applications of a Unified Design Theory*. Paper presented at the Herbert Simon International Conference on Design Sciences, Lyon, 15-16 march 2002.
- Hatchuel, A., & Weil, B. 2002b. *CK Theory, Notions and Applications*. Paper presented at the Proceedings of the Herbert Simon International Conference on " Design Sciences ", Lyon.
- Hatchuel, A., & Weil, B. 2002c. *La théorie C-K : fondements et usages d'une théorie unifiée de la conception*. Paper presented at the Colloque sciences de la conception, Lyon, 15-16 mars 2002.
- Hatchuel, A., & Weil, B. 2007. *Design as Forcing: deepening the foundations of C-K theory*. Paper presented at the International Conference on Engineering Design, Paris.
- Hatchuel, A., & Weil, B. 2009. C-K design theory: an advanced formulation. *Research in Engineering Design*, 19: 181-192.
- Hooge, S. 2010. *Performance de la R&D en rupture et des stratégies d'innovation. Organisation, pilotage et modèle d'adhésion*. MINES ParisTech, Paris.
- Horowitz, R. 1999. *Creative Problem Solving in Engineering Design*. Tel-Aviv University.
- Horton, G. I., & Radcliffe, D. F. 1995. Nature of rapid proof-of-concept prototyping. *Journal of Engineering Design*, 6(1): 3-16.
- Hülshager, U., Anderson, N., & Salgado, J. 2009. Team-level predictors of innovation at work: a comprehensive meta-analysis spanning three decades of research. *The Journal of applied psychology*, 94(5): 1128-1145.
- Im, S., & Workman, J. P. 2004. Market Orientation, Creativity, and New Product Performance in High-Technology Firms. *Journal of Marketing*, 68(2): 114-132.
- Itazaki, H. 2008. *The Prius that shook the world. How Toyota developed the world's first mass-production hybrid vehicle*.
- Itten, J. 1975. *Design and Form: The Basic Course at the Bauhaus and Later*: Wiley.
- Jancovici, J.-M. 2010. Eléments de base sur l'énergie au 21ème siècle : Pétrole apocalypse ou carbon paradise ? : Creative Commons.
- Johnson, C. L. 1989. *Kelly : More Than my Share of It All*: Smithsonian.
- Jones, B. M., & Trevelyan, A. 1925. Step-by-step Calculations Upon the Asymmetric Movements of Stalled Airplanes. *British R&M*, 999.
- Jones, G. 1989. *The jet pioneers: the birth of jet-powered flight*: Methuen London.
- Kaplan, C. A., & Simon, H. A. 1990. In search of insight. *Cognitive Psychology*, 22(3): 374-419.
- Kelley, D. J., O' Connor, G. C., Neck, H., & Peters, L. 2011. Building an organizational capability for radical innovation: The direct managerial role. *Journal of Engineering and Technology Management*, 28(4): 249-267.
- Kim, W. C. A., & Mauborgne, R. 2005. *Blue Ocean Strategy: How to Create Uncontested Market Space and Make Competition Irrelevant*: Harvard Business School Press.
- Klimoski, R., & Mohammed, S. 1994. Team mental model: construct or metaphor? *Journal of Management*, 20(2): 403-437.

- Koen, P., Ajamian, G., Burkart, R., Clamen, A., Davidson, J., D'Amore, R., Elkins, C., Herald, K., Incorvia, M., Johnson, A., Karol, R., Seibert, R., Slavejkov, A., & Wagner, K. 2001. Providing Clarity and a Common Language to the "Fuzzy Front End". *Research/Technology Management*, 44(2): pp. 46-56.
- Koppelaar, R. 2005. World Oil Production & Peaking Outlook: Peak Oil Netherlands Foundation.
- Kratzer, J., Leenders, O. T. A. J., & Engelen, J. M. L. v. 2004. Stimulating the Potential: Creative Performance and Communication in Innovation Teams. *Creativity and Innovation Management*, 13(1): 63-71.
- Kuhn, T. S. 1962, 1970, édition française 1983. *The Structure of Scientific Revolutions (la structure des révolutions scientifiques)* (L. Meyer, Trans.) (Traduction française de la deuxième édition (1969) ed.). Paris: Flammarion.
- Lam, A. 2006. Organizational Innovation. In J. Fagerberg, D. C. Mowery, & R. R. Nelson (Eds.), *The Oxford Handbook of Innovation*: 680: Oxford Handbook Online.
- Lave, J., & Wenger, E. 1991. *Situated Learning, Legitimate Peripheral Participation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lawrence, P. R., & Lorsch, J. W. 1967. *Differentiation and Integration in Complex Organizations*: Graduate School of Business Administration, Harvard University.
- Le Masson, P. 2001. *De la R&D à la RID : modélisation des fonctions de conception et nouvelles organisations de la R&D*. Unpublished Thèse de doctorat en Ingénierie et Gestion, sous la direction de Benoit Weil, Ecole des Mines, Paris.
- Le Masson, P., & Weil, B. 2010a. Aux sources de la R&D : genèse des théories de la conception réglée en Allemagne (1840-1960). *Entreprises et Histoire*, 58: 11-50.
- Le Masson, P., & Weil, B. 2010b. La conception innovante comme mode d'extension et de régénération de la conception réglée : les expériences oubliées aux origines des bureaux d'études. *Entreprises et Histoire*(58): 51-73.
- Le Masson, P., Weil, B., & Hatchuel, A. 2006. *Les processus d'innovation. Conception innovante et croissance des entreprises*. Paris: Hermès.
- Le Masson, P., Weil, B., & Hatchuel, A. 2010. *Strategic Management of Design and Innovation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Le Masson, P., Weil, B., Hatchuel, A., & Coge, P. 2012. Why are they not locked in waiting games? Unlocking rules and the ecology of concepts in the semiconductor industry. *Technology Analysis & Strategic Management*, 24(6): 617-630.
- Legardeur, J. 2009. *Le management des idées en conception innovante : pour une hybridation des outils d'aide aux développements créatifs*. Université Bordeaux
- Legardeur, J., Boujut, J. o., & Tiger, H. 2010. Lessons learned from an empirical study of the early design phases of an unfulfilled innovation. *Research in Engineering Design*, 21(4): 249-262.
- Leifer, R., McDermott, C. M., O'Connor, G. C., Peters, L. S., Rice, M. P., & Veryzer, R. 2000. *Radical Innovation. How Mature Companies can Outsmart Upstarts*. Boston, MA: Harvard Business School Press.
- Lenfle, S. 2008. Proceeding in the Dark. Innovation, project management and the making of the atomic bomb. In W. P.-. 08/001 (Ed.). Paris: Ecole Polytechnique, Centre de recherche en gestion.
- Lenfle, S. 2009. Exploration, project evaluation and design theory: a rereading of the Manhattan case, *IRNOP IX Conference*: 26. Berlin.
- Leonard-Barton, D. 1992. Core Capabilities and Core Rigidities: A Paradox in Managing New Product Development. *Strategic Management Journal*, 13: 111-125.
- Levinthal, D. A., & March, J. G. 1993. The myopia of learning. *Strategic Management Journal*, 14(S2): 95-112.
- Loch, C. H., Terwiesh, C., & Thomke. 2001. Parallel and Sequential Testing of Design Alternatives. *Management Science*, 45(5): 663-678.
- Loch, C. L., De Meyer, A., & Pich, M. T. 2006. *Managing the Unknown*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Loch, C. L., Solt, M. E., & Bailey, E. M. 2008. Diagnosing Unforseeable Uncertainty in a New Venture. *Journal of product innovation management*, 25: 28-46.

- Lorsch, J. W., & Lawrence, P. R. 1965. Organizing for Product Innovation. *Harvard Business Review*, January-February 1965, 43(1): 109-120.
- MacLaurin, W. R. 1953. The Sequence from Invention to Innovation and its relation to economics growth. *Quarterly Journal of Economics*, 67(1): 97-111.
- Magnusson, T., & Berggren, C. 2001. Environmental innovation in auto development. Managing technological uncertainty within strict limits. *International Journal of Vehicle Design*, 26(2/3): 101-115.
- Maniak, R. 2009. *Les processus de co-innovation-Caractérisation, Evaluation et Management: le cas de l'industrie automobile*. Paris.
- Maniak, R., & Midler, C. 2008. Shifting from co-development to co-innovation, *Gerpisa*.
- March, J. G. 1991. Exploration and exploitation in organizational learning. *Organization science*, 2(1): 71-87.
- Marchal, R. 1946. *Moteurs d'avions*: Dunod (impr. de Chaix).
- Marks, M. A., Sabella, M. J., Burke, C. S., & Zaccaro, S. J. 2002. The impact of cross-training on team effectiveness. *Journal of Applied Psychology*, 87(1): 3-13.
- Mathieu, J. E., Heffner, T. S., Goodwin, G. F., Salas, E., & Cannon-Bowers, J. A. 2000. The influence of shared mental models on team process and performance. *Journal of Applied Psychology*, 85(2): 273-283.
- McFadzean, E. 1998. The Creativity Continuum: Towards a Classification of Creative Problem Solving Techniques. *Creativity and Innovation Management*, 7(3): 131-139.
- Michelet, G. 1968. Les 30 ans de Turbomeca, *Aviation Magazine*.
- Miles, R. E., Snow, C. S., Mathews, J. A., Miles, G., & Coleman, H. J. 1997. Organizing in the knowledge age: Anticipating the cellular form. *The Academy of Management Executive*, 11(4): 7-20.
- Miller, J. 1995. *Lockheed Martin's Skunk Works* (Revised edition. First edition 1993. ed.). Leicester: Midland Publishing Ltd.
- Mintzberg, H. 1979. *The structuring of organizations*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Mintzberg, H. 1982. *Structure et dynamique des organisations* (P. romelaer, Trans.). Paris: Editions d'organisation.
- Moultrie, J., & Young, A. 2009. Exploratory Study of Organizational Creativity in Creative Organizations. *Creativity and Innovation Management*, 18(4): 299-314.
- Mullen, B., & Copper, C. 1994. The relation between group cohesiveness and performance: An integration. *Psychological Bulletin*, 115(2): 210-227.
- Mullen, B., Johnson, C., & Salas, E. 1991. Productivity loss in brainstorming groups: a meta-analytic integration. *Basic and Applied Social Psychology*, 12: 3-23.
- Muller, A., Herbig, B., & Petrovic, K. 2009. The Explication of Implicit Team Knowledge and Its Supporting Effect on Team Processes and Technical Innovations. *Small Group Research*, 40(1): 28-51.
- Mulligan, N., & Hartman, M. 1996. Divided attention and indirect memory tests. *Memory and Cognition*, 24: 453-465.
- Mumford, M. D., Hester, K. S., & Robledo, I. C. 2012. Creativity in Organizations: Importance and Approaches. In D. M. Michael (Ed.), *Handbook of Organizational Creativity*: 3-16. San Diego: Academic Press.
- Nahum, A. 2005. *Frank Whittle: Invention of the Jet*: Icon.
- Newell, A., & Simon, H. A. 1972. *Human problem solving*: Prentice-Hall.
- Nonaka, I. 1994. A Dynamic Theory of Organisational Knowledge Creation. *Organization Science*, 5(1, February 94): 14-37.
- Nonaka, I., & Konno, N. 1998. The concept of "Ba" : Building Foundation for Knowledge Creation. *California Management Review*, 40(3): 40-54.
- Nonaka, I., & Peltokorpi, V. 2006. Knowledge-Based View of Radical Innovation: Toyota Prius Case. In J. Hage, & M. Meeus (Eds.), *Innovation, Science, and Institutional Change*: 88-104. Oxford: Oxford University Press.
- Nonaka, I., & Takeuchi, H. 1995. *The Knowledge Creating Company : How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*. New-York: Oxford University Press.

- O'Connor, G. C. 2008. Major Innovation as a Dynamic Capability: A System Approach. *Journal of product innovation management*, 25: 313-330.
- O'Connor, G. C., & DeMartino, R. 2006. Organizing for Radical Innovation: An Exploratory Study of the Structural Aspect of RI Management Systems in Large Established Firms. *Journal of product innovation management*, 23: 475-497.
- Osborn, A. F. 1957. *Applied Imagination* (First edition ed.). New York: Charles Scribner.
- Ouvrage Collectif Interne Turbomeca. 1986. Grandes lignes d'une politique de produits pour 1986 - 1995.
- Ouvrage Collectif Interne Turbomeca. 1987. *50 années de progrès continu dans les turbomachines*: Turbomeca.
- Ouvrage Collectif Interne Turbomeca. 1998. *60ème anniversaire de Turbomeca*.
- Pacey, A. 1992. *The Maze of Ingenuity: Ideas and Idealism in the Development of Technology*: Mit Press.
- Pahl, G., & Beitz, W. 1977. *Konstruktionslehre (English title : engineering design)* (K. W. Arnold Pomerans, Trans.). Heidelberg, version anglaise : London: Springer Verlag, édition anglaise : The Design Council.
- Pahl, G., & Beitz, W. 2006. *Engineering design, a systematic approach* (K. Wallace, L. Blessing, & F. Bauert, Trans.). Berlin: Springer.
- Paletz, S. B. F. 2012. Project Management of Innovative Teams. In D. M. Michael (Ed.), *Handbook of Organizational Creativity*: 421-455. San Diego: Academic Press.
- Parnes, S. J. 1975. CPSI — A Program for Balanced Growth*. *The Journal of Creative Behavior*, 9(1): 23-29.
- Parnes, S. J., & Meadow, A. 1959. Effect of "brainstorming" instructions on creative problem solving by trained and untrained subjects. *Journal of Educational Psychology*, 50: 171-176.
- Paulus, P. B., Dzindolet, M., & Kohn, N. W. 2012. Collaborative Creativity, À Group Creativity and Team Innovation. In D. M. Michael (Ed.), *Handbook of Organizational Creativity*: 327-357. San Diego: Academic Press.
- Radaelli, G., Guerici, M., Cirella, S., & Shani, A. B. 2012. Intervention Research as Management Research in Practice: Learning from a Case in the Fashion Design Industry. *British Journal of Management*: n/a-n/a.
- Reiter-Palmon, R., Wigert, B., & Vreede, T. d. 2012. Team Creativity and Innovation: The Effect of Group Composition, Social Processes, and Cognition. In D. M. Michael (Ed.), *Handbook of Organizational Creativity*: 295-326. San Diego: Academic Press.
- Rich, B. R., & Janos, L. 1996. *Skunk Works: A Personal Memoir of My Years of Lockheed*: Little, Brown.
- Rispol, M. H., & Saporta, B. 2002. *La méthode des cas: Application à la recherche en gestion*: De Boeck Supérieur.
- Rouse, W. B., Cannon-Bowers, J. A., & Salas, E. 1992. The role of mental models in team performance in complex systems. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 22(6): 1296-1308.
- Schumpeter, J. 1942. *Capitalisme, socialisme et démocratie* (G. Fain, Trans.) (française ed.). Paris: Payot.
- Segrestin, B. 2003. *La gestion des partenariats d'exploration : spécificités, crises et formes de rationalisation*. Ecole des Mines, Paris.
- Shamir, B., House, R. J., & Arthur, M. B. 1993. The motivational effects of charismatic leadership: A self-concept based theory. *Organization Science*, 4(4): 577-594.
- Shani, A. B., Mohrman, S. A., Pasmore, W. A., Stymne, B., & Adler, N. 2007. *Handbook of Collaborative Management Research*: SAGE Publications.
- Shin, S. J., & Zhou, J. 2007. When is educational specialization heterogeneity related to creativity in research and development teams? Transformational leadership as a moderator. *Journal of Applied Psychology*, 92(6): 1709-1721.
- Simon, H. A. 1969. *The Sciences of the Artificial*. Cambridge, MA, USA: M.I.T. Press.
- Simon, H. A. 1991. Bounded rationality and organizational learning. *Organization Science*, 2(1): 125-134.

- Smith, G. G. 1949. *Propulsion par réaction*: Dunod.
- Souder, W. E., & Moenaert, R. K. 1992. INTEGRATING MARKETING AND R&D PROJECT PERSONNEL WITHIN INNOVATION PROJECTS: AN INFORMATION UNCERTAINTY MODEL*. *Journal of Management Studies*, 29(4): 485-512.
- Suh, N. P. 1990. *Principles of Design*. New York: Oxford University Press.
- Szydlowski. 1950. La turbine à gaz moteur de demain. *La technique moderne*.
- Szydlowski. 1951. *Application de la turbine à gaz à la traction terrestre*. Paper presented at the Séance plénière de la société des ingénieurs de l'automobile.
- Szydlowski. 1952. *Les turbines à gaz de faible de puissance*. Paper presented at the Société d'encouragement pour l'industrie nationale.
- Szydlowski. 1957. L'importance des moteurs à turbine de petite puissance dans l'aéronautique, *Institute of the aeronautical sciences*. New-York.
- Szydlowski. 1958. Les turbines à gaz de petites puissances, *Journée internationale de la turbine à gaz*. Bruxelles.
- Szydlowski. 1960. Importance du turbopropulseur pour l'avion léger polyvalent de 4 à 6 places quelques résultats et possibilités, *4ème congrès européen de la navigation - C.A.E.* Cologne.
- Szydlowski. 1963. Comparaison du point de vue économique des turbines à gaz et des moteurs à piston de moyenne puissance, *Forum des hélicoptères*. Bückeburg.
- Szydlowski. 1965. Etude et développements en France des petites turbines pour aérodynes, *Royal Aeronautical Society*. Londres.
- Szydlowski. 1966. Développement en France des petites turbines à gaz applications industrielles. *Entropie*(11).
- Szydlowski. 1974a. Le réacteur à double flux avec fan mono-étage à pas variable, entraîné, à travers un réducteur - 25 ans après pourquoi l'Astafan, *Turbomeca*.
- Szydlowski. 1974b. Prévision des performances en vol d'un turboréacteur, *Communication à l'Académie des Sciences*.
- Szydlowski. 1974c. Turbine monocorps à vitesse constante et couple variable, *Royal Aeronautical Society*. Derby.
- Szydlowski. 1975. Quelques réflexions sur l'évolution de la turbine, *Association des ingénieurs et architectes d'Israel*.
- Teece, D. J., & Pisano, G. P. 1994. The Dynamic Capabilities of Firms : an Introduction. *Industrial and Corporate Change*, 3(3): 537-556.
- Teece, D. J., Pisano, G. P., & Shuen, A. 1997. Dynamic Capabilities and Strategic Management. *Strategic Management Journal*, 18(7): 509-533.
- Tushman, M. L., & Anderson, A. D. 1986. Technological Discontinuities and Organizational Environments. *Administrative Science Quarterly*, 31: pp. 439-465.
- Tushman, M. L., Anderson, P., & O'Reilly, C. 1997. Technology Cycles, Innovation Streams, and Ambidextrous Organizations: Organization Renewal Through Innovation Streams and Strategic Change. In M. L. Tushman, & P. Anderson (Eds.), *Managing Strategic Innovation and Change : a Collection of Readings*: 3-23. New York: Oxford University Press.
- Tushman, M. L., & O'Reilly III, C. A. 1996. Ambidextrous Organizations: Managing Evolutionary and Revolutionary Change. *California Management Review*, 38(4): 8-30.
- Van de Ven, A., Polley, D. E., Garud, R., & Venkataraman, S. 1999. *The Innovation Journey*. New-York, Oxford: Oxford University Press.
- Verganti, R. 2009. *Design-Driven Innovation: Changing the Rules of Competition by Radically Innovating What Things Mean*. Harvard Business School Press.
- von Hippel, E. 1976. Has Your Customer Already Developed Your Next Product? In Working Paper from MIT Sloan School N° 865-76 (Ed.).
- von Hippel, E. 1978. Successful Industrial Products from Customer ideas. *Journal of Marketing*(Jan. 1978): 39-49.
- von Hippel, E. 1982. Get New products from Customers. *Harvard Business Review*(March-April 1982): 117-122.
- von Hippel, E. 1988. *The Sources of Innovation*. New York : Oxford U.P.

- von Karman, T. 1930. Mechanische Ähnlichkeit und turbulenz. *Weidmannsche Buchh.*
- Wallas, G. 1926. *The Art of Thought*. New York: Harcourt Brace.
- Walsh, J. P., & Ungson, G. R. 1991. ORGANIZATIONAL MEMORY. *Academy of Management Review*, 16(1): 57-91.
- Ward, T. B. 2012. Problem Solving. In D. M. Michael (Ed.), *Handbook of Organizational Creativity*: 169-187. San Diego: Academic Press.
- Weber, M. 1997 (red. 1947). *The Theory Of Social And Economic Organization*: Free Press.
- Weber, M., & Eisenstadt, S. N. 1968. *On Charisma and Institution Building*: University of Chicago Press.
- Weick, K. 1979. *The social psychology of organizing*: Addison-Wesley Pub. Co.
- Wenger, E. C., & Snyder, W. M. 2000. Communities of Practice : the Organizational Frontier. *Harvard Business Review*, January-February 2000: 139-145.
- West, M. A. 1996. Reflexivity and work group effectiveness: A conceptual integration. In M. A. West (Ed.), *Handbook of work group psychology*: 555-579. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Whittle, F. 1953. *Jet, the story of a pioneer*: Muller.
- Woodman, R., Sawyer, J., & Griffin, R. 1993. Toward a Theory of Organizational Creativity. *The Academy of Management Review*, 18(2): 293-321.
- Woodward, J. A. 1965. *Industrial Organization: Theory and Practice*. Oxford: Oxford University Press.
- Zaccaro, S. J., Heinen, B., & Shuffler, M. 2009. Team leadership and team effectiveness. In E. Salas, G. F. Goodwin, & C. S. Burke (Eds.), *Team effectiveness in complex organizations: Cross-disciplinary perspectives and approaches*: 83-111. New York, NY, US: Routledge/Taylor & Francis Group.

TABLES DES LEGENDES

Table des figures

Figure 1 - Synthèse des données, méthodes de collecte de données, et apports aux différents niveaux théoriques.....	31
Figure 2 – Synoptique du document de thèse.....	32
Figure 3 - Le logo du Skunk Works que l'on pourrait traduire par « Atelier des putois ».....	64
Figure 4 – Blackbird SR-71 de Lockheed.....	65
Figure 5 – Chaîne de montage du SR 71 Blackbird dans un Skunk Works	66
Figure 6 – Le carré de la conception et les quatre opérateurs de C-K.....	85
Figure 7 – Représentation d'un diagramme C-K (Hatchuel & Weil, 2002c).....	85
Figure 8 – Cadre d'analyse D-I-M pour les capacités de conception innovante	90
Figure 9 – le générateur de gaz et quelques-unes de ses applications	108
Figure 10– Cartographie CK de conception du moteur aéronautique pour application haute vitesse et haute altitude avant la TAGA.....	112
Figure 11– Représentation avec la théorie C-K de l'héritage de la turbine à gaz aéronautique.....	113
Figure 12– F. Whittle devant une maquette d'un de ses concepts de turboréacteur	114
Figure 13 - Cartographie CK de conception du moteur aéronautique h. vitesse et altitude dans le mémoire de F. Whittle.....	115
Figure 14 - Cartographie CK de conception du moteur aéronautique h. vitesse et altitude avec turbine à gaz	116
Figure 15 – Lignées de produits et principales innovations de Turbomeca de 1938 à aujourd'hui.....	121
Figure 16 – Synoptique du récit des capacités de conception innovante à Turbomeca	122
Figure 17 – Joseph Szydlowski devant une tuyère de turbine à gaz	123
Figure 18 - Cartographie C-K du raisonnement de conception menant à la conception de la turbine à gaz de petite puissance la TT 782 par J. Szydlowski et Turbomeca	134
Figure 19 - Représentation d'une famille de moteur de Turbomeca.....	137
Figure 20 – Cycle de Brayton dans le diagramme température / entropie (T, S).....	138
Figure 21- Comparaison de 2 cycles de Brayton pour des isobares différentes dans le diagramme (T, S).....	139
Figure 22– Comparaison de 2 cycles de Brayton pour des températures d'entrée turbine différentes dans le diagramme (T,S)	140
Figure 23– Un Fouga Magister en vol motorisé par des Marborés de Turbomeca	145
Figure 24– Hélicoptère Alouette II motorisé par un Astazou	146
Figure 25 – Cartographie C-K représentant le raisonnement de conception dans la période 1955-1980 à Turbomeca.....	157
Figure 26 – Cartographie C-K représentant le raisonnement de conception de 1950 à 1980	162

Figure 27 - Cartographie CK représentant les concepts et connaissances sur la période 2000-2008	169
Figure 28 - World oil peaking estimates as of October 2005 ; * prediction means that the demand of oil will probably not be met. (Koppelaar, 2005).....	172
Figure 29 – Impact environnemental des moteurs de Turbomeca de 1955 à nos jours.	175
Figure 30 - Cartographie CK représentant un raisonnement de conception inchangé après la prise de conscience des bouleversements externes	178
Figure 31 – Représentations des éléments associés à un <i>potentiel d'innovation de rupture</i>	188
Figure 32 – Activités de conception innovante du modèle entrepreneurial de Turbomeca 1945-1965	190
Figure 33 - Activités de conception innovante du modèle exploratoire de Turbomeca 1965-1980	192
Figure 34– Activités de conception innovante du modèle technocentré de Turbomeca 1965-1980	193
Figure 35- Evolution des capacités de conception innovante à Turbomeca durant la période 1945 - 2008.....	195
Figure 36 - Diagramme d'évolution des capacités de conception d'une entreprise	196
Figure 37 – Impact environnemental des moteurs de Turbomeca de 1950 à aujourd'hui et cibles ACARE	209
Figure 38 – Objectifs cognitifs et organisationnels pour l'innovation radicale	213
Figure 39– Processus de la méthode KCP et visualisation des deux niveaux opératoires	217
Figure 40 - Synthèse de notre recherche-intervention dans le cadre de Propulsion 2030.....	221
Figure 41– Potentiel d'innovation de rupture construit à partir de la méthode KCP	229
Figure 42 - Cartographie C-K représentant des voies d'amélioration de la turbine à gaz étudiées chez Turbomeca avant la méthode KCP	231
Figure 43 - Cartographie C-K représentant les voies d'amélioration des systèmes énergétiques et connaissances associées après la méthode KCP.....	232
Figure 44 - Évolution du réseau des avant-projets et de l'équipe de travail après le KCP	237
Figure 45 – Illustration d'un concept de voiture volante	243
Figure 46– Modélisation d'une transition organisationnelle par la conception	255
Figure 47- Protocole de construction de l'organisation de conception innovante à Turbomeca sur les deux niveaux théorique et opérationnel.....	267
Figure 48- Modèle DIMa représentant le cycle des 6 activités de conception innovante	269
Figure 49- représentation d'une activité.....	269
Figure 50- Activité de mise en évidence des incertitudes de l'écosystème	270
Figure 51- Activité d'intégration de connaissances du non-art.....	271
Figure 52- Activité de construction d'une exploration conceptuelle	272
Figure 53- Activité de nidification	273
Figure 54- Activité de mise en œuvre d'une incubation agile.....	273
Figure 55- Activité de dissémination interne et externe.....	274
Figure 56- Classification des propositions d'innovation pour Turbomeca	282

Figure 57- Proposition de cartographie de niveau 1 des processus de conception pour Turbomeca.	283
Figure 58- Cartographie de niveau 2 du processus « générer et piloter l'innovation de rupture ».	285
Figure 59- Méthodologie de construction du budget annuel nécessaire pour la conception innovante	293
Figure 60- Proposition d'un organigramme pour la conception innovante à Turbomeca	296

Table des tableaux

Tableau 1 – Synthèse des travaux au niveau individuel	48
Tableau 2 : Synthèse des travaux au niveau de l'équipe	58
Tableau 3 : Synthèse des travaux au niveau de l'organisation	69
Tableau 4 – Lacunes théoriques pour l'innovation radicale aux différents niveaux organisationnels	72
Tableau 5 – Synthèse des travaux théoriques pour l'innovation radicale multi-niveaux et proposition d'un cadre théorique unifié	75
Tableau 6 – Méthodologie d'analyse des capacités de conception innovante	106
Tableau 7 - Synthèse des capacités de conception innovante de Turbomeca sur la période 1938-1955 selon le cadre analytique D-I-M	135
Tableau 8– Synthèse des capacités de conception innovante durant la période 1955-1980.	158
Tableau 9– Synthèse de la période 1980-2000 à travers le cadre théorique D-I-M	163
Tableau 10- Synthèse des capacités de conception innovante à Turbomeca durant la période 2000-2008.	170
Tableau 11– Synthèse des capacités de conception innovante en 2008	179
Tableau 12– Approches organisationnelles et cognitives pour l'innovation radicale (Arnoux & Béjean, 2010)	214
Tableau 13– Synthèse des lacunes identifiées durant le projet PowerPlus	242
Tableau 14- Synthèse des lacunes identifiées lors du projet FlyingCar à travers D-I-M	244
Tableau 15- Synthèse des données collectées lors du projet SuperFast	246
Tableau 16 - Synthèse des lacunes organisationnelles et cognitives collectées à partir des projets de conception innovante et caractérisation des 6 grands types d'activités à intégrer dans l'entreprise	247
Tableau 17 - Synthèse des sources académiques pour l'analyse comparative des organisations de conception innovante	262
Tableau 18- Synthèse de nos sources pour l'analyse comparative sur l'organisation de conception	264
Tableau 19- Résumé des principes organisationnels et écueils tirés de l'analyse comparatives des organisations pour la conception innovante	265
Tableau 20- Synthèse des présentations et séances de travail à Turbomeca (hors équipe de recherche)	276
Tableau 21- Synthèse des présentations et séances de travail dans l'aéronautique	277

Tableau 22- Synthèse des présentations et séances de travail avec d'autres entreprises	278
--	-----

Table des encadrés

Encadré 1– Présentation de la méthode de résolution de problème TRIZ	47
Encadré 2 – Les 14 règles de Kelly Johnson pour la conduite d'un Skunk Works.....	68
Encadré 3 - Guide d'entretien semi-directif.....	105
Encadré 4 : Description de l'innovation technologique à l'origine de la création de Turboméca...	127
Encadré 5 : La mutation du service régulation.....	143
Encadré 6 : Exemple de conception alternative de moteur	148
Encadré 7 : La mission EDF	155
Encadré 8 : Une technologie éternellement émergente	167

PLAN GENERAL

REMERCIEMENTS	7
RESUME GENERAL	9
SOMMAIRE	15
INTRODUCTION GENERALE ET METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE	17
1. Objet de recherche : l'intégration de capacités d'innovation radicale	19
2. Problématique de recherche	23
3. Approche méthodologique	25
3.1. Recherche-intervention et statut du chercheur en contrat CIFRE	26
3.2. Présentation du terrain d'étude et de son intérêt pour la recherche.....	27
3.2.1. Sélection et pertinence du cas Turbomeca.....	27
3.2.2. Les étapes de la recherche et une combinaison de méthodes mobilisées.....	28
4. Organisation du document de thèse.....	32
 PARTIE I INTEGRER DES CAPACITES D'INNOVATION RADICALE : UNE APPROCHE PAR LA CONCEPTION.....	 37
 CHAPITRE 1 ANALYSE DES LIMITES DE LA LITTERATURE SUR LES CAPACITES D'INNOVATION RADICALE	 41
1. Intégrer des capacités par la résolution de problèmes – Le niveau individuel	43
2. Intégrer de capacités collaboratives pour l'innovation radicale – Le niveau de l'équipe....	49
2.1. Caractéristiques d'un « groupe de créativité ».....	49
2.2. Facteurs sociaux influençant la créativité de groupe	51
2.2.1. Espace psychologique sécurisant.....	51
2.2.2. Leadership	52
2.3. Processus cognitifs collaboratifs pour la génération de capacités d'innovation radicale	53
2.3.1. Shared Mental Models.....	53
2.3.2. Réflexivité	54
2.4. Une méthode pour des capacités d'innovation de groupe : le <i>brainstorming</i>.....	55
2.5. Des capacités de gestion de projet pour l'innovation radicale	56
3. Capacités organisationnelles pour l'innovation radicale	59
3.1. Cognition organisationnelle pour l'innovation radicale	59
3.2. Structure organisationnelle pour l'innovation radicale	62
3.3. Skunk Works, un exemple de structure organisationnelle pour les avions en rupture de Lockheed	64
4. Mise en évidence des lacunes théoriques et proposition d'un cadre unificateur par la conception	70
4.1. Synthèse et limites des approches conventionnelles pour intégrer des capacités d'innovation radicale	70
4.2. Choix du modèle Recherche - Innovation - Développement (R-I-D).....	73
Résumé du CHAPITRE 1	74
 CHAPITRE 2 APPROCHES DE LA CONCEPTION POUR INTEGRER DES CAPACITÉS D'INNOVATION RADICALE	 77
1. Les approches par la conception de l'innovation radicale.....	79
1.1. Design et art appliqué	80

1.2. <i>Design-driven innovation</i>	80
1.3. La conception comme processus	81
1.2.1. La conception systématique allemande	81
1.2.2. La conception axiomatique	82
1.2.3. L'approche d'Herbert Simon	82
1.4. Conception innovante et théorie C-K	83
1.5. Cahier des charges des capacités d'innovation radicale et fonction I	87
2. Proposition d'un cadre d'analyse pour la conception innovante : le modèle Design – Incubation – Mutation de l'écosystème	89
2.1. Design : les capacités de raisonnement de conception innovante	89
2.2. Incubation : les capacités de production de connaissance en rupture	89
2.3. Mutation de l'écosystème : les capacités d'interaction et de transformation de l'écosystème	90
Résumé du CHAPITRE 2	91
Conclusion de la PARTIE I	92
 PARTIE II L'INNOVATION RADICALE DANS UNE ENTREPRISE ETABLIE : ANALYSE HISTORIQUE DES CAPACITES DE CONCEPTION INNOVANTE DE TURBOMECA	95
 CHAPITRE 3 GÉNÉALOGIE DES CAPACITÉS DE CONCEPTION INNOVANTE À TURBOMECA	99
1. Méthodologie	101
1.1. Les premiers pas d'un objet : la genèse de la turbine à gaz en Angleterre (1928-1945)	102
1.2. Une généalogie des capacités de conception : la conception à Turbomeca 1945-2009	103
2. Les premiers pas d'un nouveau moteur (Le Cas Whittle)	107
2.1. Caractéristique de la turbine à gaz aéronautique	107
2.2. Limite du modèle de conception dominant	109
2.3. Efforts d'optimisation du modèle de conception dominant	111
3. La généalogie des capacités de conception innovante à Turbomeca	119
3.1. 1945-1955 : Szydlowski et l'héritage allemand de la Seconde Guerre mondiale, consolidation de la turbine à gaz aéronautique	123
3.1.1. Études et formation	123
3.1.2. 1938, la création de Turbomeca	128
3.1.3. La récupération des BE allemands et la naissance de la turbine à gaz française	130
3.1.4. La première Turbine à gaz de Szydlowski, TT782	132
3.1.5. L'ADN des moteurs de Turbomeca	133
3.2. 1955-1980 : le modèle exploratoire : des capacités d'essais pour universaliser la turbine à gaz	136
3.1.1. L'amélioration du générateur de gaz : l'expansion axiale	137
3.1.2. La génération de nouvelles variantes de moteurs : expansion radiale	144
3.1.3. Des moyens pour améliorer le cœur thermodynamique et explorer de nouvelles applications	150
3.3. 1980-2000 : la restructuration et l'orientation vers l'hélicoptère	159
3.3.1. La turbine à gaz, une technologie mature	160
3.3.2. L'arrivée de l'industrialisation unique : la disparition des capacités de prototypage	160
3.4. 2000-2008 : conception réglée et politique de démonstrateurs, principal vecteur pour l'innovation	164
3.4.1. Une stratégie monolignée, la turbine à gaz d'hélicoptère	164
3.4.2. Restructuration du processus de conception	165
3.4.3. Le renforcement de l'activité «démonstrateurs»	165
3.4.4. Un processus de conception unique	168
3.5. 2008 : Nouveaux défis et mise en place d'une démarche de conception innovante	171
3.5.1. Une prise de conscience de nouveaux défis par Turbomeca	171
3.5.2. Vers la réintégration de capacités de conception innovante : mise en place d'une démarche de conception innovante	180
Résumé du CHAPITRE 3 :	181

CHAPITRE 4 INTERPRETATION DE LA GENEALOGIE DES CAPACITES DE CONCEPTION INNOVANTE A TURBOMECA 183

1. La turbine à gaz, un potentiel d'innovation de rupture.....	185
2. Analyse des capacités d'innovation radicale à Turbomeca : le pouvoir explicatif du cadre D-I-M.....	189
2.1. Modèle 1 : La structure entrepreneuriale, Turbomeca, 1945-1965.....	189
2.2. Modèle 2 : La structure exploratoire pour une diversification, 1965-1990	191
2.3. Modèle 3 : La structure technocentrée, 1990-2000	192
Résumé du CHAPITRE 4.....	197
Conclusion de la PARTIE II.....	198

PARTIE III LES LECONS DE L'EXPERIENCE KCP : UNE *TRANSITION ORGANISATIONNELLE PAR LA CONCEPTION* 201

CHAPITRE 5 ORIGINE, DESCRIPTION ET ANALYSE DE LA METHODE KCP CHEZ TURBOMECA 205

1. Intérêt et motivation pour la mise en œuvre de la méthode KCP	207
1.1. Une réponse au contexte de rupture : la mise en œuvre de la méthode KCP	208
1.2. Apports et présentation de la méthode KCP	211
1.2.1. Limites des théories et méthodes usuelles pour l'étude de l'innovation radicale	211
1.2.2. Méthode KCP: Description et Organisation	215
1.2.3. Méthodologie de l'étude de cas	219
1.2.4. Description de la mise en œuvre de la méthode et de ses impacts sur l'entreprise	221
2. Déroulement de la méthode KCP.....	222
3. Impacts organisationnels et cognitifs de KCP	228
3.1. Impacts cognitifs : nouveau raisonnement de conception et régénération des voies de conception historique	229
3.2. Impacts organisationnels des voies en rupture.....	234
3.2.1. Nouveau rôle de l'expert dans le processus de conception.....	234
3.2.2. Transformation de <i>l'équipe de travail</i> et des avant-projets	235
3.2.3. Transformation du réseau et de la fonction du chef de projet.....	236
3.2.4. Mutation du positionnement stratégique de l'entreprise.....	237
4. Impact libérateur de la méthode KCP : l'émergence de trois projets de conception innovante	239
4.1. PowerPlus : démonstration des limites de la conception réglée pour conduire l'exploration	239
4.2. Le projet FlyingCar : un <i>crazy concept</i> comme plateforme d'apprentissage	243
4.3. SuperFast : explorations parallèles sur un verrou technologique.....	245
Résumé du CHAPITRE 5.....	248

CHAPITRE 6 INTERPRETATION DES IMPACTS DE LA METHODE : UNE *TRANSITION ORGANISATIONNELLE PAR LA CONCEPTION* 249

1. Interaction des processus organisationnels et cognitifs durant la méthode KCP.....	251
2. Notion de <i>Transition Organisationnelle par la Conception</i>	254
Résumé du CHAPITRE 6.....	255
Conclusion de la PARTIE III	256

PARTIE IV LA CONCEPTION INNOVANTE : PRINCIPES D'ORGANISATION D'UNE NOUVELLE FONCTION STRATEGIQUE..... 259

1. Méthodologie de construction de l'organisation de conception innovante.....	262
1.1. Analyse comparative d'organisations de conception innovante	262
1.2. Protocole de construction de l'organisation de conception innovante à Turbomeca.....	265

2. Proposition d'un modèle générique d'activités pour la conception innovante	268
2.1. DIMa : Conceptualisation de six grands types d'activités pour la conception innovante	268
2.2. Etapes de consolidation du modèle	275
3. Opérationnalisation du modèle pour Turbomeca	280
3.1. Proposition d'un processus pour la conception innovante	280
3.2. Opérationnalisation des activités	284
3.3. Détermination des ressources et budget de fonctionnement	292
3.4. Positionnement de l'entité dans l'entreprise et structure organisationnelle	294
Conclusion de la PARTIE IV	298
 CONCLUSION GENERALE	 301
1. Synthèse de la recherche	302
2. Nouveau langage pour les « organisations orientées conception »	306
2.1. Confirmation de l'intérêt d'une approche par la conception et nouveau langage pour les activités de conception innovante	306
2.2. Contribution aux travaux sur les <i>organisations orientées conception</i>	309
3. Perspectives de recherches	310
 BIBLIOGRAPHIE	 313
 TABLES DES LEGENDES	 322
Table des figures	322
Table des tableaux	324
Table des encadrés	325
 PLAN GENERAL	 326

Modéliser et organiser la conception innovante :

Le cas de l'innovation radicale dans les systèmes d'énergie aéronautiques

RESUME : L'objet de la thèse est l'étude de l'intégration de capacités organisationnelles pour l'innovation radicale dans les entreprises industrielles établies. Les travaux s'appuient sur l'étude longitudinale des processus de conception innovante d'un motoriste de l'aéronautique : Turbomeca. Si la littérature s'accorde à dire que la préparation de l'avenir des entreprises repose sur certains types de capacités pour l'innovation radicale, les processus d'intégration de ces capacités demeurent peu étudiés en sciences de gestion. En s'appuyant sur le champ de la conception innovante, notre recherche vise à modéliser et organiser les activités de conception pour intégrer des capacités d'innovation radicale dans une entreprise en répondant à trois questions de recherche : comment caractériser une situation d'innovation radicale ? Comment piloter et modéliser des transformations organisationnelles pour intégrer des capacités d'innovation radicale ? Quels principes organisationnels pour l'intégration de capacités d'innovation radicale de manière pérenne dans l'entreprise ? A partir d'un cadre théorique permettant l'étude des capacités d'innovation radicale relatives au Design (D), à l'Incubation (I), et à la Mutation (M) de l'écosystème, trois résultats principaux se dégagent :
1/ la généalogie des capacités d'innovation radicale de Turbomeca;
2/ la notion de *transition organisationnelle par la conception* pour caractériser les processus d'intégration de capacités d'innovation radicale s'appuyant sur des méthodes collaboratives de conception innovante ;
3/ un modèle générique de six grands types d'activités à piloter pour intégrer des capacités d'innovation radicale dans une entreprise établie, et structurer les *organisations orientées conception*

Mots clés : Conception innovante ; Innovation radicale ; Energie ; Aéronautique

Modelling and organizing innovative design :

The case study of radical innovation in aircraft power plants

ABSTRACT : The purpose of the thesis is to study the implementation of radical innovation capabilities within established firms. The work is based on the longitudinal in-depth study of the innovative design processes of an aircraft manufacturer: Turbomeca. While previous research works have recognized that preparing for the future requires distinctive capabilities for radical innovation, the processes of integration of these capabilities still lacks an empirically grounded understanding. Building on recent research works on the management of innovative design processes, our study aims at modeling the innovative design activities that have to be organized to integrate radical innovation capabilities within established firms. Three research questions are investigated: how can radical innovation situations be characterized? How organizational transitions can be managed to integrate radical innovation capabilities? What are the organizational settings that may sustain these radical innovation capabilities over time? Drawing on an analytical framework to study radical innovation capabilities that relates Design (D), Incubation (I) and Mutation (M) of the ecosystem, three main results are presented:
1/ the genealogy of Turbomeca design capabilities;
2/ the concept of *design organizational transition* to characterize the integration process of radical innovation capabilities based on collaborative innovative design methods;
3/ a generic model of six types of activities to operationalize radical innovation capabilities within established firms and organize design-oriented organizations (D2O).

Keywords : Innovative design ; Radical Innovation ; Energy ; Aeronautics

