La dynamique du bilan hydrique parcellaire au sein de l'espace rural est une question que plusieurs approches plus ou moins complexes se sont attachées à traiter, dans des finalités diverses. Plusieurs termes du bilan hydrique sont toutefois souvent énormément simplifiés ou non pris en compte (captation et ruissellement notamment) et *a fortiori* de même les aspects dynamiques qui les déterminent (travail du sol, rythme et caractéristiques des pluies, battance, etc.). Ces éléments semblent néanmoins montrer une certaine importance quantitative. Afin de développer un modèle de bilan hydrique complet, il était donc important de discuter du poids de chacun. Nous allons présenter ici la problématique de notre travail, et le restituer dans un cadre élargi.

1) Présentation de notre objet d'étude : la parcelle agricole

L'élément central de notre étude est une parcelle cultivée (taille de l'ordre de l'hectare), de caractéristiques moyennes équivalentes et que l'on pourrait schématiser comme suit (figure n°1):

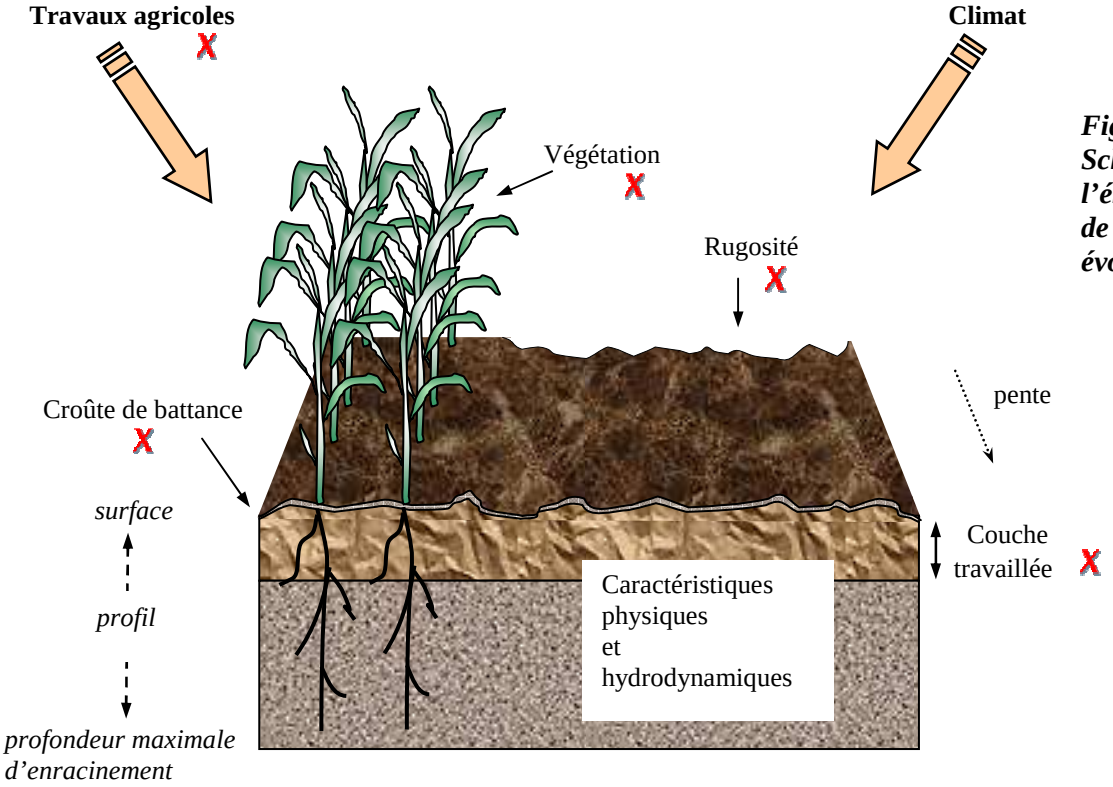


Figure n°1 : Schéma simplifié de l'élément étudié et de ses facteurs évolutifs

Cet élément est soumis à un ensemble de facteurs d'évolution anthropiques (activités agricoles) et naturels (climat essentiellement) : battance, croissance et mort du couvert végétal, évolution des caractéristiques hydrodynamiques de la tranche de sol travaillée, etc.

2) Les différents processus du bilan hydrique

La figure n°2 précise les principaux processus agissant sur le bilan hydrique, avec indication des principales interactions. Les processus en jeu apparaissent nombreux et fortement interactifs, et seront expliqués pour la plupart au fil des chapitres. Notons que toutes les liaisons ne sont pas indiquées pour une question de lisibilité de la figure, et également certains processus *a priori* trop marginaux ne sont pas représentés, tel que les transferts horizontaux de l'eau sous la surface du sol. Les éléments centraux sont les pluies et la réserve en eau du sol. Une partie de la pluie ne participe pas à la recharge de la réserve du sol à cause des processus de captation par le couvert végétal et de ruissellement. La battance de la surface du sol sous l'effet des pluies influence largement ce dernier processus, par la formation de la croûte de battance (limitant les capacités d'infiltration) et l'abaissement de la capacité de flaquage. L'humidité du sol de surface a également un poids sur l'infiltration. Le travail du sol est tout à fait essentiel pour l'infiltration / ruissellement, notamment car il détruit la croûte de battance, maximise la capacité de flaquage, modifie les capacités

d'infiltration de la tranche de sol travaillée. Outre les apports par infiltration, le stock d'eau du sol varie également fortement en fonction de l'évapotranspiration, et est soumis à une perte d'eau par drainage profond (rechargeant les nappes phréatiques), et des gains par « remontées capillaires ». La pluie efficace (voir notamment DASTANE, 1977, GUYOT, 1997) correspond finalement à la pluie incidente diminuée de la captation et du ruissellement, et augmentée d'un terme secondaire : l'abaissement de la transpiration du couvert sous l'effet de la captation.

La captation et le ruissellement, notamment, sont très généralement négligés dans les modèles de bilan hydrique, sauf dans certains cas particuliers : le ruissellement est intégré dans les modèles calculant l'érosion, et la captation est prise en compte pour le bilan hydrique des forêts. Comme nous allons le voir, différents éléments indiquent toutefois que l'importance de la captation et du ruissellement peut être réelle sur des parcelles agricoles, ce qui implique le développement de modèles spécifiques couplés au bilan hydrique (captation, infiltration, flaquage, ruissellement) avec intégration de certains processus essentiels (notamment la variabilité des caractéristiques hydrodynamiques de la tranche de sol travaillée, l'évolution de la capacité de flaquage et de la croûte de battance).

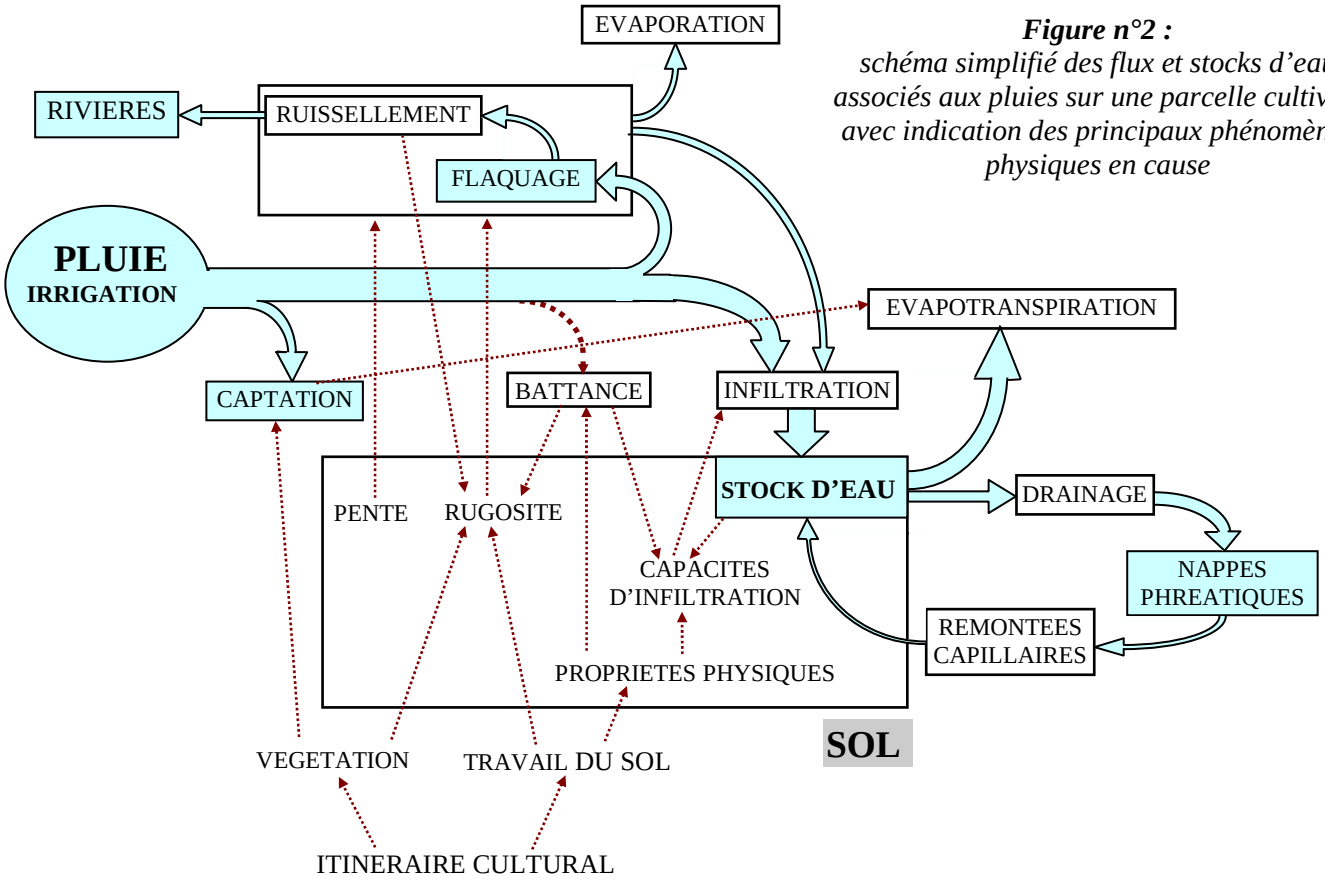


Figure n°2 :
schéma simplifié des flux et stocks d'eau associés aux pluies sur une parcelle cultivée, avec indication des principaux phénomènes physiques en cause

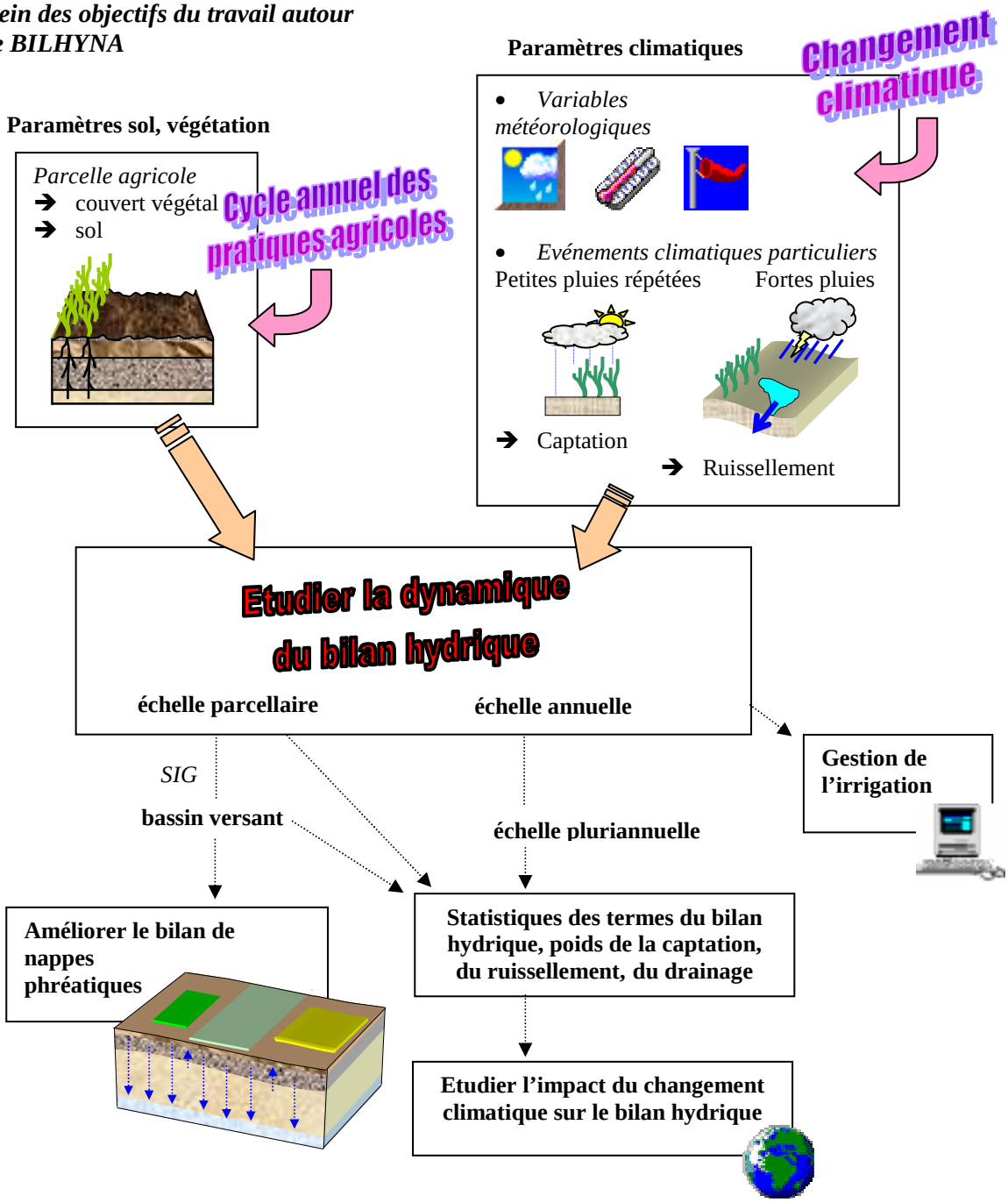
3) Cadrage du projet de thèse par rapport aux objectifs des travaux du Laboratoire avec le modèle de bilan hydrique BILHYNA

Le modèle BILHYNA (TUZET *et al*., 1992) (présenté en détail dans le chapitre I), de type « agrométéorologique », a été développé initialement dans une finalité « agronomique » avec l'étude de la consommation en eau des cultures, pour la gestion de l'irrigation. De nouveaux projets s'y sont greffés depuis, et notamment l'amélioration du bilan de nappes phréatiques (projet en cours avec la participation du Laboratoire), impliquant de calculer les termes de transferts hydrologiques (ruissellement, drainage profond). Plusieurs lignes directrices sont poursuivies, notamment de développer des modèles à base physique et prenant en compte les processus majeurs sous une forme simple, afin de permettre une extrapolation assez facile à des situations très variées de sol, climat et végétation.

La présente étude a des objectifs très étroitement liés à ceux de ce modèle de bilan hydrique, sur lequel elle se greffe. La figure n°3 résume ces données. Nous visons en premier lieu à étudier la dynamique du bilan hydrique parcellaire, à l'échelle de plusieurs années pour dégager une idée du poids statistique de certains processus (captation, ruissellement, drainage). Cela nécessite d'intégrer les pratiques agricoles et leurs conséquences sur les paramètres de sol et de végétation du système, ainsi que les variables et paramètres climatiques pertinents. Nous nous limitons bien entendu dans le projet actuel à la dimension parcellaire. Les problématiques plus extrapolées ne sont pas abordées dans le présent travail : amélioration du calcul du bilan de nappes phréatiques, impact du changement climatique sur le bilan hydrique.

Puisque la plupart des modèles négligent la captation et le ruissellement, menons à présent une petite analyse préalable des termes du bilan hydrique.

Figure n°3 :
Schéma simplifié de situation du projet de thèse au sein des objectifs du travail autour du modèle BILHYNA



4) Eléments quantitatifs des termes du bilan hydrique - place de la captation et du ruissellement

Le tableau n°1 présente les valeurs moyennes annuelles des principaux termes du bilan hydrique sur le territoire français. Ces ordres de grandeur moyens indiquent que le ruissellement est loin d'être négligeable, et qu'il représente un terme assez proche du drainage profond. Ces chiffres doivent être nuancés considérablement en fonction des conditions locales, car il est indéniable que le ruissellement est extrêmement variable selon notamment la pente, les caractéristiques du sol, le type de climat, de couvert végétal et de (non-) travail du sol. La captation de l'eau de pluie par le feuillage n'est pas représentée - traduisant le manque de références sur l'importance de ce processus -, mais des données indiquent toutefois sa grande importance dans certaines conditions de végétation et de climat. Précisons maintenant les valeurs de la captation et du ruissellement en fonction de la bibliographie.

1) Les pluies (810 mm)	**100 %**	**450 Gm3**
Reprise par l'évaporation (490 mm)	60 %	270 Gm3
Bilan des apports (325 mm)	40 %	180 Gm3
2) Les apports	**100 %**	**180 Gm3**
Ecoulements de surface (16 % des pluies)	40 %	70 Gm3
Ecoulement de profondeur (24 % des pluies)	60 %	110 Gm3

Tableau n°1 : Estimation du bilan hydrique moyen annuel pour le territoire français *(PERRIER, 1996)*

- ***Valeurs de la captation***

La captation (présentation détaillée dans le chapitre I) a été très largement plus étudiée pour les forêts et les broussailles (« schrubs ») que pour les végétations plus basses telles que grandes cultures et prairies. Egalement, la captation a surtout été étudiée à travers le terme d'interception de l'eau de pluie, n'individualisant pas le terme d'évaporation de l'eau interceptée et ne traitant pas l'impact de l'interception sur la transpiration de la végétation. Nous abordons ici des données de la bibliographie afin de situer un premier ordre de grandeur de la captation selon les grands types de végétation. Nous noterons bien que la captation n'est pas directement définissable selon le type de végétation seulement, tel que nous le montrerons à travers la modélisation.

Les chiffres indiquent d'énormes variations selon le type de climat - saisons en particulier - et de couvert (voir notamment LORENS *et al*., 1997), et il est donc plus pertinent de se fier aux études « statistiques » portant sur une ou plusieurs années de mesures. On pourra notamment se reporter à un article récent qui présente un large bilan bibliographique et critique des chiffres de la captation et de leur variabilité (CROCKFORD et RICHARDSON, 2000). Selon des grandeurs très moyennes, JACQUES (1996) indique une interception de 20-30% des pluies annuelles, en précisant : 3% au Nigeria, 8% en Malaisie, 12% dans les forêts tropicales de Côte d'Ivoire, 20% au Zaïre, 31% à l'Ile Maurice, 35% en Ouganda, 38% en Inde (plantation de *Shorea robusta* de 40 ans d'âge), et jusqu'à 65-70% dans la forêt subtropicale du Brésil.

En forêt, l'interception est nettement plus forte pour les essences résineuses (12.5-39% pour les pins, 11-17.9% pour les acacias, 34% pour les épicéas, 20-42% pour les sapins) que feuillues (6-23%, dont 18-22.8% pour *Quercus rubra*) (KELLER , 1974 ; CLAUDEVILLE, 1976 ; MDBSN-AFBSN, 1976 ; LANKREIJER *et al*., 1993 ; CROCKFORD et RICHARDSON, 2000). Les forêts tropicales et subtropicales humides (« rainforests ») marquent une interception de 9.4 à 39% des pluies annuelles (CROCKFORD et RICHARDSON, 2000). La litière végétale des forêts participe

également assez nettement au processus (CLAUDEVILLE, 1976 ; CROCKFORD et RICHARDSON, 2000).

Le taux d'interception sur de grandes cultures pleinement développées ne devrait *a priori* pas être très inférieur à celui observé sur des peuplements boisés (MDBSN-AFBSN, 1976). JACKSON, 2000, a ainsi estimé sur un système agroforestier du Kenya (climat semi-aride) une interception de 10.9%. Egalement, quelques très rares chiffres sur les végétations basses pures indiquent 10% de captation sur un champ et 3.9% pour un « mauvais pâturage » (NEY, 1920, cité par CLAUDEVILLE, 1976), 14-22% pour une prairie de graminées mélangées en climat aride avec saison froide (COUTURIER et RIPLEY, 1973), ou encore pour de petites études sur culture de maïs, 7% (8 jours dont 2 avec pluies et 1 avec irrigation, NORMAN et CAMPBELL, 1983) et 40.7% (8 pluies, PARKIN et CODLING, 1990, cités par CROCKFORD et RICHARDSON, 2000).

Le flou de l'ensemble des données indique d'importants besoins de recherches, surtout pour les grandes cultures. Nous pouvons néanmoins préciser que la captation sur ces dernières est un processus largement non négligeable, de l'ordre (très grossièrement) peut-être de 10% des pluies brutes. L'impact réel sur le bilan hydrique du sol n'est pas estimé dans l'essentiel des études.

- ***Valeurs du ruissellement***

Le ruissellement (mécanismes et modélisation détaillés dans le chapitre suivant) est extrêmement variable en fonction des conditions locales (caractéristiques du sol de surface et d'une éventuelle litière végétale, abondance et intensité des pluies, type de couvert végétal, rugosité, longueur et inclinaison de la pente, etc. - voir notamment FOURNIER, 1960) et selon l'échelle spatiale considérée.

Les régions forestières tout d'abord ont un taux de ruissellement annuel de l'eau de pluie très variable : par exemple, 1% en Côte d'Ivoire, 30% pour l'ensemble de l'Afrique, 55% en Guyane française jusqu'à 70% dans certaines régions de pluviosité annuelle de plus de 2 500 mm (JACQUES, 1996).

Certaines régions agricoles sont connues pour leur « caractère très ruisselant » (notamment la région de Caux, France), d'autres se caractérisent à l'opposé par une relative absence de ruissellement (notamment la Beauce, France - LE BISSONAIS, communication personnelle).

Type de sol	**Pluie moyenne annuelle (mm)**	**Longueur de la pente (m)**	**Inclinaison de la pente (%)**	**Culture**	**Ruissellement moyen annuel (% des pluies)**
Limon argileux (Miles, Texas)	526	30	0 1 2	Coton	6.4 15.1 15.5
« Silty clay loam » (Madison, S.D.)	1310 (*) 1359 (*) 410 (*)	22.1 22.1 22.1	6 6 6	Maïs Maïs TP (+) Avoine	24.6 22.9 21.0
Limon fin (Muskingum, Ohio)	926	22	8 12	Maïs	30.4 42
Argile (Houston, Texas)	889	22	2 4	Maïs	13.4 16.6
Limon finement sableux (Kirvin, Texas)	1 041	22	8.75 16.5	Coton	20.9 14.6
Limon (Shelby, Missouri)	940	27.5	3.7 8	Maïs	29.4 28.3

(*) pluie totale traitée, non rapportée à une année *(+) TP = avec labour printanier (« turn plough »)*

Tableau n°2 : exemples de valeurs de ruissellement mesuré sur parcelles agricoles

Les études sur parcelles agricoles ont porté très généralement sur des placettes de quelques dizaines de mètres carrés à un hectare au plus et montrent des ordres de grandeur relativement cohérents du ruissellement. Le passage aux échelles intermédiaires entre la parcelle et la grande région ou le pays n'est le plus souvent pas traité à cause de la complexité des processus. Une série

d'études aux USA illustrent les ordres de grandeur du ruissellement sur parcelle cultivée, selon les types de sols (depuis FOURNIER, 1960, sauf sol de Madison : ZHANG *et al*., 1995a) (tableau n°2). Nous retrouvons ici des grandeurs hétérogènes, sous l'influence des types de travail du sol, de la sensibilité à la battance, etc. Sur des placettes de 22m x 4m, des coefficients annuels de ruissellement ont été estimés de 0.3 à 34.2% (moyenne 10%) sur cultures pérennes (alfalfa, trèfle, « Bermuda grass », brome) (ZHANG *et al*., 1995b) et de 3.5 à 40.7% (moyenne 23.6%) sur cultures en rangs (« row crops » : maïs, coton, avoine, soja, pomme de terre) (ZHANG *et al*., 1995a). Selon WISCHMEIER, 1966 (cité par ZHANG *et al*., 1995), les valeurs sont en moyenne plutôt de 7% sur cultures pérennes et de 12% pour les cultures en rangs. Selon ces données, sur des sols cultivés de texture proche de celui de Grignon (limon argileux), le taux de ruissellement pourrait être de l'ordre de 6 à 25%.

Ces résultats sont toutefois peut-être des estimations hautes, car ils ont été obtenus à des échelles de quelques dizaines de m², alors que le ruissellement a été montré par exemple de 1.5 à 6 fois inférieur (facteur 2 en moyenne) entre les dimensions de 20m² et 500m² en Pays de Caux (LE BISSONAIS et MARTIN, 1999). Le lien entre les échelles parcellaire et de bassin versant ou de région est quant à lui très complexe et sort trop largement de notre propos.

Compte-tenu de l'ensemble des données bibliographiques, il se dégage un ordre de grandeur assez conséquent du ruissellement sur parcelle agricole, et ceci même pour des pentes très faibles, et il semble donc tout à fait indispensable de modéliser ce processus. Il n'est pas du tout évident de situer notre site expérimental parmi les données précédentes, et une étude spécifique et approfondie est donc à mener.

- ***Bilan***

Captation et ruissellement sont de toute évidence des phénomènes non négligeables à l'échelle de parcelles agricoles, mais dont le poids sur le bilan hydrique des cultures et sur la quantité de drainage profond semble bien peu documenté. Nous allons ainsi chercher dans notre étude à compléter le modèle BILHYNA avec des modèles captation et du ruissellement, afin d'en étudier le poids sur le bilan hydrique.

5) Modélisation du bilan hydrique - BILHYNA, place de la captation et du ruissellement

Les hypothèses de modélisation du bilan hydrique, le nombre de processus pris en compte, les échelles spatiales et temporelles (étroitement liées), la complexité des équations, sont autant de paramètres directement fonction des objectifs de chaque modèle. Nous présentons ici nos objectifs et leurs conséquences sur les choix de modélisation, ainsi que la situation de notre base de travail, le modèle BILHYNA, par rapport à d'autres du même type.

- ***Caractéristiques comparées du modèle BILHYNA - stratégies de travail***

Il existe de très nombreux modèles qui s'attachent à des objectifs assez similaires aux nôtres, avec des degrés de complexité et des échelles spatiales et temporelles très variables. Situons maintenant plus précisément notre approche, et voyons en quoi elle est particulière.

Tout d'abord, nous remarquerons qu'autant l'infiltration / ruissellement a fait l'objet d'un nombre considérable d'études et de modélisations, autant la captation a été bien peu étudiée et très rarement intégrée pour le bilan hydrique des cultures. Nous la trouvons par exemple intégrée dans les modèles LISEM (DE ROO *et al*., 1994 ; DE ROO et OFFERMANS, 1995 ; JETTEN *et al*., 1997), ACRU (SCHULZE, 1989, 1994).

Les échelles sont fortement déterminées par les caractéristiques des processus étudiés. Ainsi, tandis que le calcul de l'évapotranspiration des cultures donne des résultats désormais satisfaisants à l'échelle parcellaire et pour un pas de temps journalier (notamment avec le modèle BILHYNA, sauf cas particuliers de couverts hétérogènes et à condition de disposer des données météorologiques pertinentes), l'étude des transferts d'eau dans le sol - et particulièrement en conditions proches de la saturation - reste beaucoup plus problématique. L'hétérogénéité des caractéristiques du sol, le

nombre et la variabilité spatiale et temporelle des processus, la rapidité des phénomènes liés à la pluie, etc., sont autant de facteurs qui nécessitent un traitement fin de l'infiltration / ruissellement. A cela s'ajoute la complexité du cheminement de l'eau de ruissellement au sein d'un paysage, qui nécessite un traitement spatial complexe sous forme d'éléments de terrain de caractéristiques individualisées. Des modèles relativement complexes tentent de traduire les processus à l'échelle du bassin versant (notamment le modèle TOPMODEL - voir notamment BEVEN, 1997). D'autres approches, très simples, calculent le ruissellement à l'échelle du bassin versant à partir de classes de critères très simplistes gérées au sein d'un S.I.G., et parviennent néanmoins à fournir des résultats assez bons après calibration (voir par exemple CERDAN, 2001). La captation fait *a priori* partie des processus n'exigeant pas une définition temporelle extrêmement précise et plutôt homogènes à l'échelle parcellaire. Ces derniers points seront discutés ultérieurement.

En règle générale, plus la dimension spatiale est grande et plus les processus sont simplifiés ; ceci est tout à fait notable dans la modélisation de l'infiltration / ruissellement.

Dans le cas de BILHYNA, l'échelle spatiale est avant tout la parcelle, et suggère donc un intermédiaire entre les approches locales très complexes et les approches généralement simplistes de type bassin versant. La stratégie du Laboratoire est en outre de traiter les processus de manière simple mais robuste, en faisant appel le plus possible à des bases physiques, afin de pouvoir manier les relations entre phénomènes et expliquer rigoureusement les résultats : ceci exclut d'emblée les modèles trop simplistes. Notre stratégie est donc assez bien fixée, une difficulté essentielle restant le choix des modèles et des processus à étudier.

Les modèles sont habituellement assez tranchés dans leurs objectifs, et s'attachent notamment à calculer soit le bilan hydrique des cultures, notamment pour des études de flux de carbone et d'azote : CERES (GABRIELLE *et al*., 1995), STICS (BRISSON *et al*., 1998) , etc., soit le ruissellement, pour des besoins d'érosion essentiellement : modèles PARCHED-THIRST (MAHOO *et al*., 1995 ; YOUNG et GOWING, 1996), TOPMODEL (BEVEN, 1997), STREAM (CERDAN, 1997, 2001 ; SOUCHERE *et al*., 1999 ; KING, 2001 ; LE BISSONNAIS *et al*., 1998), WEPP (FLANAGAN *et al*., 1995), etc. Rares sont les modèles, tels que SWAGSIM (PRATHAPAR *et al*., 1996 ; PRATHAPAR, 1997), qui se veulent suffisamment généralistes pour combiner les objectifs. Pour notre part, le ruissellement constitue à la fois un terme de correction du bilan hydrique et un transfert hydrologique potentiellement important pour le calcul de la recharge, et donc du bilan, des nappes phréatiques. Néanmoins, nous restons éloignés de la grande complexité de bon nombre de modèles d'infiltration / ruissellement, résolvant notamment l'équation de RICHARDS. Notre stratégie - comme nous le verrons - nous rapprochera par certains aspects de modèles tels que PARCHED-THIRST, WEPP, ou encore LISEM.

Nous noterons enfin que le réalisme du modèle de sol est généralement très faible dans les modèles de type agrométéorologique (une à trois couches décrivant le sol), et beaucoup plus élevé dans les modèles d'infiltration / ruissellement. BILHYNA quant à lui intègre une véritable définition multicouches du sol, qui sur ce point l'apparente aux modèles les plus précis.

- ***Modélisation des pluies***

Les pluies sont l'entrée essentielle de tous les modèles. Comme nous le verrons en détail, la définition temporelle est cruciale pour calculer l'infiltration / ruissellement, et dans une moindre mesure la captation. L'essentiel des modèles de bilan hydrique la traite de manière simpliste, souvent sous forme de cumuls journaliers (notamment BILHYNA), ce qui est incompatible avec les préoccupations de calcul de la captation et du ruissellement. Certaines approches utilisent des données temporellement très précises des pluies (voir notamment ESTEVES *et al*., 2000) mais l'essentiel des études emploie des modèles simplistes, sous forme de pluie d'intensité constante et sans traitement particulier de la durée de chaque pluie. Parfois la pluie fait l'objet de modèles de désagrégation de données journalières, comme dans WEPP. La modélisation des pluies à partir de mesures horaires semble insuffisante, et nous proposerons donc des moyens originaux de le traiter.

- ***Bilan***

Le modèle BILHYNA, dans la famille des modèles de bilan hydrique agropédoclimatiques, a des caractéristiques de précision et de robustesse (malgré une certaine simplicité de définition temporelle) qui en font un modèle particulièrement réaliste. Toutefois, dans l'objectif d'intégrer le calcul de la captation et du ruissellement, nous avons rapidement établi que son fonctionnement devait être très largement complété et adapté, nécessitant en particulier un traitement spécial des pluies. Ces étapes seront largement détaillées au fil des chapitres suivants. Nous verrons que l'ensemble forme alors un modèle tout à fait original, dont nous testerons la robustesse.

6) Conclusion

Nous avons précisé les objectifs et le cadre stratégique de notre étude. Nous avons également mis en avant les besoins d'étudier la captation et l'infiltration / ruissellement, et de développer un traitement particulier des pluies. Les chapitres suivants vont ainsi présenter une analyse des caractéristiques et de la modélisation des pluies, de la captation et de l'infiltration / ruissellement, appuyée par des résultats numériques et expérimentaux. Ces volets tendent vers une étude du bilan hydrique complet, avec dégagement des conséquences sur le poids statistique des processus, en particulier des transferts hydrologiques (ruissellement, drainage) et du rôle de la captation. Le tout se place dans une démarche de prise en compte de l'essentiel des processus dynamiques à l'échelle de la parcelle agricole, au sein d'un modèle de bilan hydrique agrométéorologique à pas de temps journalier, et participe à remplir les objectifs fixés par le Laboratoire.

Nous développerons ainsi successivement la présentation des différents modèles et leur intégration dans le bilan hydrique, les différentes expérimentations, la détermination des paramètres des modèles intégrant les aspects dynamiques et complétée par des études de sensibilité, et enfin l'analyse des résultats du bilan hydrique et des transferts hydrologiques.