80 803

NS 175 756
t.2

THÈSE

Présentée à

L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'ENPC
Spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement

par

Martine GUITON

Sujet

RUISSELLEMENT ET RISQUE MAJEUR
Crue centennale en milieu urbanisé
Etudes de cas : le Grand-Bornand, Nîmes, Paris et Vaison-la-Romaine

soutenue à Paris, le 3 février 1994

devant le jury composé de :

M. R. POCHAT	Président
Mme Y. DEWOLF	Rapporteur
M. B. CHOCAT	Rapporteur
M. J.L. DURVILLE	Examinateur
M. J. P. MAGNAN	Directeur de thèse
M. M. BOURGES	Invité
M. J.F. COSTE	Invité

E.N.P.C.
DOC09236
IE 2

06

T A B L E D E S M A T I E R E S

RUISSELLEMENT ET RISQUE MAJEUR
Crue centennale en milieu urbanisé

Etudes de cas: le Grand-Bornand, Nîmes, Paris et Vaison-La-Romaine

T O M E -2-

CHAPITRE 3 FACTEURS AGGRAVANTS ET LIMITANTS ET TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LE RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT

3.1. LES EFFETS DE LA LEGISLATION SUR LE RISQUE MAJEUR URBAIN DE RUISSELLEMENT 200

3.1.1. Les lois ont-elles aggravé ou limité le risque de ruissellement? 200
3.1.2. Classement des textes législatifs par rapport au risque majeur de ruissellement 204
3.1.3. Evolution souhaitable des textes législatifs 208

3.2. LES FACTEURS AGGRAVANTS DU RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT 218

3.2.1. Généralités 218
3.2.2. Les facteurs géomorphologiques 218
3.2.3. les facteurs anthropiques 236
3.2.4. Les incertitudes sur les données climati--ques 252

3.3. LES FACTEURS LIMITANT LE RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT

3.3.1. Généralités 292
3.3.2. Facteurs s'opposant à l'évolution catastrophique du ruissellement 292
3.3.3. Facteurs limitant les effets des écoulements catastrophiques 302

3.4. DES TECHNIQUES DE LUTTE URBAINE ET PERI-URBAINE CONTRE LE RUISSELLEMENT RISQUE MAJEUR

3.4.1. Des techniques de lutte en urbanisme 318
3.4.2. Des techniques de lutte en architecture 320
3.4.3. Des techniques de lutte en paysage 338
3.4.4. Des techniques de lutte urbaine en infrastructure ,voirie publique 368

CHAPITRE 4 GESTION PREVENTIVE DU RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT DANS UN CENTRE URBAIN

4.1. INTRODUCTION

4.2. OBJECTIFS

4.2.1. Origine du risque de ruissellement 448
4.2.2. Démarche pour contrôler le risque de ruissellement 448
4.2.3. Limites de l'étude 450

4.3. GESTION PREVENTIVE DU RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT.Etudes sur le cas de Nîmes 450

4.3.1. Généralités 450
4.3.2. L'existant 450
4.3.3. Modifications des ca icités d'écoulement et de stockage 450
4.3.4. Les éléments de l'an yse économique analyse coût-avantage 468

4.4. DEMARCHE GENERALE DE GESTION EVENTIVE DU RISQUE DE RUISSELLEMENT DANS LES CEN ES URBAINS 477

4.4.1. Introduction 477
4.4.2. Caractérisation du ri e 477
4.4.3. Choix d'une solution 477
4.4.4. Utilisation d'une aide ogistique existante : les servic municipaux 478

CONCLUSION GENERALE 482

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 492

TABLE DES FIGURES 513

T O M E -3- A N N E X E S

A N N E X E -1-

La gestion du risque majeu de ruissellement dans le département de la eine-Saint-Denis (France) 516

A N N E X E -2-

La gestion du risque majeur le ruissellement dans le Canton de Vaud (Su se) 607

A N N E X E -3-

Textes juridiques et administ atifs 679

TROISIEME CHAPITRE

FACTEURS AGGRAVANTS ET LIMITANTS ET TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LE RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT

Le chapitre 3 comprend quatre parties :

3.1. LES EFFETS DE LA LEGISLATION SUR LE RISQUE MAJEUR URBAIN DE RUISSELLEMENT

3.2. LES FACTEURS AGGRAVANTS DU RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT

3.3. LES FACTEURS LIMITANT LE RISQUES MAJEUR DE RUISSELLEMENT

3.4. TECHNIQUES DE LUTTE URBAINE CONTRE LE RUISSELLEMENT RISQUE MAJEUR

3.1. LES EFFETS DE LA LEGISLATION SUR LE RISQUE MAJEUR URBAIN DE RUISSELLEMENT

3.1.1. Les lois ont-elles aggravé ou limité le risque de ruissellement ?

Pour examiner si les lois, règlements, circulaires techniques ont participé à l'aggravation ou à la limitation du risque, nous nous appuierons sur les interviews que nous avons menées en Suisse en 1990 auprès des responsables du "Service des Eaux et de la Protection de l'Environnement"(1) du Canton de Vaud à Lausanne.

3.1.1.1. Influence de la législation en Suisse (Canton de Vaud) au cours des 40 dernières années

Interviews
M. MATTHEY, Responsable du "Service des Eaux et de la Protection de l'Environnement" de Lausanne.
M. JATON, Responsable du "Service des Améliorations Foncières" du Canton de Vaud.
M. MUSY, Professeur à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Responsable du Département du Génie Rural.

a- Les lois successives sur l'assainissement et la protection des eaux

- La première loi de 1951 donnait l'obligation légale de recueillir toutes les eaux et de les épurer.
- La loi de 1974 sur la protection des eaux a aggravé la situation, selon les responsables. Tout le monde, aussi bien en milieu rural qu'en milieu urbain, s'est cru obligé de récolter les "eaux claires" au lieu de les laisser poursuivre leur infiltration naturelle. Ce sont donc les lois qui ont organisé la situation actuelle de saturation des ruisseaux et des stations d'épuration.
- Ce n'est qu'en 1985 que la Suisse a réalisé que les ruisseaux n'avaient pas une capacité infinie pour accueillir tous les rejets.
- La dernière loi du 18 décembre 1989 modifie le concept d'assainissement :

• Les communes ont en premier lieu l'obligation de ré-infiltrer, sauf dans les zones de protection des eaux de sources qui sont étendues et surveillées. Si l'infiltration n'est pas suffisante, elles doivent construire des ouvrages de rétention, même en milieu rural.
• Aucune commune ne peut obtenir un nouveau permis de construire ou d'aménagement, urbain ou agricole, sans avoir présenté un plan de traitement du risque hydraulique pour l'ensemble du bassin-versant.

---

(1) Ce service a la charge de la gestion des eaux potables, des eaux pluviales et des eaux d'égouts, et de la protection de l'environnement

b- Découvertes

Les responsables hydrauliciens du Canton de Vaud ont découvert :

- qu'il existe des archives centennales dans les entreprises et dans les familles ;
- que des travaux contradictoires hydrauliques ont été faits, refaits, défaits deux à trois fois dans le siècle pour l'aménagement des mêmes rivières (endiguement, rectification de lit, destructions des endiguements, etc.) ;
- que les riverains refusent de payer maintenant pour les nouveaux travaux de réaménagement hydraulique liés à la lutte contre les inondations, arguant, lettres conservées à l'appui, qu'ils avaient déjà payé pour ces travaux exécutés contre leur gré et qu'ils jugeaient à l'époque nuisibles, pour des travaux exécutés entre les deux guerres.

Les riverains refusent donc de payer deux fois pour revenir, somme toute, à l'état initial naturel des lieux du début du siècle.

c- Conclusions

Les services en ont conclu que les lois sur l'hydraulique poussent à régler un problème immédiat, par exemple un débordement ponctuel, mais qu'en réglant ce problème ponctuel, la loi engage de nouveaux risques non prévus, pour les 20 ans à venir, et que les lois ne sont que des réponses provisoires à des problèmes successifs, en fonction de l'état actuel des connaissances.

3.1.1.2. Influence de la législation en France

Document : DEA de l'auteur sur le ruissellement, sol et végétation dans les travaux d'infrastructure [106]

Au cours de la période 1945-1990, nous constatons en France une double évolution des règlements urbains :

- en assainissement, une évolution sur l'évacuation des eaux de pluie,
- en urbanisation, une évolution de la construction en zone inondable.

a- Assainissement

a1- Evolution sur l'évacuation des eaux de pluie

• Entre 1945 et 1960 : principe d'évacuation rapide de toutes les eaux

La circulaire interministérielle de 1949/C.G. 1333, la circulaire CAQUOT, sur laquelle s'est appuyée le plan MARSHALL, a organisé les réseaux d'assainissement urbain sur tout le territoire français (principe de base "l'évacuation des eaux de pluie le plus rapidement possible", et la séparation des réseaux d'eaux pluviales et d'eaux d'égouts).

Les corps d'Etat ont suivi le principe de la circulaire CAQUOT, principe de rivières mises en canal, busées, de sols agricoles drainés, ... le tout représentant des travaux à coût très élevé qui demandaient beaucoup de temps de réalisation.

Le nombre des corps d'Etat qui ont regroupé les eaux de ruissellement pour les évacuer vers un exutoire hypothétique est impressionnant.

- la plupart des ingénieurs chargés de travaux hydrauliques canalisent les rivières, suppriment et colmatent les méandres pour préserver les terres riveraines proches, sans envisager les problèmes de l'aval ;
- la plupart des ingénieurs urbains recouvrent les rivières et imperméabilisent les sols des villes ;
- la plupart des agriculteurs remembrent, débocagent, drainent leurs terres et assèchent les marais en évacuant les eaux vers les exutoires ;
- même les ingénieurs forestiers, qui ont l'obligation de boiser, trouvent que "la végétation des berges des torrents à croissance rapide et de faible utilité est dangereuse pour le BON ECOULEMENT de la fraction ruissellée des averses d'orages" (d'après M. PONCET [163]).

• Entre 1960 et 1980 : problèmes nouveaux

a2- Principe de rétention ponctuelle concentrée

Le principe de Caquot d'évacuation rapide sans frein s'est trouvé confronté à de nouveaux problèmes : saturation, inondations, destructions d'ouvrages neufs, ...

1ère réponse : l'instruction technique interministérielle de 1977 dite LORIFERNE

L'instruction technique LORIFERNE est basée sur une rétention d'eaux pluviales à l'aide de bassins de retenue, c'est-à-dire une rétention ponctuelle concentrée sur le réseau d'assainissement. Les abaques d'assainissement vont jusqu'à la crue décennale.
A la question de savoir pourquoi les ingénieurs hydrauliciens ne regardent pas au-dessus de la crue décennale, malgré les recommandations des textes de 1977, nous pouvons répondre, en fonction de nos interviews, que c'est **parce qu'il n'y a pas d'abaques au-dessus de la crue décennale.**
On peut donc avancer que l'absence de moyens (abaques ou autres solutions d'urbanisme) de ce texte pour traiter les crues supérieures aux crues décennales, va favoriser l'apparition de crues catastrophiques de ruissellement, en particulier dans les réseaux séparatifs d'assainissement, sous-dimensionnés par rapport à l'ancien réseau unitaire parisien de Belgrand, dont les "ovoïdes" avaient été construits en fonction de la taille d'un homme pour les visites, et non en fonction des quantités ruisselées.

2ème réponse : la loi sur les P.E.R. (Plan d'Exposition aux Risques)

L'établissement de Plans d'Exposition aux Risques n'a pas permis d'éviter les catastrophes modernes de ruissellement du Grand-Bornand (1987) et de Nîmes (1988).
La catastrophe de Vaison-la-Romaine (1992) a démontré que la loi sur les P.E.R. n'offre pas l'efficacité de protection souhaitée, en particulier parce que l'on n'a pas VU la nécessité d'avoir un P.E.R. pour Vaison-la-Romaine, alors que les villages d'amont et d'aval ont été retenus pour l'établissement de P.E.R.

Constat : En 1990, nous avons constaté dans les études hydrauliques de différents travaux d'infrastructure et de superstructure, l'application des formules de la circulaire Caquot de 1949 et la prise en compte de la circulaire de 1977. Ce fait nous démontre le chevauchement de plusieurs méthodes de calcul dans un même pays, et la maintenance des anciennes lois, même reconnues néfastes, dans des domaines d'applications récents.

b- Urbanisation

b1- Evolution de la construction en zone inondable

• **Entre 1945 et 1960**

La **"reconstruction"** permet de reconstruire les bâtiments détruits par la guerre à leur place d'origine, c'est-à-dire HORS zones d'inondations, généralement.

• **Entre 1960 et 1990**

Progressivement, il n'est plus interdit de construire en zones inondables, ni dans les ravins, etc., à partir du moment où des "précautions" sont prises.
Cette tendance est confirmée en 1987 par un responsable de la Direction des Risques Majeurs (D.R.M.) du Ministère de l'Environnement, qui dit que la "NON-INTERDICTION" de construction en zone inondable (en lit majeur donc) est ACCEPTEE à condition de bien respecter les cotes d'accès habitables par rapport au niveau du sol, sans préciser d'ailleurs s'il s'agit des cotes de la crue décennale, centennale ou historique (revue Métropolis "Risques Majeurs" 1er trimestre 1987 n° 78/79 pp. 18 à 21) [126].

Constat : De nombreuses villes françaises se sont donc développées depuis 40 ans dans des zones inondables, avec les autorisations réglementaires, et PLUS que sur le reste de leur territoire, à cause des facilités d'accès et de proximité par rapport aux centres anciens. Pendant cette même période, de nombreux barrages et endiguements ont été mis en place pour "PROTEGER" ces nouvelles constructions à risque.

b2- 1992, le tournant décisif : moralisation du problème

La catastrophe de Vaison-la-Romaine met en lumière les dangers d'une politique de construction en zones inondables (destruction du lotissement neuf de "Théos").
La catastrophe de Bédarrides met en lumière la vulnérabilité des endiguements de protection, même anciens (du siècle dernier), et le danger que représente leur submersion ou leur rupture.

• **Les décisions administratives** : pour la catastrophe de Vaison-la-Romaine, l'Administration s'est trouvée devant un problème moral :

- fallait-il autoriser la reconstruction dans les lieux des logements détruits ?
- fallait-il autoriser la poursuite des activités commerciales et industrielles dans les zones inondées ?

Les réponses sont en cours d'élaboration mais vont varier avec un bel illogisme suivant que ce sont des logements ou des activités.
La reconstruction des logements détruits va être interdite. Il a même été envisagé la destruction des logements qui ont résisté au risque, bien que situés en zone inondable.

Par contre, les activités commerciales de type grand centre commercial (Magasin CASINO à Nîmes et Vaison-la-Romaine), vont être maintenues ainsi que les activités industrielles installées en bordure de rivière, comme les SCIERIES, qui créent un risque gravissime d'EMBÂCLES.

3.1.2. Classement des textes législatifs par rapport au risque majeur de ruissellement

3.1.2.1. Les textes aggravant le risque majeur de ruissellement

Nous avons classé dans ce groupe les lois qui organisent ou encouragent ou provoquent :

- la suppression des rétentions naturelles,
- l'accélération de la vitesse des courants,
- la limitation des études hydrauliques à la crue décennale.

a- Code Rural

a1- Aggravation due à la suppression des rétentions naturelles

- LA SUPPRESSION DES MARAIS : articles 152 à 173

Ce sont les lois qui concernent l'assèchement des marais et des terres humides, dont les travaux concédés ou ordonnés sont subventionnés et qui représentent d'immenses bassins de rétention naturels pour les crues centennales et historiques. Leur disparition influe donc sur le ruissellement.

- LA SUPPRESSION DES ZONES HUMIDES : articles 147, 153 et 175 (paragraphe 5)

Le paragraphe 5 de l'article 175 préconise l'assainissement des terres humides, qui sont le lieu de stockage naturel du ruissellement. Cet assainissement conduit au développement du drainage agricole souterrain, source d'augmentation des volumes de ruissellement qui ne sont plus ni infiltrés, ni évaporés.

- LE NIVELLEMENT DES LACS : article 175

Tous les travaux qui suppriment le marnage naturel des lacs pour les crues historiques et donc l'accueil du ruissellement sont aussi source d'aggravation des inondations des rives, qu'ils aient été décidés pour stabiliser les niveaux d'eaux ou pour le développement de l'urbanisation.

a2- Aggravation due à l'accélération de la vitesse des courants:

- LA SUPPRESSION DES MEANDRES : articles 97 à 100

Nous avons en France des lois qui autorisent la suppression des méandres de rivière et des bras morts. Ces articles aggravent le risque de ruissellement pour deux raisons :
• la diminution des capacités d'accueil et de stockage de la rivière conduit à une augmentation des volumes d'eau pour l'aval,
• la rectification des tracés naturels des cours d'eau conduit à une accélération des vitesses d'écoulement,

• Il est important de signaler que "l'eau a une mémoire" : pour la catastrophe de Vaison-la-Romaine, les objets transportés par la crue (blocs de pierre, déchets de végétaux, ...) ont été déposés exactement sur les tracés des anciens méandres comblés depuis quelques décennies.

- LE REMEMBREMENT RURAL : articles 19 à 35, décrets du 8 juin 1970 et du 31 décembre 1986

Le remembrement rural, par son DEBOCAGEMENT, a en grande partie provoqué l'augmentation du ruissellement en créant de nouveaux lieux d'inondation urbains, comme par exemple sur le site de MORLAIX (Finistère).
Depuis l'origine des lois sur le remembrement (1963), ce sont 12 000 000 hectares qui ont été remembrés, soit plus de 37 % de la surface agricole utile (notes du Code Rural LITEC). C'est dire combien ce mode d'aménagement peut avoir une incidence sur les crues hydrologiques urbaines.

- LES TRAVAUX CONNEXES DU REMEMBREMENT : article 25

L'article 25 du Code Rural est un article spécialement aggravant pour le risque majeur de ruissellement, en particulier les paragraphes 2, 3, 4. L'article 25 supprime la rétention naturelle des pluies par l'incitation au comblement des "anciens fossés" à "l'arasement des talus, à la disparition des levées de terre des clôtures" et à "l'arrachage des haies".

Il favorise de nouveaux ruissellements liés au remplacement des "anciens chemins agricoles" par des nouveaux chemins beaucoup plus larges.
Il est à noter à ce sujet que le Service de l'Amélioration foncière du Canton de Vaud (Suisse) crée des bassins de rétention "micro-hydrologiques" pour chaque secteur agricole remembré et doté de nouveaux chemins agricoles imperméabilisés, sur la base des crues centennales (annexe 1 pp. 11 à 14).

b- Code de l'Urbanisme

Le Code de l'Urbanisme contient des articles pouvant être considérés comme aggravants pour le risque majeur de ruissellement.

b1- Les constructions en périmètres submersibles : article R.421-38-15

"Les dispositions relatives aux eaux intérieures et aux périmètres submersibles" permettent à un Préfet d'autoriser un permis de construire en zone inondable ; l'article ne prend pas position sur la sécurité et la sûreté des bâtiments, mais sur le MAINTIEN du libre écoulement des eaux et la CONSERVATION DES CHAMPS D'INONDATION.

C'est donc une autorisation administrative qui augmente les risques à long terme de destructions de biens (et de personnes) en lit majeur, bien que par lui-même l'article ne porte pas atteinte au maintien des lieux naturels de rétention que nous préconisons.

b2- Les constructions sur terrains à risque : article R.111-3

L'article R.111-3 autorise à construire, avec **des conditions spéciales**, sur les terrains exposés à un risque (inondation, érosion, affaissement, éboulement, avalanches).
Comme exemple d'aggravation du risque, nous retiendrons le côté aléatoire de l'efficacité et de la pérennité des "Conditions Spéciales" (cas de l'Université de Grenoble en particulier, qui a été construite il y a 20 ans sur pilotis, précaution spéciale par excellence, mais où tous les rez-de-chaussée, aménagés maintenant, sont devenus des lieux de travail pour les personnes et les étudiants).

c- Les circulaires techniques interministérielles

Les deux principaux textes interministériels utilisés en France depuis 1945 sont des outils à tendance aggravante pour la transformation du risque de ruissellement en risque majeur (cf. paragraphe 3.1.1.2.).

c1- Aggravation due aux concepts

- Les deux concepts de la circulaire CAQUOT "d'évacuer le plus vite possible" et de ne pas "freiner l'écoulement" sont fondamentalement des concepts aggravants pour le risque de ruissellement.

- La limitation pratique de l'instruction technique LORIFERNE (1977) aux ABAQUES jusqu'à la crue DECENNALE, et l'absence de toute aide graphique pour les crues supérieures et centennales sont aussi une façon d'aggraver le risque, en ne le prenant pas en compte.
- Les TECHNIQUES ALTERNATIVES d'assainissement pluvial, qui sont des techniques d'aménagement et de construction (cf. description paragraphe 3.4.1.), et qui devraient pallier aux défaillances du réseau souterrain pour les crues supérieures à 10 ans, sont devenues dans certains exemples des TECHNIQUES DE COMPENSATION qui assurent la fonction du réseau souterrain pour des crues INFERIEURES à la crue décennale (colloque ENPC de novembre 1992 sur la maîtrise du ruissellement en milieu urbain).

c2- Aggravation par omission : l'omission du risque centennal dans les directives.

La limitation des études hydrauliques à la crue décennale, et l'oubli de toute AIDE TECHNIQUE à la prise en compte des crues centennales, amène automatiquement sur les lieux l'apparition de crues désastreuses, puisqu'elles existent.

d- Code de la Santé

L'ASSAINISSEMENT AUTONOME

L'assainissement autonome, qui est une dépollution privée des eaux vannes et ménagères à la parcelle, ne prend pas en compte la gestion des eaux pluviales de la toiture et de la parcelle. Il préconise le rejet des eaux pluviales de la parcelle "A L'EXUTOIRE", qui est en général un réseau d'assainissement, et ceci quelle que soit la FORCE DE LA CRUE.
Cet "oubli" ne peut qu'aggraver la situation dès l'origine de la parcelle. Par le biais de l'omission, ce texte de loi a donc un caractère aggravant sur le ruissellement risque majeur puisqu'il INCITE A REJETER LE RUISSELLEMENT PRIVE DANS LE DOMAINE PUBLIC.

3.1.2.2. Les textes limitant le risque majeur de ruissellement

Les outils juridiques les plus appropriés au risque majeur de ruissellement et le limitant le mieux sont les suivants :

- le périmètre submersible (P.S.S.) ou Plan de Surface Submersible (Code de l'Urbanisme) : ce plan est peu utilisé,
- le Plan d'Intérêt Général (P.I.G.) (Code de l'Urbanisme) qui est un plan d'ensemble d'Urbanisme, auquel on peut rajouter la mention de risques naturels tel celui d'inondation par ruissellement. Ce plan affichera la notion de PREVENTION pour les constructions nouvelles et existantes ;
- le Plan d'Exposition aux Risques Inondations (P.E.R.I.) (lois) : ce plan reste positif malgré les critiques face au risque de ruissellement majeur, à condition qu'il soit décidé et approuvé ;
- la loi Montagne du 9 janvier 1985 ;
- le Porter à Connaissance.

Ces documents sont des documents PAR PRINCIPE favorables à une gestion anticipée du risque majeur de ruissellement, mais nous rappelons qu'aucun de ces documents n'a pu éviter les morts et les dégâts pour les quatre catastrophes majeures françaises du Grand-Bornand (1987), de Nîmes (1988), de Paris (1990) et de Vaison-la-Romaine (1992).
Ces documents sont des documents trop globaux, qui manquent d'une réflexion de terrain, de détail, pour toutes les "prescriptions spéciales" qui sont soit décrites sommairement, soit inexistantes comme dans le cas du P.E.R.I. de Carros-Gattières où les "prescriptions spéciales" pour éviter le ruissellement et l'inondation portent la mention = NEANT.

3.1.3. Evolution souhaitable des textes législatifs

En nous appuyant sur l'évolution de la lutte contre les incendies dans les villes depuis le siècle dernier et sur le succès des règlements face à ce risque, nous proposons de retenir les principes de détails et les principes pragmatiques du risque incendie pour faire évoluer les textes relatifs au risque de ruissellement.

3.1.3.1. Lois à compléter

a- Le PERMIS DE CONSTRUIRE

Le permis de construire touche toutes les **constructions nouvelles** ou les **réhabilitations** de constructions anciennes, aussi bien privées que publiques.
Le permis de construire est instruit au niveau communal par le Service compétent, souvent le Service Administratif de l'Urbanisme. Il reçoit l'agrément de l'Architecte voyer et des autres services administratifs.
On peut inclure le risque de ruissellement, et donc les moyens de lutte, au niveau du PLAN MASSE du permis de construire (échelle 1/500°) en IMPOSANT, au même titre que la lutte contre l'incendie ou que la préservation de la qualité architecturale locale, un stockage à la PARCELLE DU RUISSELLEMENT CENTENNAL, SURFACE DE TOITURE ET VOIRIE D'ACCES COMPRISES.

La liste des moyens de rétention à la parcelle et de protection, proposés au paragraphe 3.4., est à inclure dans les formulaires de demande de permis de construire.

b- Le CERTIFICAT DE CONFORMITE

Le certificat de conformité est l'attestation légale de réalisation conforme à la demande du permis de construire, délivrée par les services administratifs AU VU de la construction, sur le terrain.

Il peut y avoir demande de rectification, voire même de démolition, si le permis de construire n'est pas respecté, avec son plan de masse comprenant l'implantation du bâtiment, des voiries et des aires de stationnement (dimensionnement et revêtement).
La mention de "SAUVEGARDE" est à établir sur le certificat de conformité avec l'engagement de préserver les protections et rétentions centennales établies sur la parcelle.

c- REGLEMENT NATIONAL DE LA COPROPRIETE

Nous proposons d'inclure le risque majeur de ruissellement dans le Règlement National de la copropriété, pour les précautions à prendre au niveau des rez-de-chaussée vis-à-vis d'inondation par ruissellement et ceci pour deux motifs :

- les répercussions "d'adjonctions" sont efficaces au niveau des syndics très vigilants d'être conformes avec la loi (on a pu le voir avec les réglements concernant l'étanchéité des terrasses privatives),

- ce sont les personnes concernées qui décident de leur degré de protection et qui en trouvent le financement.

d- Les ACTES NOTARIÉS et servitudes de protection et rétention

Il pourrait être inclus dans tous les actes notariés lors de l'acquisition de parcelles (terrains agricoles, forestiers ou biens immobiliers) la mention générale des risques naturels, comprenant les éléments de protection de rétention naturelle des lieux à préserver tels marais, zones humides, zones submersibles...
Cette proposition d'inscriptions de servitudes peut avoir un impact important d'information au niveau de la population sachant qu'en France 50 % d'individus "préfèrent" être propriétaires (ou copropriétaires) de leur habitation.

e- PLANS DESCRIPTIFS D'EVACUATION INCENDIES-INONDATIONS avec exercices annuels d'évacuation

Des PLANS D'EVACUATION POUR INCENDIE, sont obligatoirement apposés dans tous les halls et cages d'escaliers des habitations, dans les écoles, cinémas, hôpitaux, etc.
Il est possible d'y inclure le risque d'inondation par ruissellement et de prévoir les EVACUATIONS RECOMMANDÉES. Cette inscription complémentaire sur des documents existants aurait l'avantage de tester l'efficacité des propositions d'évacuation par des EXERCICES ANNUELS déjà obligatoires pour le risque incendie, et menés par les sapeurs-pompiers.

Reste le problème de l'alarme sonore à différencier entre ces deux risques où l'un consiste à descendre pour sortir, et l'autre à monter sur les toits éventuellement, suivant les cas topographiques des lieux.

f- L'ASSAINISSEMENT AUTONOME TOUTES EAUX élargi la crue centennale

L'assainissement autonome pourrait prendre en charge l'absorption des EAUX PLUVIALES de la parcelle jusqu'à la crue CENTENNALE. Les crues supérieures à 10 ans seraient stockées au niveau du jardin (techniques de rétention, paragraphe 3.4.).

3.1.3.1. Lois NOUVELLES

Il serait intéressant de créer de nouvelles lois pour le contrôle et la protection contre le ruissellement majeur dans les directions suivantes, sachant que le risque de ruissellement majeur urbain ne peut aller qu'en s'aggravant dans les décennies à venir en fonction de l'adjonction au risque naturel historique millénaire du risque du ruissellement artificiel anthropique et de la dérive climatique .

a- Lois nouvelles en direction de regroupement des sinistrables.
b- Lois nouvelles en direction des Maîtres d'Ouvrage.
c- Lois nouvelles en direction des Maîtres d'Oeuvre.

a- Lois nouvelles en direction de regroupement d'individus sinistrables

• **Création d'une "commission des sages"** pour chaque agglomération (village compris), composée des habitants les plus anciens par l'âge et l'implantation dans le pays, d'universitaires ... sachant que beaucoup de projets nouveaux sont inadaptés au risque de ruissellement par méconnaissance des lieux et de l'histoire du terroir. Ce comité donnerait un AVIS sur tous les nouveaux projets (infrastructure, construction, etc.) et sur les projets existants en fonction des risques divers connus.

• **Création d'un "syndicat de sinistrables"** concernés par le risque du ruissellement, dont le but serait d'assurer leur protection, ou de définir le degré de protection souhaité en fonction des analyses coûts-avantages des techniques retenues, ainsi que de discuter des plans d'évacuation et de secours.

Pour cette proposition, nous nous en référons à l'analyse de l'Ecole Polytechnique du MIDDLESEX ("Flood Hazard Research Centre") et aux recherches de Madame Myriam FORDHAM, Sociologue [203], sur les degrés de protection souhaités par les individus sinistrables, et les degrés de tolérance du risque vis-à-vis de travaux d'endiguement de la Tamise qui avaient été refusés, économisant ainsi un très gros poste budgétaire (1990).

b- Lois nouvelles en direction des Maîtres d'Ouvrage[1]

- lois pour les municipalités et les élus,
- lois pour l'Etat : Préfectures, Organismes d'Etat, Agents territoriaux,
- redéploiement du service R.T.M. au niveau péri-urbain et urbain.

b1- Lois concernant les municipalités et les élus

Deux obligations peuvent être proposées au niveau des Maires :

- LES ENQUETES ADMINISTRATIVES sur tous les risques auprès des administrés pour pouvoir :

• sensibiliser aux risques les personnes concernées comme la probabilité du risque d'inondation par ruissellement,
• recueillir les avis et souhaits de protection,
• tester les programmes de protection, avec possibilités de choix, et les coûts budgétaires correspondant aux travaux de protection privés et publics.

Après l'expérience de certaines études de P.E.R. (Chamonix, etc.), nous pensons qu'il est préférable que les administrés soient partie prenante de leur protection plutôt que d'être réticents, voire même opposants :

- la création d'une "COMMISSION MUNICIPALE CONTRE LES RISQUES MAJEURS" (inondation, sécheresse, incendie, séisme, avalanche, raz-de-marée, etc.) comprenant :

• des responsables du corps des Sapeurs-Pompiers,
• les responsables des Services Techniques,
• des élus,
• un responsable du Ministère de l'Environnement et un agent du service R.T.M. (Ministère de l'Agriculture) pour définir les ouvrages ayant le moindre impact au niveau de l'accroissement du risque de ruissellement artificiel et les ouvrages les moins vulnérables au niveau du risque naturel de ruissellement.

b2- Lois concernant l'Etat : Préfectures, Agents territoriaux, organismes d'Etat.

- **pour le Code de l'Urbanisme**, une nouvelle loi générale sur **"le risque majeur urbain de ruissellement"** comprenant :

• la définition de ce nouveau risque, élargi à tout le territoire national et non plus à l'Arc Méditerranéen ;
• l'obligation de prendre comme crue de référence pour les nouveaux projets les crues les plus fortes connues, soit au minimum la crue centennale. Sinon l'obligation serait de prendre la crue de référence de Nîmes, soit 400 mm en 6 heures, ceci afin de faciliter les études et leur qualité ;

---

(1) Les Maîtres d'Ouvrage sont les commanditaires ou les programmeurs des opérations de constructions (voirie, bâtiments, dossiers de consultation des concepteurs D.C.C., etc.)

• l'obligation d'établir un plan de risque hydrologique en milieu urbain (P.I.G.), par exemple pour la définition des lits majeurs des rivières pérennes et des talwegs, des rivières sèches pour la crue centennale de référence, avec comme moyen d'extrapolation pour la période de retour centennale la méthode du Gradex ;
• l'obligation de ne rien faire qui aggrave la situation actuelle (date de référence 1988) au niveau de l'Urbanisme, de l'infrastructure, du déboisement ou débocagement, du remembrement ou du drainage agricole souterrain ;
• la mention de la prévision de la dérive climatique au cours du siècle à venir, concernant l'augmentation des pluies d'orages et le surhaussement du niveau des mers estimé entre 0,20 et 0,60 mètre pour l'an 2050 (textes ONU et OMM résumés dans la revue "Sources" n° 13 de mars 1993 de l'UNESCO par le MAB [177]).

- **pour le Code Rural**, nous proposons une loi identique concernant le **risque majeur agricole de ruissellement**, qui comprendrait:

• l'obligation de maintenir les lieux de rétention naturelle ;
• le maintien des marais, zones humides, méandres, bras morts, fossés, avec aussi le maintien du marnage du niveau des lacs pour les crues centennales.

Cette loi entraînerait l'abrogation de tous les paragraphes IMBRIQUÉS dans une loi ou loi spécifique qui aggrave le phénomène du ruissellement agricole, contraire au concept de la rétention naturelle.

• Redéploiement d'un Service R.T.M. péri-urbain et urbain

Le service de Restauration des Terrains en Montage, qui dépend actuellement du Ministère de l'Agriculture (80 agents en 1990 contre 2000 en 1880), pourrait répondre techniquement aux problèmes de protection contre le ruissellement rural et le ruissellement urbain, et suivre la gestion de lits majeurs aussi bien en milieu agricole qu'en milieux péri-urbain et urbain.
Nous formulons donc le souhait d'un redéploiement des services R.T.M. qui ont une longue expérience de la gestion des crues torrentielles depuis un siècle :

- avec rattachement au Ministère de l'Environnement, Délégation aux Risques Majeurs (D.R.M.),
- avec l'introduction dans ce service d'agents de diverses formations (architecte et paysagiste) afin d'établir les défenses actives et passives PÉRI-URBAINES et URBAINES.

c- Lois nouvelles en direction des Maîtres d'Oeuvre[1]
- directives pour l'urbanisme,
- directives pour l'assainissement,
- directives pour l'agriculture,
- directives pour la sécurité routière liée à la circulation.

---

[1] Les Maîtres d'Oeuvre sont les réalisateurs des opérations commandées. Dans certaines administrations, exceptionnellement, les Maîtres d'Ouvrage et les Maîtres d'Oeuvre peuvent être la même personne

c1- Propositions de directives pour l'urbanisme

- interdiction de construire en zone inondable soumise aux crues centennales, d'où l'inconstructibilité des lits majeurs naturels ;
- remise en état des "précautions" d'origine détruites, c'est-à-dire à titre d'exemple remise en état des PILOTIS de l'Université de Grenoble destinés à être ennoyés, avec construction de nouveaux bâtiments sur pilotis pour compenser le déficit spatial.

c2- Propositions de directives pour l'assainissement

- interdiction de recouvrir les rivières et ruisseaux en milieu urbain et péri-urbain et maintien de leur gabarit d'origine.
- incitation à réouvrir les anciennes rivières recouvertes urbaines, et même en milieu rural, incitation à réouvrir les anciens méandres :

• exemple des parkings recouvrant la rivière à l'amont du Grand-Bornand et qui ont été détruits lors de la catastrophe, libérant ainsi des matériaux d'embâcles ;
• exemple des parkings recouvrant la rivière au centre de Val d'Isère et qui pourraient aussi aggraver un risque majeur de ruissellement, libérant des embâcles de voitures (construction en 1988).

- création de busages sous les ouvrages d'infrastructure pour les crues millennales, ce qui amène la transformation de principe du passage de l'écoulement, avec piles de support et surplomb plutôt que buses et remblais.

• exemple de destructions des buses ou passages d'écoulement sous les ponts du Vaucluse pendant la crue de septembre 1992, dont la destruction prouve que les passages étaient trop étroits et qu'ils avaient été calculés sur la base d'une crue décennale;
• exemple des passages d'écoulements des petites rivières sous les autoroutes calculés sur la base des crues millénales en Suisse (canton de Vaud, autoroute Transfontalière d'accès à la Vallée d'Yverdon) pour assurer la résistance de l'ouvrage à ce type de crue "déluge", les autoroutes faisant partie de la Défense Nationale et ne devant être sous aucun cas détruits (annexe 1 p. 27).

- élargissement de l'instruction technique de 1977 avec l'obligation de la prise en compte des crues centennales sur tout le territoire national comprenant :

• l'obligation de travailler avec les autres professions pour une rétention de surface à la source, et non plus seulement une rétention sur réseaux ;
• l'obligation d'utiliser des techniques alternatives de ruissellement concernant toutes les techniques de captage de surface en architecture, jardin et paysage (toiture-réservoir, cour-réservoir, cave-réservoir, jardin-réservoir, parc urbain-réservoir, canal-réservoir, champ-réservoir, etc.), en plus des techniques alternatives d'assainissement (cf. paragraphes 3.4.)

- prévision des endiguements fluviaux et des endiguements marins face à la montée du niveau des mers avec les problèmes d'inondations par la mer et par ruissellement terrestre :

• exemple des endiguements du Var pris par revers par le ruissellement (catastrophe de Carros-Gattière de 1981) ;
• exemple de la crue de ruissellement d'Anduze (1956), où les maisons protégées par l'endiguement contre la rivière ont été inondées par les eaux de ruissellement piégées derrière les digues ;
• exemple de l'endiguement de la zone industrielle de Dunkerque, qui a commencé mais mettra 20 ans pour réaliser une digue de 2 mètres de hauteur ;

- prévision du rehaussement de tous les émissaires marins, pour éviter le piégeage des eaux de ruissellement bloqués par une mer aux plus hautes eaux, et éviter des effets de mascaret destructeur :

• exemple de la ville de Morlaix (Finistère) : la marée centennale du 10 mars 1993 avec un coefficient de 119[1] n'a pas fait d'inondation parce qu'il ne pleuvait pas ! Mais tous les services étaient en état d'alerte.

La prochaine marée centennale prévue pour 1997[2] risque de poser des problèmes d'inondation, s'il pleut, si un rebocagement ou des travaux RTM ne sont pas remis en route pour limiter le ruissellement à la source (attendus du jugement condamnant les travaux de débocagement de la D.D.A. à partir de 1970).

c3- Propositions de directives pour l'agriculture
- suppression des "travaux connexes" liés aux remembrements (interdire la destruction des fossés agricoles, l'arrachage des haies, la suppression des murs de clôtures en terre ...).

• Expérience de la commune de RIPPE du Canton de Vaud (Suisse) concernant la retenue d'un ruissellement centennal d'un bassin-versant liée à un ruisseau. La retenue est une parcelle de pâturage, entourée d'une levée de terre (avec pierres) plantée, et fermée par un pertuis. L'ensemble de la surface est sur sol, sans décaissement et sur le principe du bocage [128] pp. 137 à 141 (photo 108 figure 109).

- autorisation de remembrement et de drainage souterrain agricole, sous réserve de l'obligation d'exécuter des travaux de rétention pour les crues centennales : bassins de retenue collinaire, bassin de rétention agricole, pâturage de rétention, remise en état du fonctionnement des marais et zones humides, etc.

---

(1) Le coefficient de 100 caractérise les marées moyennes de vive eau d'EQUINOXE
(2) Article de Yvonne REBEYROL du Monde du 9 mars 1996

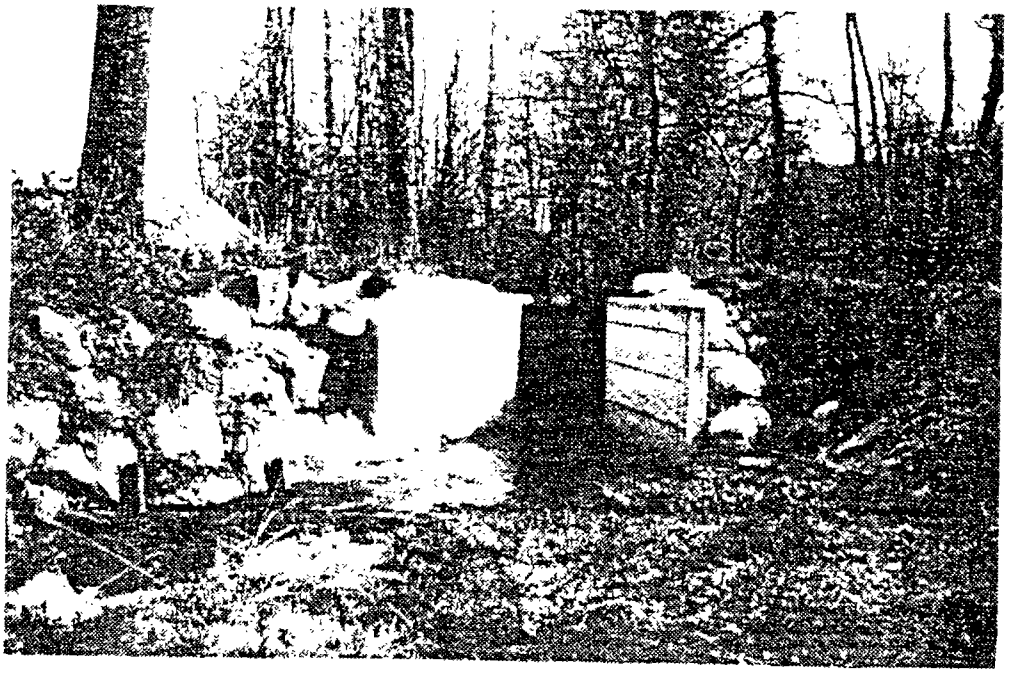


Photo 108- Retenue d'un ruissellement centennal. Création d'un pertuis dans une levée de terre d'un maillage de bocage(128) (photo M.Nickl,Canton de Vaud,Suisse)

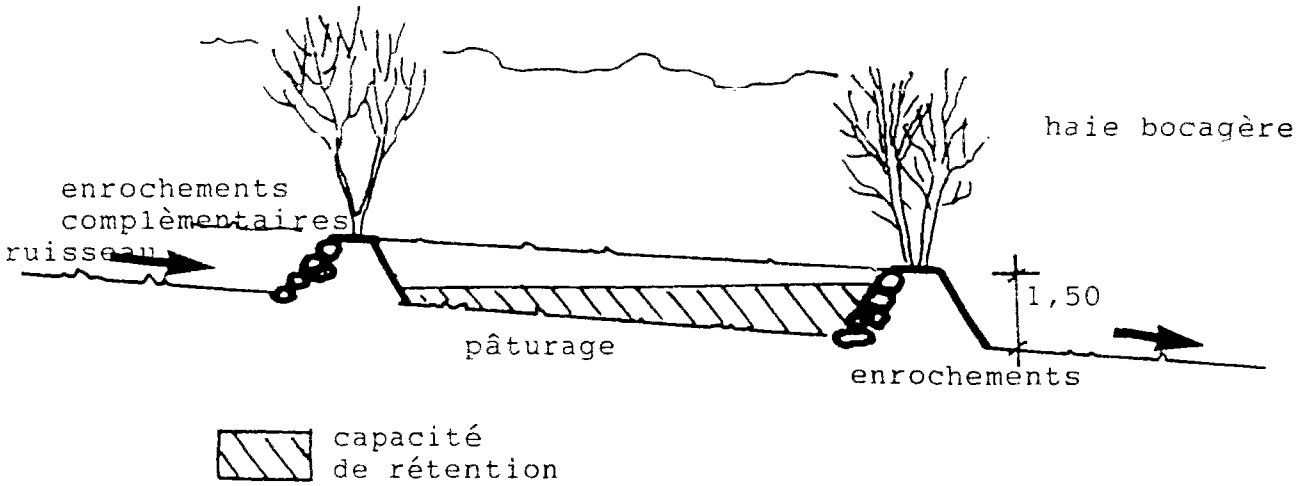


Figure 109- Coupe de principe sur un bassin de rétention agricole multifonctionnel (dessin M.Guiton)

• exemple des polders fluviaux du Rhin réouverts après les grandes inondations de 1982 en Allemagne et aux Pays-Bas (étude du LCPC [40]) ;

- demande de travaux rétroactifs de rétention centennale pour tous les remembrements faits depuis 1963 et pour toutes les sorties des drainages agricoles souterrains ;

• exemples des retenues micro-hydrologiques agricoles du canton de Vaud (Suisse), (annexe 1 pp. 47 à 59) ;
• exemple des retenues collinaires en Gironde (chapitre 1 pp. 121).

• Directives pour la Sécurité Routière

Les inondations modernes de ruissellement nécessitent une loi sur la circulation routière :

- interdiction de stationner sur les routes et les rues à écoulement hydrologique préférentiel, les anciennes rivières donc, pour empêcher la formation d'embâcles par les voitures emportées :

• exemple des embâcles de voitures de Nîmes (paragraphe 3.2.) ;
• exemple des possibilités d'embâcles de voitures à Royat, Aubrière (Clermont-Ferrand), Val d'Isère, etc., en fonction de l'emplacement des parkings publics ;

- modification des sens de circulation en fonction des risques de ruissellement urbain ;

• études sur Nîmes (chapitre 3.4. Les techniques de lutte)

- création des rues refuges pour les automobilistes pour les inciter à y mettre leur véhicule pendant la crise et éviter les voitures dérivantes ;

- interdiction de "conduire" sur des chaussées prises en AQUAPLANAGE (à partir de 10 cm d'eau, par exemple).

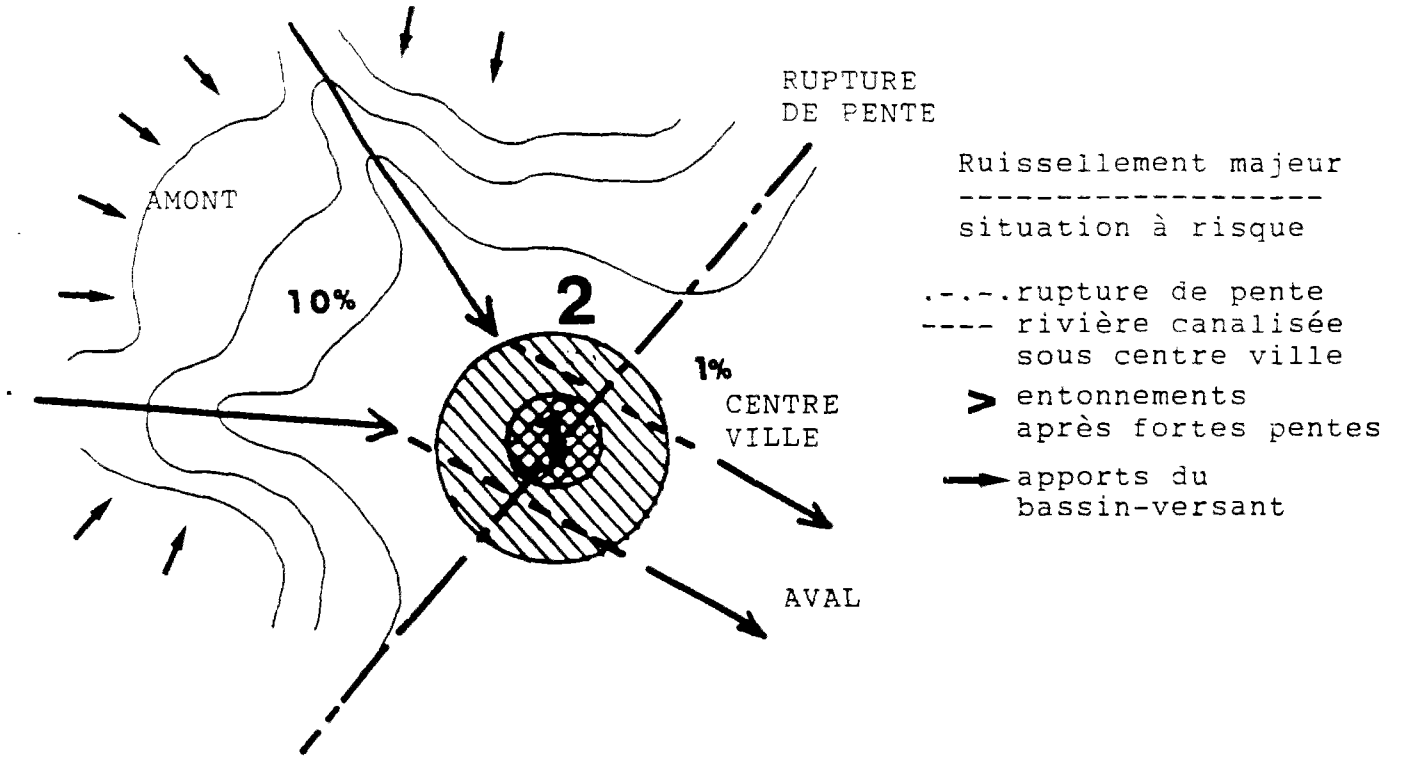


Figure 110-Schéma classique d'une ville ou d'un village en situation de risque hydrologique (hémicycle).

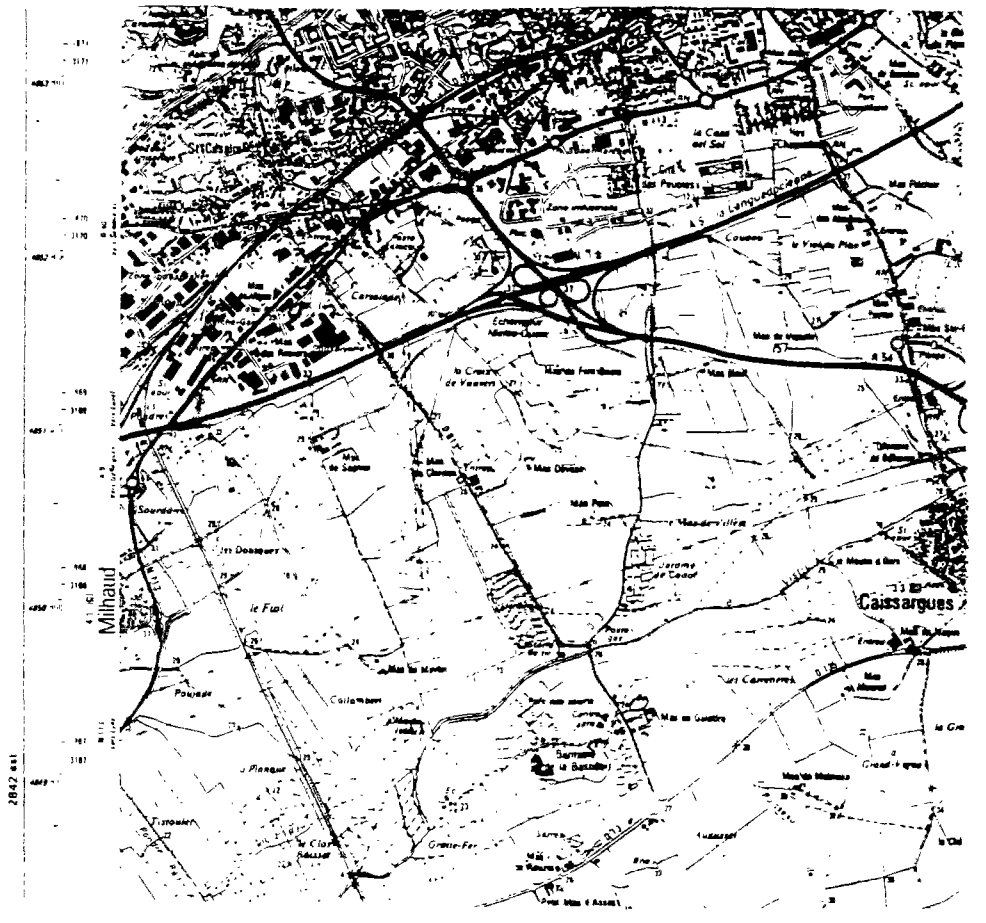


Figure 111- Plan sur l'aval de Nîmes ,avec les fossés de drainage de l'ancien marais

3.2. LES FACTEURS AGGRAVANTS DU RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT

3.2.1. Généralités

Nous avons détecté une série de facteurs aggravant le risque urbain de ruissellement. Ce sont des facteurs géomorphologiques et anthropiques en fonction de la gravité du risque naturel climatique. Ce sont aussi des facteurs de comportement.

Méthode de travail

L'analyse s'est appuyée sur les observations visuelles du site et les simulations spatiales du risque (cf. méthode de travail de VIOLLET-LE-DUC [191]) : observations de la géomorphologie, des ravinements historiques, des protections historiques, analyse des modifications du paysage, analyse de l'évolution de l'urbanisme, modes de construction, datation des constructions, analyse des végétaux centenaires, des revues de presse sur les catastrophes de ruissellement avec recoupement des éléments, etc.

Les observations multidisciplinaires de terrain peuvent être menées parallèlement à l'étude classique hydraulique par modélisations, qui s'appuie sur les relevés topographiques des profils des lits mineurs et majeurs et planifie le degré du risque en fonction des DONNEES CLIMATIQUES APPORTEES PAR L'HYDRAULICIEN.

Nous aborderons les facteurs aggravants dans les domaines suivants :

3.2.2. Domaine de l'urbanisme
3.2.3. Domaine de l'architecture
3.2.4. Domaine des infrastructures
3.2.5. Domaine du paysage
3.2.6. Les incertitudes sur les données climatiques
3.2.7. Les comportements aggravants

3.2.2. Domaine de l'urbanisme

3.2.2.1. Les facteurs géomorphologiques aggravants

Nous trouvons deux échelles de risque au niveau de l'urbanisme, liées à la géomorphologie :

- les zones de risque à grande échelle,
- les zones de risque à petite échelle.

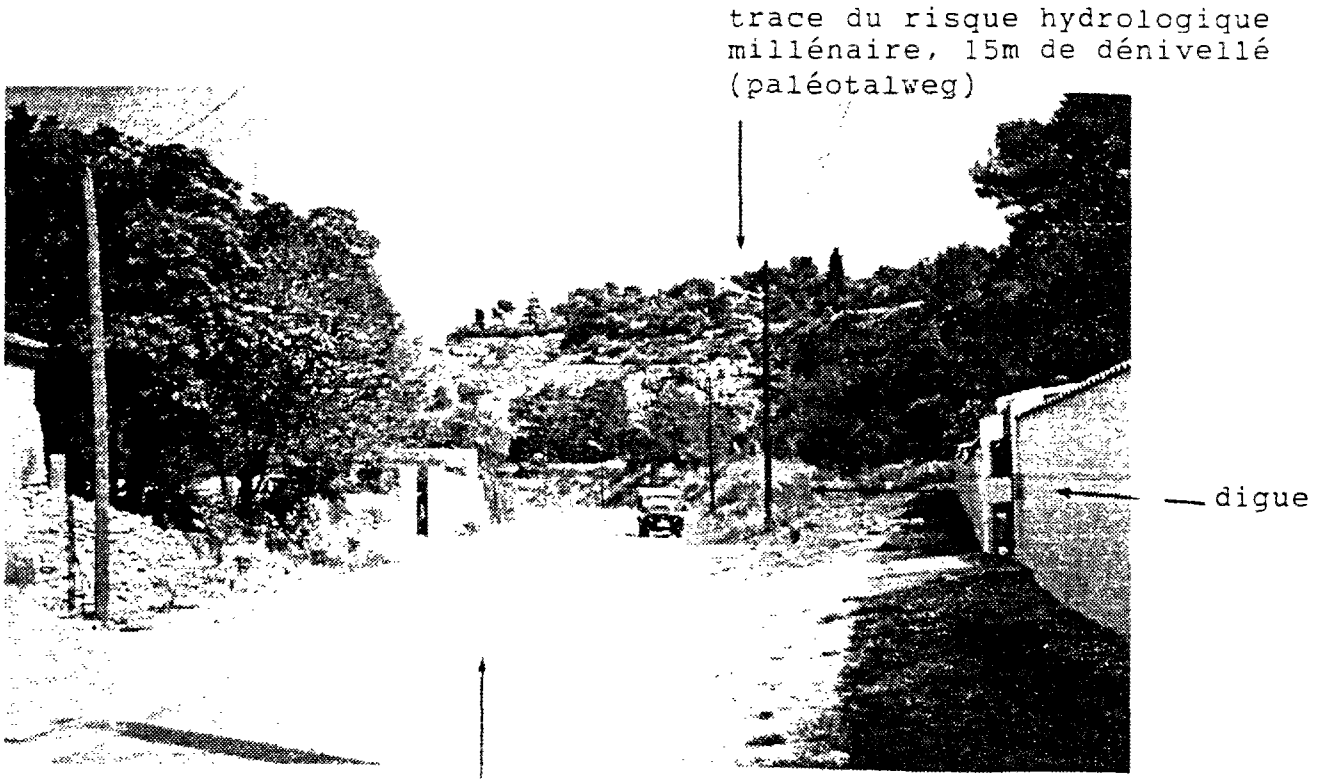


Photo 112 - Cadereau d'Alès à l'entrée de Nîmes
les maisons sont aussi construites
dans le lit de la rivière.

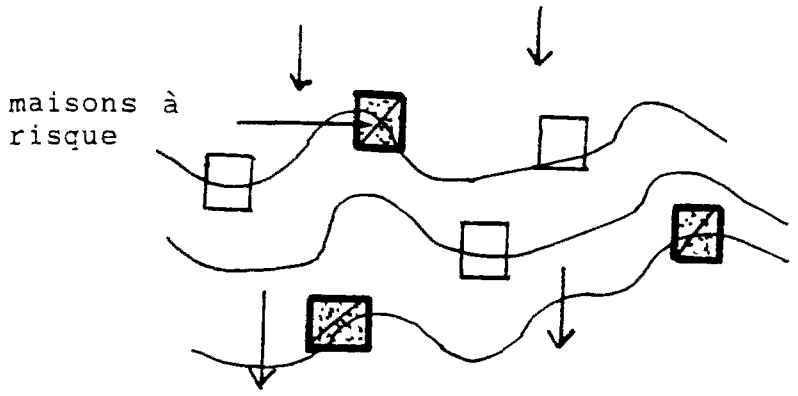


Figure 113 - Implantation de maisons à risque
dans les mini-talwegs.

3.2.2.1.1. Les zones de risque à grande échelle

- hémicycle, coteau
- fortes pentes
- les fonds de vallées
- enneigement du bassin-versant
- anciens marais
- suppression des zones de rétention naturelle
- les villes avec possibilité de glissements de terrain
- les villes de bord de mer
- les villes de bord de lacs

Les causes géomorphologiques aggravantes, renforcées par des évènements climatiques ou des modifications de milieu, peuvent être les suivantes :

a- Relief

- HEMICYCLE, COTEAU : les villes construites en hémicycle, en pied de coteaux où les eaux de surface se concentrent en UN, DEUX ou TROIS POINTS généralement et qui correspondent à des rivières sèches ou à de petites rivières pérennes : exemple Nîmes, Clermont-Ferrand (figure 110).
  De nombreuses villes en France sont bâties suivant cette configuration pour des raisons historiques d'amenée d'eau potable, d'évacuation des eaux usées, et de transport de marchandises par voie navigable.

- LES FORTES PENTES : les villes à forte pente où les eaux de ruissellement prennent de la vitesse, et "des raccourcis urbains" (pentes de la ville de Lausanne entre 5 et 10 %, pentes de la zone péri-urbaine de Nîmes entre 5 et 10 %).

- LES FONDS DE VALLÉES : les villes installées dans un rétrécissement de vallée (exemple de Vaison-la-Romaine, défilé du cadereau d'Alès de Nîmes, figure 112).

b- Climat

- ENNEIGEMENT DU BASSIN-VERSANT : les villes avec un bassin-versant soumis à un enneigement même sporadique (exemple de la ville de Lausanne au climat pluvio-nival qui regroupe les fontes des neiges avec des pluies intenses, annexe 2 p. 609 - application possible à la ville de Clermont-Ferrand, etc.).

c- Modification du milieu

- ANCIENS MARAIS : construction de villes sur d'anciens marais ou d'anciennes rizières (département de la Seine-Saint-Denis, annexe 1 p. 525 - Plaine de Nîmes, figure 111).

- SUPPRESSION DES ZONES DE RETENTION NATURELLE : les villes à l'aval avec d'importantes rétentions naturelles supprimées, comme la suppression des polders fluviaux du Rhin supérieur et les inondations de janvier 1983. L'Allemagne et la Hollande ont demandé à la France le rétablissement du niveau de protection antérieur par la REMISE EN INONDATIONS de l'ancien champ majeur (étude du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Strasbourg de 1986 [40] (p. 111) Rapport général d'activité de 1986).

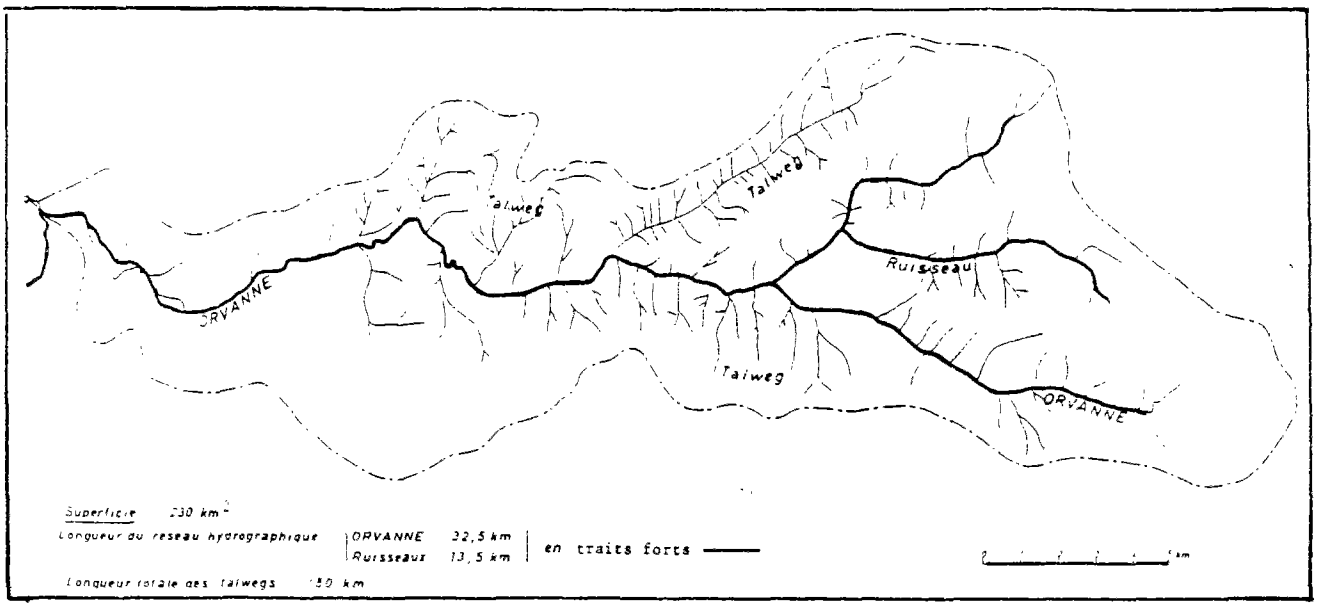


Figure 114 - Définition des zones de talweg ,ruisseau et rivière par analyse stéréoscopique des photographies aériennes (extrait "Risques naturels" B.L.P.C. n°150 p.171 , application de la télédétection à l'évaluation du risque d'inondation).

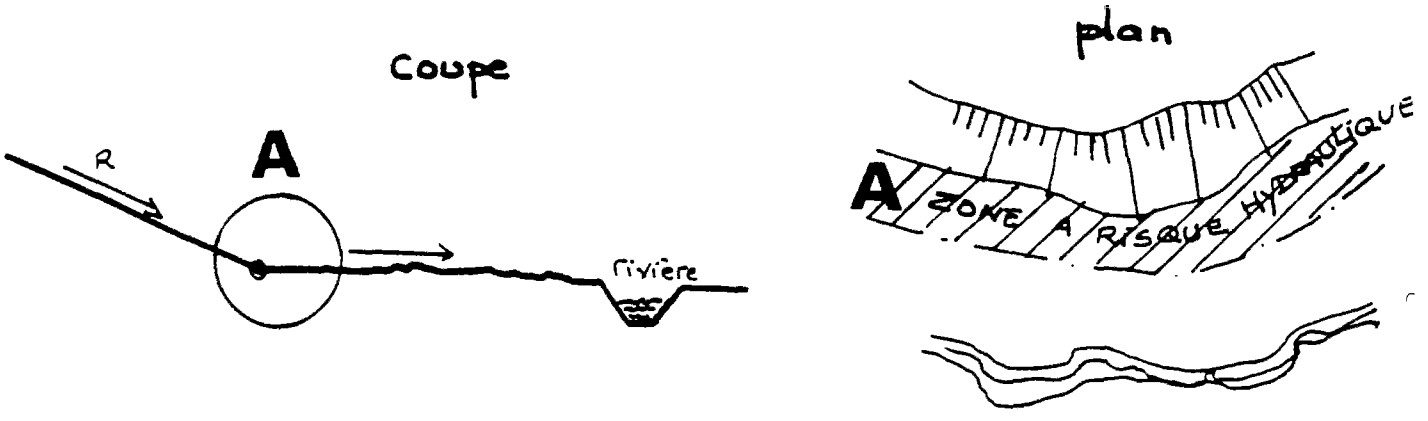


Figure 115 Les zones sensibles au ruissellement les ruptures de pentes.

d- Zone à risque

- LES VILLES AVEC POSSIBILITÉ DE GLISSEMENTS DE TERRAIN pouvant barrer l'aval de la vallée (exemple du mouvement du versant de la Clapière à Saint-Etienne de Tinée, Alpes-Maritimes suivi par le LCPC - Bulletin de Liaison des LPC consacré aux risques naturels [46] (p. 39). Exemple d'écroulement aux ruines de Séchilienne (Isère), avec barrage éventuel de la Romanche [46] (p. 55).

- LES VILLES DE BORD DE MER : refoulement des rejets des eaux pluviales avec la concomitance des pluies et des marées exceptionnelles (ville de Morlaix, etc.).

- LES VILLES DE BORD DE LACS dont le niveau des plus hautes eaux a été "stabilisé", pour pouvoir construire sur le pourtour, mais avec une sous-estimation importante du risque centennal (ville d'Yverdon, Suisse, annexe 2 pp. 663 à 669).

3.2.2.1.2. Les zones de risque à petite échelle

- les zones de talweg
- les lits majeurs des ruisseaux
- les ruptures de pentes
- la présence d'îlots
- les coudes de rivières
- le redressement des rivières et le comblement des bras morts et méandres

Il existe de plus des lieux spécifiques à petite échelle sensibles au risque d'inondation par ruissellement. Ces lieux sont :

a- Relief

- LES ZONES DE TALWEG[1] ou vallées sèches : surfaces privées. Les limites des lits mineurs de ces micro-lieux correspondent à l'emprise des talus de rives, matérialisée par l'absence d'humus. Les limites des lits majeurs ne sont généralement pas lisibles (figures 113 et 114) ;

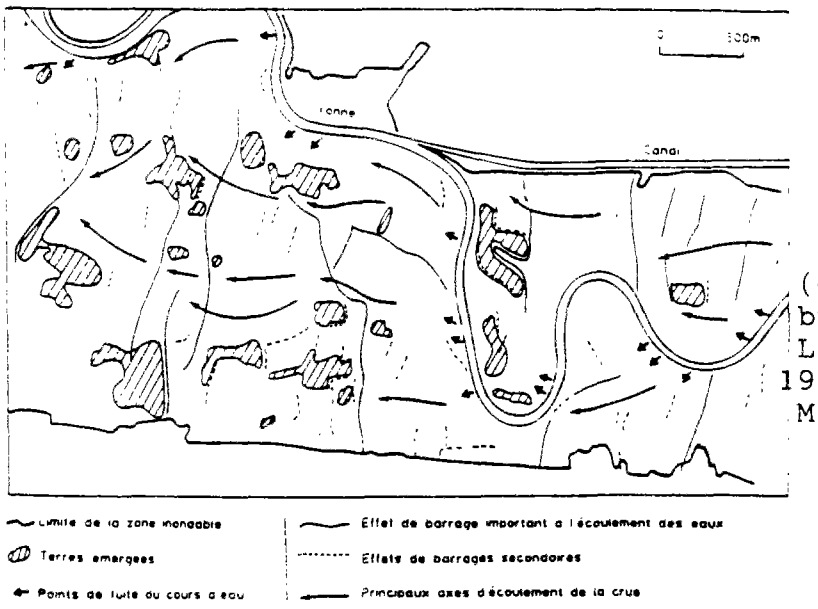
- LES LITS MAJEURS DES RUISSEAUX à eau pérenne. La délimitation des lits majeurs peut se faire par "lecture visuelle sur le terrain" (cf. VIOLLET-LE-DUC [191]) ;

- LES RUPTURES DE PENTES : les lieux de rupture de pente quand les pentes passent de 5 % à 2 % sont des lieux préférentiels pour les dommages de ruissellement (observations sur des exemples de la Seine-Saint-Denis, annexe 1 p. 525 et figure 115).

- LA PRESENCE D'ILOTS : les îlots peuvent être un facteur géomorphologique aggravant quand les eaux submergent les îlots qui sont devenus des refuges (figure 116).

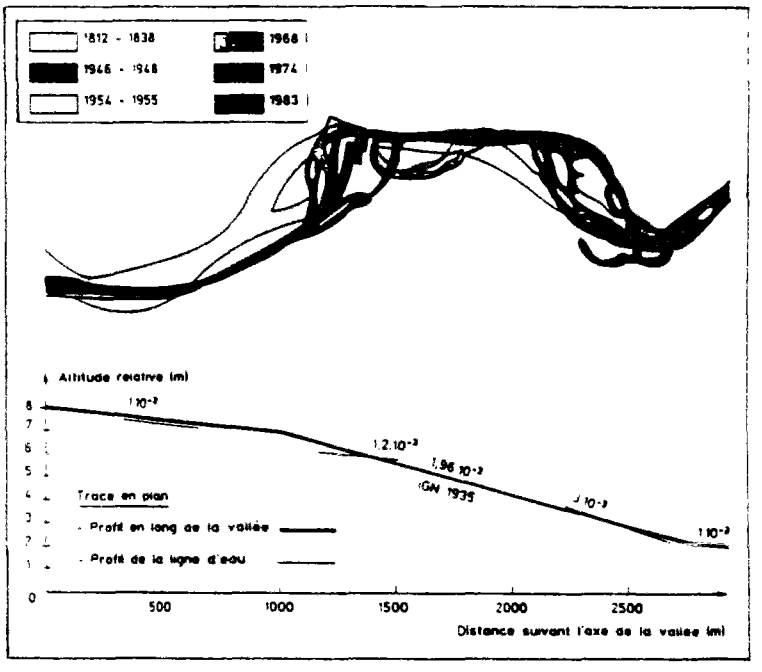
---

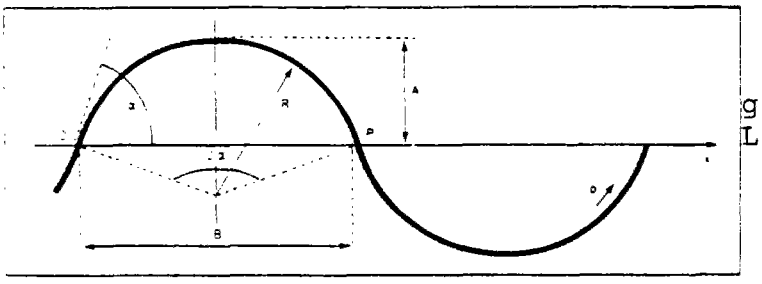
[1] Talweg : le talweg rejoint les points les plus bas d'un vallonnement. Il permet le regroupement des eaux de pluie et correspond aux écoulements préférentiels



(extrait du bulletin de liaison L.P.C. n°150-151 1987 p. 169 à 184 M.Doridot,G.Garry)

Figure 116 - Ilots-refuges à risques pour une crue fluviale c'est le même problème pour une crue pluviale.





(extrait Rapport général d'activité L.C.P.C. 1986 p.106)

Figure 117 - La rectification d'un tracé naturel de rivière peut être une cause aggravante de risque au niveau de l'accélération de la vitesse de crue et au niveau de la suppression des espaces naturels de submersion.

- LES COUDES DE RIVIERE : les rivières en crue abandonnent les coudes pour trouver des tracés plus directs, quelle que soit leur taille (exemple du Coude de la rivière du Borne au camping du Grand-Bornand, exemple du Coude dans la ville de Brives-Charensac).

b- Modification du milieu

- LE REDRESSEMENT DES RIVIERES et LE COMBLEMENT DES BRAS MORTS ET MÉANDRES : à l'opposé, il y a un risque pour les ouvrages et constructions établis sur des méandres comblés de se trouver sur le tracé d'un écoulement de crue exceptionnelle (figure 117).

  Le dépôt des blocs de pierres sur les anciens bras morts de l'Ouvèze à côté de Vaison-la-Romaine est une preuve de reprise des tracés naturels par les eaux en crue centennale.
  Il est donc préférable de maintenir une rivière avec des tronçons dits instables mais naturels plutôt que de rectifier des rivières non navigables.

3.2.2.2. Les facteurs anthropiques aggravants en urbanisme

3.2.2.2.1. Construction

a- L'évolution du parcellaire, densification (figure 118)

Le parcellaire fait partie du domaine privé, mais il est géré par l'autorité publique. L'état du parcellaire (taille des parcelles, densité des constructions, surface des constructions) est défini par le POS.

Le COS est le Coefficient d'Occupation des Sols. La densification du parcellaire, c'est-à-dire l'autorisation de pouvoir construire sur des parcelles de plus en plus petites FAVORISE LES QUANTITÉS DE REJET de ruissellement. D'où l'importance que prend toute modification du COS dans le bilan hydrologique et hydraulique.

b- Urbanisation nouvelle sur bassin-versant d'amont

Toute nouvelle urbanisation d'amont, même ponctuelle, influe sur le ruissellement risque majeur : densification d'une zone pavillonnaire existante ou nouveaux lotissements (Clermont-Ferrand lotissement Boiséjour, Nîmes).

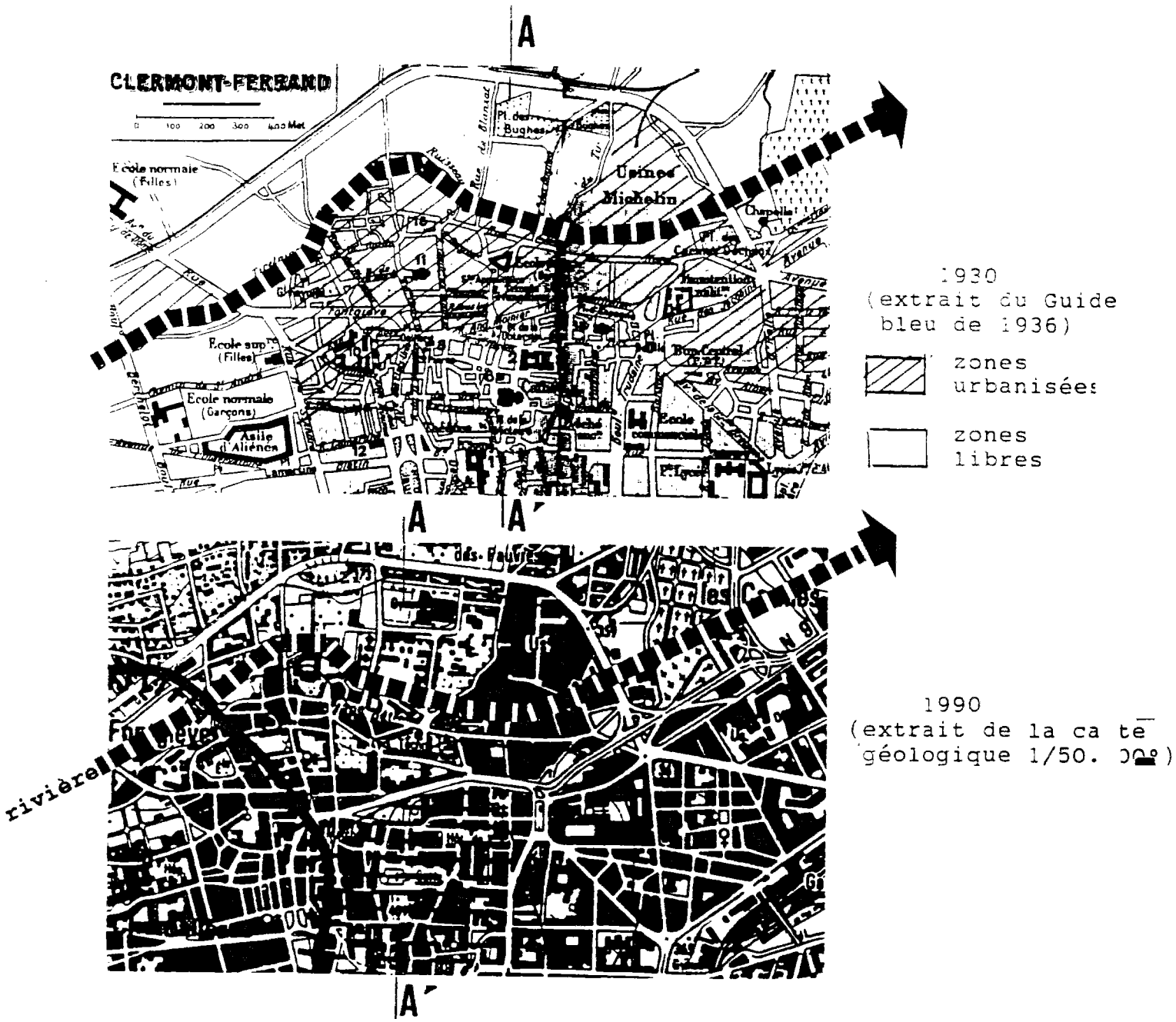


Figure 118 - Clermont-Ferrand , évolution du parcellaire et de la densité entre 1930 et 1990.

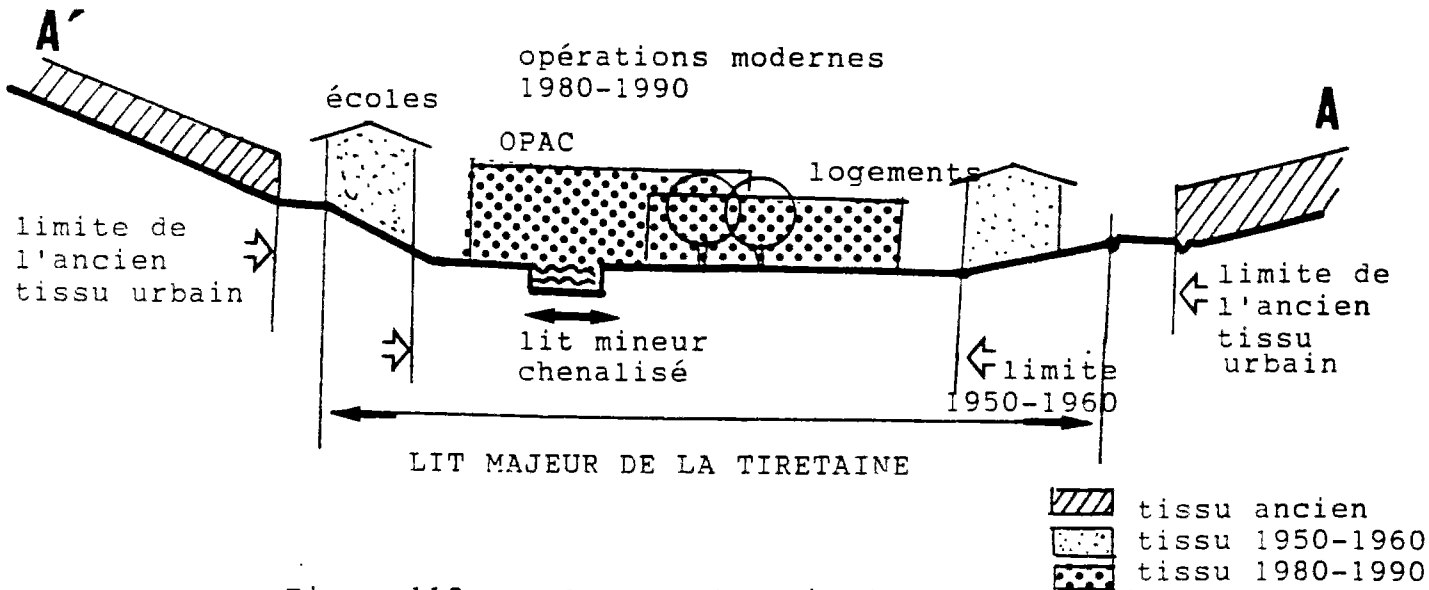


Figure 119 - Un urbanisme à risque hydrologique

c- Risque aggravé par l'implantation de grands équipements collectifs à l'amont

- grandes surfaces, écoles, casernes, terrains de jeux, de sports, hôpitaux, golfs, etc.

Ces équipements, installés à l'amont d'une ville, constituent un facteur aggravant du risque, pour leur grande capacité à créer des volumes d'eau de ruissellement, si aucune rétention pour les crues centennales n'est prévue.

d- Progression de l'imperméabilisation du centre-ville : risque d'augmentation des volumes de ruissellement

Liée en partie à l'Urbanisme[1], la progression de l'imperméabilisation du centre-ville suit le remplacement des maisons particulières avec jardins par des immeubles collectifs avec parkings et diminution des surfaces de jardins.

Comme données, nous avons l'apport du ruissellement urbain de Nîmes, de son BASSIN-VERSANT URBAIN du cadereau d'Alès, soit 60 m^3/s (estimation du Bureau Merlin-Etude [24], correspondant à la différence entre les chiffres d'entrée de ville (506 m^3/s) et de sortie de ville (566 m^3/s).

Mais nous ne connaissons pas les limites de la surface de ce bassin-versant urbain pour cette rivière spécifique (figure 120).

3.2.2.2.2. Hydrologie

a- L'urbanisation progressive des lits des rivières depuis 1930 Exemple de Clermont-Ferrand : l'occupation du lit majeur de la Tiretaine s'est effectuée (figure 119) :

- en 1950-1960, par des constructions de type HLM,
- en 1980-1990, par des opérations modernes :
  - logements style 1980,
  - OPAC (en panneaux préfabriqués).

La lecture des différents "styles" de construction, en opposition avec la limite du TISSU ancien, donne l'évolution de l'occupation de l'espace du lit majeur et du lit mineur urbain d'une rivière.

b- Les constructions autorisées en zone inondable (figure 121 et photo 122)

- CONSTRUCTIONS EN LIT MAJEUR et le long des berges du lit mineur. Soit les précautions d'origine (niveau des seuils, ...) ne sont pas suffisantes, soit les protections d'amont (endiguement, etc.) peuvent se rompre, soit il n'y a aucune précaution exigée comme à Vaison-la-Romaine (lotissements construits sur zone inondable depuis 1983), soit encore il y a eu autorisation de construire en zone inondable comme l'école maternelle de Bagard (Gard), sciemment construite dans une zone à risque malgré l'avis négatif d'habitants qui ont déjà connu trois crues dans leur vie.
- CONSTRUCTION "A CHEVAL" SUR LE LIT MINEUR. Toutes les constructions à cheval sur le lit mineur sont vulnérables, ainsi que les constructions le long des berges du lit mineur (exemples des constructions de Clermont-Ferrand, photos 123/124 et figure 125 de l'OPAC et de Nice).

---

[1] L'autre partie concerne le remplacement récent des engazonnements et sol stabilisé des abords des voies publiques par des sufaces minérales, plus faciles d'entretien

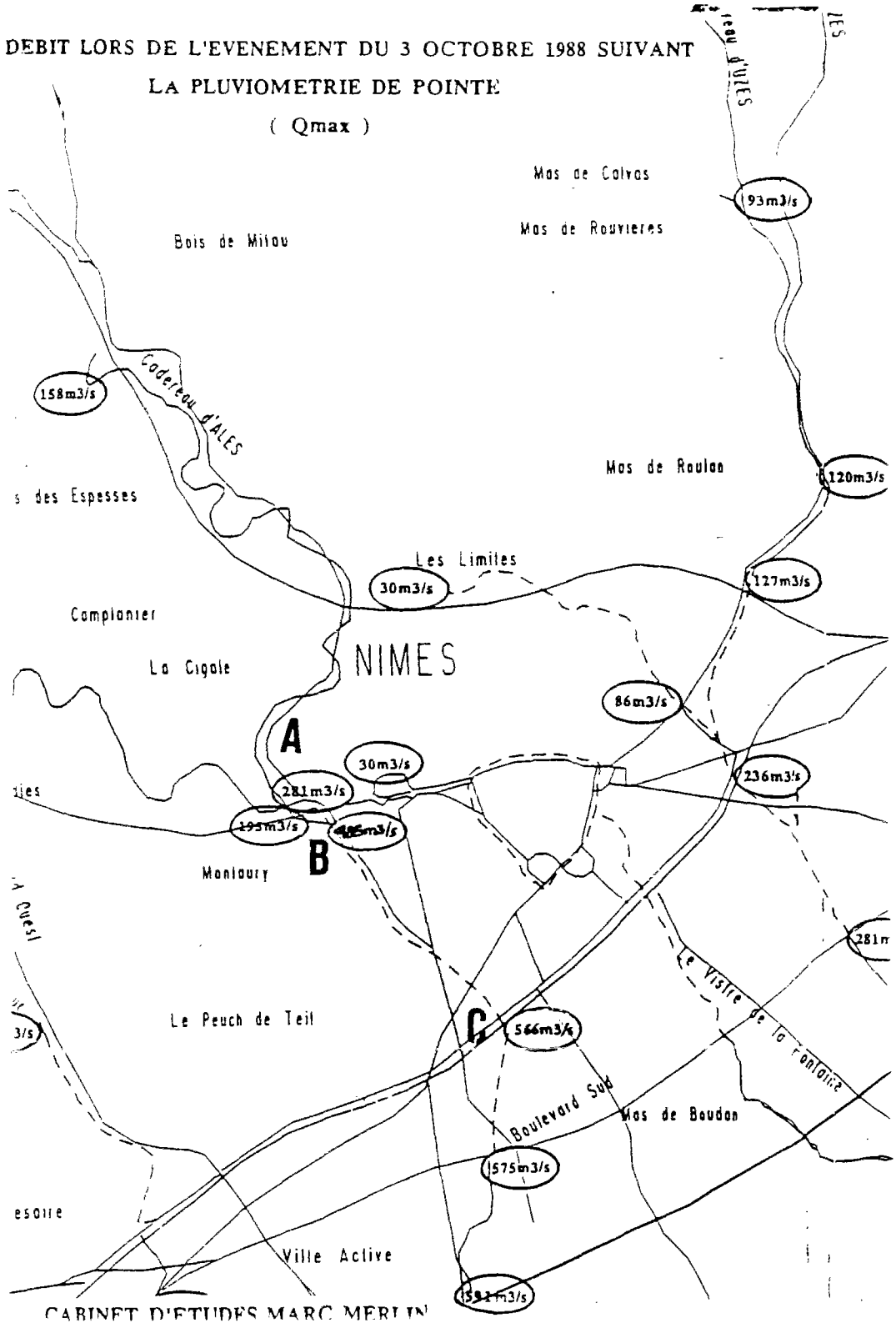
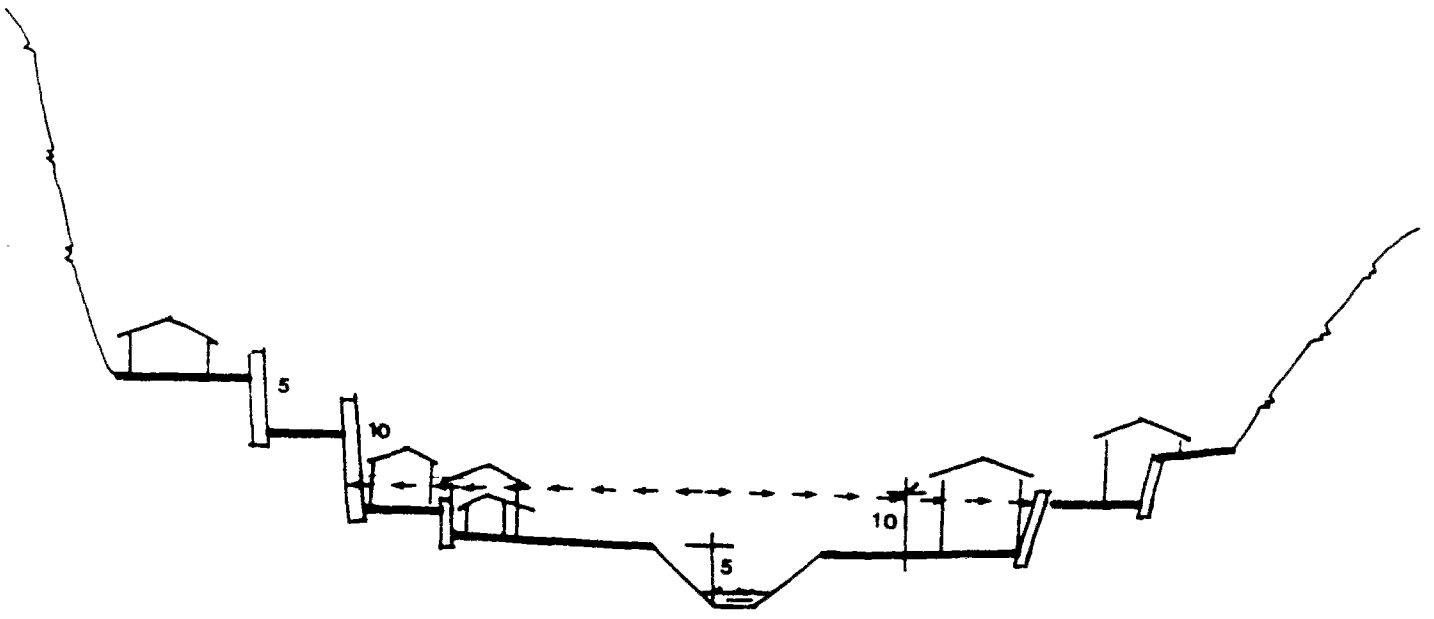


Figure 120 - Estimation des débits par les hydrauliciens des ruisseaux de Nîmes pendant la catastrophe du 3.10.1988(ruisseaux d'Alès et de Camplanier)

B- débit d'entrée : 506 m3/s

C- débit de sortie : 566 m3/s

débit centre-ville : 60 m3/s



Croquis 121- Les constructions en lit majeur et le niveau de la crue de 1992 (Vaison-La-Romaine, amont du Pont Romain)

Photo 122- Même site que le croquis 121

Photo 123-
Construction à cheval sur lit mineur.

les risques encourus

façade côté amont (large entonnement)

Clermont-Ferrand
l'Opac

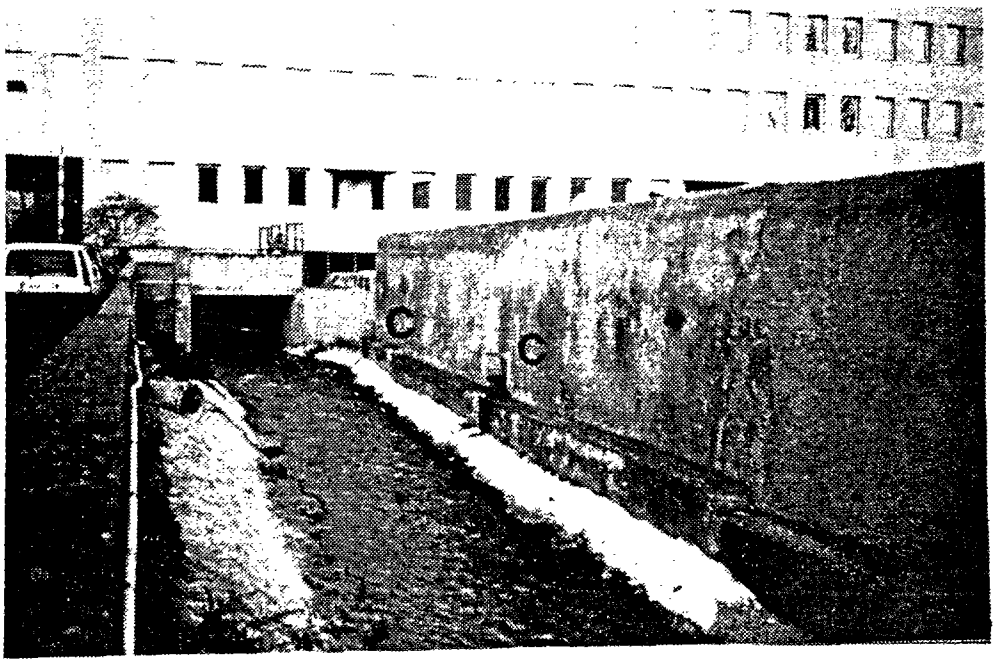


Photo 124-
Façade côté aval (petite sortie)

C=fenêtres d'évacuation

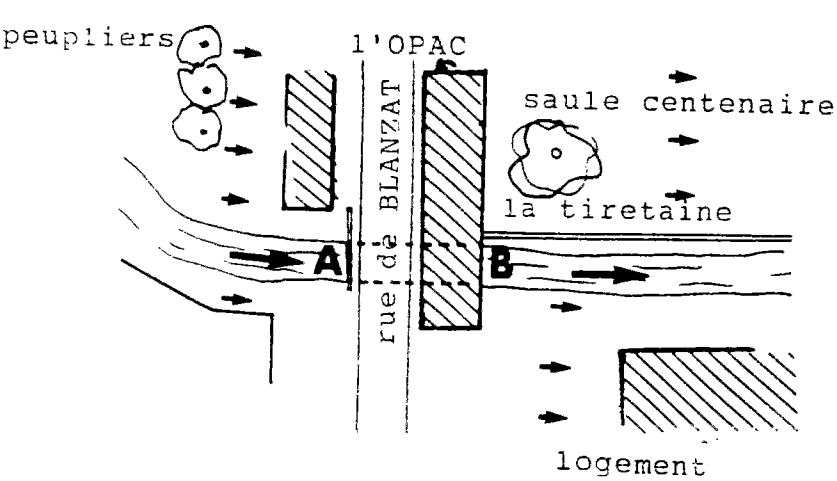


Figure 125- plan

prévision d'inondation du lit majeur pour une crue de 100 ans.

bâtiments à risques

C le risque d'inondation est prévu pour des petites crues:fenêtres d'évacuation pour parkings

c- Le danger de recouvrement des rivières sèches et ravins intra-muros et extra-muros

• Intra-muros

- PEUT-ON COUVRIR UN COURS D'EAU ? "Couvrir un cours d'eau, à fortiori le faire transiter dans des canalisations, constitue un aménagement à haut risque" (catastrophe de Nîmes, rapport PONTON [39] (p. 39).

- HISTORIQUE : en 1960, les parties urbaines des rivières de Nîmes ont été remblayées et mises en souterrain sous la double pression du Service d'Hygiène (lits secs, détritus, prédateurs) et du Service de la Voirie pour répondre aux demandes de stationnement et de circulation automobile (le "Quai des Dardaillons" est devenu à Nîmes la voie Pompidou, le "Quai Paul Gontard" à Vaison-la-Romaine est en 1993 une rue bordée des deux côtés par des maisons).

- DANGER : le danger réside dans le fait que le recouvrement s'effectue sur le lit mineur exclusivement, et que le choix de la taille des buses se fait à partir des directives de calcul du moment, en l'occurrence celles de 1977 où la crue centennale n'était pas prévue.

  Pour Nîmes, le gabarit amont aérien de la rivière d'Alès est de 70 m^2/section mouillée (tranchée de 14 mètres x 5 mètres de hauteur) alors que la galerie urbaine souterraine qui va suivre est de 6,28 m^2/section (3,14 m^2x2) (2 galeries voûtées Ø 2000) (figure 126a et photos 127 et 128).

- RESULTAT : le danger du recouvrement des rivières est flagrant: à Nîmes, les MAISONS SINISTRÉES sont sur les anciens tracés des cadereaux enterrés (plan des sinistres "Nîmes 1 an après" [47]).

• Extra-muros

Le recouvrement de la rivière du Chinaillon hors tissu urbain à l'amont du Grand-Bornand, pour installer des parkings aux pieds des pistes skiables, a été détruit lors de la catastrophe de 1987 et emporté.

d- L'encombrement artificiel des exutoires naturels

La constitution de barrières anthropiques artificielles autorisées par les plans d'urbanisme et qui font obstacle à l'écoulement des eaux, s'est avérée pour Nîmes être un facteur très aggravant de la catastrophe. Les eaux ont été piégées et ont inondé la ville basse pendant 6 jours au lieu de 4 heures. Planification : trois barrières anthropiques à Nîmes :

- le viaduc SNCF,
- le boulevard circulaire,
- l'autoroute A9.

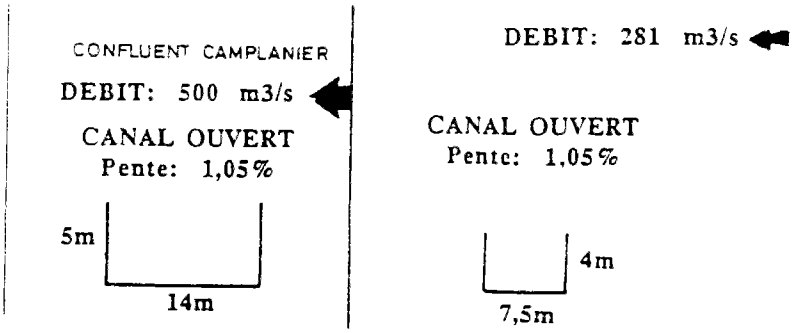


Figure 126.a.Gabarit amont aérien de la rivière d'Alès(Nîmes) (extrait de l'étude Merlin (24)

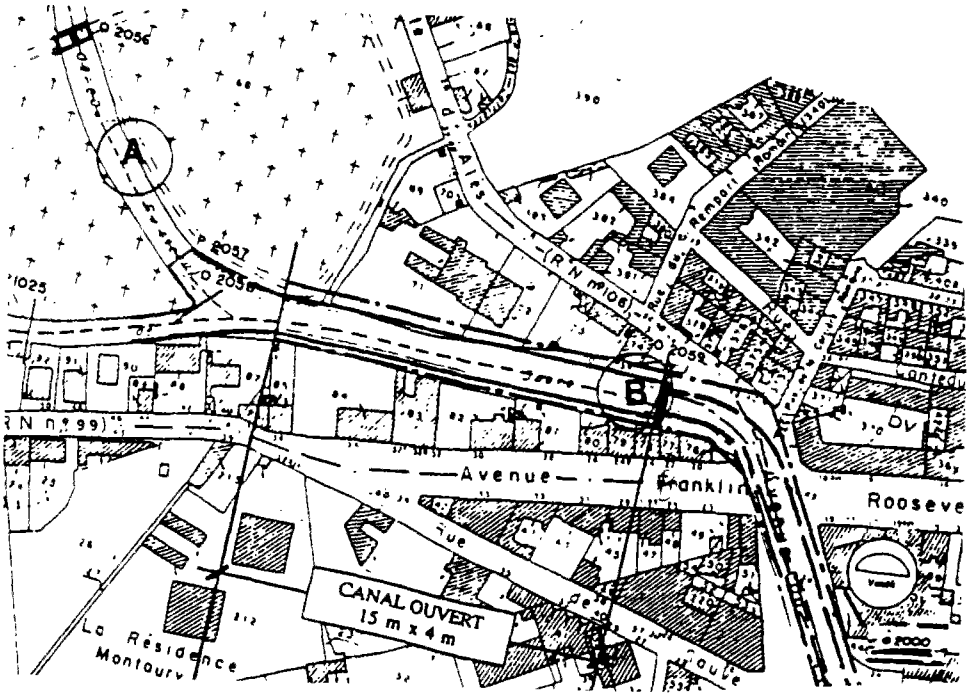
photo 127-

Gabarit ancien (A) : les arches du vieux pont du cimetière protestant(Nîmes)

Photo 128-

Gabarit moderne(B) : les entonnements d'amont de Nîmes, à l'endroit où la rivière est recouverte

Les eaux du profil (A) peuvent difficilement pénétrer dans les entonnements (B).



Plan 126-b

plan d'assainissement (Nîmes)
A- canal ouvert sec
B- galerie couverte

en 1988 le secteur B a débordé

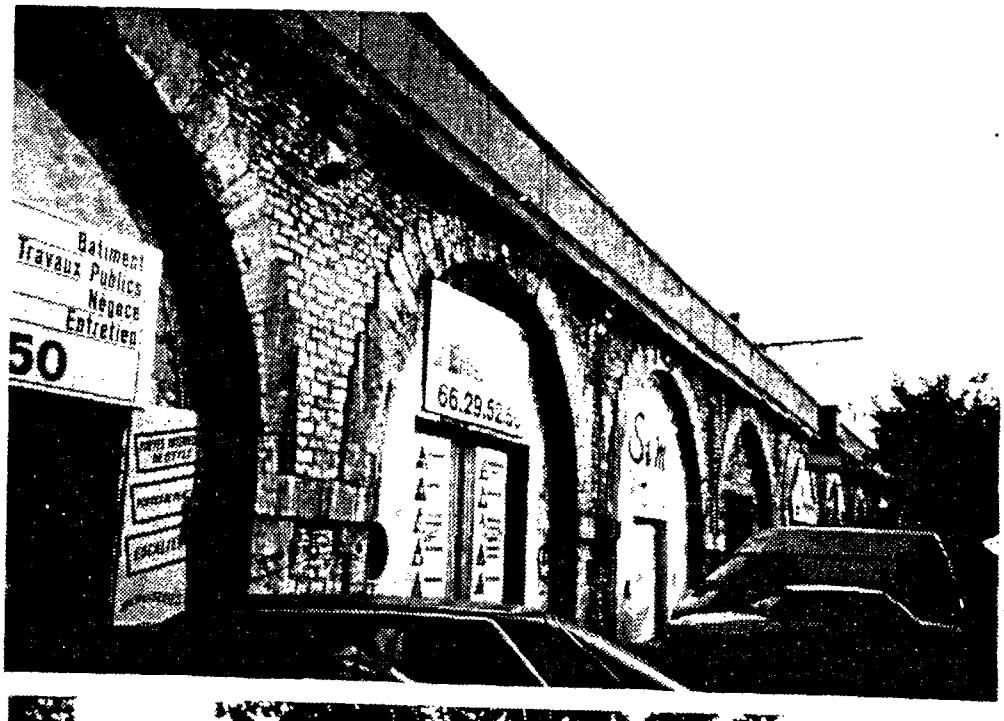
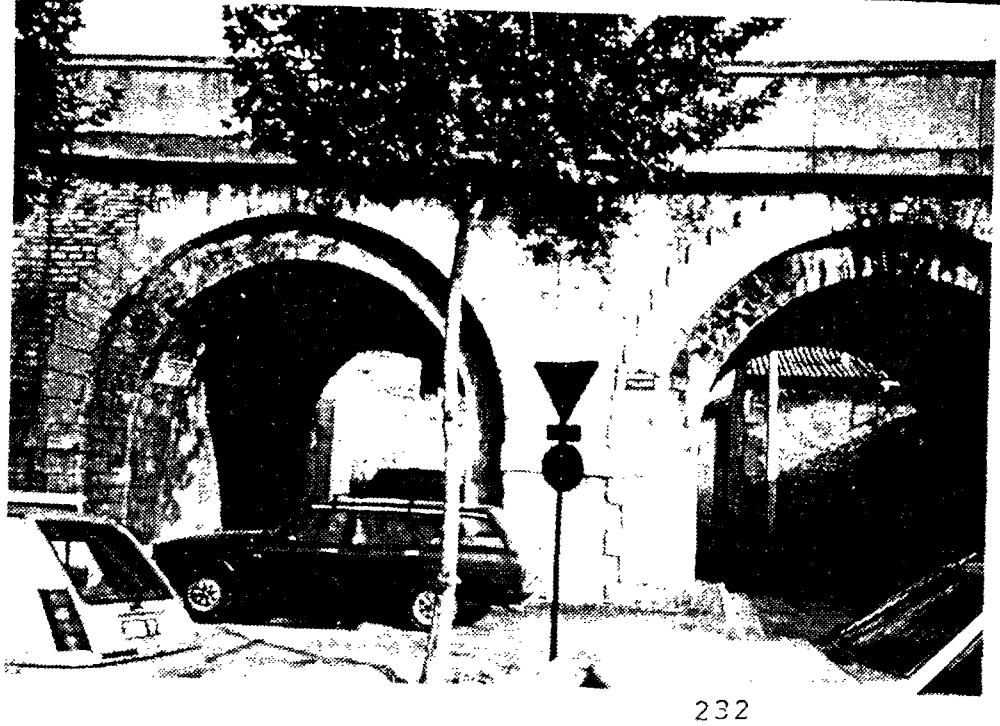


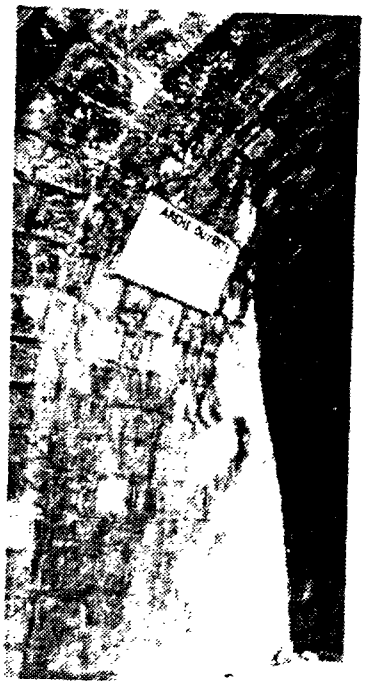
Photo 129-

SNCF , les arches pour le passage hydrolo--gique sont murées

Photo 130-

Après 1988, la SNCF libère quelques arches.





- EXEMPLE DU VIADUC SNCF : ce viaduc de 1 500 mètres de longueur a été construit vers 1900, avec 150 arches dont certaines se trouvent à plus de 10 mètres du sol.

Nos prédécesseurs avaient tenu compte des crues centennales à l'échelle de la ville. Depuis 1960, toutes les arches ont été progressivement occupées (photo 129) pour des commerces et entrepôts. En 1992, la SNCF libère et rend à la ville de Nîmes QUELQUES ARCHES pour favoriser les écoulements (photo 130).

Si nos prédécesseurs, vers 1900, ont construit les voies de la gare de Nîmes au premier étage (+ 6,00 mètres), c'était pour assurer le passage de l'écoulement urbain et protéger les rails des inondations.

Il en est de même pour la gare de Brigue (Suisse) où les voies se trouvent être à l'étage supérieur, et où il faut descendre pour rejoindre la place. La place de la gare de Brigue a été inondée le 26 septembre 1993 par 2 à 3 mètres d'eau et 1 à 2 mètres de boue.

e- Les protections dangereuses pour les rivières sèches et petites rivières: rehaussement, endiguement latéral

- LES REHAUSSEMENTS DU SOL PAR REMBLAIEMENT DU LIT MAJEUR
Exemple : le remblaiement du camping de Vaison-la-Romaine sur 0,70 mètre de hauteur lui a apporté une fausse sécurité (12 morts) (figure 131a).

- LES ENDIGUEMENTS LATERAUX DE LIT MINEUR
Les endiguements peuvent soit se rompre (endiguement centennal de Bédarrides) soit être submergé (endiguement de Brives-Charensac) (figure 131b).
Les endiguements peuvent aussi avoir des brèches comme celle que nous avons vue pour le camping du Mas d'Azil (Ariège).

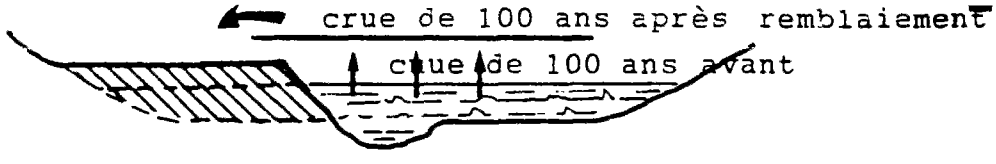


Figure 131-a Aggravation du risque hydrologique en zone inondable urbanisée.Le remblaiement du lit majeur relève le niveau des crues.

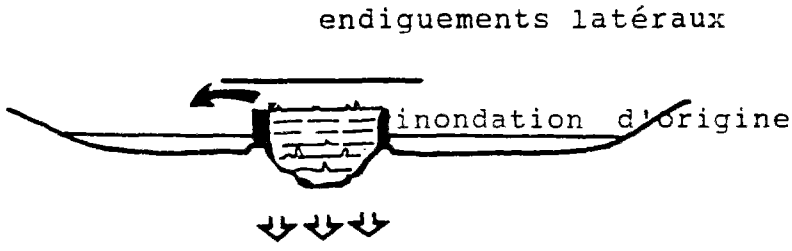
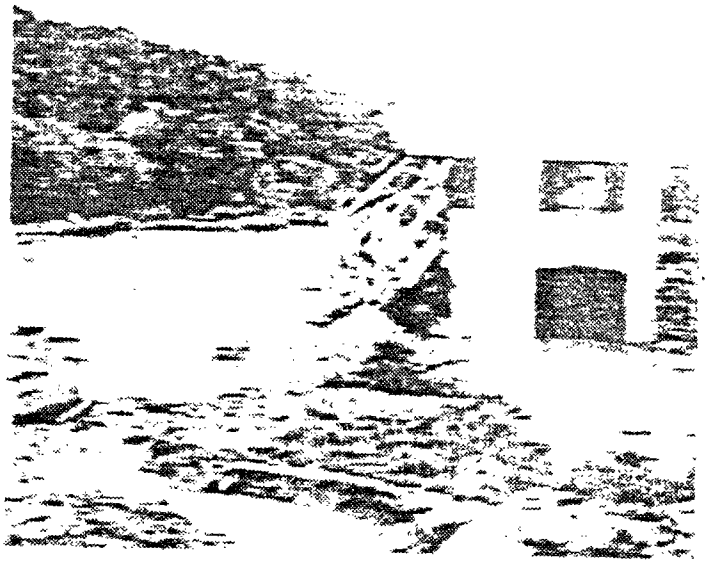


Figure 131-b Les risques des endiguements latéraux. Tout rétrécissement du lit majeur augmente la vitesse à l'aval et les dégâts.

Le Parisien 25.9.1992

Photo 132 -Vaison-La-Romaine



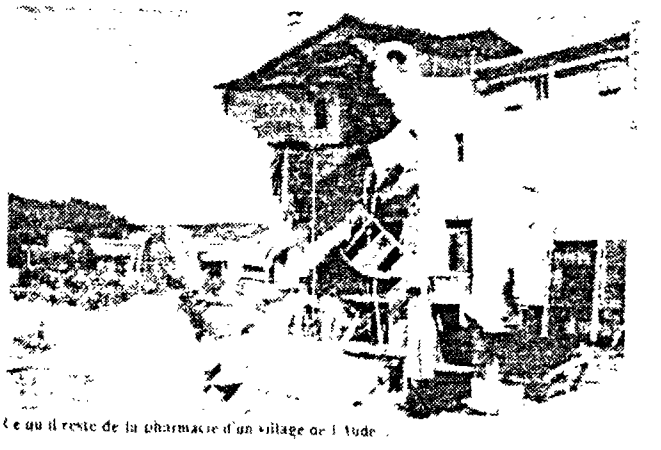
Le Parisien 23.9.1992

Photo 133 -Vaison-La-Romaine

La vulnérabilité des matériaux de construction en parpaings.

Paris-Match 20.10.1988

Photo 134- Nîmes



Ce qu'il reste de la pharmacie d'un village de l'Aude

Le Quotidien de Paris 28.9.1992

Photo 135 -Rennes-Les-Bains(Aude)

Emplacement vulnérable pour des constructions en pierres.

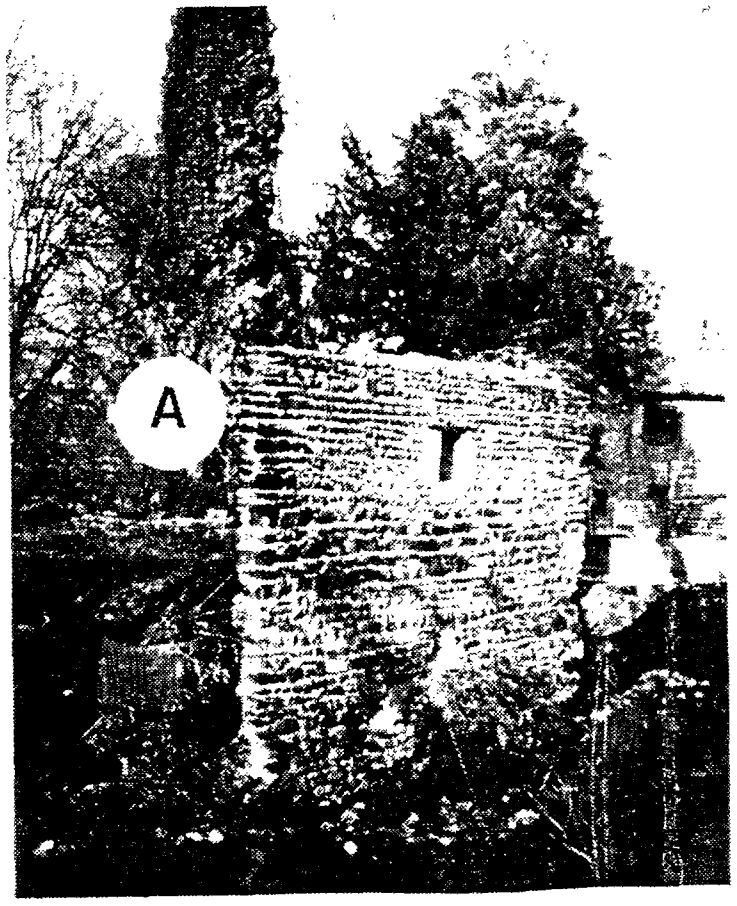
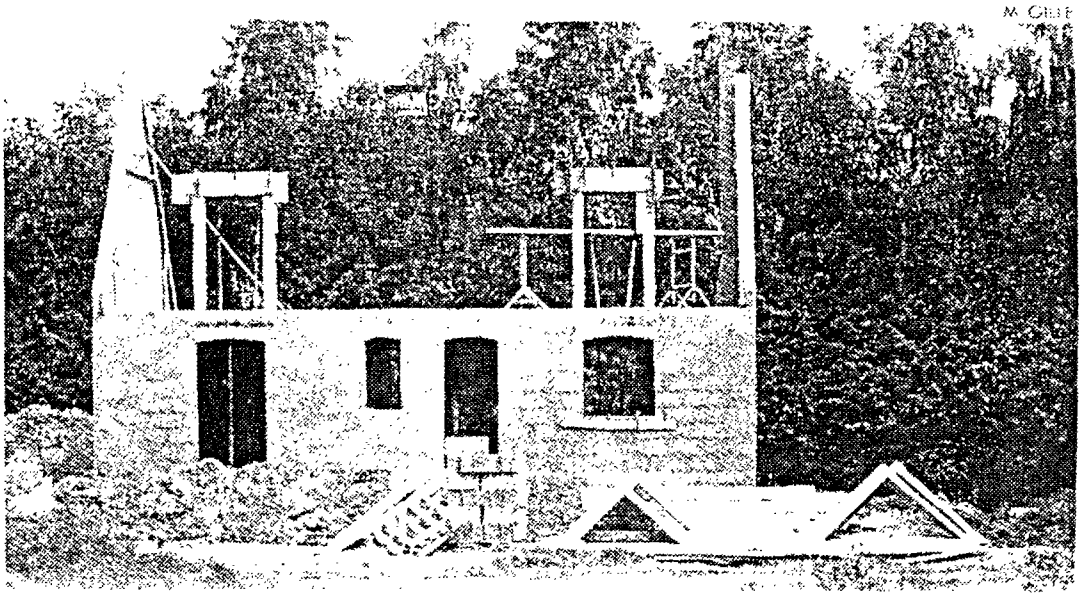


Photo 136 - L'Artière (Clermont-Ferrand)

Figure 137- Plan

Importance de l'orientation de la construction face à l'écoulement. Restes d'une maison, les deux murs de façade ont disparu, seuls restent les murs latéraux. Inondation ancienne: murs en lits de galets techniques du XVII siècle et fenêtres très petites (impôts sur les portes et fenêtres avant la Révolution).



Le Moniteur 29.8.1992

Photo 138- Vulnérabilité des constructions sans étages et mise en oeuvre vulnérable, sans raidisseurs ni chaînage.

3.2.3. Domaine de l'architecture

3.2.3.1. Les facteurs géomorphologiques aggravants

Ce sont les mêmes facteurs que pour l'urbanisme (3.2.2.) avec des constructions réalisées dans des lieux à risques (lit mineur, lit majeur, talweg, anciens marais, etc.).

Exemples : pour les villes helvétiques en bordure de lac, le niveau des plus hautes eaux a été "stabilisé" entre 1950 et 1970 mais sans tenir compte des crues centennales, ce qui fait que l'urbanisation récente est en situation de risque (les villes lacustres du Canton de Vaud à risque d'inondations, projet pour la ville d'Yverdon, annexe 2 pp. 623 à 628).

3.2.3.2. Les facteurs anthropiques aggravants en architecture

- vulnérabilité des matériaux de construction
- emplacement de la construction
- orientation des murs face à l'écoulement préférentiel
- construction vulnérable par sa mise en oeuvre
- construction vulnérable en rez-de-chaussée sans étages
- hauteur insuffisante de refuge
- inaccessibilité des toitures
- effondrement des toitures
- dégâts de la foudre sur les appareils météorologiques et les centres de secours
- vulnérabilité des ouvrages souterrains
- vulnérabilité des caves
- voies d'eau
- destruction des "précautions" d'origine
- fragilité du réseau VRD[1] mural
- vulnérabilité du mobilier urbain et des feux de signalisation
- aggravation du danger liée au mode de vie
- aggravation du danger liée à l'oubli du risque

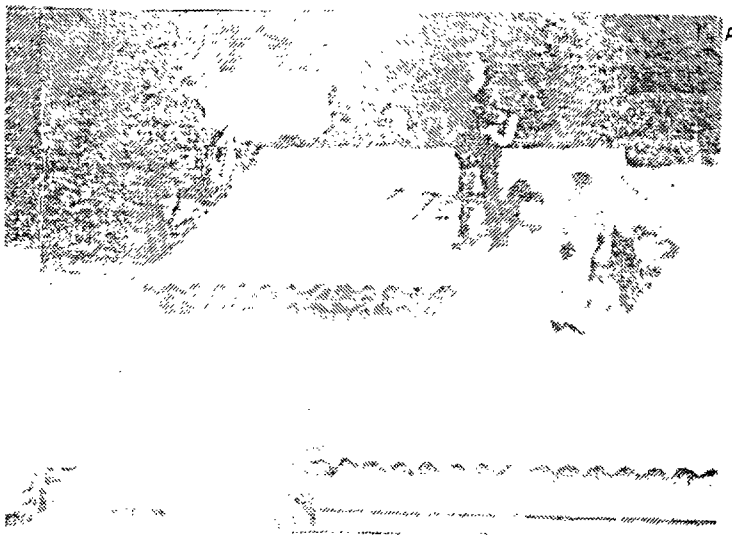
a- Vulnérabilité des matériaux de construction

- constructions dites légères,
- constructions en pierres,
- murs en panneaux préfabriqués.

- CONSTRUCTIONS LEGERES : pavillons.
Les constructions en parpaings, briques, siporex, etc., se sont révélées extrêmement vulnérables pendant les catastrophes majeures de ruissellement.
Exemple : destruction de maisons individuelles dans le lotissement récent de Théos à Vaison-la-Romaine (photos 132, 133).
Pour montrer la fragilité de ces murs, des troncs flottants en provenance d'une scierie ont été vus traversant de part en part ces maisons individuelles en murs de parpaings.
Les maisons de type "chalandonnette" auraient elles aussi peu de chance de résister à un flot de ruissellement chargé d'éléments solides.

---

[1] V.R.D. : Voiries et Réseaux Divers



extrait de Paris-Match du 8.10.1992
Vaison-La-Romaine

Francis Rodier a pu pratiquer un trou avec une paire de pinces dans la paroi de beton pour faire passer ses deux fils, Sebastien et Emmanuel, du grenier sur la terrasse d'à cote

extrait de Paris-Match du 20.10.198
Nîmes

Photos 139 et 140 - L'inaccessibilité des toitures
les habitants cassent leur toiture
pour se réfugier dessus.

Situation insolite dans le métro parisien : à gauche, un agent de la R.A.T.P., pantalon retroussé, s'adresse au conducteur d'une motrice immobilisée à la station porte de Montreuil dont les couloirs (à droite) sont totalement impraticables.

extrait France-soir pour le 27.6.1990

Photo 141 - Vulnérabilité des ouvrages souterrains
au ruissellement (Paris).

- CONSTRUCTIONS EN PIERRES

Des constructions en pierres, avec des murs de 40 cm d'épaisseur, ont été détruites lorsqu'elles étaient situées dans les zones à écoulement préférentiel urbain.
Les murs porteurs et les murs de refend sont "grignotés" (photos 134 et 135).

- MURS EN PANNEAUX PREFABRIQUES

Le panneau préfabriqué est une technique récente (1960). De fait, un mur en panneaux préfabriqués n'a aucune chance de résister à un courant de 4 m/s à 11 m/s, l'accrochage des plaques non solidaires n'ayant pas été calculé pour la pression latérale ou l'arrachement.

Par contre, la structure porteuse "en pilotis" peut résister si les calculs ont prévu ce courant, et les panneaux du rez-de-chaussée peuvent être emportés avec risques d'embâcles, ces éléments solides apportant une aggravation au risque hydrologique.

b- Constructions vulnérables

- EMPLACEMENT DE LA CONSTRUCTION

Une construction vulnérable peut se trouver à quelques mètres d'une autre construction non menacée dans la zone de turbulence du ruissellement. A Brives-Charensac (1981), il a été observé une distance de 3 mètres entre les maisons endommagées et les maisons indemnes [2].

- ORIENTATION DES MURS FACE A L'ÉCOULEMENT PRÉFÉRENTIEL

Les constructions orientées parallèlement aux flots résistent mieux que les constructions perpendiculaires aux flots.
Exemple : Moulin de Pourliat, à l'Artière - Clermont-Ferrand, où seuls restent les murs perpendiculaires et porteurs (photo 136 figure 137).

- CONSTRUCTION VULNERABLE PAR LEUR MISE EN OEUVRE

Les constructions avec murs porteurs de remplissage sans raidisseurs sont très vulnérables (photo 138). Par contre, les raidisseurs en béton armé se comportent en rez-de-chaussée comme des pilotis, étant reliés au plancher du premier avec un chaînage circulaire en poutrelles, permettant de résister au courant.

- CONSTRUCTION VULNERABLE EN REZ-DE-CHAUSSEE SANS ETAGES

L'observation des dommages de la crue à Vaison-la-Romaine montre que les maisons de plein pied n'ont pas résisté et ont été emportées, ou bien ont eu leur toit détruit, alors que les maisons à un niveau (R+1) résistaient (photo 138).

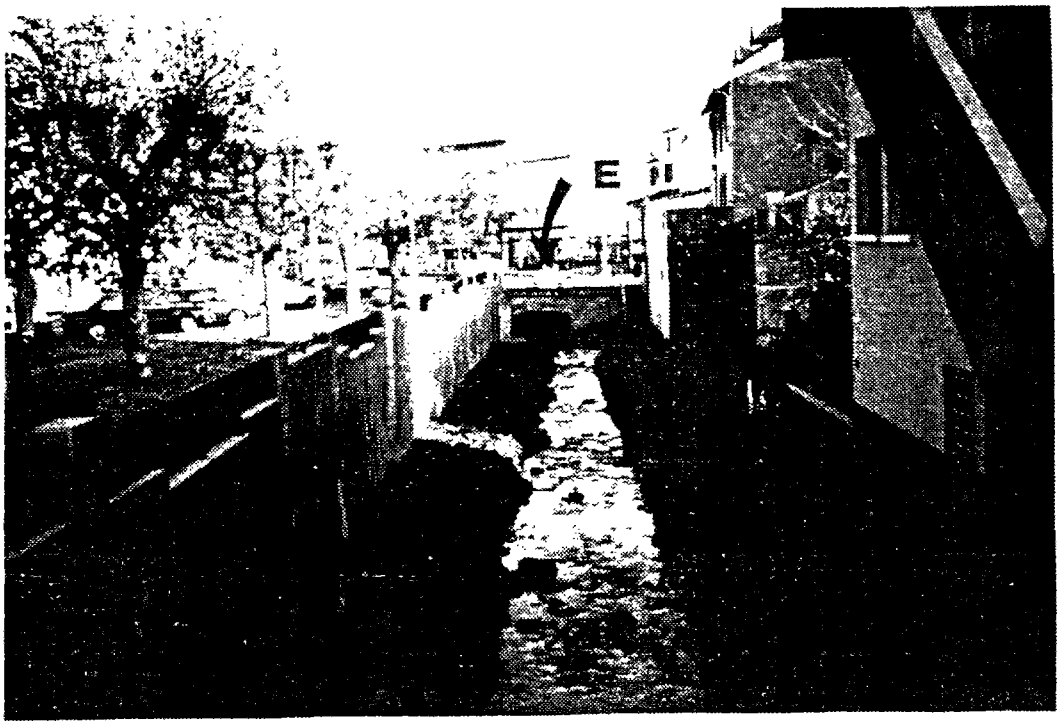
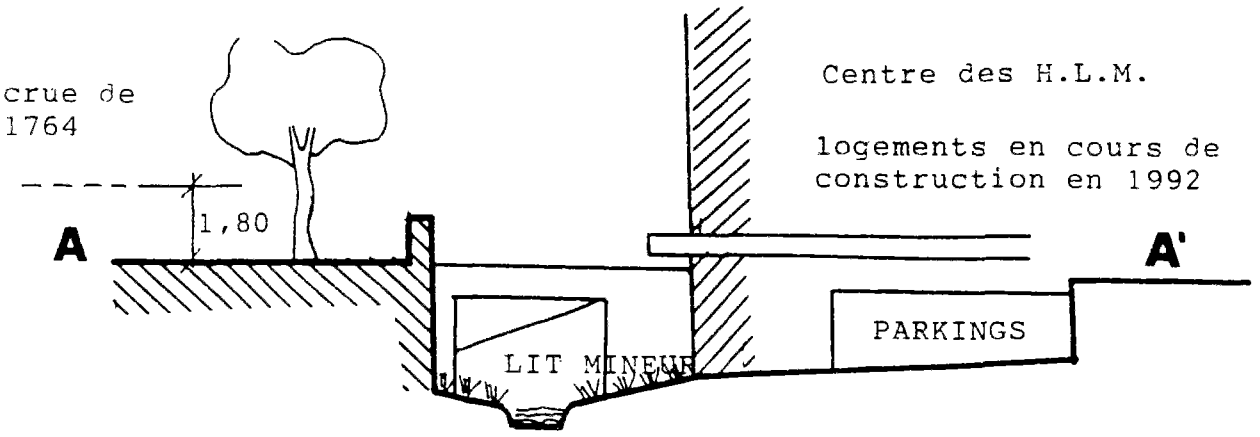


Photo 142-

Chenalisation des rivières urbaines ramenées au lit mineur

risque de débordement en "E"

Aubrière (Clermont-Ferrand)



Coupe 143 -Vulnérabilité des parkings souterrains donnant sur lit mineur. à Aubrière (Clermont-Ferrand)

Photo 144-Le problème des soupiraux et la vulnérabilité des caves aux crues de ruissellement, les voies d'eau. (Nîmes, bl.de Prague)

Deux explications :

- une meilleure construction pour les maisons R+1,
- l'eau a pénétré sous les toits des maisons de plein pied, occasionnant le renversement par l'intérieur des murs et l'effondrement de la toiture.

- HAUTEUR INSUFFISANTE DE REFUGE

Une maison en rez-de-chaussée n'a donc pas la hauteur suffisante pour les crues centennales et remous, l'eau étant montée jusqu'aux toitures à Vaison-la-Romaine.

- L'INACCESSIBILITÉ DES TOITURES

Plusieurs sinistres font apparaître l'impossibilité d'accéder aux toits, à partir de l'intérieur de la maison.
A Nîmes, à Vaison-la-Romaine, des familles ont dû CASSER les plafonds et toitures pour trouver refuge sur les toits.
Ce travail de casse, difficile, peut de plus être fatal s'il est plus long que la montée des eaux (photos 139 et 140).

- L'EFFONDREMENT DES TOITURES

Pour la catastrophe du 1.6.1992 dans le département de la Seine-Saint-Denis (Aubervilliers, Saint-Denis, Sarcelles) avec une pluie de + 90 mm en 6 heures (23h-5h), il y a eu des effondrements de toitures, par le poids de la lame d'eau totale et la force des vents.

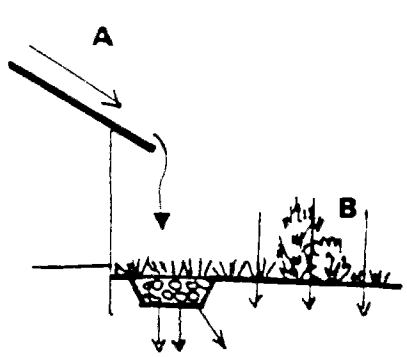
Constat : les effondrements de toitures ont eu lieu sur des toitures en mauvais état, et mal entretenues (constat de la DEA de la Seine-Saint-Denis).
Notre avis : Il est possible aussi que les calculs pour les charpentes des toitures aient été sous-estimés pour le poids des gouttes de pluie en région parisienne.

- LES DEGATS DE LA FOUDRE SUR LES APPAREILS MÉTÉOROLOGIQUES ET LES CENTRES DE SECOURS

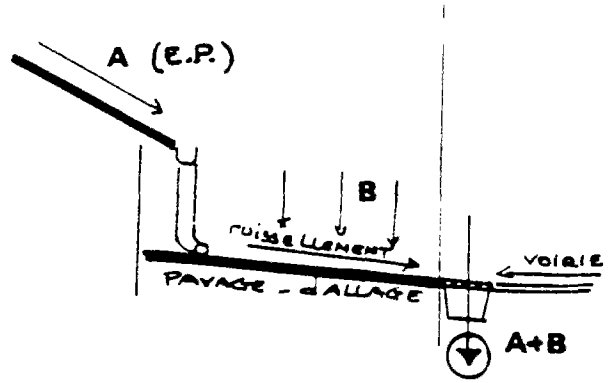
Les cumulo-nimbus produisent de nombreux impacts de foudre.
Le RADAR de Nîmes "Melody", qui permet la détermination fine des quantités de précipitations attendues, a été frappé par la FOUDRE, la veille au soir de la catastrophe de Vaison-la-Romaine (1992).
La DDE de la Seine-Saint-Denis et le CODIS ont été foudroyés la veille du 27 juin 1990.
La station météorologique de Montsouris a été foudroyée en 1988.

- VULNERABILITÉ DES OUVRAGES SOUTERRAINS

Les ouvrages souterrains urbains sont des facteurs aggravants pour les crues de ruissellement, en ce sens que les eaux de surface pénètrent par les rampes d'accès et les escaliers piétons, et que l'ennoiement de ces ouvrages a entraîné des morts (catastrophe de Nîmes, parking de l'Esplanade).



1988- Eaux pluviales(A) et de ruissellement(B) infiltrées à la parcelle



1990- Imperméabilisation des sols privés et rejets clandestins en canalisation

Schéma 145 - Destructions des précautions hydrologiques d'origine

- LES OUVRAGES VITAUX SOUTERRAINS
A Nîmes, le PC du Plan Orsec, qui se trouvait en sous-sol de la Préfecture, à l'abri du risque de bombardement et du risque nucléaire, a été ennoyé et rendu inopérationnel (rapport Ponton p. 15), de même pour le central téléphonique et les stations de relevage souterrain.

A Paris (1990), ce sont les centraux souterrains des feux tricolores sous la Bastille qui ont été ennoyés, immobilisant la circulation dans la capitale pendant 6 heures ainsi que le mouvement des ambulance (16h-20h).
Les 2 000 transformateurs urbains d'EDF ont été ennoyés, aggravant des délais de remise sur secteur.
L'ennoiement du RER (ligne A et B) et du Métro a retardé le trafic des transports en commun, obligeant des milliers de personnes à traverser Paris à pied (photo 141).

- LES PARKINGS SOUTERRAINS
• Vulnérabilité des parkings publics : exemple du parking de l'Esplanade à Nîmes où les eaux de ruissellement se sont engouffrées par les rampes, remplissant les sous-sols.
Effets aggravants : absence d'issues de secours, arrêts de la ventilation et de l'éclairage de secours, détruits au moment le plus critique.

• Vulnérabilité des parkings privés : les parkings privés peuvent devenir des lieux à RISQUE MORTEL s'ils sont construits près de lit mineur (exemple 1) ou au fond du lit mineur (exemple 2).

Exemple 1 : parking privé souterrain rue Henri Barbusse/Avenue du Maréchal Leclerc (Clermont-Ferrand) mitoyen à la rivière La Tiretaine.
Exemple 2 : parking des HLM à Aubrière (Clermont-Ferrand) sur la rivière l'Artière, dont l'accès se fait au niveau du lit mineur de la rivière, et où on sait que la crue historique de 1764 a eu une hauteur de 1,80 mètre (photo 142 et coupe 143).

- LA VULNERABILITE DES CAVES
L'inondation des caves résulte de la présence des soupiraux, indispensables à l'aération et à la salubrité des murs de fondation (photo 144).
Les soupiraux ne peuvent donc que rarement être obstrués, mais ils peuvent être protégés côté jardin par des murets.

- LES VOIES D'EAU
D'où provient l'eau de ruissellement en sous-sol ? :
- accès le plus courant : les rampes, escaliers d'accès, soupiraux,
- autre accès : les tranchées des travaux de câbles se transformant en tranchée drainante :
- exemple de Nîmes (1988) l'eau a ennoyé la salle du central téléphonique en arrivant avec les câbles souterrains EDF installés dans les tranchées drainantes (rapport Ponton p. 47).

Coupe 147 - Ouvrage clandestin pour empêcher le fonctionnement hydraulique du bassin

Photo 146 - Effet aggravant : modification d'un bassin de rétention lotissement "Château d'eau"(Seine-Saint-Denis)

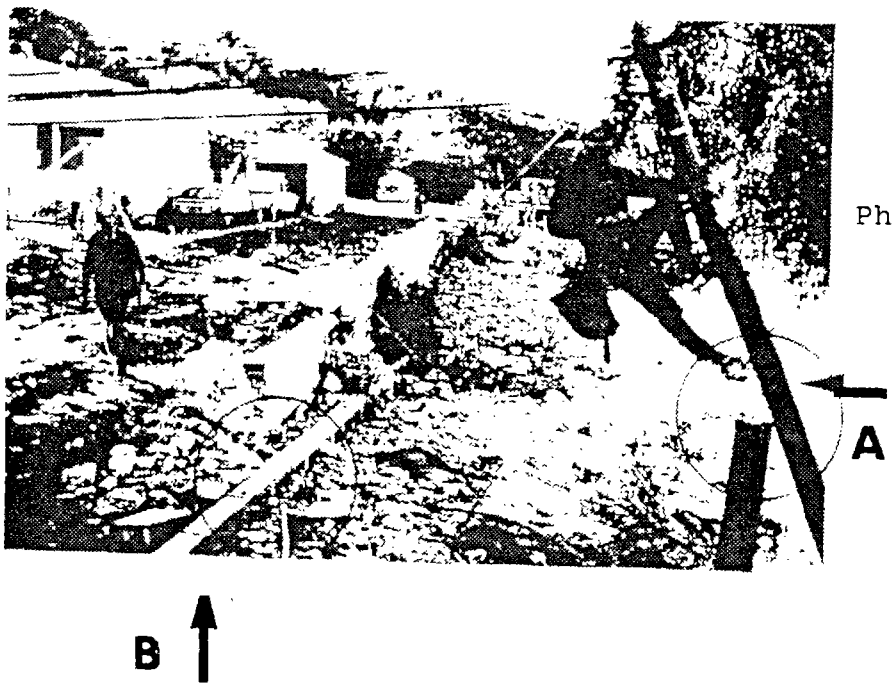


Photo 148 - Fragilité du réseau filiaire

A = poteau PTT
B = poteau EDF

- exemple de la station météorologique de Montsouris, où le sous-sol a été ennoyé (1987) par une voie d'eau en provenance des câbles EDF souterrains installés dans une tranchée drainante, et ceci malgré un cuvelage de protection. Cette salle comprenait les archives historiques météorologiques de France depuis la Révolution de 1789.

- LA DESTRUCTION DES "PRECAUTIONS D'ORIGINE"

Nous avons relevé un certain nombre de "précautions exigées à l'origine" du projet contre le risque de ruissellement mais non sauvegardées avec le temps.

• Exemple de l'Université de Grenoble (déjà citée) : les rez-de-chaussée sur pilotis ont été murés et aménagés.
La destruction du matériel est donc certaine pour la prochaine crue.
Effet aggravant : l'absence d'issues de secours rapides vers le premier étage, non prévues lors de la construction des dalles du premier étage et le risque de piégeage des individus.

• Exemple de la disparition des "précautions d'origine" dans le département de la Seine-Saint-Denis (lotissement du "Château d'eau") 1988 (cf. annexe 1 p. 598, 599, schéma 145).
Effet aggravant micro-spatial :

- la disparition des tranchées drainantes d'accueil des eaux de toitures,
- la disparition des gouttières (sur 50 habitats, environ 1 seul logement a conservé l'état d'origine),
- le dallage des parties d'infiltration,
- le rejet des eaux pluviales de toitures et de parcelle au réseau d'assainissement, non prévu dans les calculs de construction du réseau séparatif.

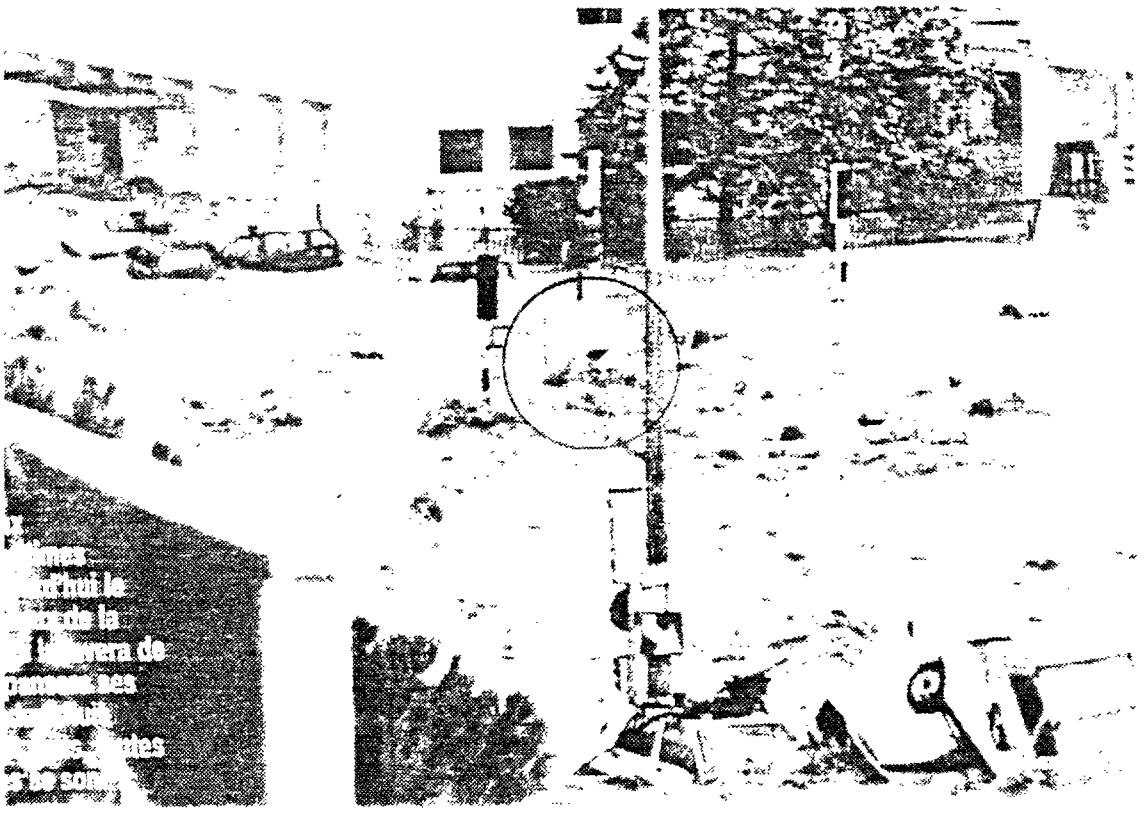
• Exemple de court-circuitage de fonction d'un bassin de rétention privé dans le département de la Seine-Saint-Denis (lotissement "le Château d'eau" cf. annexe 1 pp. 572 à 575 photo 146 et coupe 147).

Les riverains ont rajouté sans autorisation un ouvrage destiné à court-circuiter les capacités hydrauliques du bassin, de rétention, pour éviter d'avoir de l'eau dans LEUR bassin et pour l'évacuer directement au réseau.

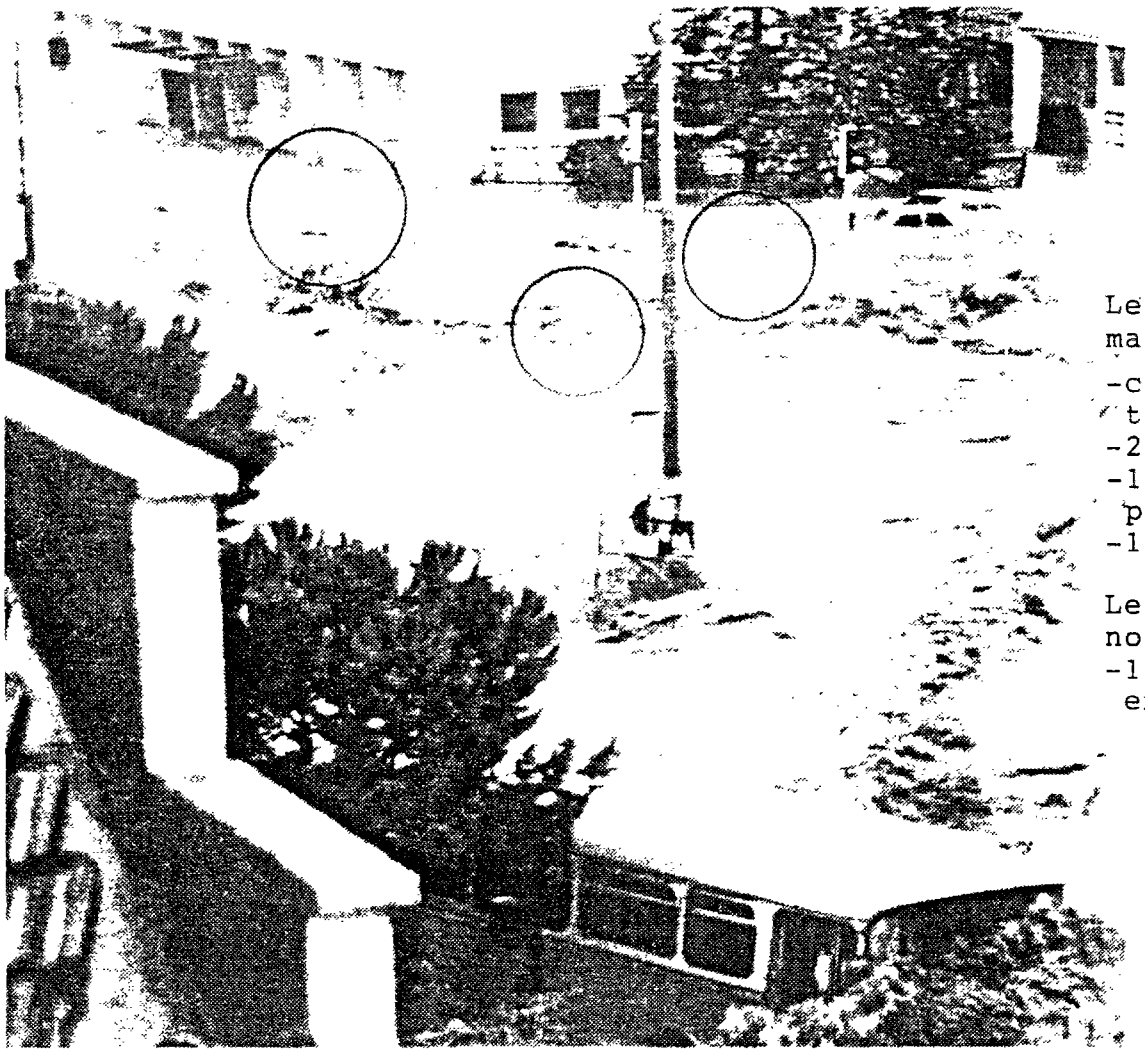
Effet aggravant : annulation de la rétention et surcharge du réseau en aval non prévue dans les calculs d'assainissement.

- FRAGILITE DU RESEAU VRD MURAL

Lors de la catastrophe de Nîmes (1988) tout le réseau VRD mural du centre-ville a été détruit avec l'arrachement des conduites par les véhicules flottant en dérive : câbles EDF, PTT, les réseaux d'eau et compteurs d'eau, les descentes d'eaux usées extérieures (E.U.) et les descentes d'eaux pluviales (E.P.).



La vulnérabilité du mobilier urbain.
Photo 149 - Cliché pris à 9 H ,Nîmes le 3.10.1988,rue de la Bienfaisance



Les éléments manquants
-cabine téléphonique
-2 feux tricolores
-1 panneau publicitaire
-10 voitures

Les éléments nouveaux
-1 autobus en détresse

Photo 150 - Cliché pris à 10 H , soit une heure après.
Des comportements à risque (la présence d'un car).

- FRAGILITE DU RESEAU FILAIRE : EDF, TELECOM (photo 148)

La fragilité des liaisons par poteau télégraphique a rendu le SERVICE D'ANNONCE DES CRUES du Vaucluse inopérant au moment même où ses pronostics pouvaient s'avérer vitaux (catastrophe de Vaison-la-Romaine de 1992).

- LA VULNERABILITE DU MOBILIER URBAIN ET DES FEUX TRICOLORES

La comparaison de trois photos de Nîmes prises au même endroit à 9h, 10h, et 14h pendant l'inondation montre (extrait Paris-Match 20 octobre 1988 photos 149 et 150) :

• que la hauteur de l'eau est quasiment la même sur les trois photos: 0,40 mètre d'eau. L'estimation est faite à partir de quatre repères : hauteur de l'eau par rapport à un soubassement de clôture, à un soubassement de vitrage de magasin, aux branches basses de végétaux et au niveau de l'eau arrivant sous les genoux des sauveteurs ;
• que la vitesse du courant, avec vagues et remous, est très forte à 9h et 10h, mais qu'à 14h le courant se calme mais avec la même hauteur d'eau ;
• qu'entre 9h et 10h, c'est-à-dire au début de la crise ont disparu : 20 voitures emportées, 1 cabine téléphonique, 1 feu tricolore, 1 panneau publicitaire type Decaux ;
• qu'est apparu sur la photo de 10h un car de ramassage scolaire à contre-courant, alors que le niveau de l'eau était déjà à 40 cm depuis 1 heure ;
• que l'évacuation de ce car, ayant navigué imprudemment en aquaplanage important, n'a pu se faire que 4 heures après (10h-14h) ;
• que les arbres, arbustes et plantes grimpantes privés (le long des immeubles) ont résisté à la crue et n'ont pas eu de dégâts ;
• que la rue de la Bienfaisance (lieu photographié) se trouve à proximité de l'ancien tracé de la rivière d'Alès enterrée.

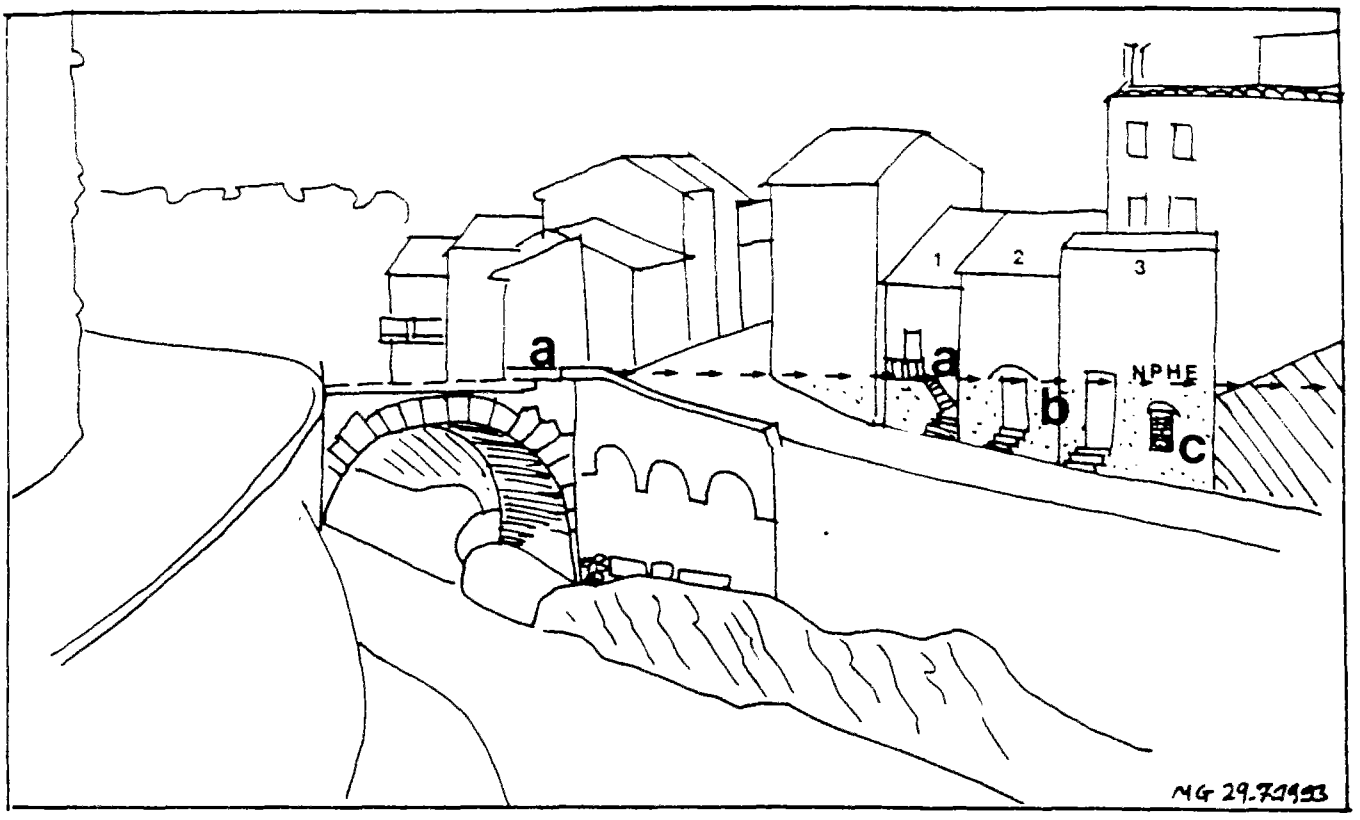


Figure 152[a] - Croquis in situ
Observations

L'oubli du risque : les maisons du quai.
Maison 1 : le perron de la porte d'entrée est à la même hauteur que le haut du parapet restant du pont Romain
Maison 2 et 3 : les portes d'entrée sont à 2 et 3 mètres sous ce niveau
Maison 3 : travaux de ravalement en juillet 1993 , la fenêtre(c) vient d'être murée (leçon de la crue du 22.9.1992)

Leçon (1) ou oubli(2 et 3) de la crue de 1616 ?

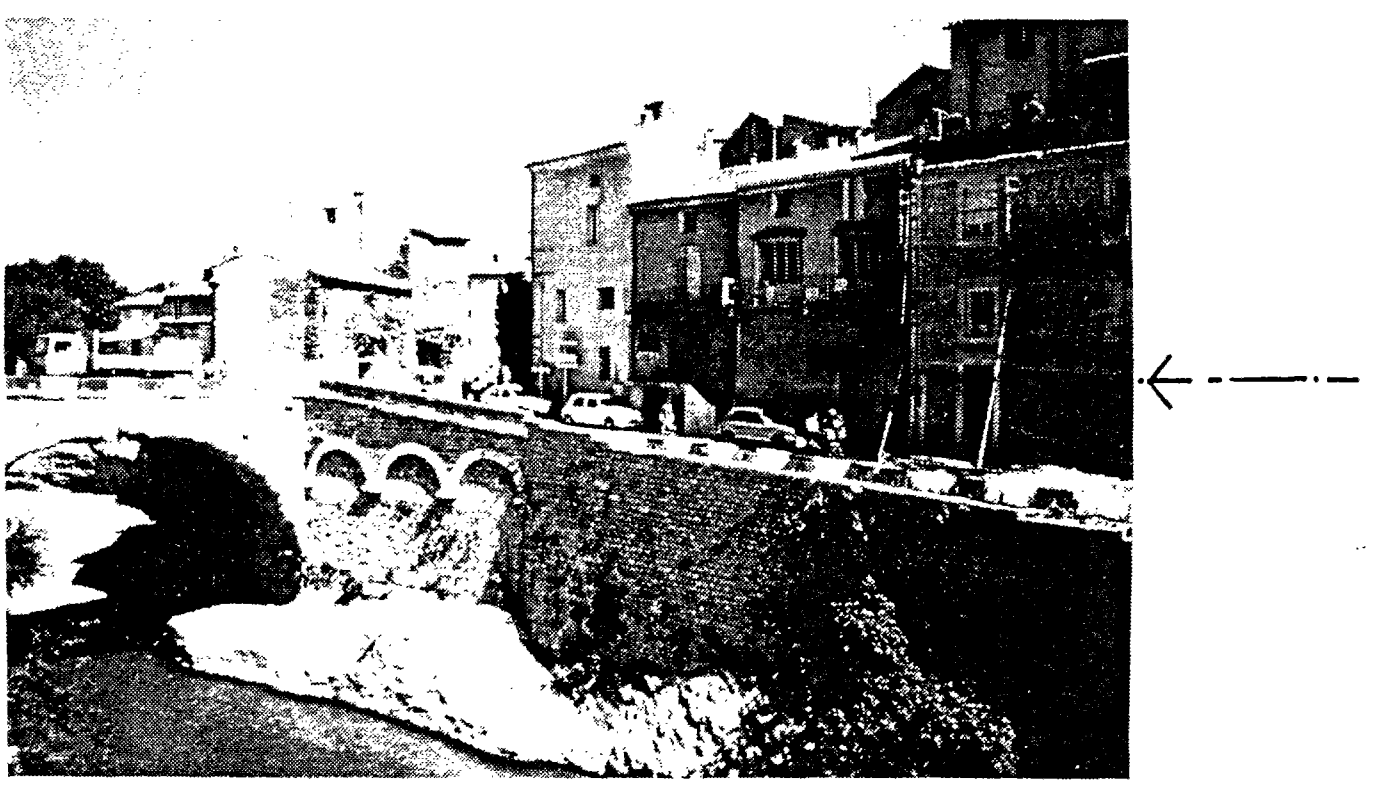


Photo 152[b] - L'aggravation du danger liée à l'oubli du risque
les traces d'humidité sur les murs de façade indiquent le niveau d'eau de l'inondation pluviale (juillet 1993)

- L'AGGRAVATION DU RISQUE LIEE AU MODE DE VIE

Le risque est énorme face aux crues de ruissellement exceptionnelles, si les gens habitent et surtout DORMENT au rez-de-chaussée, dans les zones à écoulement préférentiel.
• Interdire les logements d'habitation en rez-de-chaussée, ou les chambres en construction pavillonnaire (figure 153).
Exemple de risque possible : Marseille et les logements en rez-de-chaussée le long de la Canebière et à l'arrivée du Quai des Belges et de la rue de la République (inondation du 23/09/1993).

Cette proposition est applicable grâce au Permis de Construire ou au Permis de Rénovation, où l'obligation d'indiquer la "distribution" des pièces et leur "affectation" est exigée sur plan ; il peut donc y avoir corrections des affectation.

- L'AGGRAVATION DU DANGER LIEE A L'OUBLI DU RISQUE

En réalisant une analyse de site sur les abords proches du Pont Romain de Vaison-la-Romaine, nous avons constaté que :
• le niveau haut du parapet romain correspond exactement au niveau du perron de la première maison de la façade sur quai. C'est donc que cette maison a été construite avec le souvenir de la catastrophe de 1616, et que des précautions ont été prises pour éviter l'inondation ;
• les deux autres maisons ont leur porte d'entrée (et fenêtres) au niveau de la chaussée, soit 2 à 3 mètres plus bas. Elles ont été ennoyées en 1992 : il reste des traces d'humidité sur les murs en juillet 1993 correspondant aux PHE (et au niveau haut du parapet). On peut dire que les maisons n° 2 et n° 3 ont été construites longtemps après en oubliant la crue de 1616 ;
• des travaux de rénovation ont été réalisés en juillet 1993 sur la maison n° 3 : la fenêtre du rez-de-chaussée est murée (figure 152a et photo 152b).

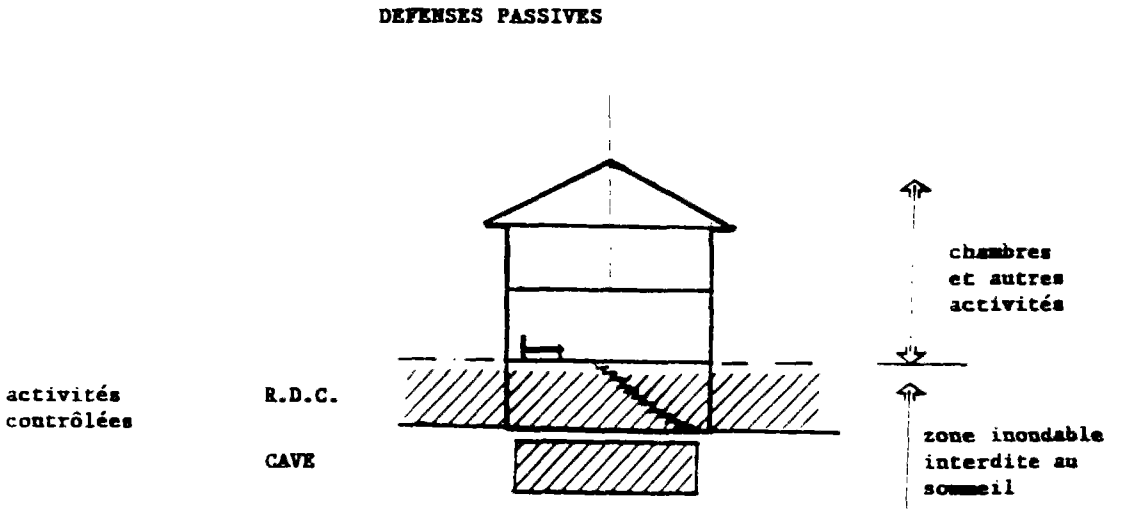


Figure 153 - L'aggravation du risque liée au mode de vie le contrôle de la distribution des pièces dans les logements et l'interdiction de dormir en rez-de-chaussée et cave.

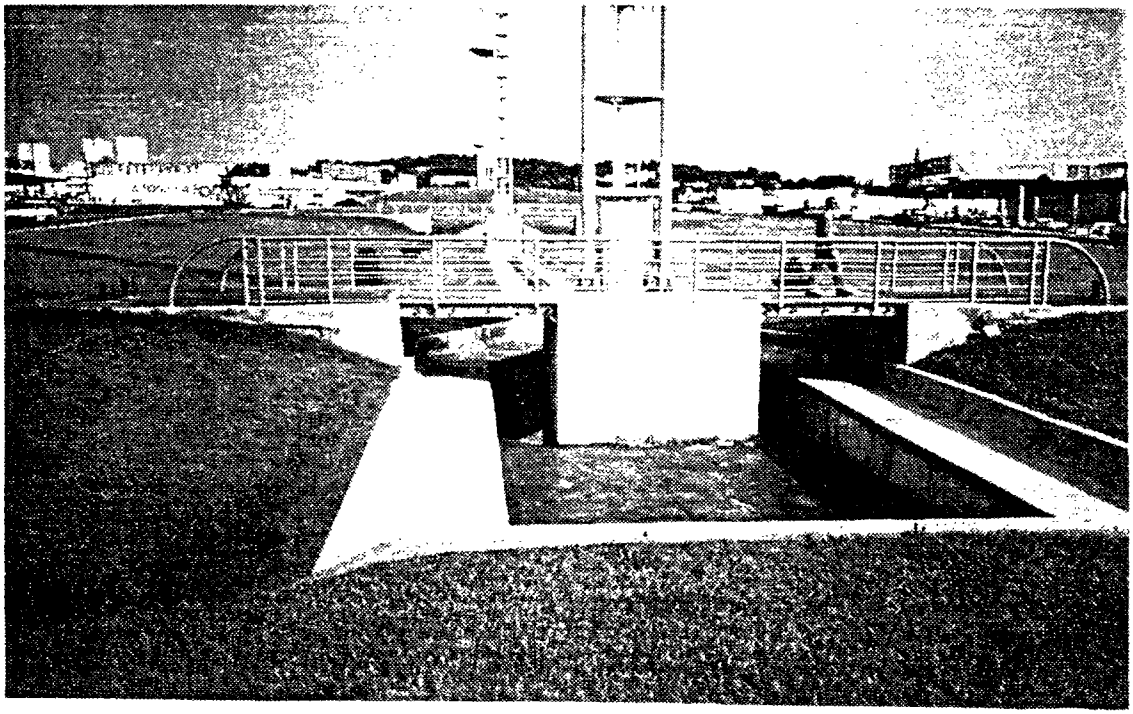


Photo 154 - L'APRES-NIMES , création de la "Ville Active"
après la crue du 3.10.1988 /photo sept.1992
(seule la crue décennale semble avoir été retenue)

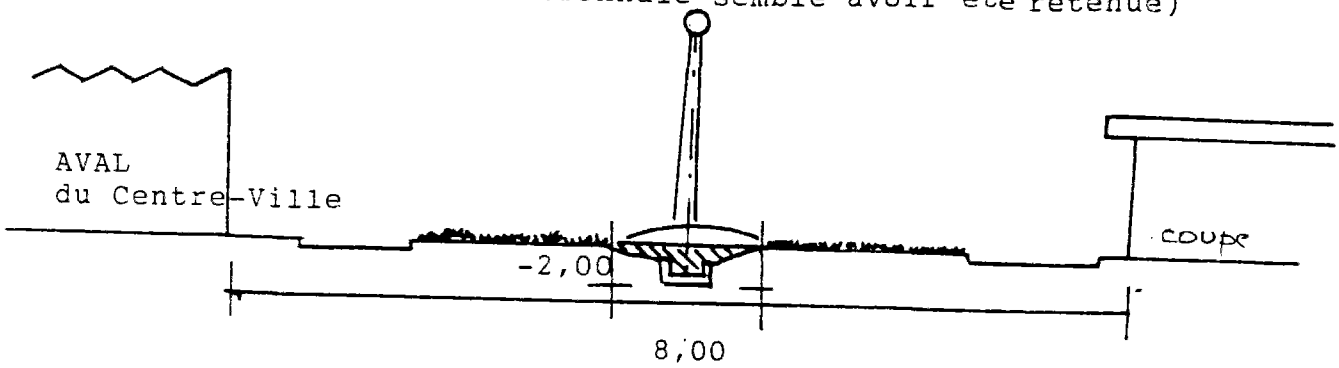
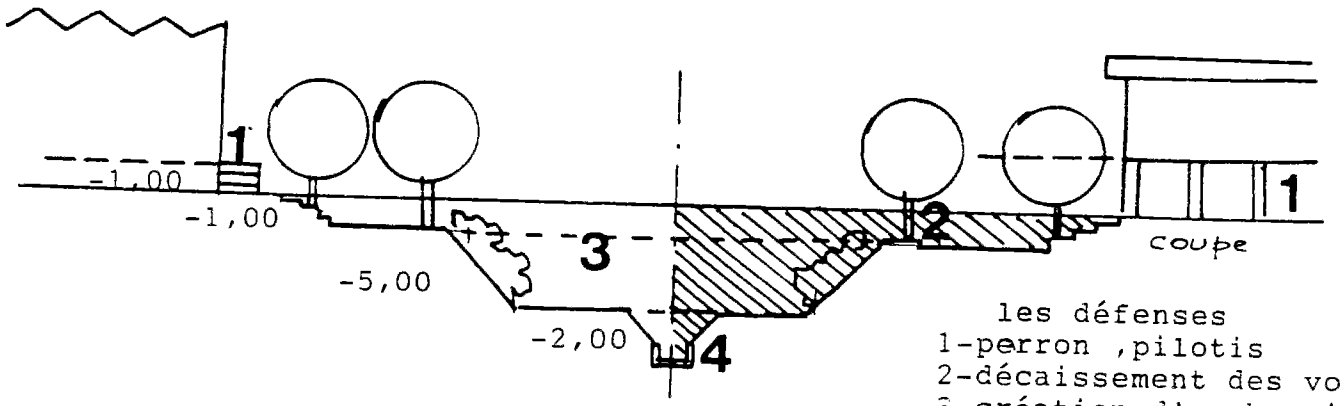


Figure 155- La ville active.Travaux neufs à l'aval de la ville
Capacité d'écoulement : 8 m^2/section mouillée.
seule leçon: un lampadaire-refuge avec
échelons de secours



les défenses
1-perron ,pilotis
2-décaissement des voiries
3-création d'un bassin
crue de rétention ou d'écoule-
100 ans ment urbain,sec et planté

crue 4- aménagement de la rivière
10 ans pour les crues
décennales

Figure 156-
Le JARDIN- CANAL : Contre-proposition d'aménagement tenant compte du risque hydrologique centennal.
Capacité d'écoulement:400 m^2/section mouillée.

L'APRES NÎMES

Après la catastrophe de Nîmes de 1988, des travaux furent réalisés concernant :

1- la réparation des ouvrages existants ;
2- l'amélioration des croisements des rivières sèches (les cadereaux) et routes (élargissement des buses, renforcement);
3- la programmation de bassins de rétention amont et aval, trois bassins aval sur la rivière Le Vistre étant réalisés en 1993;
4- la réalisation de la Ville Active (carte IGN 1992), zone commerciale.

LA VILLE ACTIVE (photo 154) concerne les domaines de l'architecture, de l'urbanisme et des infrastructures.

• Travaux neufs urbains après 1988
Des travaux importants de restructuration de la ville basse de Nîmes ont été réalisés après 1988 pour la création d'une ville active programmée depuis quelques années, avec expropriations et destructions du tissu urbain le long du cadereau aval d'Alès.
Situation : zone naturellement ennoyable par ruissellement exceptionnel.

• Notre avis :
Ces travaux neufs ne tiennent pas compte du risque hydrologique centennal et n'apportent pas d'amélioration à la lutte contre ce risque.
Description des lieux (figure 155) : large espace engazonné horizontal de 70 mètres de largeur environ, bordé de bâtiments d'activités non soumis à des prescriptions spéciales pour zone inondable.

Le creusement central pour l'aménagement de la rivière a un gabarit (8 m^2/section mouillée) qui n'a aucun rapport avec le gabarit d'amont de la même rivière AVANT sa traversée en ville (70 m^2/section mouillée) : il est dix fois plus petit à l'aval qu'à l'amont (figure 126a et photo 127).

Le seul élément qui rappelle le risque est le modèle de LAMPADAIRE créé, avec des échelons pour refuge. La capacité de stockage de l'aménagement de la rivière est de 8 m^3/m d'ouvrage.
Les carrefours urbains sont réalisés en buttes importantes de 5,00 mètres de hauteur, installées SUR le passage des écoulements préférentiels urbains.

Ces travaux neufs peuvent être considérés comme des facteurs aggravants en ce sens qu'ils n'ont pas été réalisés en tenant compte de la catastrophe.

• Nos propositions : travaux de reprise (figure 156)

1- Améliorer le passage de l'écoulement de surface au pont SNCF, au point bas du boulevard Jean Jaurès qui regroupe les eaux de surface du "bassin-versant du centre-ville" du cadereau d'Alès enterré.

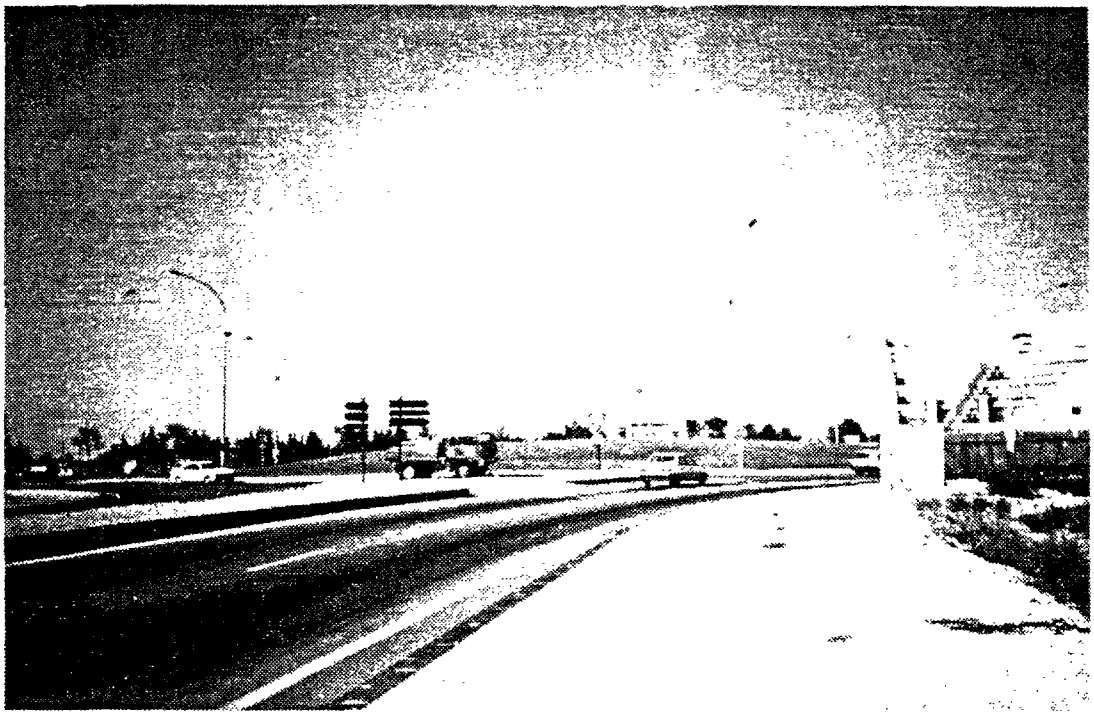
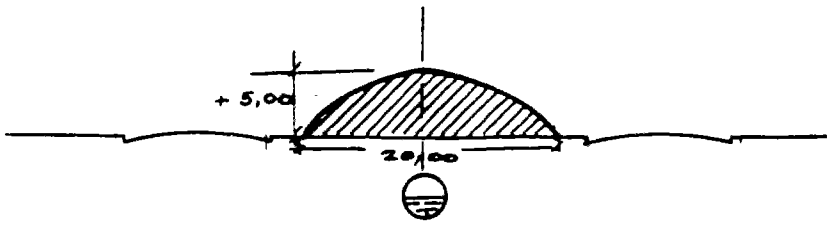
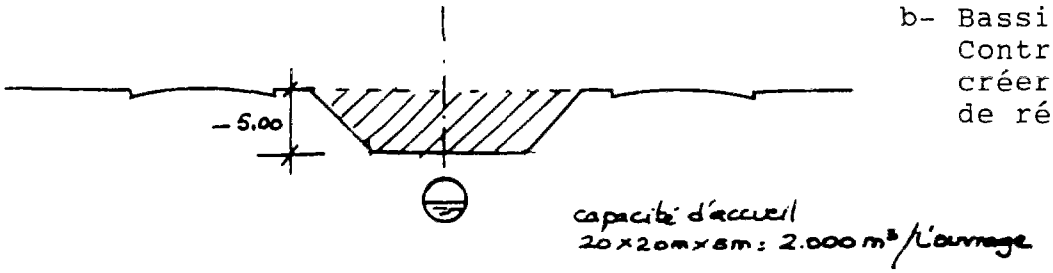


Photo 157 - Les buttes-carrefours de Nîmes
sur les écoulements préférentiels



a- Buttes-carrefours
l'après 1988



b- Bassins-carrefours
Contre-proposition:
créer des bassins
de rétention urbains.

Figure 158- Les carrefours de la Ville Active

2- Créer un JARDIN-CANAL par le surcreusement de la partie centrale de l'esplanade de la Ville Active pour l'accueil de pluies centennales, en créant un "bassin de rétention urbain sec" :
   - avec mise en place de "perrons" et vide sanitaire pour les bâtiments (+ 1,00 mètre), et toiture-refuge,
   - avec un premier encaissement des abords pour les voiries (- 1,00 mètre),
   - avec la création d'un jardin-canal, bassin de rétention urbain sec et planté (- 5,00 mètres),
   - avec un aménagement de rivière en pierrée pour les crues décennales (- 2,00 mètres).

Capacité d'accueil de la proposition : 400 m^2/section mouillée.
Capacité de stockage : longueur de l'ouvrage : 500 m x 400 m^2 = 200 000 m^3 l'ouvrage.
S'il y avait un exutoire total à l'ouvrage et à raison d'une vitesse d'écoulement de 4 m/s, c'est 800 000 m^3/s qui pourraient transiter.

3- Remplacer les buttes-carrefours (photo 157) par des bassins de rétention engazonnés et secs de même profondeur que leur hauteur (soit un encaissement de - 6,00 mètres environ) en s'inspirant de la gestion automatique du bassin du LOUP de la Seine-Saint-Denis (annexe 1 pp. 575 à 579), et du principe de la SURVERSE des eaux dans le bassin, au-dessus de la crue décennale.
Capacité de stockage : 2 000 m^3 l'ouvrage (figure 158).
Nous sommes tout de même étonnés de voir que des travaux de cette importance (le Colisée, la Ville Active) n'aient pas pu s'adapter à des modifications de nivellement après la catastrophe de 1988 et ne servent pas actuellement à la lutte contre les inondations par ruissellement, même si ces travaux se trouvent exactement SUR l'axe d'une rivière urbaine, c'est-à-dire au meilleur point hydrologique.

3.2.4. Domaine des infrastructures : les facteurs aggravants

Les trois grandes catastrophes de ruissellement (le Grand-Bornand, Nîmes, Vaison-la-Romaine) ont fait apparaître de nouveaux problèmes au niveau de l'infrastructure, en plus des problèmes classiques.

Problèmes classiques

• L'augmentation de la vitesse des crues due au tracé des voies.
• L'augmentation considérable des volumes d'eau de ruissellement, liée à l'imperméabilisation progressive des voies et parkings, à l'allongement des voies et à l'élargissement des voies.
• Les insuffisances d'accueil au niveau des bordures d'arrêt et des avaloirs.
• Les infrastructures publiques dans les lits des rivières.
• Le sous-dimensionnement des buses au passage des rivières sous les routes.
• L'analyse des cadereaux de Nîmes et leur dysfonctionnement.

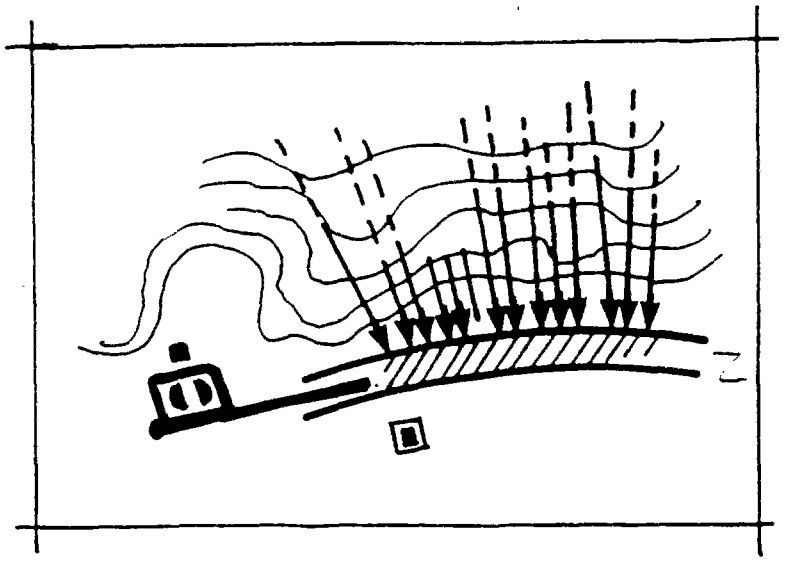


Figure 159- Le ruissellement naturel en fonction des courbes de niveaux

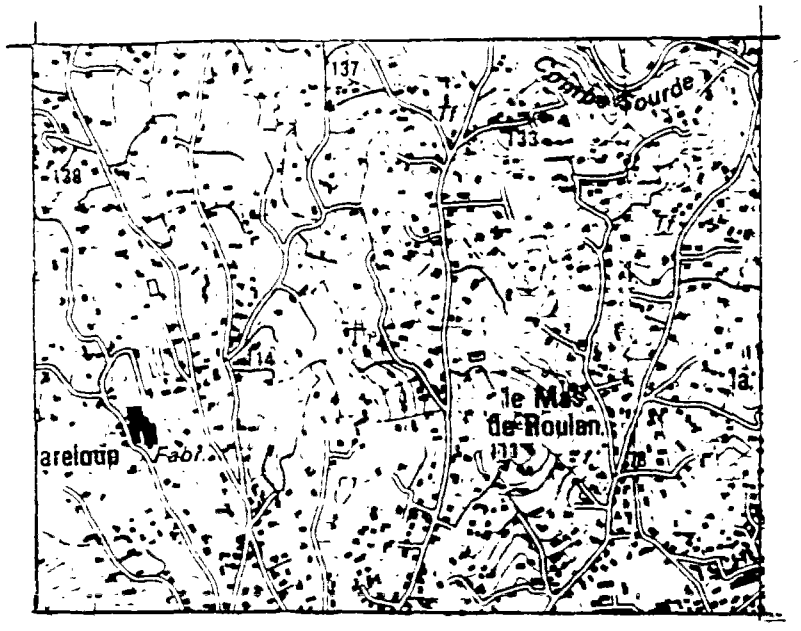


Figure 160- Le réseau des dessertes à Nîmes est dans le même sens que le ruissellement

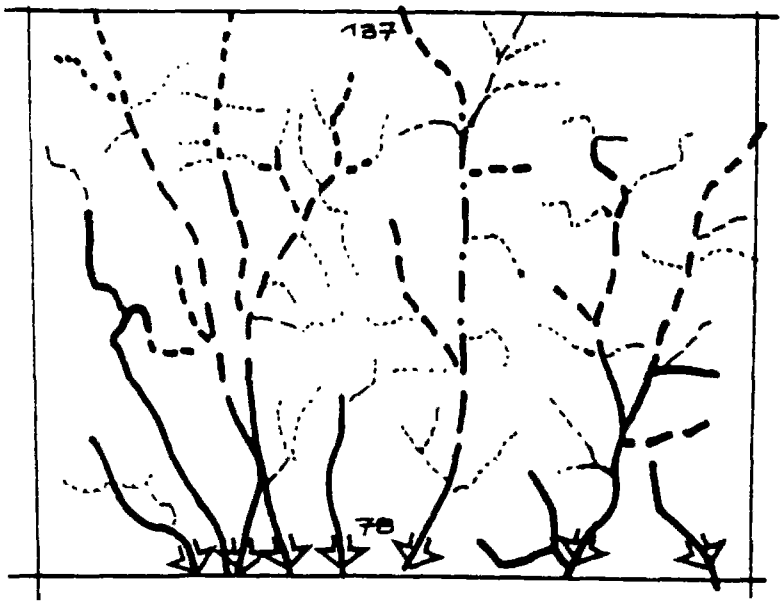


Figure 161- Modification progressive des revêtements des voies d'amont à Nîmes, et allongement des voies.

Les chemins caillouteux se sont transformés progressivement en voies asphaltées depuis 1950, sous la pression urbaine.

Nouveaux problèmes :

• Les voitures et caravanes :
- les problèmes soulevés par les voitures, le stationnement, la dérive des voitures, la formation d'embâcles de voitures et de caravanes,
- la destruction de revêtement routier par la crue et la dérive des matériaux,
- les décès de personnes restées dans leur véhicule.

• Les eaux pluviales privées :
- le constat du rejet de toutes les eaux pluviales privées sur la voie publique.

3.2.4.1. Les problèmes classiques

- Vitesse des crues liée au tracé des voies

• L'ORIENTATION : Les voies qui concentrent le ruissellement sont les voies perpendiculaires aux courbes de niveaux implantées dans le sens de la plus grande pente.

• LA RECTITUDE DU TRACÉ : il n'y a aucun obstacle à la progression de l'écoulement de surface.

• LES PENTES : les pentes renforcent la vitesse des eaux (figure 159 et photo 162).

- Imperméabilisation progressive des voies et parkings

• IMPACT DU REVÊTEMENT SUR LE RUISSELLEMENT : A Nîmes, les dessertes d'amont se sont transformées progressivement de chemins caillouteux en sol stabilisé (implantées généralement entre deux murs de pierres sèches distants de 3,00 mètres) en voies étroites GOUDRONNEES.
L'imperméabilisation de ces chemins de terre s'est faite progressivement depuis 45 ans (figure 160 et 161).

• L'ALLONGEMENT DES VOIES : l'accessibilité aux nouvelles parcelles a créé une multiplicité de voies de dessertes imperméables. Elle a suivi l'allongement des surfaces conquises par l'urbanisation, en remontant le bassin versant de plus en plus loin.

Depuis 1945, sur les collines péri-urbaines de Nîmes, le kilométrage des voies de desserte a dû être multiplié par 10 (études sur cadastre).

- L'élargissement des voies

La multiplication du nombre de parcelles a entraîné la multiplication du nombre de voitures (x 2 par famille), ce qui a poussé la DDE à l'élargissement des voies, entraînant de ce fait l'augmentation des surfaces en pentes imperméabilisées et le volume d'eau de ruissellement.

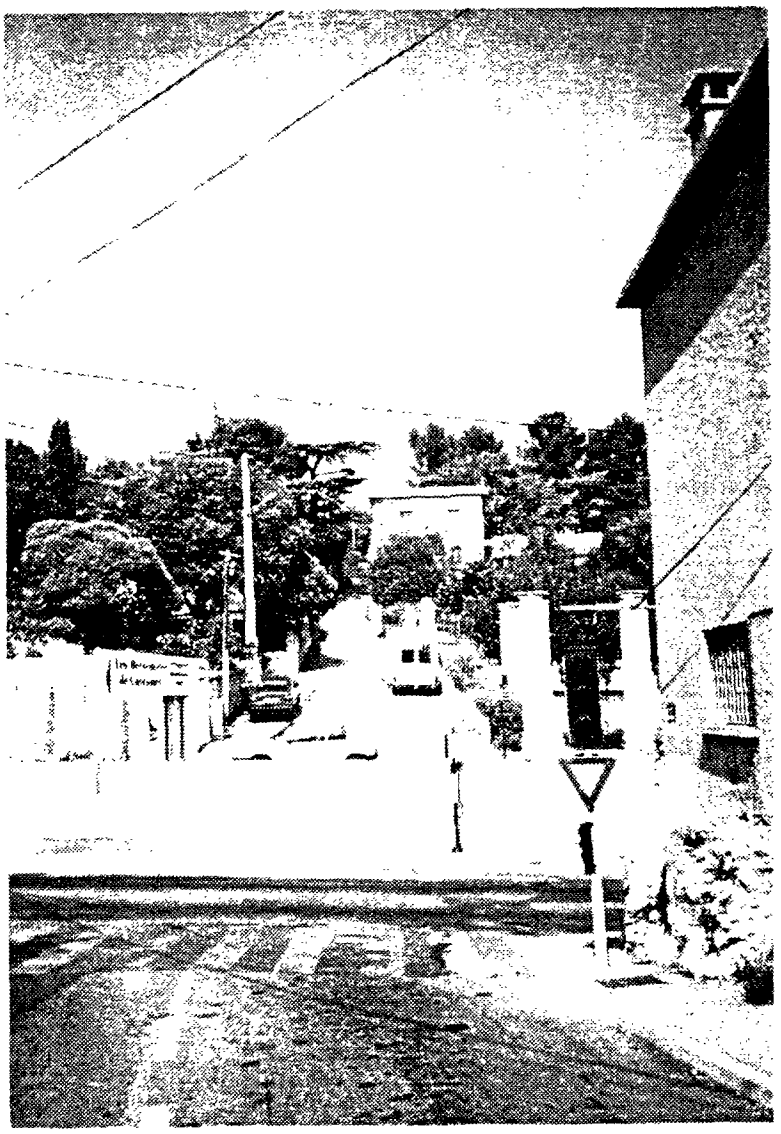


Photo 162-
Les rues en forte pente

Nîmes,croisement Chemin des 3 piliers,Route de Sauve, Mont Mirabel.
Le dénivellé est de 20 mètres pour 100 mètres de voie.

La route de Sauve(premier plan) a été transformée en torrent d'eau le 3.10.1988.

• EXEMPLE DE CANCALE (Bretagne) 1993 : actuellement personne ne s'oppose à l'élargissement des voies secondaires ou vicinales sur les plateaux côtiers, mettant en situation nouvelle de risques d'inondation par ruissellement toute l'urbanisation ancienne établie sur les pentes des falaises (photo 163).

- **Les insuffisances d'accueil au niveau des bordures d'arrêt et des avaloirs**

Constat à Nîmes : nous avons constaté :

- la faiblesse du nombre des avaloirs, Chemin de la Sauve (1 petit avaloir tous les 50 mètres) (photo 164),
- le bombé de la route,
- la faiblesse du dénivelé des bordures d'arrêt (5 cm de hauteur environ).

- **Les infrastructures publiques dans les lits des rivières sèches**

Nous avons aussi été étonnés de la fréquence des routes installées dans les lits des rivières sèches (Nîmes : chemin Roquemaillère, rue de la Graffone, rue Renaissance, rue des Resedas, etc. (photo 165).

Résultat à Nîmes : création d'un réseau hydrologique de surface empruntant la voirie à chaque grosse pluie. L'organisation du réseau routier de distribution d'un habitat dispersé est ici à l'image d'un réseau hydrologique, avec les confluents.

CE TYPE DE TRACÉ FACILITE AUSSI L'AGGRAVATION DU RISQUE DE RUISSELLEMENT PÉRI-URBAIN ET URBAIN.

- **Le sous-dimensionnement des buses aux passages des rivières sous les routes**

Nous avons noté un certain nombre d'incohérences pour le diamètre des buses sur les parcours aériens des cadereaux de Nîmes, partie amont et partie aval :

- exemple de la minuscule buse (photo a2) placée dans le remblai sous la D926 au lieu dit "le Creux de l'Assemblée" ;

- exemple des buses du carrefour route d'Alès/Chemin de la Cigale où la buse de sortie (photo a10) est deux fois plus petite que la buse d'entrée (photo a9) où l'on peut se tenir debout.

Photo 163-

Aggravation du ruissellement par l'élargissement des voies vicinales

Photo 164-

Les insuffisances d'accueil des Eaux Pluviales (E.P.) au niveau des avaloirs, le faible dénivellé des trottoirs(5 cm) qui ne conduit plus le ruisselle-ment,le bombé de la route plus haut que les seuils (Nîmes,Route de Sauve,entrée de la ville)

Photo 165-

Les infrastructures publiques dans les lits des rivières. La rue de la Renaissance à Nîmes correspond au tracé de l'ancienne boucle du cadereau d'Uzès mis en souterrain, au lieu dit "les 3 ponts".

- L'analyse des cadereaux de Nîmes - tableaux 166a et b (plan de situation et photos descriptives)

L'analyse des deux principaux cadereaux de Nîmes, le cadereau d'Alès **(tableau a)** et le cadereau d'Uzès **(tableau b)** a fait apparaître les anomalies suivantes :

1- la présence d'un remblai important (10,00 mètres de hauteur) barrant la rivière (photo a2) avec une minuscule buse d'évacuation ;

2- l'incohérence des diamètres des busages successifs : pour l'amont : photos a2, a5, a9, a10 ; pour l'aval : photos a14, a17, a20 ; ce qui pourrait faire dire que plus on descend, plus les buses sont petites ;

3- l'existence de dépôts d'objets (voitures) sur une épaisseur de 5 à 10 mètres dans le lit mineur du cadereau d'Alès (photo a3, ferrailleur), faisant aussi barrière ;

4- des précautions anciennes pour laisser passer le ruissellement lors de la construction du chemin de fer vers 1900, des arches non murées de 15 mètres de hauteur (photo a4), et des arches murées sous la partie ferroviaire intra-muros (photo 129) ;

5- la grande variabilité de "l'empreinte" de la rivière : grande variation de largeur et de profondeur aussi bien à l'amont qu'à l'aval du cadereau d'Alès sur environ 8 kilomètres ;
- exemple du gabarit ancien de la rivière entre les deux murs du cimetière protestant de 14 mètres de largeur à l'amont de Nîmes (photos a11, a12), à la sortie de Nîmes avec 6 mètres de largeur (photo a15) puis un rétrécissement allant jusqu'à 3 mètres de largeur (photo a16) puis 2 à 3 mètres (photo a18) pour aller en s'élargissant, 12 mètres avec une zone inondable (photo a19) pour enfin se rétrécir à 4,00 mètres (photo a20) avant le rejet à "l'exutoire" dans le Vistre ;

6- la construction de nombreuses rues dans le lit mineur des rivières, surtourt en zone d'amont :
- exemple pour le cadereau d'Uzès (tableau B) : rue de la Rennaissance (photo 165), rue Croizat, rue des Résédas, etc.
- exemple pour le cadereau d'Alès : rue de la Gaffone (photos a6 et a7), Chemin Roquemaillière (photo 112 p. 219), etc. ;

7- la petitesse des entonnements principaux des deux rivières à l'amont de Nîmes (photo 226), avant de devenir souterraines, et sans aucune échelle avec les arches des vieux ponts par exemple (photo a12 pour l'amont et photo a15 pour l'aval) ;

8- l'enfouissement récent des rivières urbaines vers 1960 : il existait encore tout récemment pour le cadereau d'Alès : une rue appelée "le Quai du cadereau des Dardaillons" qui est devenue l'avenue Georges Pompidou et pour le cadereau d'Uzès : une sortie en centre-ville après la gare des marchandises (il y a encore une rue de l'Ecluse).

CADEREAU D'ALES 6- TABLEAU 166-a

Plan de situation des photos du tableau -a-

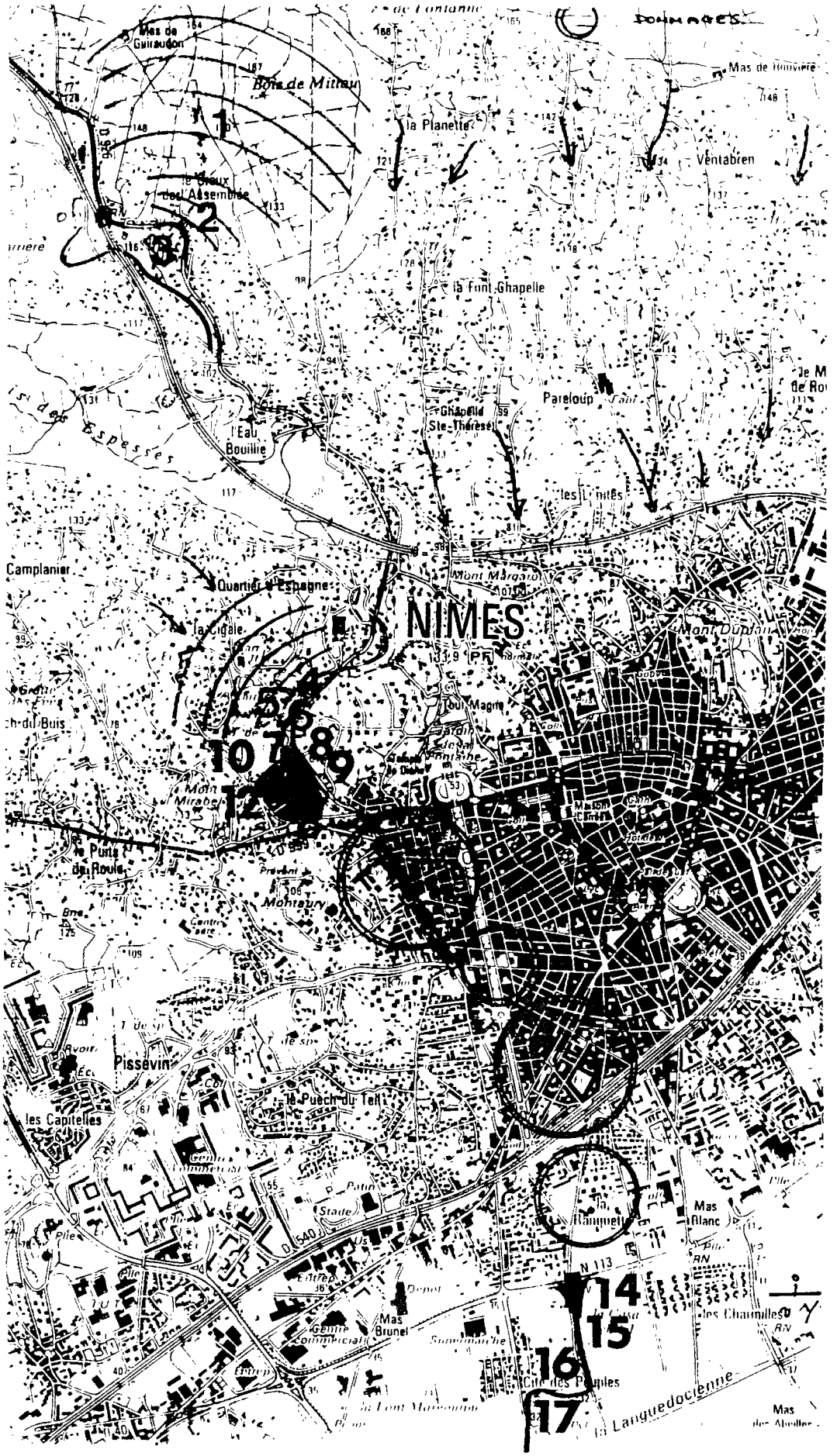
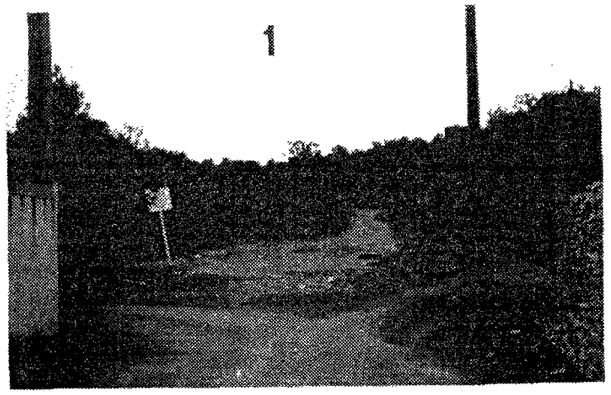
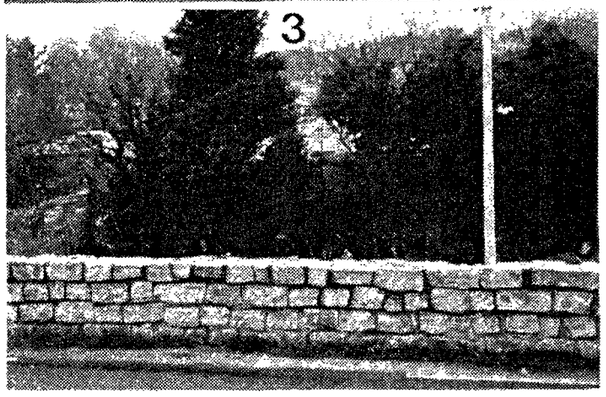
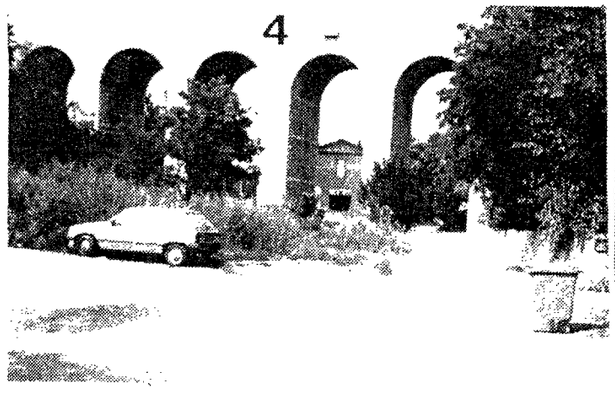
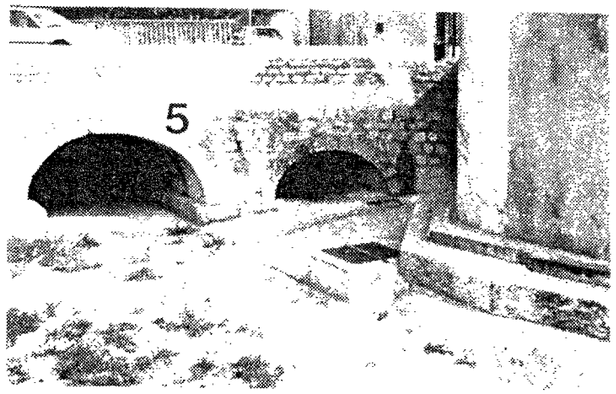


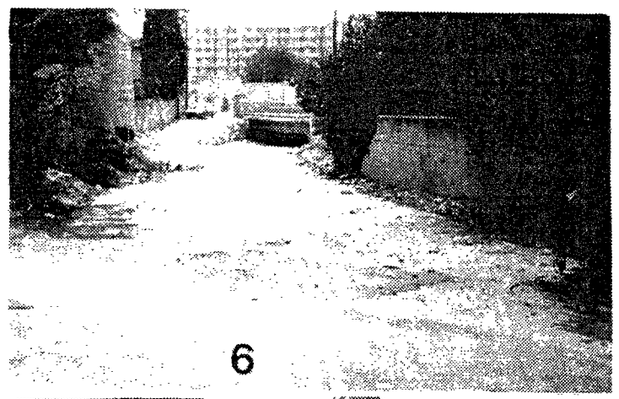
TABLEAU 166-a ANALYSE DU CADEREAU D'ALES

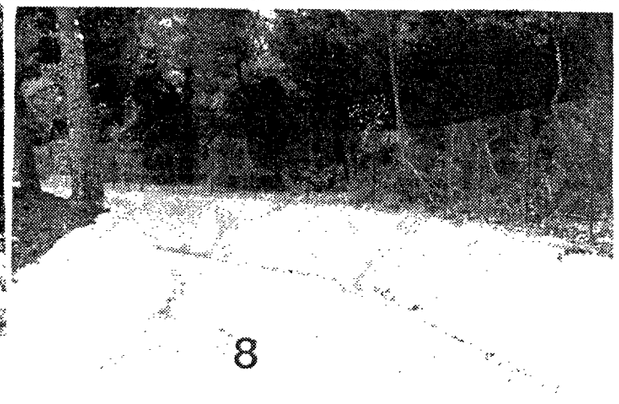


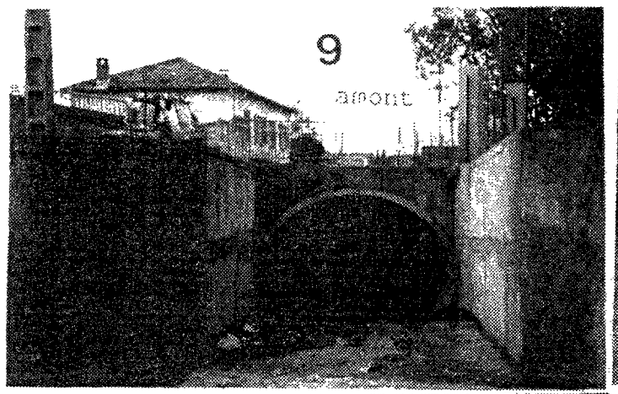


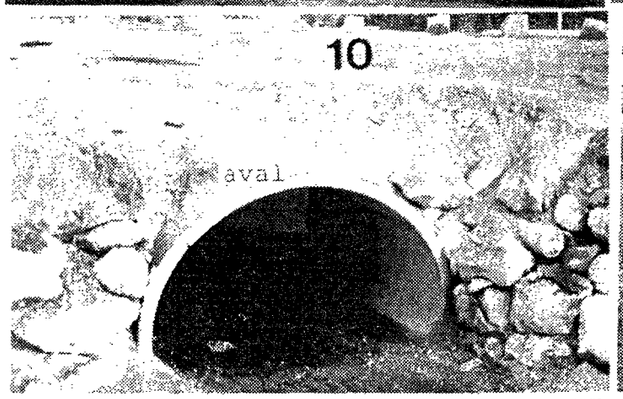


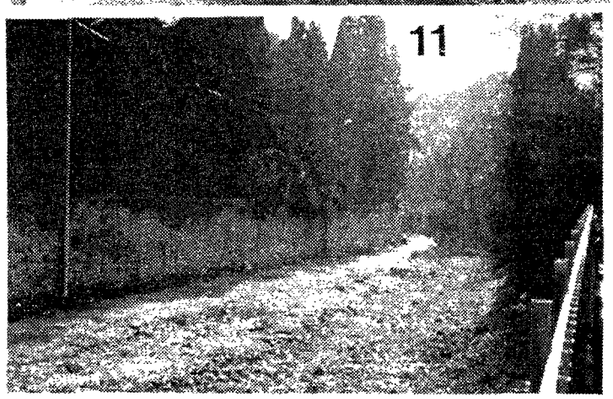


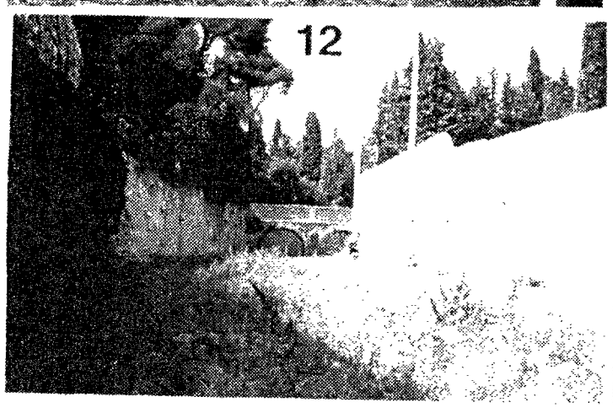


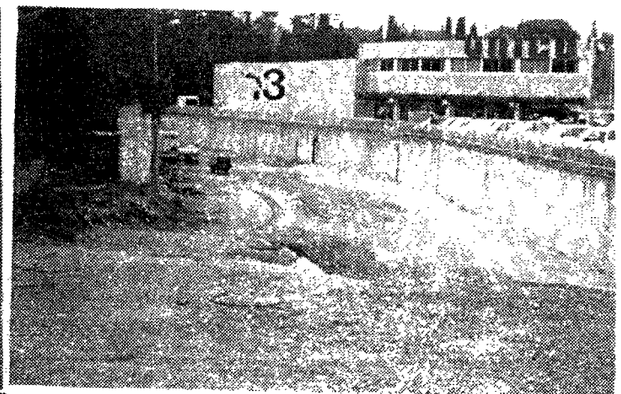


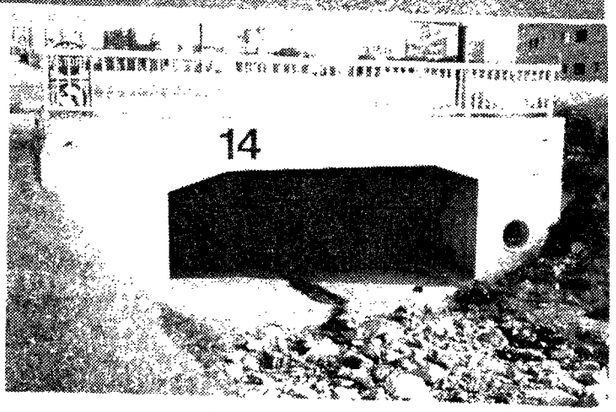


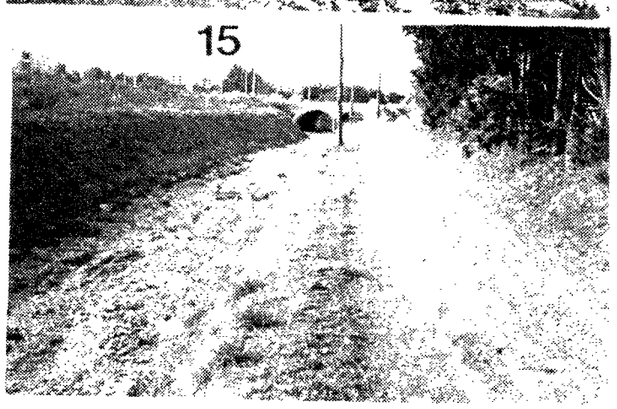


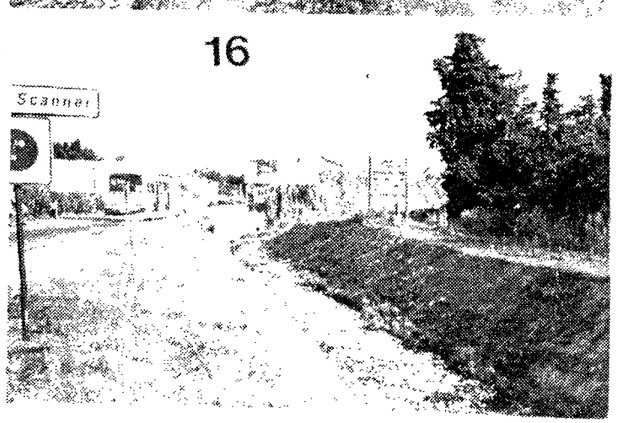


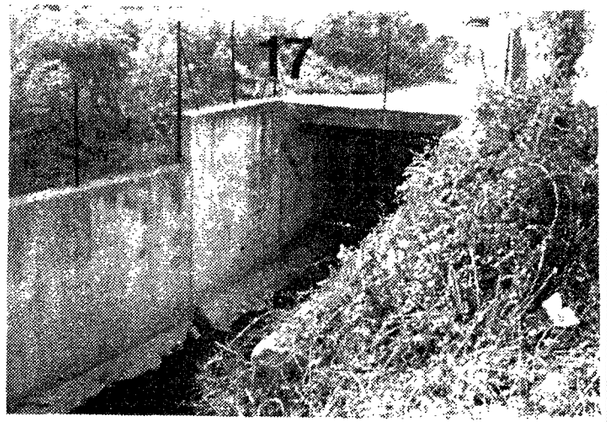


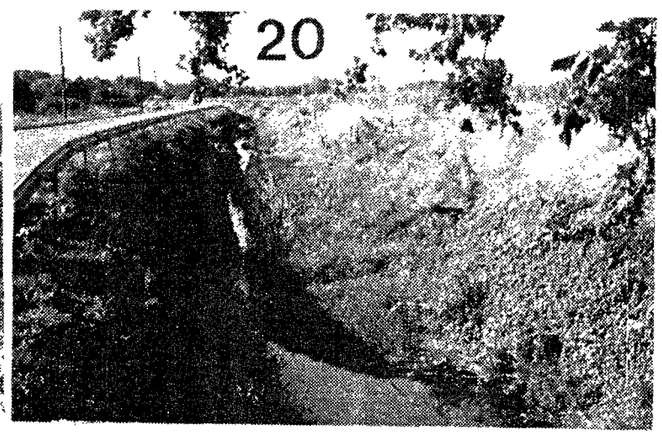


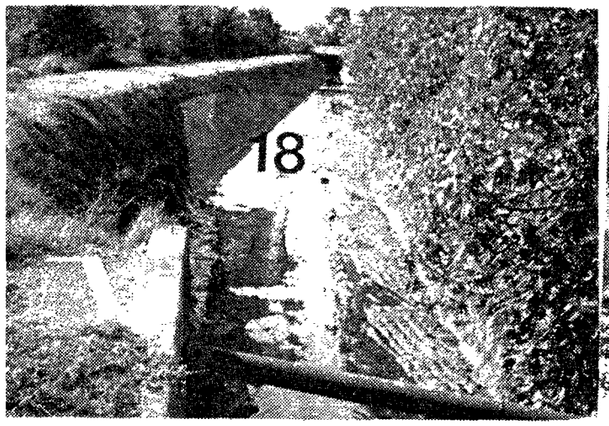


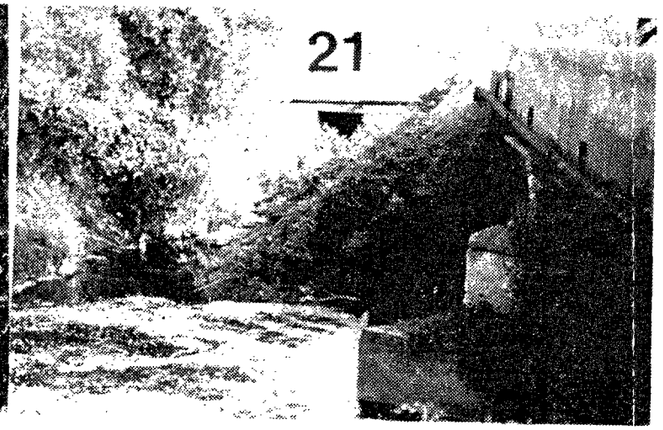




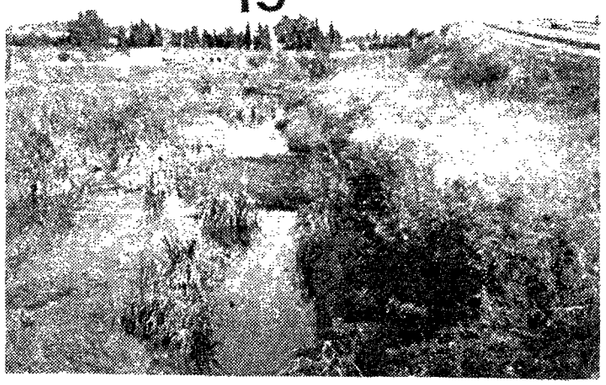








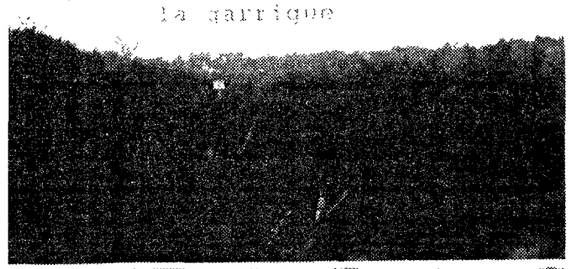
19

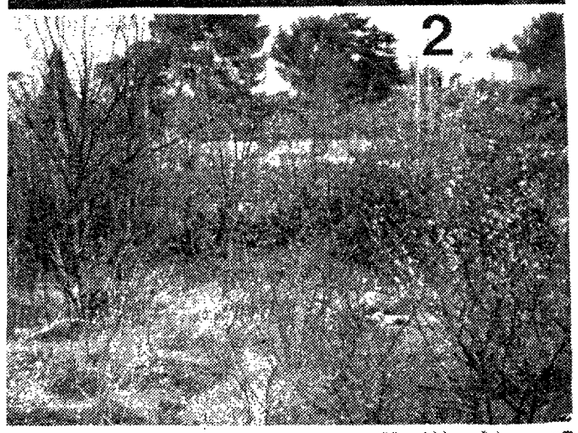


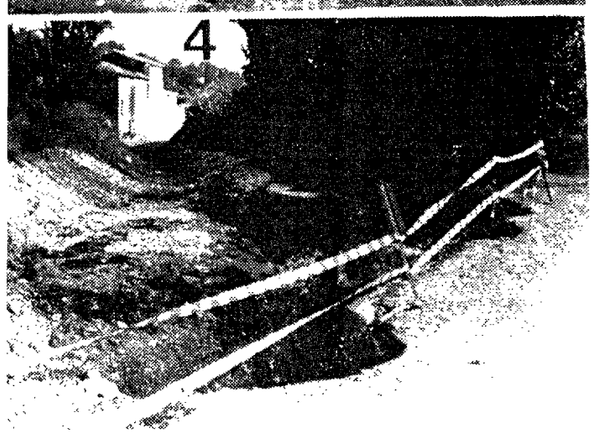
Plan de situation des photos du Cadereau d'Alès

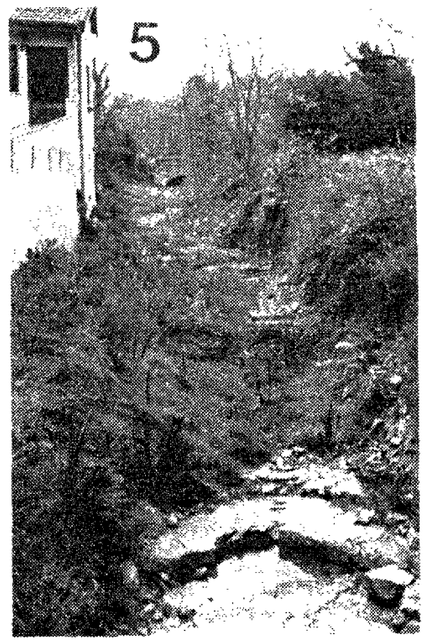
1

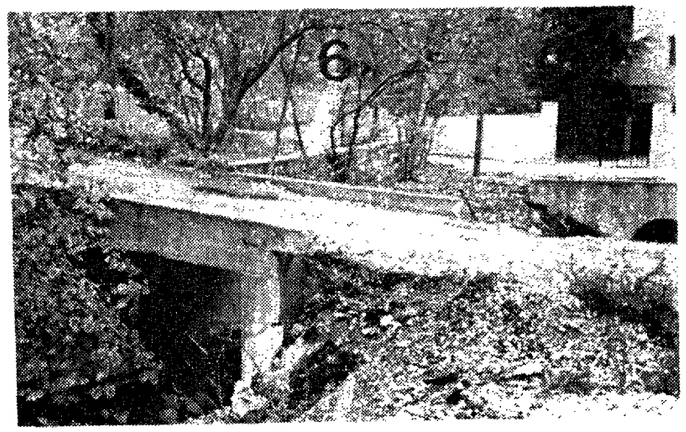
La garrigue

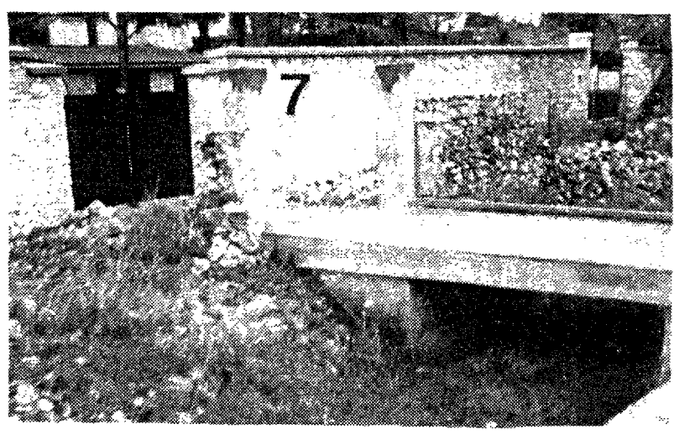


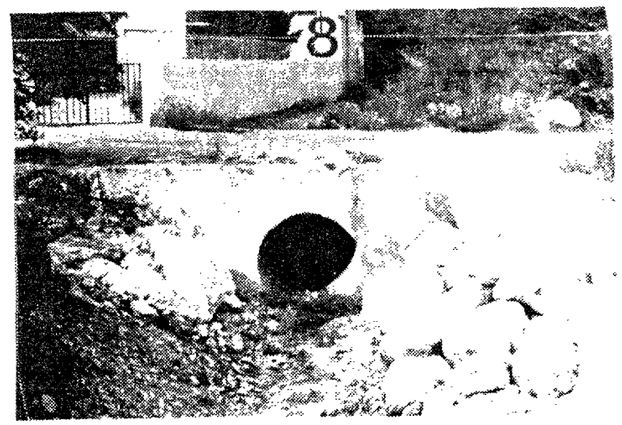


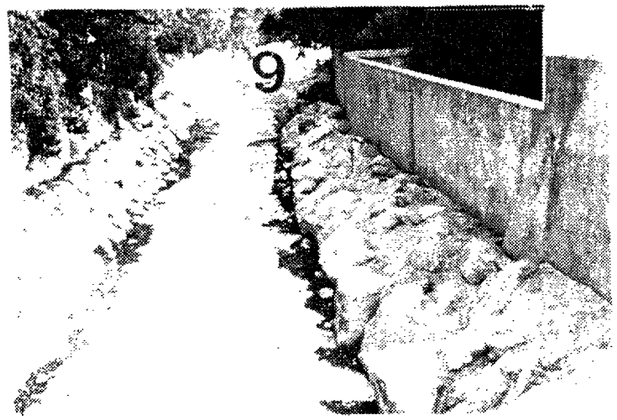


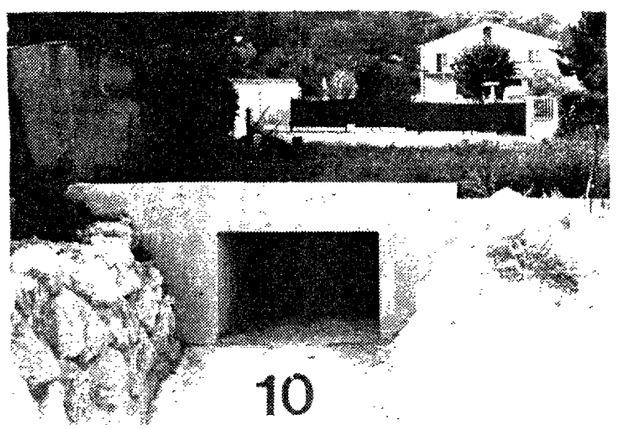












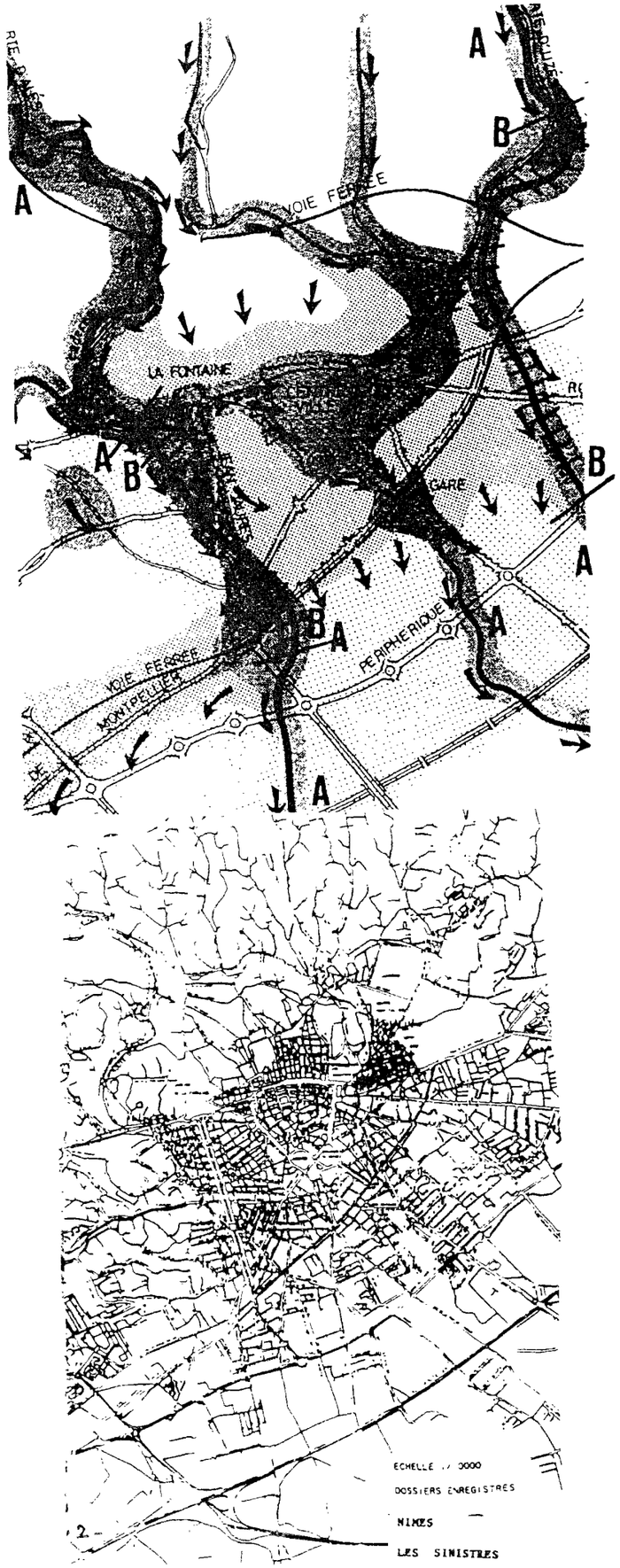


Figure 167- Nîmes

Les écoulements préférentiels de surface

Les zones d'inondations

.parties à ciel ouvert(A,A)

.rivières enterrées(B,B)

Figure 168-

Le dossier des sinistres correspond aux parcours des trois rivières intra-muros.

3.2.4.2. Les nouveaux problèmes pour l'infrastructure

Méthode de travail :

La recherche a été menée à partir de CONSEQUENCES REELLES des événements pluvieux exceptionnels en milieu urbain, en utilisant les METHODES D'OBSERVATION de terrain, appliquées ici à l'analyse de photographies, complétée par des INTERVIEWS de personnes ayant affronté personnellement les crises (personnes interviewées : sapeurs-pompiers, Compagnie Nationale du Bas-Rhône).

Nous aborderons les problèmes, en nous appuyant sur des cas concrets pris à Nîmes, la Seine-Saint-Denis, Lausanne et Vaison-la-Romaine en fonction du risque hydrologique pour des crues de 100 ans et plus.

CONSTAT GÉNÉRAL : un double constat
L'observation des crues-éclairs en milieu urbain intra-muros fait apparaître deux nouveaux éléments :

- les écoulements préférentiels de surface,
- les embâcles de voiture (photo 169).

3.2.4.3. Les facteurs géomorphologiques aggravants en infrastructure

- LES ECOULEMENTS PRÉFÉRENTIELS DE SURFACE (figure 167)

Dans tous les cas analysés d'événements extrêmes (Nîmes, la Seine-Saint-Denis, ...), il existe une similitude de parcours des crues-éclairs entre les écoulements de surface et les anciens lits de rivières qui ont été mises en souterrain à l'aide de galeries ou de buses.
Il est donc aisé de proposer une délimitation de SECTEURS A RISQUES correspondant aux anciens lits majeurs en centre-ville et zone péri-urbaine par l'observation de site.

- LES PARCOURS A RISQUES

Pour Nîmes, les parcours principaux de la crue qui ont traversé la ville le 3 octobre 1988 correspondent exactement aux trois lits des anciennes rivières intra-muros. Les dossiers des sinistres, reportés sur une carte, correspondent eux aussi aux parcours de ces trois rivières (figure 168).

- LA HAUTEUR DU NIVEAU D'EAU

Les niveaux d'eaux sont déterminés par le rapport de la crue avec les éléments d'architecture et avec la stature des intervenants. Ces niveaux varient entre 0,20 et 0,40 m de hauteur, sauf sur certaines photos où le niveau atteint 1,00 mètre de hauteur, en bas de la ville, où les eaux sont bloquées à Nîmes par des obstacles transversaux aux exutoires naturels (arches obstruées de la SNCF et remblais d'autoroute).

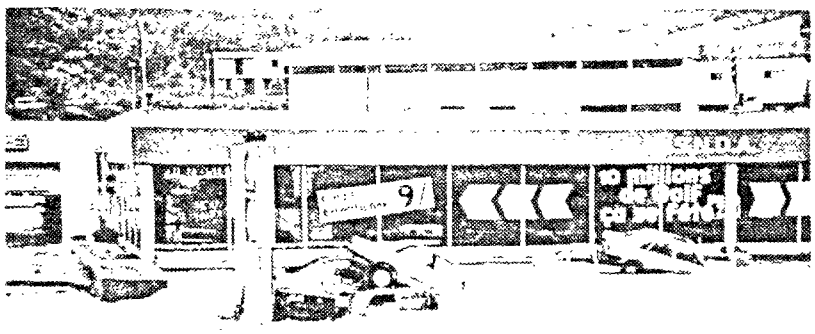


Photo 169 - La violence des événements:le charriage des véhicules.
(extrait du livre Nîmes un an après) **NIMES**
[46] .

LUNDI 26 NOVEMBRE 1990

65 millimètres d'eau sont tombés en 2 heures sur la région ajaccienne. Le chiffre en lui-même n'est pas vraiment parlant, il est important. Les conséquences aussi

Photo 170 - Les voitures dérivantes. **AJACCIO**

OBSTRUCTION DES PONTS PAR LES VEHICULES

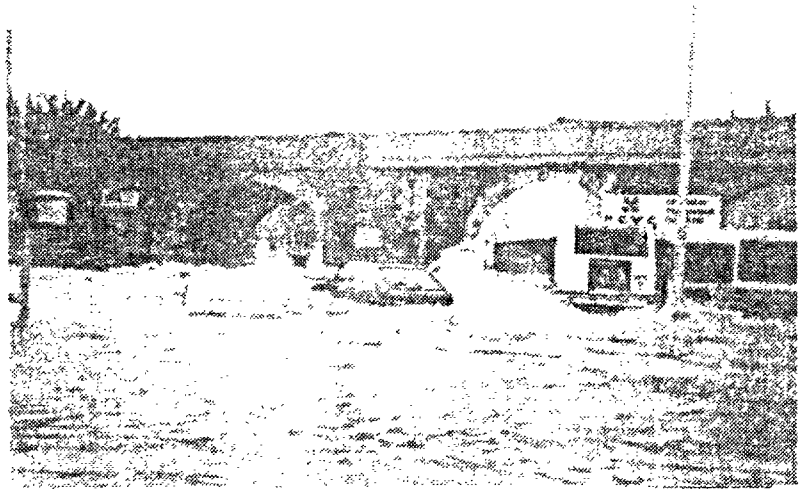


Photo 171- Les phénomènes d'embâcles(voitures) **NIMES**
(extrait de la revue Aménagement et nature
N°95 Nîmes:les leçons d'une catastrophe,B.CHOCAT)
[6].

- LES COURANTS
La catastrophe de Nîmes a montré l'existence de "courants violents" (photo 172) dans les rues à écoulement préférentiel, et de "mortes eaux" dans les rues transversales.
Les voitures ennoyées (photo 173) restent SUR PLACE dans les rues et places urbaines transversales.

3.2.4.4. Les facteurs anthropiques aggravants en infrastructure publique

- ANALYSE DES CONSTATS ET DÉTÉRIORATIONS :
Nous constatons un nouveau type d'embâcles, les voitures sous des formes variées :
- les voitures flottantes et dérivantes ;
- les barrages de voitures ;
- l'augmentation des volumes des eaux par les voitures dérivantes ;
- les destructions occasionnées par les voitures : le laminage des façades, la destruction des réseaux sur façades (EDF, descentes d'eaux pluviales, compteurs de gaz,...) ;
- la voiture faux-refuge et les risques de décès ;
- les courants ;
- le comportement des revêtements de chaussée ;
- les détériorations de véhicules.

- LES EMBACLES DE VOITURES OU EMBACLES MODERNES
Les embâcles actuelles sont constituées par les voitures qui partent à la dérive alors que les embâcles classiques étaient formées de végétaux arrachés, en particulier de troncs d'arbres.
Les dernières catastrophes ont montré ce phénomène nouveau de déplacements de véhicules ; ce sont les caravanes du Grand-Bornand et les 3 000 voitures de Nîmes, avec détérioration du véhicule et risque de décès.

- LES VOITURES FLOTTANTES ET DÉRIVANTES
L'analyse des photos de crise nous montre qu'une très faible hauteur d'eau est suffisante pour faire "flotter" un véhicule et l'entraîner (éléments de références : portes, seuils, fenêtres, ...) soit environ 0,30 mètre.
La photo suivante nous montre les conséquences d'une dérive par l'empilement de véhicules (photo 169).
Par contre, deux personnes suffisent à bloquer la dérive d'une voiture (un pompier et un civil) (photo 170). La hauteur d'eau connue est d'environ 0,40 m, mais la vitesse du courant doit être faible.

- LES BARRAGES DE VOITURES
La constitution d'une embâcle est imminente dans la photo 171. La photo a été prise avant obstruction des arches du pont de la SNCF, par les véhicules légers et petits poids lourds dérivants.
Photo 174 : dans une rue étroite à fort courant hydrologique, la rencontre de deux voitures dérivantes suffit à former un barrage et donc à provoquer une forte augmentation du volume des eaux, les hauteurs passant de 0,40 à 1,00 mètre de façon tout à fait artificielle (observations faites par le BRL[1]).

---

[1] Compagnie Nationale du Bas-Rhône

LA HAUTEUR DES EAUX
ET LA FORCE DU COURANT

PHOTO 172
La force du courant

. courant dans les écoulements préférentiels
. mortes-eaux dans les rues transversales

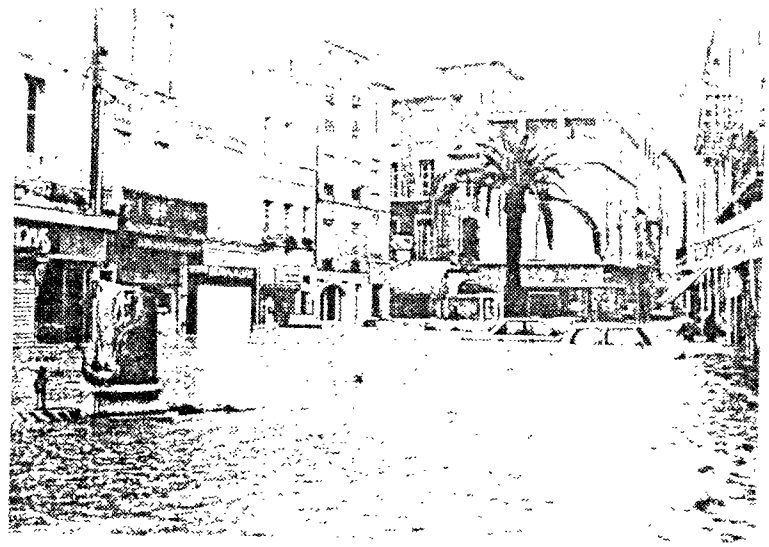


PHOTO 173
Les mortes-eaux.

PHOTO 174
Un barrage de voitures.

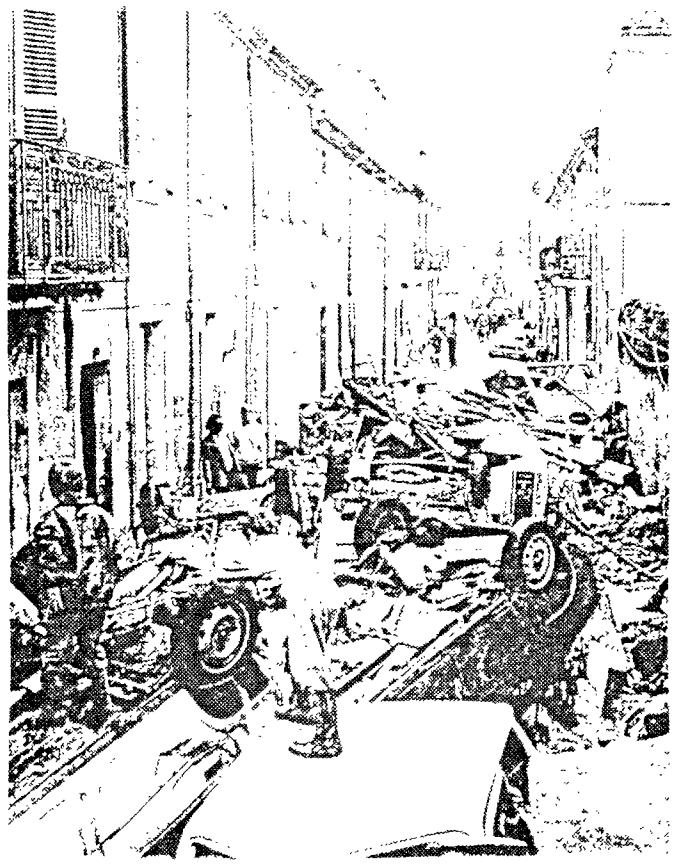


PHOTO 175
Le résultat de la crue

- LES DESTRUCTIONS OCCASIONNEES PAR LES VOITURES DERIVANTES
Les façades dans les rues étroites sont laminées (striures sur les façades) par les voitures dérivantes, comme l'action d'un glacier.
La photo 175 montre l'impact de ce laminage : destruction des réseaux de façades EDF, des descentes d'eaux pluviales, des compteurs à gaz, arrachement des volets, ...
Enfin l'impact des voitures entraînées par les courants qui heurtent une façade frontale, en bout de rue par exemple, devient un véritable "BELIER" moderne.

- LA VOITURE FAUX-REFUGE ET LES RISQUES DE DÉCÈS
Les décès sont survenus lorsque les personnes sont restées DANS leurs voitures ou caravanes, face à la pluie d'orage et à la crue (catastrophe du Grand-Bornand (1987 - 23 morts), Fréjus (1990 - 1 mort) ou bien lorsqu'elles se sont réfugiées sur les TOITS des véhicules, sans connaître la tendance au renversement d'une voiture flottante.

- LE COMPORTEMENT DES REVÊTEMENTS DE CHAUSSEE
A l'entrée de Nîmes à l'amont, à la rupture de pente, le passage des eaux de crue pendant 4 heures (8h-12h) a donné les résultats suivants (photo 176) :
• décollement du revêtement en bitume : des plaques entières de 1 m^2 à 3 m^2 d'enrobés traditionnels ont été enlevées par les eaux;
• ces plaques, s'enroulant sur elles-mêmes comme des "crêpes" (observations des sapeurs-pompiers), sont venues obstruer les entonnements principaux, les engouffrements des rivières à l'entrée en ville, en se plaquant sur les grilles et faisant une obstruction complète, ainsi que sur les avaloirs et bouches d'égouts ;
• l'érosion progressive du fond de forme libéré a été très rapide (4 heures). Cette érosion rappelle l'analyse théorique de G. RIOU [172] d'une destruction d'un sol par une lame de ruissellement, dans un géosystème tropical.

Pour G. RIOU, le ruissellement à nappes provoque des décollements latéraux en A, en exerçant une importante force de traction. Puis le départ d'une large plaque du sol crée un axe de concentration du ruissellement favorisant le développement d'une érosion en nappes ravinantes successives (figure 177).
Pour M. LIVET (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand), c'est la pression osmotique des sols saturés d'eau qui se gonflent, et qui fait que le fond de forme des chaussées soulève les revêtements qui fissurés sont disloqués par les eaux de surface.

- LA DÉTÉRIORATION DES VÉHICULES
La crue-éclair de Nîmes a entraîné la détérioration de 3 000 voitures en une journée.
La crue du Grand-Bornand ainsi que la crue de Vaison-la-Romaine, ont ravagé le camping, entraînant voitures et caravanes (photo 178).

NIMES

PHOTO 176

LES DETERIORATIONS SUR LES CHAUSSEES
. les embâcles de revêtements décollés

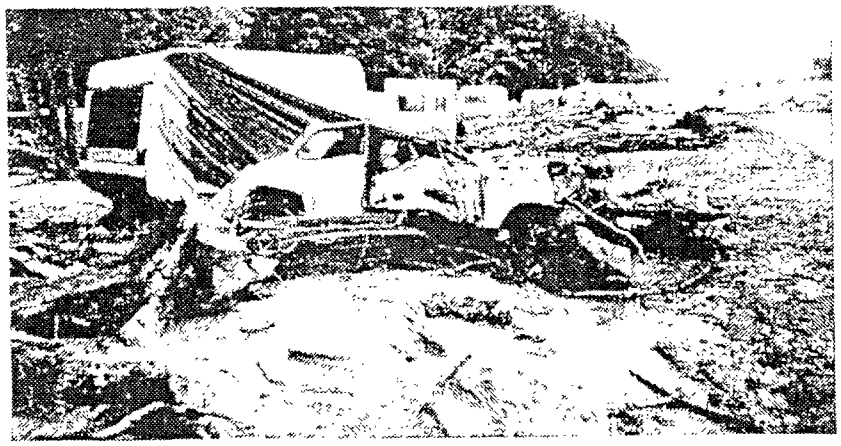


PHOTO 178

GRAND-BORNAND

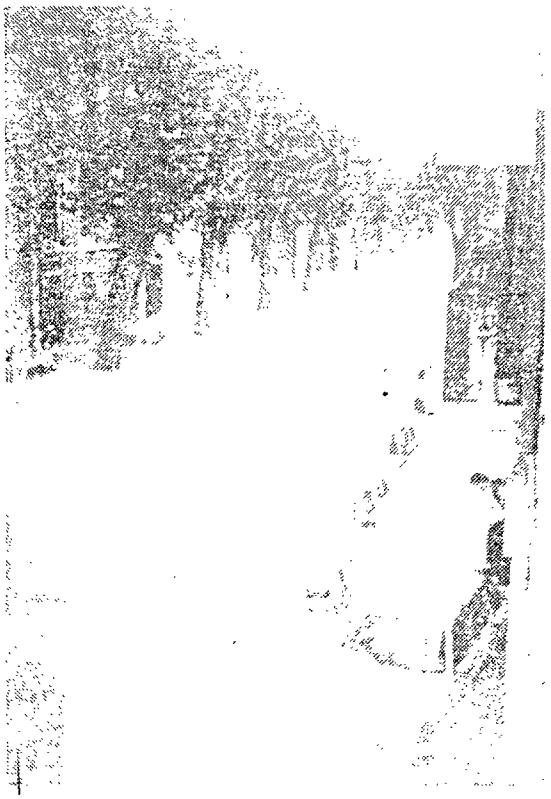
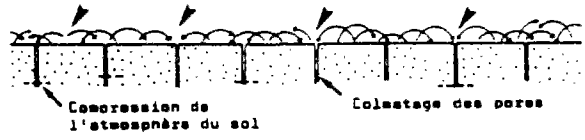


PHOTO 179- Utilité de la végétation urbaine.

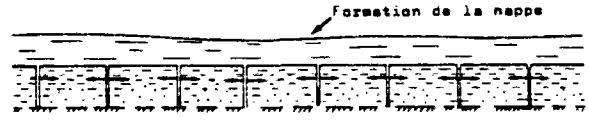
NIMES

- L'UTILITE DE LA VEGETATION URBAINE FACE A LA CRUE : arbre d'alignement

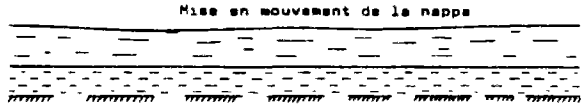
Tous les arbres d'alignement ont résisté à la crue et au courant à Nîmes, après comptage sur le site dans les artères principales. Il n'y a eu aucun remplacement d'arbres adultes par de jeunes sujets (visite de juin 1989).
D'autre part, les arbres ont retenu des voitures (photo 179). Les arbres ont aussi servi, soit d'ancrage à un car d'adolescents en dérive, soit de refuge à des dizaines de personnes réfugiées dans les arbres (sauvetage de proximité dans l'avenue Carnot par les agents de l'EDF, grâce à la présence à demeure de très gros engins de chantiers avec des plates-formes à 2 mètres de hauteur)(cf. chapitre 2 Nîmes).



Phase I : Actions de battance

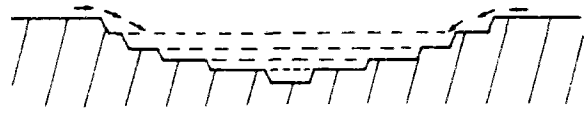


Phase II : Formation de la nappe,battance encore active. Imbibation partielle et effondrement des micro-structures de surface.Formation d'un plan de discontinuité.



Phase III : Saturation et effondrement des structures au dessus d'un plan de discontinuité de plus en plus marqué.

Phase IV : Décollements latéraux (en A).La nappe exerce une importante force de traction.La tranche de sol saturé franchit la limite de liquidité et dépasse localement la densité déjaugée.



Phase V,et suivantes : Le départ d'une large plaque de sol crée un axe de concentration de la nappe qui devient plus épaisse,plus rapide,et éventuellement turbulente.D'où le développement d'une érosion en nappes ravinantes successives.

FIGURE 177

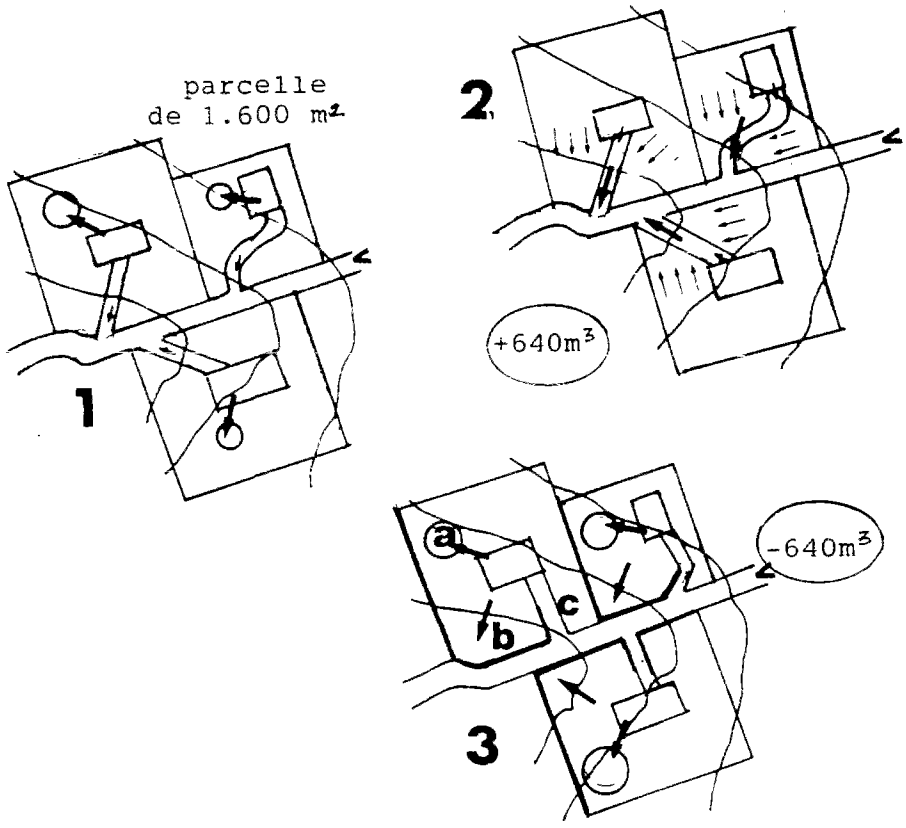
— *Enchainements des processus de l'érosion en nappe.*

L epaisseur de la premiere plaque de sol franchissant la limite de liquidite est faible 5 a 20 cm et la surface affectee par le phenomene varie de quelques ares a un demi hectare ou plus Lors des ecoulements suivants l ablation peut soit s etendre lateralement balayant des surfaces considerables, soit se developper et s accroitre en fonction du micro-relief pre-existant selon un axe de concentration des eaux les processus de l ecoulement en nappe font place aux mecanismes des ruissellements concentres, l erosion verticale succede a l erosion laterale Le ravin qui se forme est l un des plus dangereux qui soient car il est alimente par un impluvium faconne et decape par les actions anterieures de l ecoulement en nappe

Extraits du livre " l'eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux" de G. RIOU , 1989.

Exemple:parcelle Route de Sauve(Nîmes) Exemple:Route d'Uzès(Nîmes)

Photos 180 et 181 - Rejet du ruissellement privé sur la voie publique



1-Situation ancienne
on captait les eaux pluviales pour le jardin (avant 1940 environ)

2-Situation actuelle
on rejette toutes les eaux pluviales sur la route et on lave et arrose le jardin avec de l'eau potable (depuis 1970 environ)

3-Propositions:techniques de lutte urbaine (1993)

protection de la voie publique contre le ruissellement privé et protection de la parcelle contre les eaux de la voie publique(double protection)
a-rétention à la parcelle par rétention mécanique
b-blocage du ruissellement en rétention hors-sol par les murs de clôtures
c-protection contre la crue par les murs de clôtures
d-déplacement des portails

Figure 182 -L'apport du parcellaire privé au ruissellement urbain et contre-proposition d'aménagement pour retenir le ruissellement privé à la parcelle.

3.2.4.5. Les facteurs anthropiques aggravants en infrastructure privée

Nous avons découvert lors de nos visites de terrain que le principal problème des crues urbaines de ruissellement que nous avons étudiées est l'apport actuel du RUISSELLEMENT PRIVÉ sur les VOIES PUBLIQUES (photos 180 et 181).

Cet apport se fait par le biais de l'ACCES PRIVE à la parcelle, qui est en liaison directe avec la voie et souvent au point bas de la parcelle. L'accès devient donc "un exutoire naturel" de la parcelle vers le milieu urbain.
De plus, si cet accès, imperméabilisé (avec les 2 à 3 places de stationnement privé par pavillon), draine toutes les eaux de SURFACE DE LA PARCELLE, pour une pluie d'occurrence centennale les volumes rejetés équivalent à la surface de la parcelle multipliée par la hauteur de la pluie centennale.

Cet apport représente (figure 182) :
1- Ancienne situation : soit 1/3 du volume total de ruissellement issu du privé (car on estime actuellement à 30 % les surfaces imperméabilisées en urbanisme pavillonnaire) et on donne dans les calculs un Cr = 0,3 voire un Cr = 0,2 mais cette donnée de 30 % est pour l'ancienne situation où les eaux pluviales (toiture, parcelle) étaient captées et conservées pour les besoins du jardin (figure 182a).

2- Nouvelle situation : soit 100 % du volume total issu du privé et qui est la situation actuelle, où l'on rejette toutes les eaux pluviales et où l'on arrose et lave les surfaces de jardin avec de l'eau potable (figure 182b).
Cet apport actuel représente bien les 4/5 des volumes recueillis par les surfaces publiques (estimation sur cadastre variable en fonction des apports d'origine des plateaux non urbanisés).

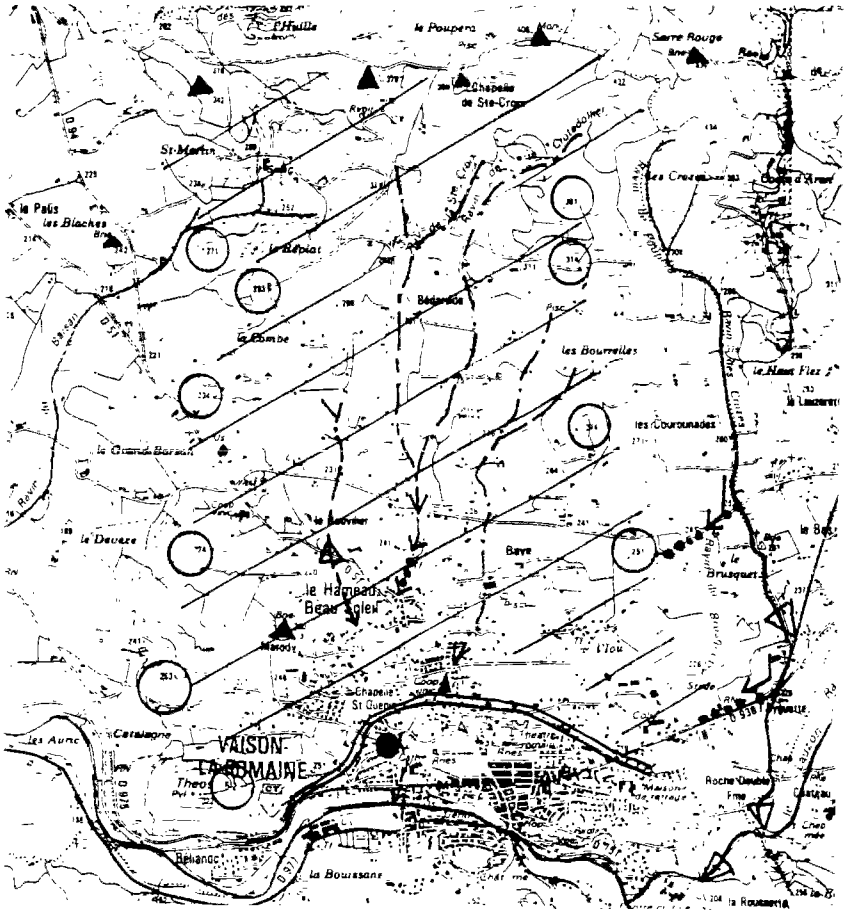
3.2.4.6. Des facteurs anthropiques aggravants en assainissement : oubli des pratiques gallo-romaines

Vaison-la-Romaine est un exemple type de l'oubli des pratiques historiques archéologiques pour ce qui est des égouts.

Les égouts romains utilisés il y a encore une décennie à Vaison ont été court-circuités, murés et remplacés par un réseau moderne beaucoup plus petit et sur d'autres parcours :
• Description : l'égout gallo-romain de Vaison a été construit avec une capacité d'accueil permettant le passage d'une charrette, et situé sur un parcours hydrologique privilégié.
• Résultat de la crue de ruissellement de septembre 1992 : en partie haute de la ville (côté la Romaine), les nouveaux égouts ont été saturés et ont refoulé sur la chaussée, projetant leurs plaques d'égout en l'air pour la première fois de l'histoire.

La taille des égouts gallo-romains étonne toujours, bien qu'ils aient été conçus pour une population beaucoup plus modeste à l'époque que maintenant.

Photo 183- Vaison-La-Romaine/parcelle la Romaine
D'où est venue l'eau de la crue de ruissellement?



▲▲ Ligne de crêtes

Les surfaces d'amont (4km x 2km)qui ont provoqué la crue de ruissellement dans les rues de Vaison-La-Romaine

Les ravins incriminés?

Les eaux des ravins extérieurs à Vaison ont-elles été détournées vers Vaison par les routes et les busages sous les ponts sous-dimensionnés?

● Ecole maternelle détruite

Analyse de site.
Carte 184 - Carte IGN de Vaison-La-Romaine .Les ravins sont-ils traités avec les techniques R.T.M.(Restauration de Terrains en Montagne)? La vue panoramique 183 et la carte 184 correspondent.

3.2.5. Domaine du paysage

3.2.5.1. Les modifications du paysage et l'aggravation du risque de ruissellement

a- Morlaix
b- Vaison-la-Romaine
c- La déprise agricole

a- Morlaix : impact du bocagement et du débocagement
Dans l'attente d'études à faire sur le bilan hydrologique ponctuel d'une crise de ruissellement sur 6 heures, nous retenons les études de bilan hydrologique annuel qui existent et qui nous donnent des éléments de repères, des indications pour la gestion naturelle des stockages de pluies dans leurs milieux, après la crise.
Depuis 1970, le remembrement des bassins-versants de la ville de MORLAIX (Finistère) a entraîné une aggravation des crues de ruissellement en centre-ville (cf. chapitre 2). Le remembrement a été conçu avec un débocagement complet (destruction des haies, des levées de terre, des fossés, des chemins creux, ...).Le livre "les Bocages" de l'INRA de 1976 [64], et en particulier les expériences de Philippe **MEROT** (INRA Rennes, pp. 177 à 184) montre les différences hydrologiques entre deux bassins-versants élémentaires granitiques BOCAGER et OUVERT, avec mêmes couvertures végétales et agricoles et recevant les mêmes précipitations.

Les résultats sont les suivants, pour un bilan hydrologique annuel de 800 mm environ :
• la présence du bocage (réseau haies-talus-fossés) écrase la fonction de transfert, la dynamique de la crue, caractérisée par le débit maximum ruisselé[1] ; les pluies emmagasinées sont différées en partie sur le mois suivant ;
• la présence du bocage diminue les rendements de crue de moitié par rapport à un bassin ouvert. Le coefficient de ruissellement ($Cr = \frac{\text{volume ruisselé}}{\text{volume de l'averse}}$) qui caractérise le rendement de la transformation volumique averse-crue est 1,7 fois plus important sur le bassin ouvert que sur le bassin bocage.

b- Vaison-la-Romaine : d'où est venue l'eau ? (photo 183)
Deux causes :
1- L'ABSENCE D'OUVRAGES MICRO-HYDROLOGIQUES DE LAMINAGE sur les ravins de torrents du bassin-versant de moyenne montagne et de haute montagne (de 600 mètres à 2 000 mètres) (figure 184).
2- LA PRESENCE DE VIGNOBLES
- OBSERVATIONS GÉNÉRALES :
Une visite de site et une analyse de paysage (comprenant l'observation de terrain, l'élaboration in situ de croquis descriptifs détaillés, la description des éléments de références, des simulations du risque centennal, et des pronostics) ont fait apparaître de grandes modifications de paysage depuis 1945 :
• Apparition récente de VIGNOBLES, d'Appellation Contrôlée "les Côtes du Rhône" en remplacement de la forêt de protection de rétention et d'âge centenaire.

---

[1] Le débit maximum ruisselé (Q max K) est la différence entre le débit maximum Qmax et le débit initial de la crue Qo

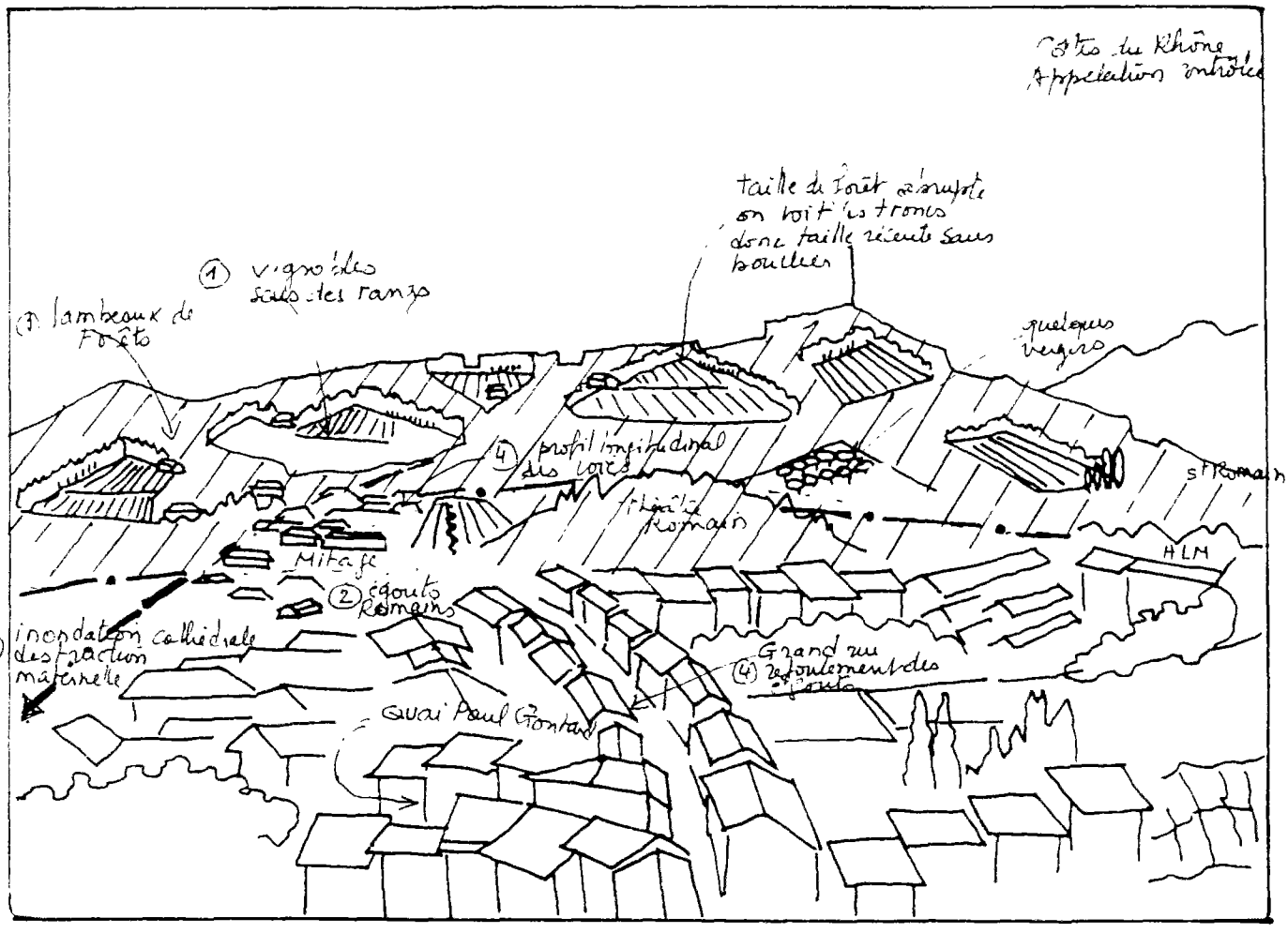


Figure 185- Analyse de paysage à grande échelle de Vaison-La-Romaine; origine de la crue de ruissellement

lambeaux de forêt

limite urbanisme/ forêt

ravins

Hypothèse : La modification du paysage

1- Le développement des vignobles au détriment de la forêt

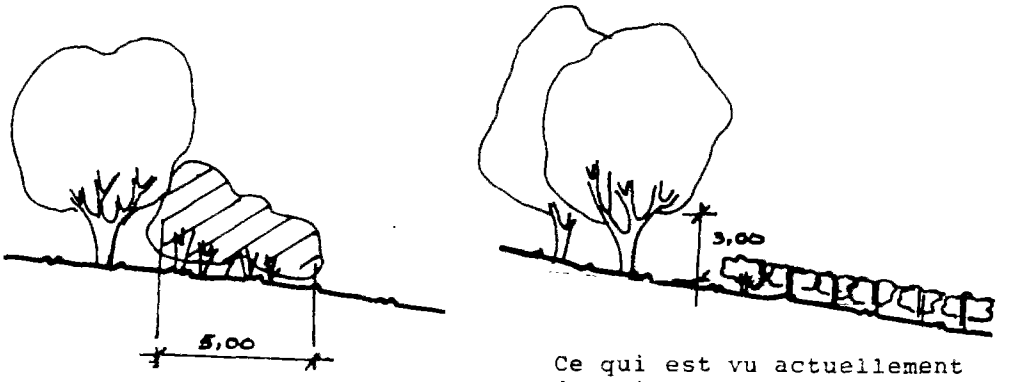
2-La disparition de la forêt en amont de Vaison et son morcellement

3-Le recouvrement des rivières séches des ravins urbains

4-Le murage des égouts Romains

Conséquences:

-Deux morts
-Le refoulement des égouts modernes
-Les rues inondées
-Une école détruite
-La rocade ennoyée avec 400 voitures détruites



Bouclier naturel

Ce qui est vu actuellement de Vaison:les troncs des arbres de lisières

Figure 186 - Analyse de détail du paysage

• Etendue de la modification de paysage analysée : versant de l'Adret de l'Ouvèze, allant de la rivière jusqu'aux crêtes dans le sens de la largeur (4 km) et de Vaison-la-Romaine aux villages suivants dans le sens de la longueur (Saint-Romain-en-Viennois, Puy Méras, Mérindol-les-Oliviers, Faucon, ...).

- OBSERVATIONS DE TERRAIN (croquis descriptif détaillé n° 185 réalisé in situ)

• Le vignoble est installé par taches, par mitage, entouré de lambeaux de forêts et représente au moins 50 % de la surface des pentes.
• La pente des versants varie entre 10 % et 20 %.
• Les lignes des vignobles sont parallèles à la plus grande pente, favorisant la formation du ruissellement.
• L'installation de ce vignoble est TRES récente : on peut voir les coupes des lisières qui montrent une forêt avec TRONCS gris, sans la présence écologique du bouclier[1] naturel. Cette cassure de lisière est visible à 5 km à partir d'un belvédère du vieux Vaison (figure 186).

- DEDUCTIONS

Nous pouvons en déduire que des modifications de paysage importantes sont intervenues depuis quelques décennies au-dessus de "La Romaine" et des villages suivants, liées au développement du vignoble, et que la forêt d'origine (de rétention du ruissellement) a été remplacée progressivement par le vignoble, sans aucune précaution de rétention du ruissellement courant, et encore moins pour les crues centennales.

Cette modification du paysage, qui va se poursuivre sûrement à l'avenir vu l'attrait de la rentabilité d'un vin d'Appellation Contrôlée, protégée par la Communauté Européenne, est une source à notre avis d'augmentation du ruissellement direct observé le 22 septembre 1992 dans les rues hautes de la partie "La Romaine", et est aussi une cause importante de la brutalité de l'inondation fluviale sur Vaison par ruissellement différé.

- LES RECHERCHES

Nous nous appuierons sur les recherches de l'INRA sur les luttes anti-érosion en vignoble en pente (17 %), déjà étudiées dans les annexes du DEA de l'auteur [106], annexe XIII (extrait du "Drainage agricole" de J. CONCARET Théorie et pratique INRA-Dijon 1981 [67], sur l'exemple de la crue de ruissellement à Morey (juin 1963) où 10 000 m^3 de terre ont été emportés et les pieds de ceps déchaussés.

---

[1] Bouclier : terme botanique pour définir la végétation arbustive naturelle progressive qui se développe entre les aires dégagées et les forêts

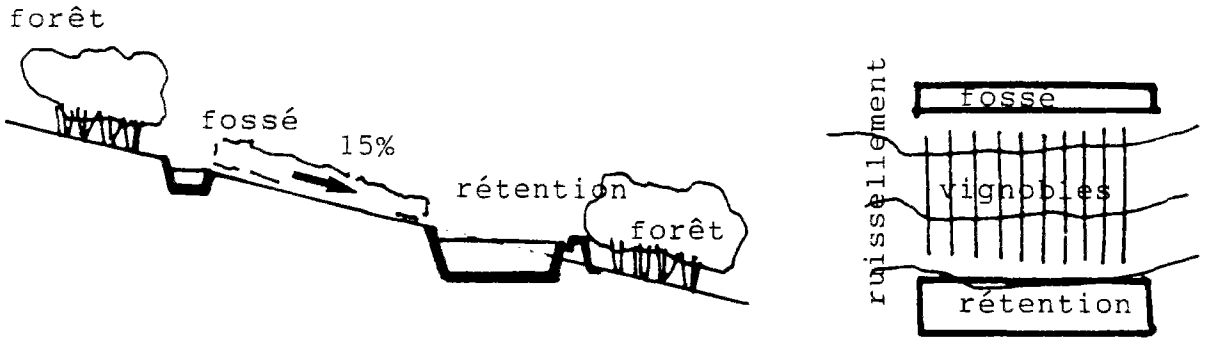
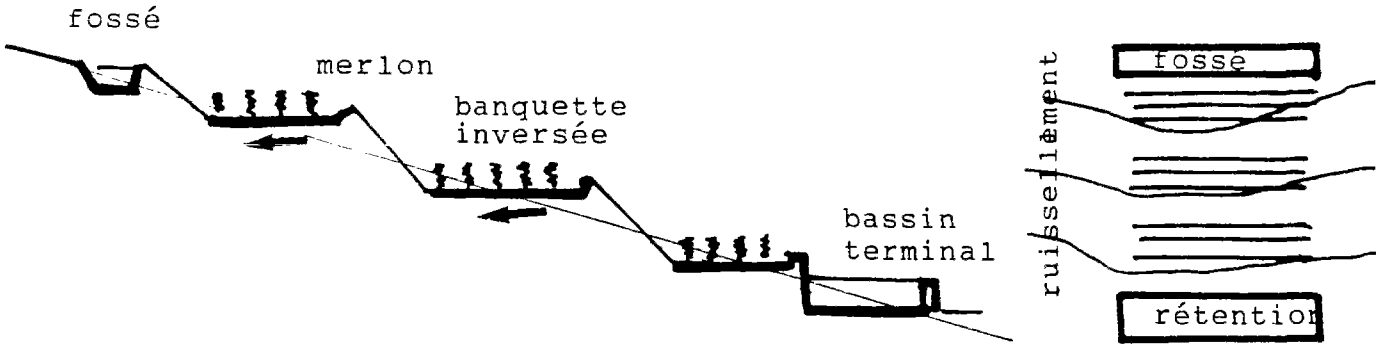


Figure 187- Les vignobles peri-urbains de Vaison-La-Romaine
Propositions d'aménagements micro-hydrologiques dans les vignobles existants,par la rétention mécanique (les rangs sont perpendiculaires aux courbes de niveaux).



2 pratiques culturales négatives
pour l'érosion et la formation
du ruissellement:
- le désherbage mécanique ou chimique
- le labour de fin d'hiver

Figure 188- Propositions de techniques de lutte contre le ruissellement pour des nouveaux vignobles (implantation des rangs de vignobles parllèles aux courbes de niveaux et sur banquettes de culture).

Cette étude s'appuie sur la formule de l'équation globale de WISCHMEIER (1961) E = R.K.C.S.L.T. où la perte de terre (E exprimé en poids par unité de surface) est proportionnelle à l'indice d'agressivité du climat (R), à la sensibilité du sol à l'érosion (K), au facteur cultural (C), à la topographie (pente S et longueur L), corrigée en tenant compte d'éventuels aménagements anti-érosifs (T).
Les aménagements anti-érosifs proposés sont pour le vignoble existant :

• un drainage comprenant d'importantes tranchées drainantes avec un sous-solage associé de grande profondeur.

- NOS PROPOSITIONS

• Pour les vignobles existants : nous proposons d'inciter à la création de fossés et bassins de rétention "micro-hydrologiques" à la base de chaque parcelle et parallèles aux courbes de niveaux (croquis 187) s'inspirant des expériences helvétiques agricoles (annexe 1).
• Pour les nouveaux vignobles : propositions de contraintes pour contrôler un ruissellement de type centennal.
A titre d'exemple : installation de nouveaux vignobles (au détriment de la forêt) sur des BANQUETTES à profil inversé, successives, parallèles aux courbes de niveaux, avec bassins de rétention secs (traité en vignobles, s'il le faut) pour les crues centennales et maintien de 50 % des parties boisées immergeables à l'entour.
Le sens de plantation des vignobles étant régi en fonction des impératifs de stabilité des engins mécanisés (enjambeur essentiellement), l'inversion du sens des plantations pourrait se faire grâce à l'horizontalité des banquettes (figure 188).

c- La déprise agricole : autre raison d'augmentation du ruissellement

La déprise agricole en MOYENNE MONTAGNE risque d'entraîner une aggravation du ruissellement à risque, par l'abandon des techniques millénaires de lutte et de rétention.

Les TERRASSES de culture de montagne en pierres sèches, entretenues jusqu'à tout récemment, en se détériorant prochainement, vont apporter de nouvelles quantités d'eau aux crues de ruissellement, qui se répercuteront à un moment donné sur un village ou une ville situées à leur aval (cf. le livre "Paysage de terrasses" de MM. AMBROISE, FRAPA et GIORGIS [50]).

Il est donc nécessaire de ne pas laisser se dégrader les milliers de kilomètres de terrasses de culture que nous avons en France, et de confier leur gestion à un organisme public, qui gérera aussi tous les aménagements hydrauliques de montagne annexes aux terrasses et en voie d'abandon (canal ou Béal maçonné, rigoles, canal de dérivation, buttée de terre, planche cultivée, irriguée par submersion, citernes, bassin, barrage de colluvionnement, etc.).

3.2.6. Les incertitudes sur les données climatiques et l'aggravation du risque de ruissellement

(cf. texte de l'auteur : le cycle de l'eau, Editions WEKA VRD Espaces verts partie 2 chapitre 1.3.2. pp. 1 à 21) [14].

a- Le nuage à risque : cumulo-nimbus (Cu Nb)

Le risque de ruissellement urbain (et péri-urbain) est actuellement fonction de la présence de nuages de type cumulo-nimbus avec enclume. Ces nuages sont le siège de violentes turbulences, surtout en été. Mais ils déclenchent des orages avec foudre à toute époque de l'année.
Les cumulus comportent trois stades : la naissance, la maturité, la dissipation (figure 18).
Les cumulus peuvent être PERSISTANTS lorsqu'ils sont associés à un puissant front froid. C'est le cas de la catastrophe de Nîmes où l'eau s'est renouvelée sur place.

Ils ont comme caractéristiques :
1- de contenir de très grandes quantités d'eau (hauteur de nuage à Nîmes, 3 000 mètres jusque dans la stratosphère, figure 19) ;
2- de rester sur place jusqu'à dissipation du nuage ;
3- de fournir de grosses gouttes de pluie qui affectent le ruissellement et l'érosion des sols.

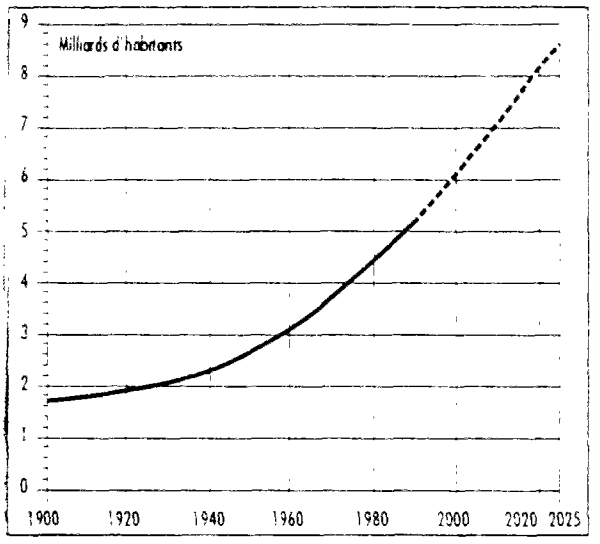
b- Les changements climatiques possibles

Sans empiéter sur le domaine des prévisionnistes, nous reprenons l'analyse de l'Organisation Météorologique Mondiale (O.M.M.) de Genève qui prévoit une modification importante des climats d'ici l'an 2100 (revue "Sources UNESCO" n° 37 mai 1992).

Les changements climatiques sont dus, selon l'ONU :

• au développement de la population mondiale, qui utilise l'énergie fossile avec libération du carbone et accélère la déforestation par la consommation (figure 189) ;
• par l'augmentation de la concentration de CO_2 (dioxyde de carbone) issue de la révolution industrielle et qui contribue à l'EFFET DE SERRE (figure 190) ;
• par l'accroissement de l'effet de serre, qui provoque un réchauffement de la terre avec élévation de la température moyenne de la terre selon les prévisions de l'O.M.M.. Cette température moyenne s'élèverait d'environ 0,3° par décennie en modifiant les conditions climatiques (pour la France augmentation des orages, etc.) (figure 191) ;
• par le rehaussement du niveau des mers dû à l'échauffement et à la fonte des glaciers polaires, qui pourrait être de 6 cm par décennie soit 60 m d'ici un siècle.
(cf. l'inondation progressive de Venise alors que l'on a pensé pendant longtemps que Venise "s'enfonçait" par suite de la détérioration des pieux de fondation en bois) (figure 192).

1. Le boom démographique



La combustion du pétrole et du charbon, qui libère chaque année environ six milliards de tonnes de carbone, la déforestation, qui en libère environ deux milliards, sont responsables de plus de la moitié de la part de l'effet de serre dû à l'homme. Apparus plus récemment, les chlorofluocarbones (surtout utilisés dans les aérosols et les réfrigérateurs) y contribuent pour environ le quart, le méthane pour un peu moins du sixième.

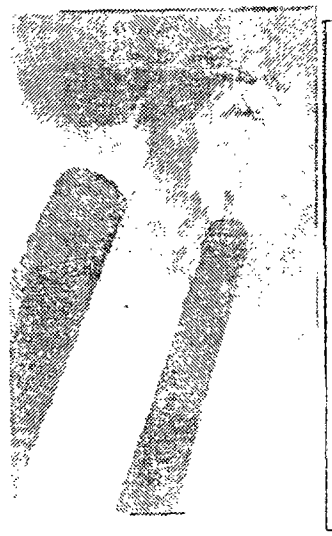
Plus la population mondiale augmente et plus ces émissions gazeuses risquent de croître du fait, surtout, de la généralisation des modes de production et de consommation des pays développés et/ou de l'accélération de la déforestation.

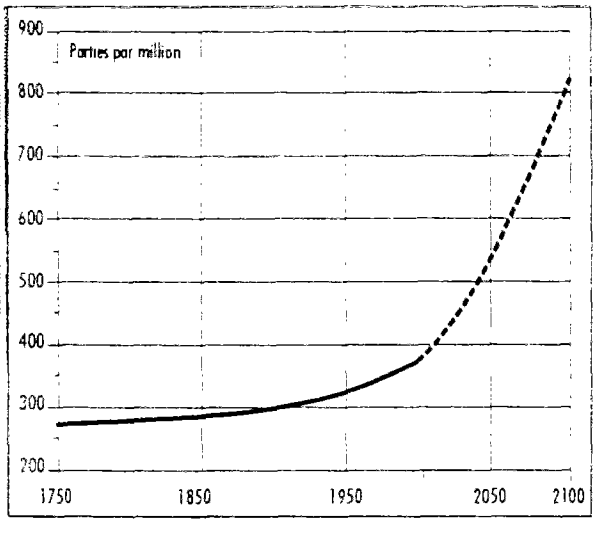
(*Sources Unesco*, n° 37, mai 1992.)

N.B. Tous les graphiques et les commentaires qui les accompagnent sont tirés de *Climate change*, le rapport d'un groupe de travail constitué par l'*Organisation météorologique mondiale (OMM)* et le *Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE)*. Infographie : A. Darmon.

Figure 189 - Evolution probable de la population mondiale

2. L'atmosphère se charge de gaz carbonique





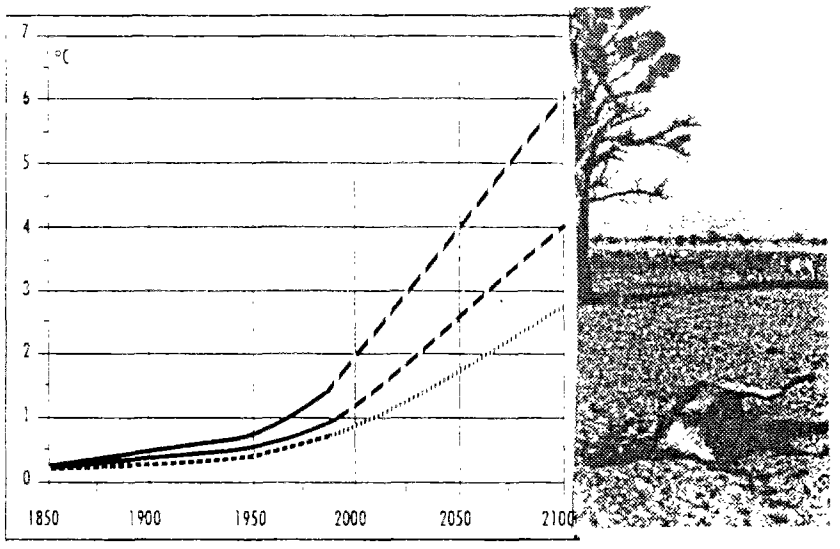
Le graphique ci-contre indique, depuis l'aube de la révolution industrielle, l'élévation de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, mesurée en parties par million.

Les projections jusqu'en 2100 sont basées sur l'hypothèse (la pire...) que pas ou peu de mesures seraient prises pour limiter les émissions de gaz carbonique contribuant à l'effet de serre.

(*Sources Unesco*, n° 37, mai 1992.)

Figure 190- Evolution de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère.

3. La temperature moyenne de la terre augmente



L'accroissement de l'effet de serre provoque un réchauffement de la Terre, d'autant plus marqué que celui-ci augmente les émissions de vapeur d'eau qui, à leur tour, accentuent cet effet.

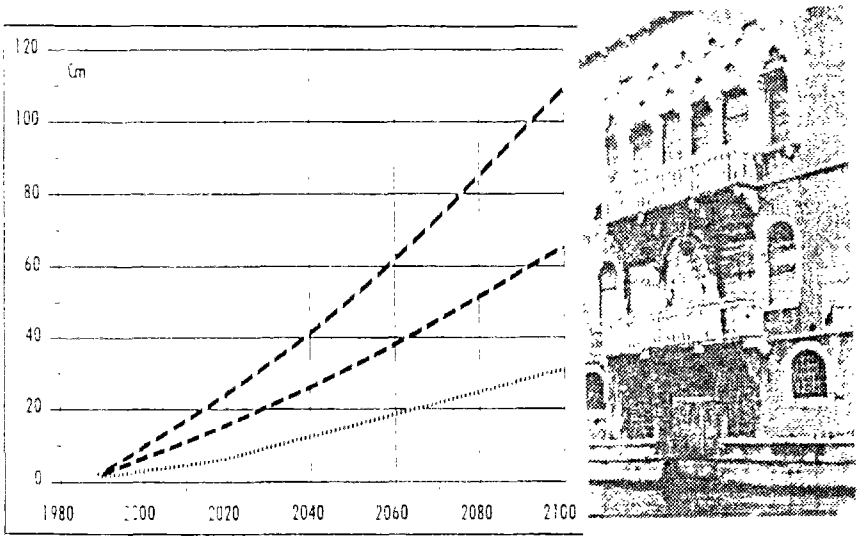
Le graphique ci-contre indique la part de l'élévation de la température moyenne de la Terre due à l'accentuation de l'effet de serre (estimations basse, optimale ou élevée), la référence zéro étant donnée par cette température moyenne en 1765.

Selon ces prévisions, cette température moyenne s'élèverait d'environ 0,3° par décennie, soit de 1° d'ici à l'an 2025, donc plus rapidement en 30 ans que pendant les 10 000 dernières années.

(*Sources Unesco*, n° 37, mai 1992.)

Figure 191- Evolution de la température moyenne de la terre.

4. Le niveau moyen des océans s'élève



Sous l'effet de cet échauffement, les océans se dilatent et les glaciers, surtout polaires, fondent : le niveau moyen des océans monte, comme l'atteste le graphique ci-contre, toujours selon les trois mêmes types d'estimation. Cette élévation moyenne serait de 6 cm par décennie, soit de 60 cm d'ici à la fin du siècle prochain.

Deux remarques importantes. Dans l'état actuel des connaissances, ces élévations de température et de niveau restent sujettes à de fortes marges d'incertitude. Elles sont aussi peut-être largement dues à des variations « naturelles ». Malgré tout, il vaut certainement mieux prévenir que guérir.

(*Sources Unesco*, n° 37, mai 1992.)

Figure 192 - Evolution du niveau moyen des océans.

Au coeur de la ville, l'av. Charles de Gaulle s'est subitement transformée en véritable rivière...

Figure 193- Les "éléments-refuges" improvisés
Crue de ruissellement du 21 juillet 1992
à Aix-Les-Bains (photo de presse "Le Dauphiné").

e- Les incertitudes
Les incertitudes sur les données climatiques sont réelles.
Que les modifications de climat auxquelles nous assistons soient d'origine anthropique (augmentation de la population, de la consommation, ...) ou qu'elles soient naturelles (si l'on s'en réfère aux travaux de VIOLLET-LE-DUC de 1868 à 1879 pour l'établissement de sa carte du Mont-Blanc et du constat du retrait des glaciers alpins par observations de terrain), les incertitudes se trouvent être dans la variation des hypothèses basses, optimales ou élevées.

d- L'aggravation du risque
Nous préférons donc prévoir, en fonction de ces hypothèses, que l'évolution climatique actuelle ira dans le sens du renforcement du risque de ruissellement par l'augmentation du nombre d'orages et la modification altimétrique des exutoires naturels marins.

3.2.7. Les comportements aggravants

a- Les éléments refuges improvisés
- LES ABRIS PUBLICS À RISQUES
A Aix-les-Bains, pendant l'inondation du 21 juillet 1992, les gens se sont réfugiés en grand nombre dans les abris et kiosques publics, mais sans aucune possibilité d'ACCES aux TOITURES, même si le niveau de l'eau avait continué de monter (photo 193).

- LES SANITAIRES DES CAMPINGS
A Vaison-la-Romaine, les sanitaires sur lesquels 20 personnes au moins avaient trouvé refuge ont été submergés, entraînant la mort de personnes.

- LES FAUX RELIEFS
Au Grand-Bornand, un relief artificiel en partie basse du camping, correspondant à une levée de terre de protection du terrain contre les eaux de la rivière, a servi temporairement de refuge aux campeurs jusqu'à l'arrivée des secours héliportés, avant d'être SUBMERGÉ.
A Vaison-la-Romaine, un relief en partie basse du camping a servi de refuge avant d'être submergé et de devenir un piège mortel.

b- Une conduite dangereuse
A Nîmes, un autocar de ramassage scolaire s'est engagé dans une voie avec 0,40 mètre d'eau, mettant en péril la vie de 27 adolescents, par une sous-estimation du risque, en se trouvant à contre-courant et dans un écoulement préférentiel.
Il serait nécessaire d'interdire la conduite en aquaplanage (dès 10 cm d'eau).

c- Le refus d'évacuation d'un site
• PAR LES SECOURS : ORDRE DE NON-ÉVACUATION
Nous signalons une tendance, jusqu'à la catastrophe de Vaison-la-Romaine incluse, à vouloir MINIMISER le risque hydrologique, à ne pas vouloir le dramatiser avant le paroxysme, même parmi les secours. Comme le dit un Commandant de secours (selon Paris-Match du 8 octobre 1992 p. 71) à la question de savoir si on ne devait pas faire évacuer le camping de Vaison-la-Romaine avant, "on ne déplace jamais des populations pour un orage.

Si on traumatise trop, on risque de créer un mouvement de panique aux conséquences encore plus graves"... Cet avis a été formulé malgré un "BMS Alarme" (Bulletin Météorologique Spécial) 24h à l'avance.

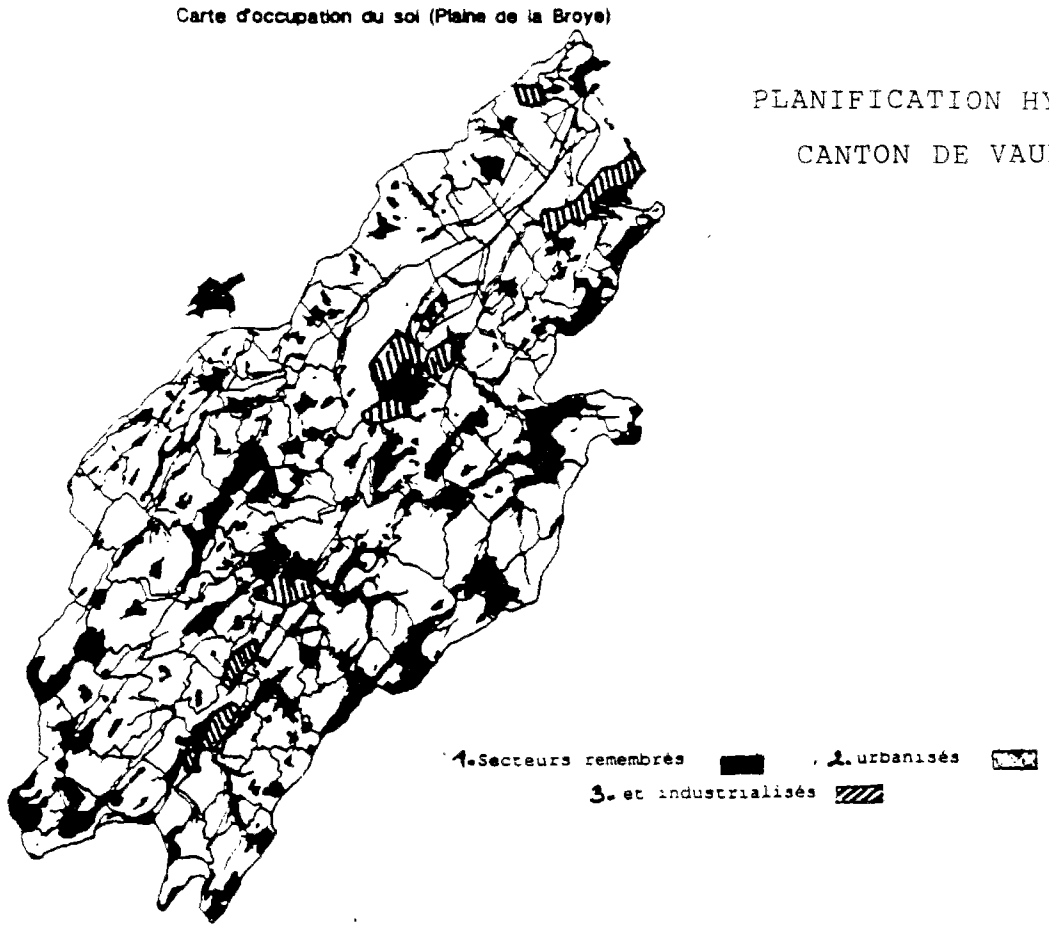
• PAR LES INDIVIDUS : REFUS D'ÉVACUATION À UN ORDRE
Nous avons rencontré plusieurs cas de refus d'évacuation à un ordre, en particulier à celui de sapeurs-pompiers (la Corse, novembre 1993 : Sainte-Lucie-de-Porto-Vecchio ; département de l'Aude, Septembre 1992 : Rennes-les-Bains).
Nous indiquons que pour les incendies de Malibu près de Los Angeles (U.S.A.) de novembre 1993, les policiers ont du faire évacuer parfois l'arme aux poings.

3.2.8. **Autres facteurs anthropiques aggravants** (liste indicative)

•Le découpage des Services Techniques Municipaux pour la gestion du ruisselement pour les villes de plus de 100 000 habitants.
•L'absence de techniciens pluridisciplinaires pour les villes plus petites.
•L'emplacement des scieries en bordure de rivières ou talwegs.
•L'emplacement de commerces à grand public dans les zones inondables (le "Casino" de Nîmes et de Vaison-la-Romaine).
•Les dysfonctionnements des réseaux souterrains d'assainissement.
•Les remblaiements des lits mineurs et majeurs.
•La non-évacuation des populations dans les lieux à risques.
•L'arrêt des appareils météorologiques foudroyés ou ennoyés.
•Le sous-équipement des communes en fax (coût 2 500 F en 1993).
•L'absence de cordages dans les Services Techniques, de secours, et édifices publics.
•La présence de nombreuses écoles construites dans des secteurs inondables (Clermont-Ferrand, Nice, Vaison-la-Romaine où une maternelle a été détruite en 1992, Bagard, ...).
•Les ruptures d'endiguements.
•La destruction des aménagements de rivières (Vaison).
•La méconnaissance des techniques archéologiques romaines d'assainissement.
•La méconnaissance de la topographie du site.
•La non-prise en compte des événements historiques, ...
•La non-protection des réceptions radio-électriques contre les perturbations électromagnétiques.
•Etc ...

CONCLUSION

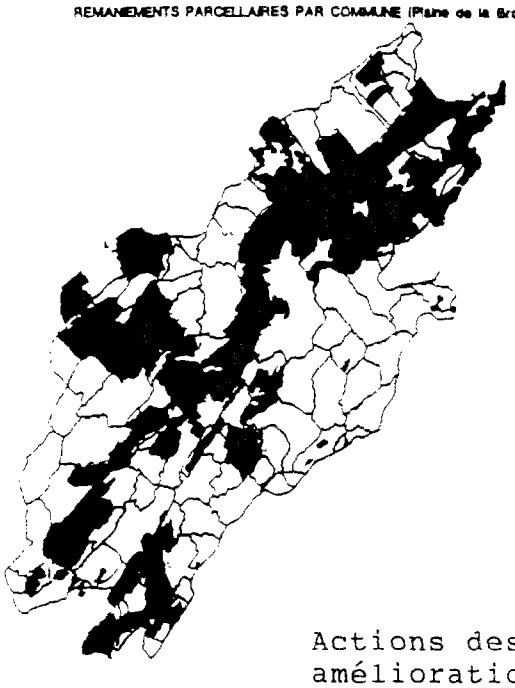
Au niveau des facteurs aggravants, nous constatons que :
- les eaux des crues exceptionnelles passent toujours au même endroit, à l'échelle géologique ;
- la nature peut être plus forte que les ouvrages des hommes (destruction de maisons, de ponts et de digues) ;
- il faut prévoir le PIRE selon les directives de la décennie 1900-2000 de l'ONU contre les risques d'inondation, pour obtenir une meilleure protection des personnes et des biens.



PLANIFICATION HYDROLOGIQUE

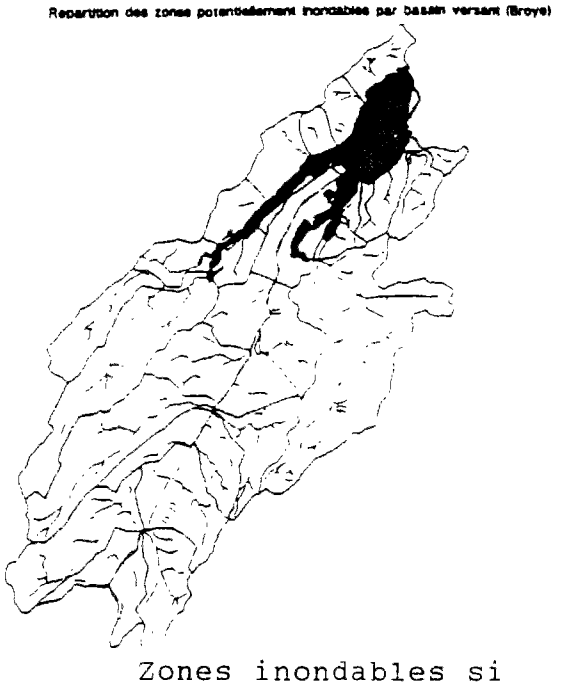
CANTON DE VAUD (C.H.)

Figure 194 - Occupation actuelle de l'espace



Actions des améliorations foncières

Figure 195- Les prévisions de remembrement



Zones inondables si aucune rétention n'est faite suite aux nouvelles implantations.

Figure 196- Conclusions
Plans directeurs informatisés
E.P.F.L. M. CONSUEGRA

3.3. LES FACTEURS LIMITANT LE RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT

Nous aborderons les facteurs limitants au niveau de la planification, du choix des infrastructures, de l'aménagement du paysage et de la présence de divers éléments de refuges.

3.3.1. Généralités

- NE RIEN FAIRE QUI AGGRAVE LE RISQUE

Les facteurs limitant le risque majeur de ruissellement sont en premier lieu les facteurs qui évitent les facteurs aggravants vus au chapitre 3.2. (choix des sites, etc.).

- LE MAINTIEN DU STATU-QUO

Il s'agit de ne pas empirer artificiellement la situation, tant que les techniques de lutte appropriées n'auront pas été mises en place pour les crues centennales et plus.

- PREVOIR LE PIRE EN MATIERE D'INONDATION c'est-à-dire la crue la plus forte historiquement connue (cf. texte de l'ONU, résolution n° A/42/169 du 12-16 septembre 1989 sur la Décennie Internationale de la Prévention des Catastrophes Naturelles).

3.3.2. Facteurs s'opposant à l'évolution catastrophique du ruissellement

3.3.2.1. Au niveau de la planification

a- Planification hydrologique à grande échelle

Nous prenons l'exemple de la planification hydrologique du Canton de Vaud (Suisse), qui équivaut à la planification d'un département français.

La Suisse a opté pour une planification à grande échelle en fonction du risque de ruissellement majeur (crue de 100 ans et plus) permettant l'autorisation ou l'interdiction de tous nouveaux équipements ou constructions, en fonction des capacités hydrologiques du territoire (annexe 2, pp. 624 à 628).

En fonction de l'occupation actuelle du sol (secteurs remembrés, urbanisés et industrialisés) et des propositions de remembrement, de lotissement, etc., la planification prévoit les nouvelles zones potentiellement inondables, des seuils de tolérance et des impossibilités de travaux liées aux aggravations des inondations pluviales (figures 194, 195 et 196).

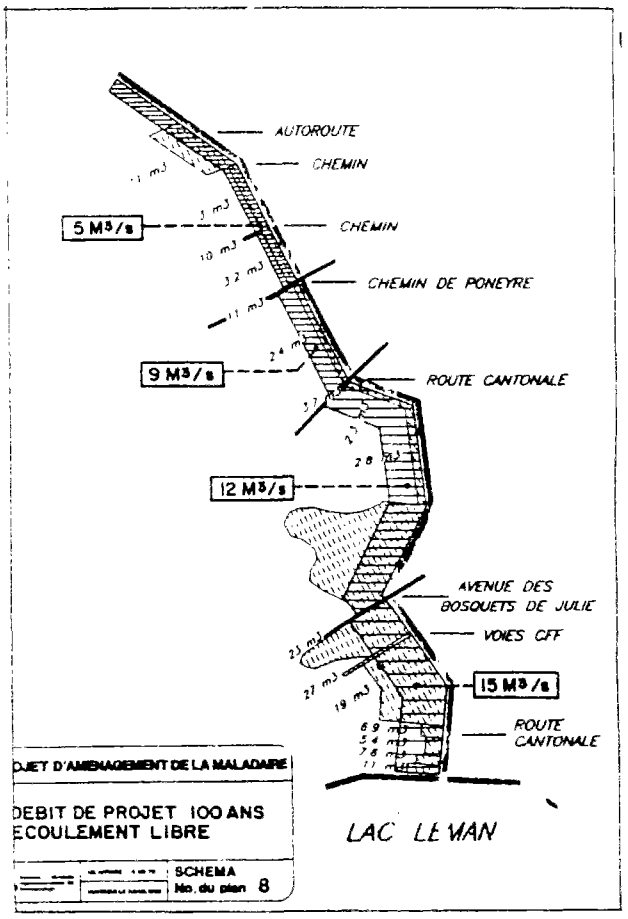


Figure 197-Débit de projet 100 ans écoulement libre

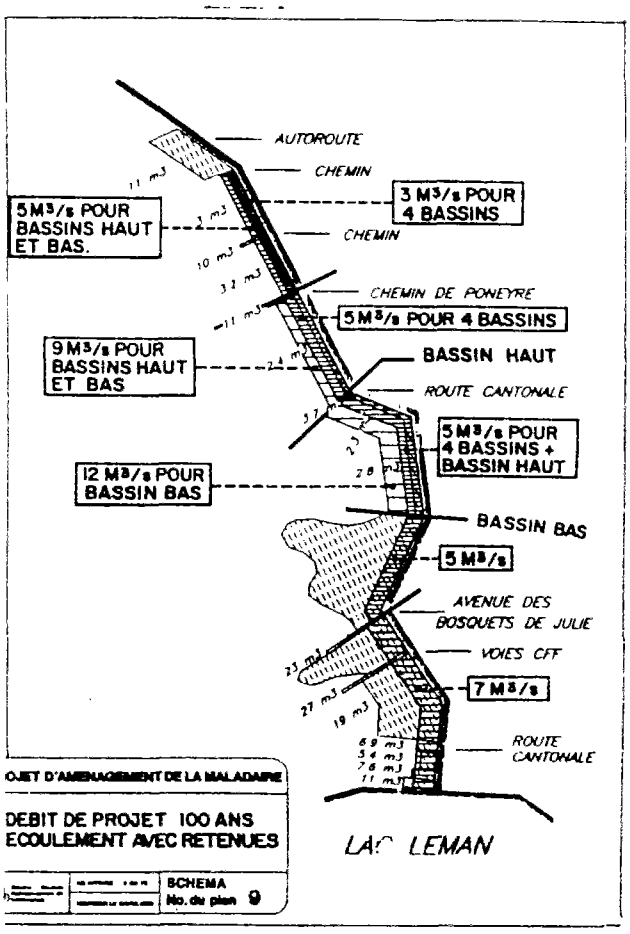


Figure 198-Débit de projet 100 ans avec retenues

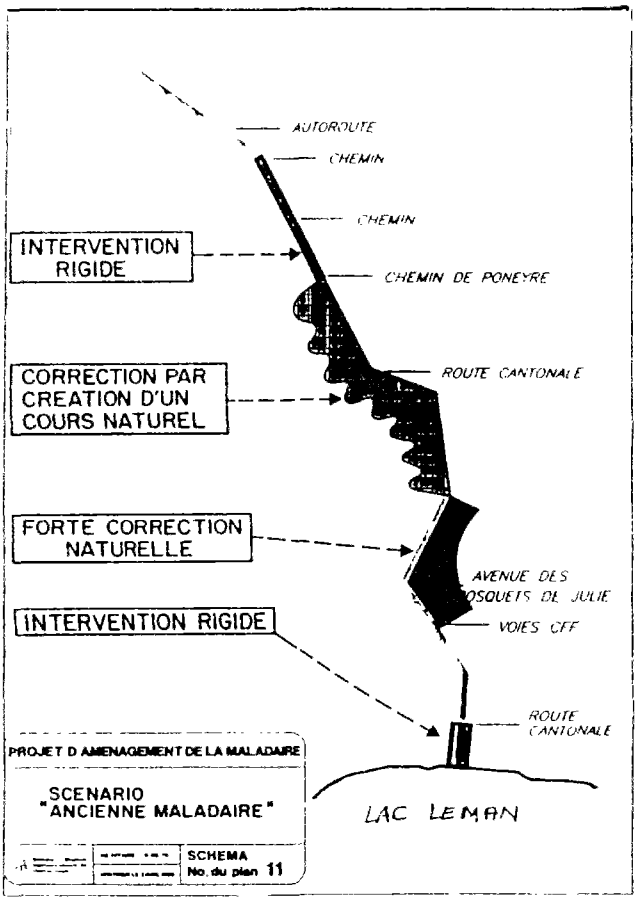


Figure 199-Scénario ancienne rivière

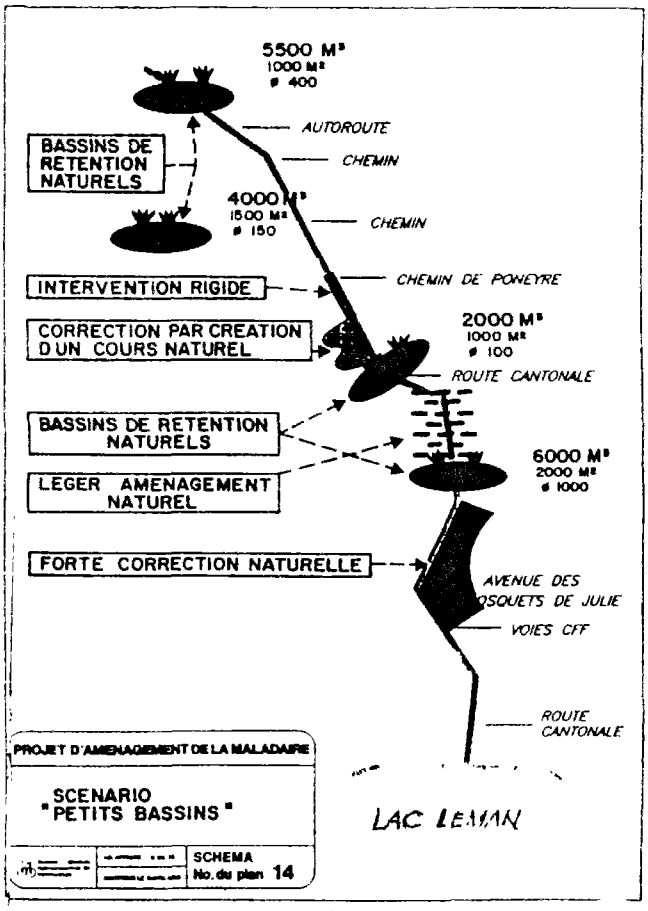


Figure 200-Scénario petits bassins

Projets d'aménagement d'une petite rivière urbaine avec simulation de crues de 100 ans(en écoulement libre ou retenues(C.H.).

La planification comprend donc la définition :

- des zones avec interdiction de construire et d'imperméabiliser,
- des zones avec autorisation de construire, avec des aménagements compensatoires pour retenir le risque hydrologique à la source.

Par les plans directeurs informatisés, l'E.P.F.L. (Professeur MUSY et M. CONSUEGRA) délimite spatialement les villes potentiellement inondables par les crues de ruissellement à risque (exemple de la ville d'Yverdon), et des probabilités d'inondabilité sur 2,00 mètres de hauteur dans la ville, si un remembrement agricole est fait en amont, par exemple sans précaution de rétention pour les crues centennales.

- CONSEQUENCES DE CETTE PLANIFICATION

Ces études générales conduisent l'Etat à autoriser certaines communes, et pas d'autres, à réaliser certains travaux de façon à NE PAS AGGRAVER LE RISQUE HYDROLOGIQUE, même si ces communes se trouvent éloignées à plus de 100 km de la zone à risque d'aval.

Tous les permis de construire (bâtiments et routes), les permis de remembrement et les permis de drainage souterrain sont sous le contrôle de ce plan directeur hydrologique.

b- Planification hydrologique à petite échelle

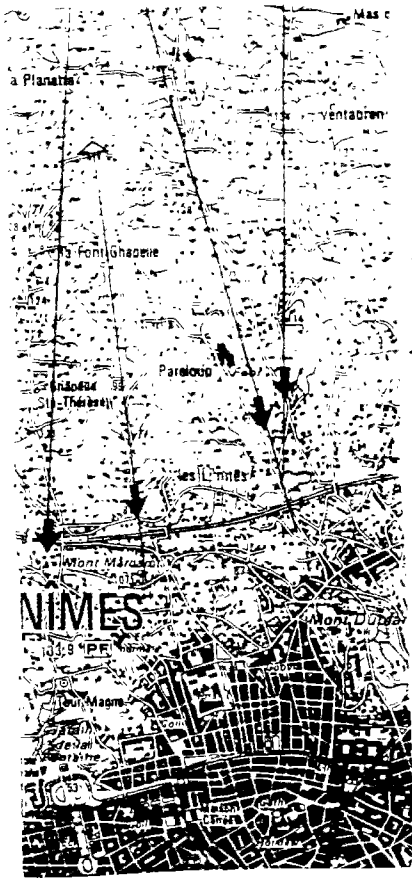
Les planifications hydrologiques à petite échelle sont réalisées avec l'éventail des crues et leurs conséquences : projet avec crue de 10 ans, de 100 ans, réponses techniques avec écoulement libre, écoulement avec retenues, petits bassins, grands bassins, etc.

La ville de Lausanne envisage des projets d'amélioration des crues de rivières urbaines avec des choix d'aménagement, des bassins de rétention, de détente, des choix de hauteur tolérable d'inondation et des coûts, l'ensemble étant "décidé" par les habitants concernés (figures 197 à 200,annexe 2,pp.629 à 633).

Nous rappelons qu'en France, en 1992, le service administratif chargé de gérer l'hydrologie et l'hydraulique des bassins-versants de la Seine-Saint-Denis, la DEA, n'a pas la possibilité juridique de contrôler le développement de l'urbanisation de son département. La lacune est d'importance (annexe 1, pp. 532 et 533) car c'est le maire d'UNE commune qui délivre le permis de construire.

3.3.2.1. Au niveau du choix des infrastructures

Les infrastructures, suivant leur emplacement et leur taille peuvent aggraver ou limiter le risque hydrologique.



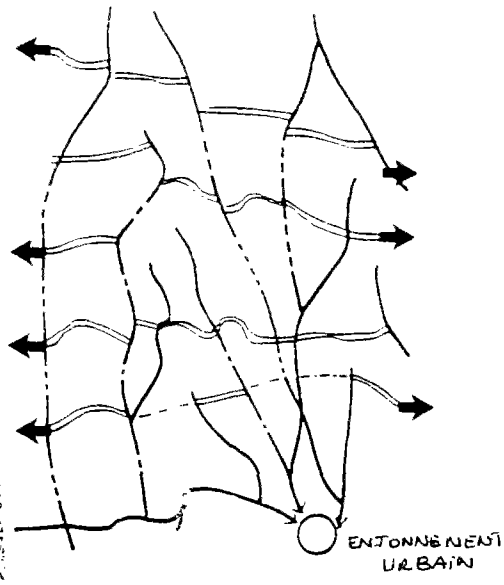


Figure 201- Défenses hydrologiques centennales d'amont
Proposition thèorique de nouveaux tracés d'infrastructure peri-urbaine d'amont.
-dans le sens des courbes de niveaux
-avec des ouvrages de rétention (bassins, fossés...)

voies anciennes délaissées
voies nouvelles avec ouvrages de rétention ou canaux de dérivation...

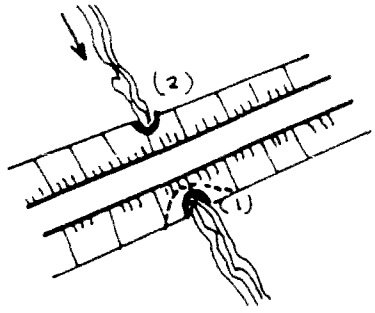
Photo 202- Autoroute avec piles pour le ruissellement de 1000 ans (le"Déluge",Canton de Vaud)

LIEU	NIVEAU DE PROTECTION 1980 → évolution
milieu urbain	100 ans → 30 ans 30 ans → 10 ans → 5 ans
autoroutes	1000 ans → 1000 ans 100 ans → 30 ans → 10 ans
milieu rural	20/30 ans → 10 ans

Le renversement actuel des tendances conduit à un retour vers de petits dimensionnements pour les canalisations, afin de provoquer la rétention dès l'amont.

Figure 203- Tableau des objectifs de protection dans le Canton de Vaud (C.H.).

a- Autoroute hors risque pour la traversée d'une vallée sèche;possibilité de la crue de 1000 ans.



b- Passage par busage zone d'affouillement du remblai(1) zone de rétention (2)

Figure 204-
Autoroutes sur pilotis ou remblais et impact du ruissellement.

- LES FACTEURS LIMITANTS SONT :

• Les routes dont le tracé suit les courbes de niveaux avec des aires de délestage pour la formation du ruissellement issu du revêtement des chaussées (figure 201).
• Le non-allongement des routes péri-urbaines.
• Le non-élargissement des routes.
• Un niveau de sécurité élevé retenu pour la préservation des ouvrages contre le ruissellement risque majeur.

Nous prendrons les exemples du Canton de Vaud (Suisse) :

• Autoroute , niveau de sécurité : crue de 1000 ans (millennale) pour la non-destruction de l'ouvrage au niveau de la structure dans le cas des crues transversales des talwegs. L'ouvrage sera construit sur piles (Photo 202, et annexe 2 pp. 620 et 621).

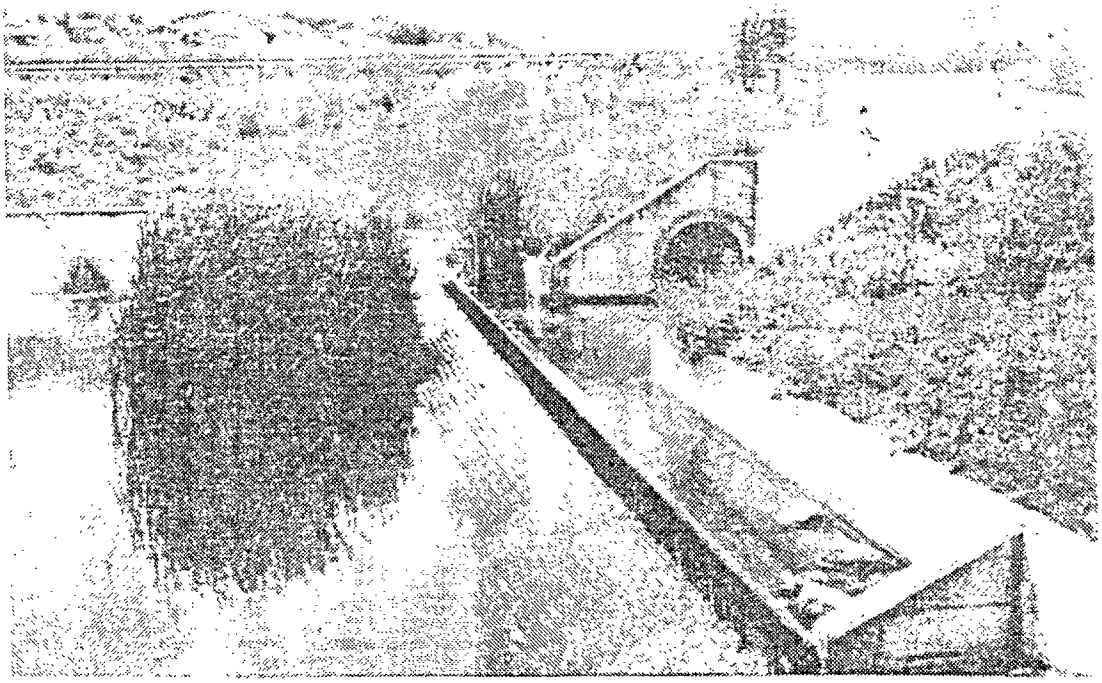
• Autoroute : niveau de sécurité pour la surface de l'autoroute
Evolution : crue de 100 ans en 1980,
crue de 30 ans en 1985,
crue de 10 ans en 1995, avec le principe de l'aquaplanage où l'eau de ruissellement des crues centennales se trouvera bloquée SUR l'autoroute existante, sur la chaussée et entre les murs-parapets (annexe 2 pp. 635 à 637, et figures 203 et 204).

• Bassins d'orages : création de bassins d'orages de rétention pour les crues définies ci-dessus et de DEPOLLUTION des eaux des autoroutes. La dépollution de ces eaux chargées d'huile, d'hydrocarbure et de métaux lourds est basée sur le principe d'une dépollution par l'eau, les plantes, les animaux microscopiques et le soleil, inspirée de l'expérience de la station d'épuration du LAGUNAGE de MEZE (France) avec la série des trois bassins de dépollution (annexe 2 pp. 635 à 643, et photo 205) [240].

• Parking urbain : des aires de délestage du ruissellement des chaussées. Pour cela, la ville de Lausanne envisage de transformer progressivement les parkings urbains existants en bassins de rétention, avec piégeage de l'eau de pluie à la source (annexe 2 pp. 646 et 647 et voir aussi les techniques de luttes 3.4.).
Niveau de sécurité retenue : crue centennale (100 ans).

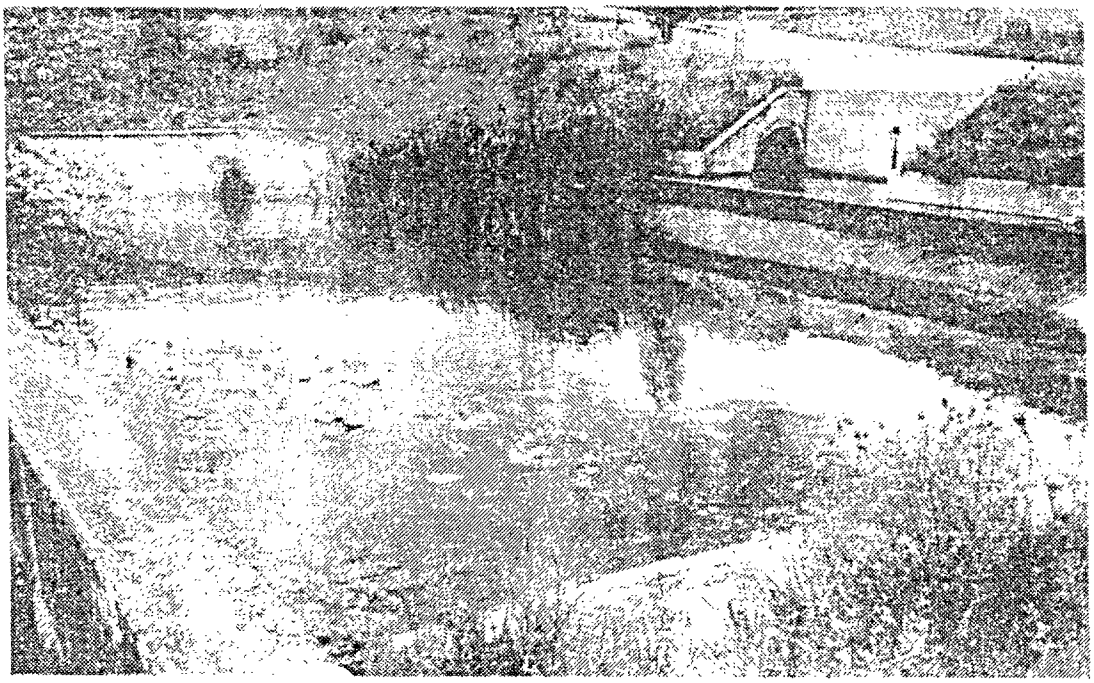
• Conclusion : dans le domaine de l'urbanisme, comme celui de l'infrastructure, le maintien du STATU-QUO est une solution d'attente pour limiter le risque majeur de ruissellement, la crue centennale, en attendant la mise au point de la planification hydrologique de départements vis-à-vis des crues historiques multi-centennales et des risques encourus.
Cela signifie que le permis de construire, ou l'édification de nouvelles routes, ou le développement de drainage souterrain agricole ne sont plus autorisés jusqu'à la réalisation de ces documents.

Le bassin de décantation



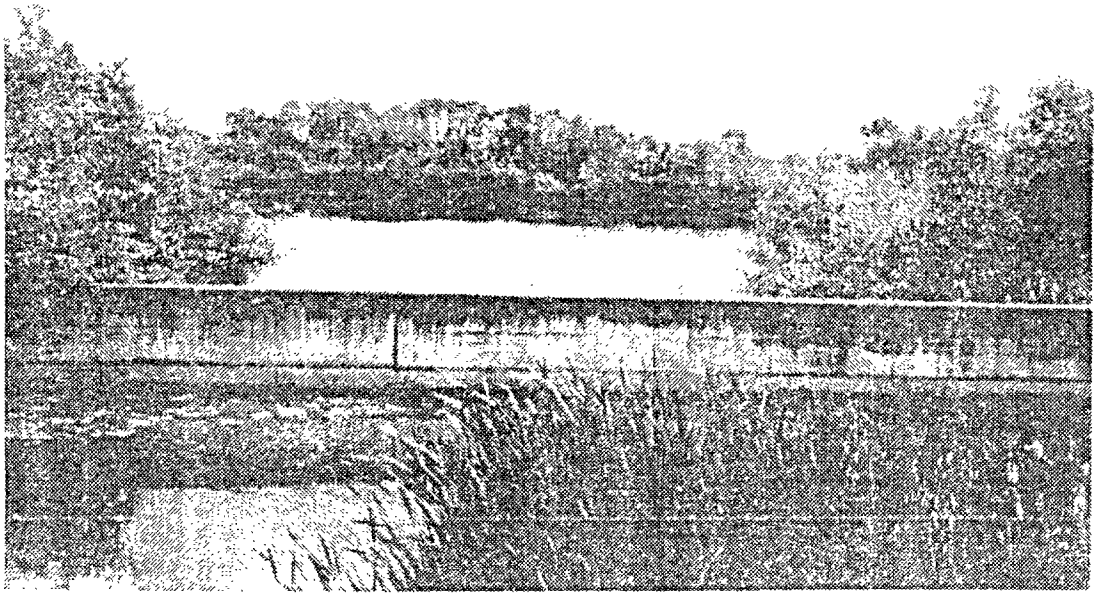
1

Le bassin de dépollution deshuileur



2

Le bassin de rétention et d'infiltration



3

Photo 205- Bassin d'orage de l'autoroute d'Orbe (C.H.) avec les trois bassins inspirés des théories du lagunage de Mèze(France) pour la dépollution des eaux pluviales d'autoroutes.

3.3.2.3. Au niveau du paysage, de l'aménagement du bassin-versant de l'arrière pays

Nous avons observé, sur les sites étudiés, des facteurs limitants existants qui s'opposent à l'évolution de la transformation du ruissellement en catastrophe.

Ce sont les facteurs regroupés de la protection mécanique, de la couverture du sol et de la rétention anthropique, par exemple :

- les murs-terrasses de culture des Cévennes (cf. DEA M. GUITON p. 24 [91] et figure 315),
- les murs de clôtures en pierres sèches (garrigue de Nîmes),
- la végétation : rebocagement, reforestation, revégétalisation,
- les ouvrages de laminage RTM et le "génie biologique",
- les ouvrages agricoles de rétention MICRO-HYDROLOGIQUES (cf. les travaux du Service des Améliorations Foncières du Canton de Vaud, qui réorganisent les remembrements agricoles avec l'assistance de l'Institut du Génie rural de l'EPFL de Lausanne en fonction des crues hydrologiques (annexe 2, pp. 653 à 661, photo 206).

a- Etude spécifique : les murs de pierres sèches de la garrigue de Nîmes, un facteur limitant ?

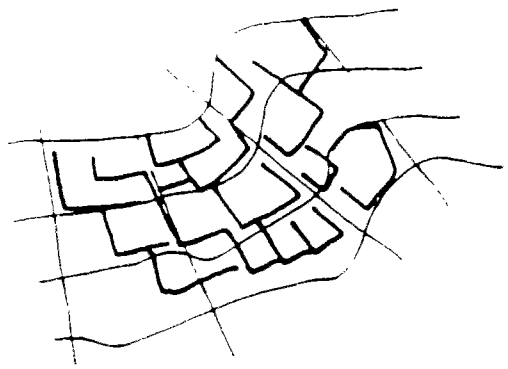
La zone périphérique d'amont de Nîmes est compartimentée par une multitude de murs en pierres sèches pluri-centenaires qui délimitent les parcelles. Ce COMPARTIMENTAGE apparaît très clairement sur les cartes IGN et sur les photographies aériennes (photo 209, carte 210, croquis 207).

- EMPLACEMENT DES MURS : visites de sites (figure 208) : les murs en pierres sèches se trouvent dans des secteurs très spécifiques de la garrigue, dans des zones à forte pente (entre 10 et 20 %) et surplombant Nîmes alors qu'il n'y a plus de mur sur les zones de garrigue de faible pente et éloignées de Nîmes (croquis 211). Ils représentent des milliers de kilomètres par leur ramification et leur densité, le parcellaire étant très petit. De plus, ces murs laissent filtrer lentement l'eau stockée.

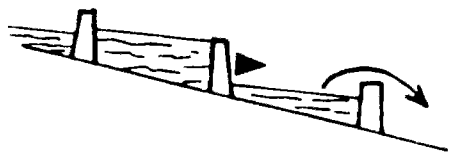
- TRANSFORMATION DES MURS EN OUVRAGE HYDRAULIQUE

Pendant la catastrophe d'octobre 1988, d'après les sapeurs-pompiers de Nîmes et l'avis de la Compagnie du Bas-Rhône Languedoc (BRL), les murs de pierres sèches ont servi d'éléments de RETENTION aux eaux du parcellaire. Les observateurs ont remarqué que les murs anciens avaient participé à l'écrêtement de cette crue de force centennale.
Très peu de murs en pierres sèches ont cédé (quelques centaines de mètres linéaires) mais le coût de leur reconstruction s'est avéré très élevé : 200 000 F pour 20 ml sur une hauteur de 2,00 mètres.

Figure 206- Rétention du ruissellement agricole par pertuis (Canton de Vaud,C.H.)



a- Plan schématique compartimentage historique de l'espace peri-urbain par des murs en pierres sèches



b- Coupe schématique fréquence des compartiments tous les 10 mètres environ hauteur: 1 à 3 m

Figure 207- Le compartimentage de la zone peri-urbaine de Nîmes qui a fonctionné pour la crue du 3.10.1988.

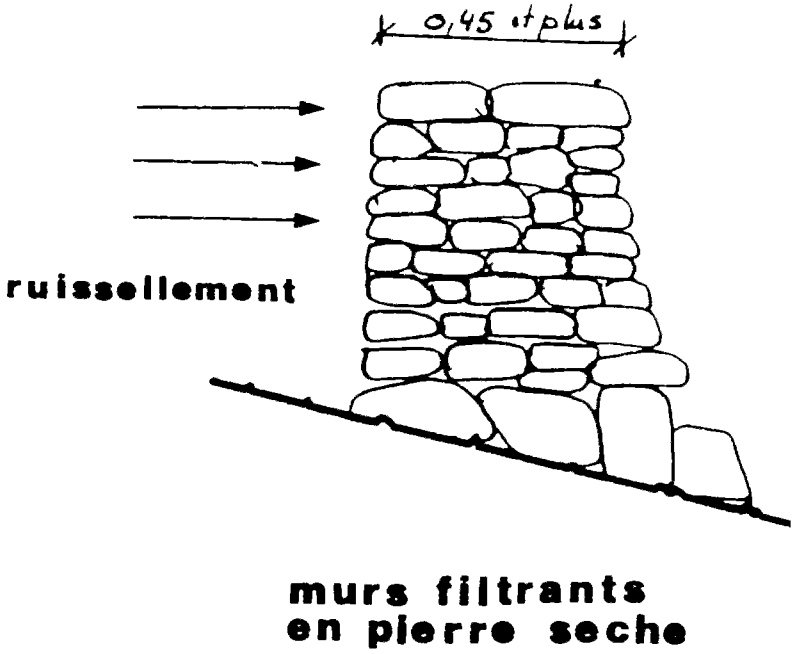


Figure 208- Détail d'un mur filtrant. Nîmes.

Figure 209 - Photographie aérienne de Nîmes ,zone peri-urbaine d'amont : les murs et murets de pierres sèches.

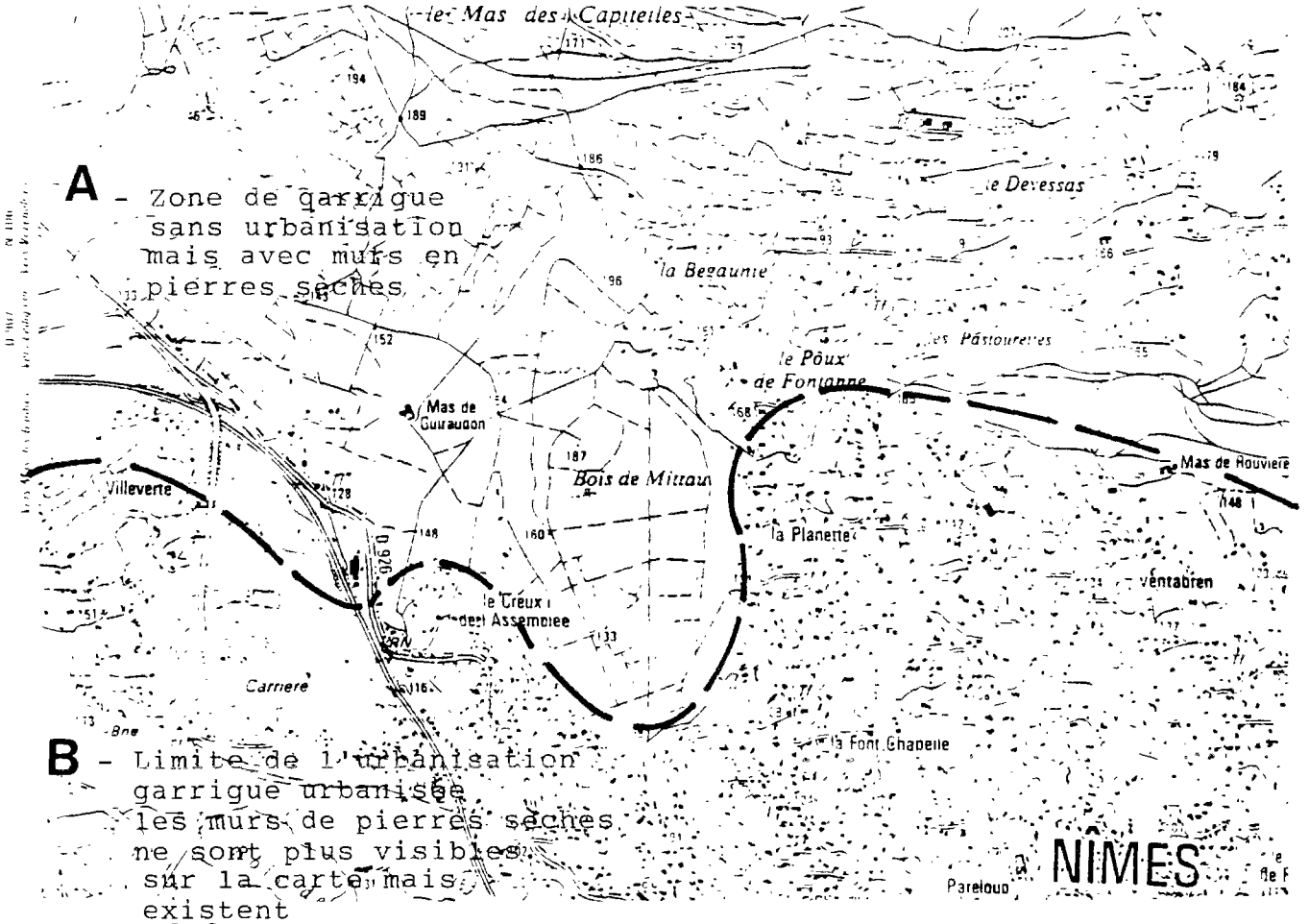


Figure 210- Carte IGN 1/25.000° .Les murs de pierres sèches sont-ils un facteur limitant important du ruissellement à Nîmes?

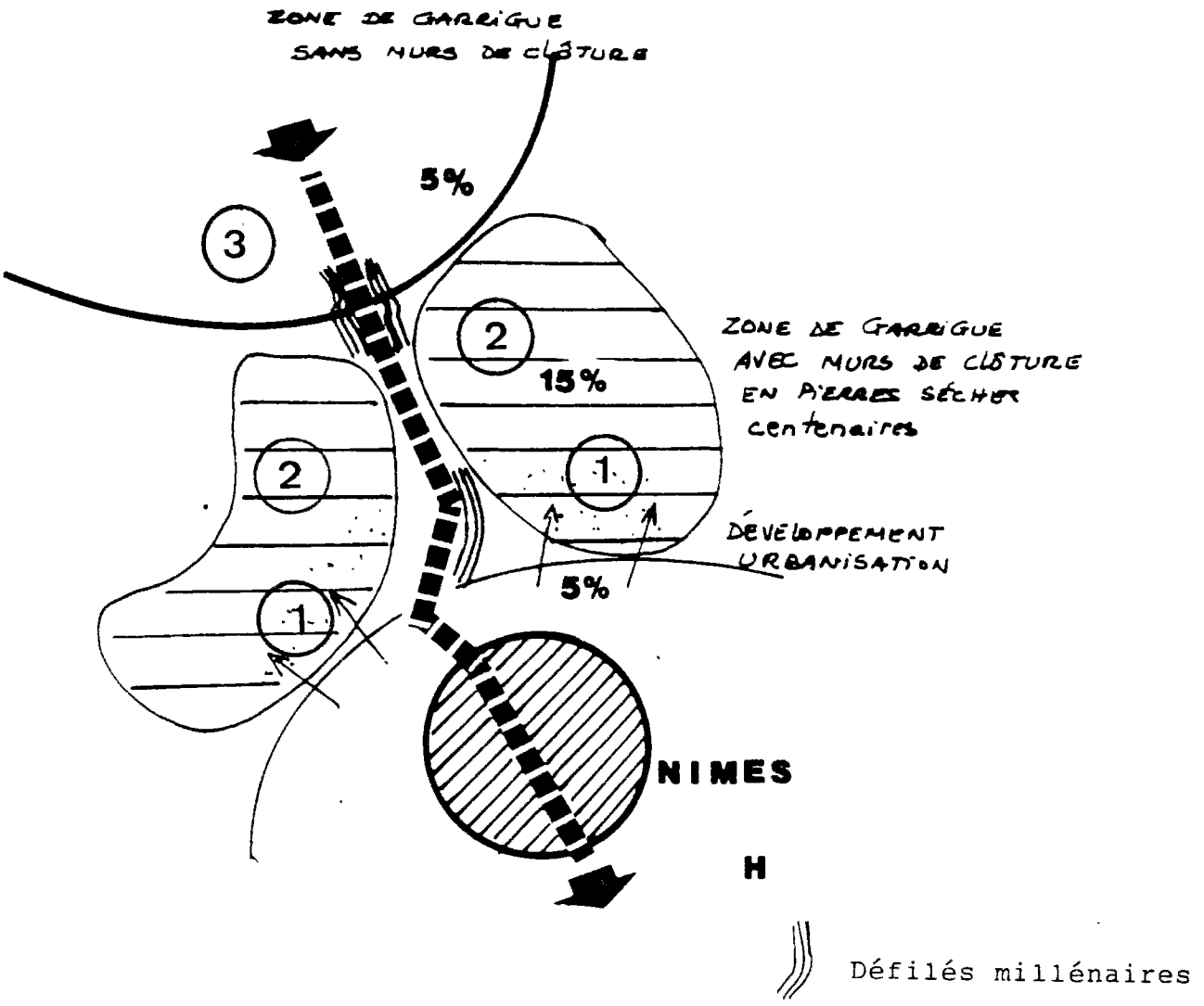


Figure 211- Les secteurs à l'amont de Nîmes avec les murs filtrants de pierres sèches participant à la rétention du ruissellement.

Les trois secteurs de la garrigue:

1- garrigue avec murs en pierres sèches filtrants et urbanisation diffuse
2- garrigue avec murs en pierres sèches sans urbanisation
3- garrigue sans murs de pierres ni urbanisation.

- CAMPAGNE DE PRESERVATION DES MURS EXISTANTS :

Il nous paraît nécessaire de mettre sur pied une campagne de préservation des vieux murs de Nîmes et DES AUTRES VILLES de France, qui sont situés à flanc de collines, le programme de préservation et d'entretien faisant partie de la protection contre les crues centennales de ruissellement.
La présence de ces murs FILTRANTS est un facteur limitant du risque ; leur destruction et leur remplacement par des grillages nous paraît être un facteur aggravant à cause de la suppression de la fonction de rétention et du risque d'embâcle provenant de l'arrachage des grillages, qui risquent de venir se bloquer contre les entonnements des rivières à l'entrée des villes.

3.3.3. Facteurs limitant les effets des écoulements catastrophiques

Bien que les facteurs limitant les effets des écoulements et les techniques de lutte contre les écoulements soient similaires, nous distinguerons deux approches, jouant sur :

- les facteurs existants limitants, qui se retrouvent à grande échelle, c'est-à-dire dans les zones de l'amont du centre-ville et de l'aval d'un bassin-versant ;
- les techniques de lutte que nous proposerons au chapitre 3.4., qui sont des techniques urbaines à petite échelle, et qui ne deviendront valables que par leur répétition et leur généralisation.

a- Facteurs limitant les effets des écoulements catastrophiques

- les bassins de rétention en série,
- les murs-parapets,
- les éléments-refuges dans les écoulements.

3.3.3.1. Les bassins de rétention en série

- EXEMPLE : le département de la Seine-Saint-Denis (annexe 1). Nous avons pris comme exemple ce département de pointe dans la recherche et la gestion hydraulique et hydrologique (système informatisé HADES pour la prévision, la détection, la protection).

• Analyse de la catastrophe du 27 juin 1990 :
Nous avons eu la chance de pouvoir tester le fonctionnement des bassins de rétention du département AVANT et APRES la catastrophe.

Nous résumons l'analyse du fonctionnement des bassins de rétention de la Seine-Saint-Denis, qui sont étudiés de façon détaillée dans l'annexe 1, pp. 548 à 606).

LA SEINE-SAINT-DENIS (94)

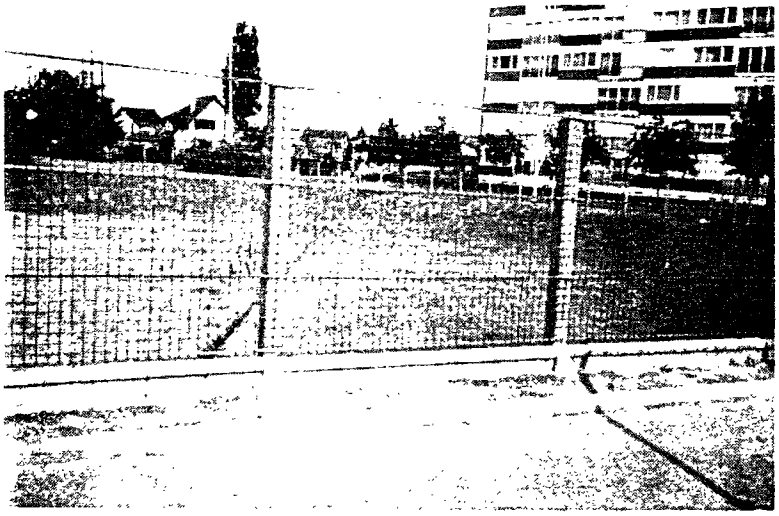


Photo 212- Le bassin enherbé de la Fosse Maussoin

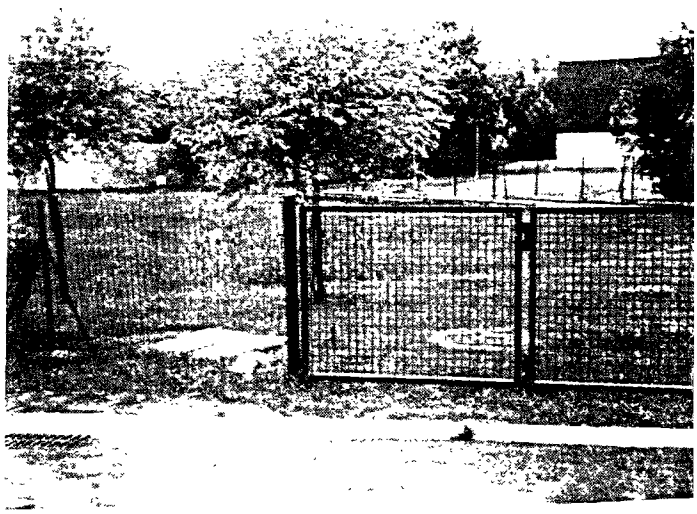


Photo 213- Le bassin du Chateau d'eau

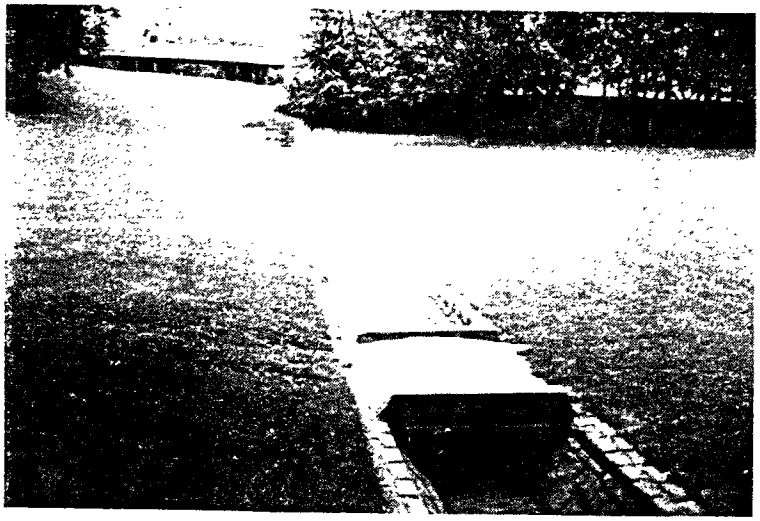


Photo 214- Vue d'ensemble d'un bassin planté de rétention des Mousseaux

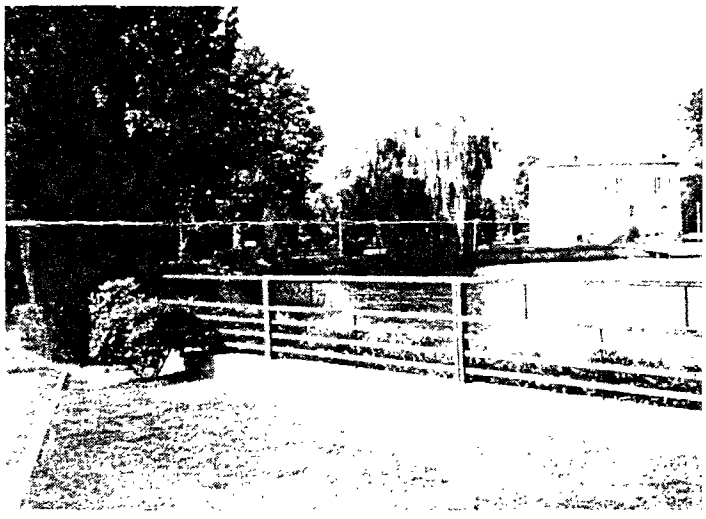


Photo 215- Bassin de rétention de Sévigné

LA SEINE-SAINT-DENIS (94)

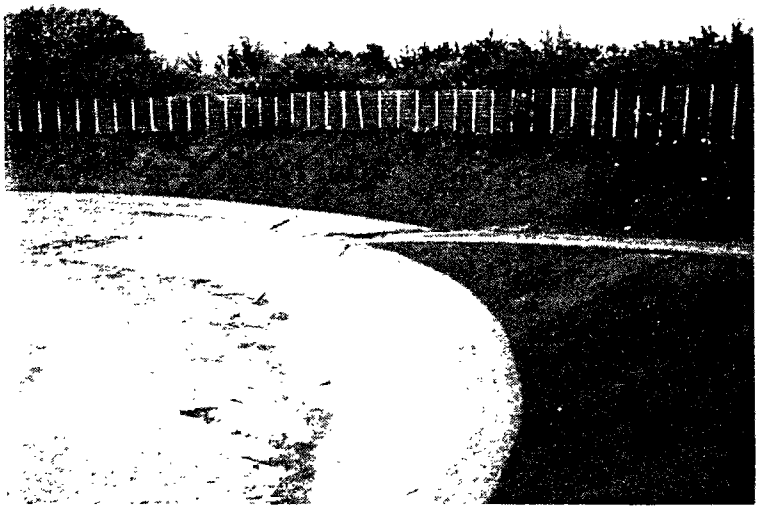


Photo 216- Traces de laisses de la catastrophe du 27 juin 1990
Bassin de rétention du Loup

Photo 217- Bassin de rétention de Maurice Audin avec l'élément de jeux "La Fontaine"

Photo 218 - Le bassin de rétention de Savigny l'Ouvrage de surverse en premier plan

Photo 219- Vue d'ensemble au bassin de rétention du Blanc-Mesnil(bassin 1)

TABLEAU 220

Description et fonctionnement de dix bassins de rétention de la Seine-Saint-Denis pendant la crue du 27 juin 1990.

OUVRAGES	STATUT	DESCRIPTION	FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE	CAPACITE STOCKAGE	STOCKAGE 27.6.90	POURCENTAGE 27.6.90
1.Fosse Maussoin 600m3	Public communal clos	Bassin sec enherbé perméable	nul n'a pas fonctionné	800 m3	0	0%
2.Maurice Audin 5.000m2	Public départemental clos/ouvert	Bassin sec betonné imperméable	partiel par surverse	25.000m3	5.000m3	20%
3.Sévigné 1 ha	Public départemental fréquenté	Bassin en eau planté	partiel par surverse	10.000m3	5.000m3 évaluation	50%
4.Mousseaux 1.600m2	Privé jeux	Bassin sec enherbé	nul n'a pas fonctionné	4.000m3	0	0%
5.Chateau d'Eau	Privé clos	Bassin sec enherbé perméable	court-circuité n'a pas fonctionné	300m3	0	0%
6.Le Loup 6.500m2	Public départemental clos	Bassin sec bâché imperméable	a fonctionné en partie suivant besoins	26.000m3	13.000m3	50%
7.Plan d'eau du Sausset 5 ha	Public départemental fréquenté	Bassin en eau planté imperméable	par surverse erreur de conception gestion informatisée	250.000m3 sans l'absence de merlon à l'aval du bassin	50.000m3	20%
8.Blanc-Mesnil 4 ha	Public départemental clos	Bassin sec(1) bétonné bassin sec enherbé(2)	a fonctionné mécaniquement gestion informatisée	400.000m3 mais en inondant l'amont par refoulement	100.000m3	25%
9.Parc de la Courneuve	Public départemental fréquenté	Bassin en eau planté	nul	0% ne sert pas à la rétention bien que les E.P. passent sous le bassin	0	0%
10.La Hay-les-Roses (Bièvre) 8 ha	Public départemental clos	Bassin sec planté perméable merlon-digue de 2 m	nul par surverse	160.000m3 aucunes traces de laisses	0	0%

• Nos observations : les bassins de rétention ont fonctionné pendant la crise, mais à des degrés divers. Sur les 8 bassins étudiés (tableau 220), nous obtenons les résultats suivants :

- trois bassins de rétention n'ont pas fonctionné (les 2 bassins privés des Mousseaux et du château d'eau et le bassin communal de la Fosse Maussoin). Aucune trace de laisses, ni vu en eau (annexe 1, pp. 548, 549, 569 à 573, photos 212, 213, 214) ;
- trois bassins de rétention publics ont fonctionné mais partiellement soit au 1/5 ou au 1/3 de leur capacité d'accueil (Sévigné, Le Loup, Maurice Audin : annexe 1, pp. 566, 575, 562, photos 215, 216, 217) ;
- un macro-ouvrage public de rétention a fonctionné totalement, mais ce fonctionnement ne représente que 1/5 de ses possibilités d'accueil à cause d'un défaut de nivellement au moment de sa conception (le plan d'eau du Parc du Sausset, annexe 1, pp. 580, photo 218) ;
- un grand bassin de rétention public ne peut fonctionner totalement sans inonder par refoulement toute une zone à l'amont à cause de son niveau d'implantation (le Blanc-Mesnil, annexe 1, pp. 586) (photo 219) ;
- un grand plan d'eau public ne sert pas à la rétention, bien que les canalisations d'eaux pluviales de la ville passent SOUS le bassin (parc de la Courneuve).

Comme on le voit, les bassins de rétention participent à la limitation des effets des écoulements catastrophiques, mais ne sont pas utilisés au maximum de leur capacité d'accueil, quel que soit leur statut (privé ou public) et quel que soit leur aménagement (en eau ou à sec).

Remarque : seul un fonctionnement avec des VANNES MECANIQUES de fermeture des ouvrages est adapté à une crue de ruissellement exceptionnelle, même si les ouvrages sont reliés aussi à une gestion informatisée.

3.3.3.2. Les murs-parapets

Analyse du fonctionnement des murs-parapets pendant la catastrophe de Nîmes (1988) (plan 221).

Les murs-parapets sont considérés comme des facteurs limitant les effets des écoulements catastrophiques.

En faisant une observation de routine sur les murs de Nîmes (partie entonnement d'amont du Cadereau d'Alès) avec les méthodes de travail décrites au paragraphe (1.3.6.), nous avons découvert :

1- que les murs de clôture en pierres et mortier situés au coeur d'un écoulement préférentiel ont peu de chance de résister à une crue centennale (exemple du renversement des murs du cimetière protestant, partie Nord, photo 222) ;

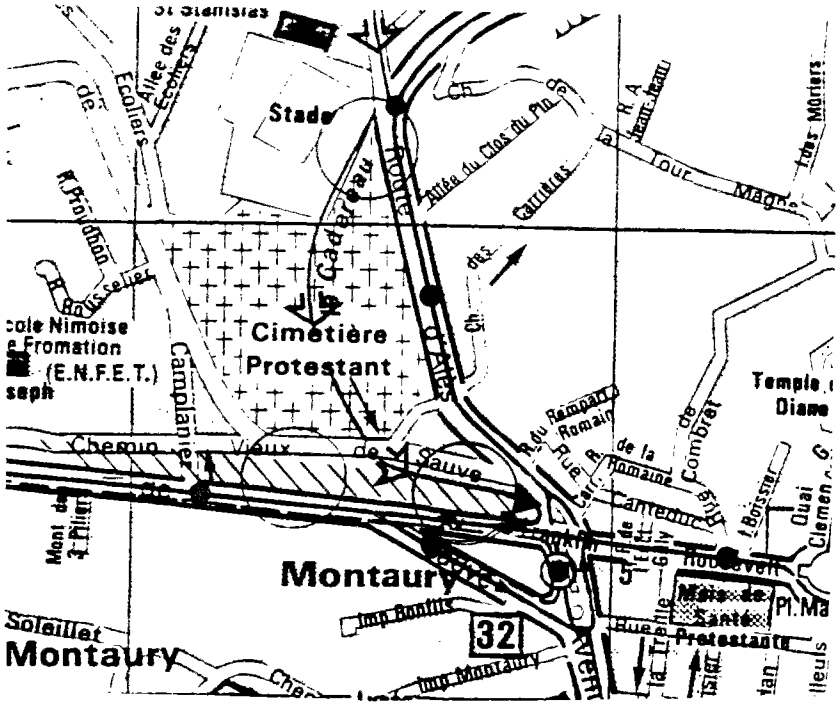


Figure 221
Plan de situation de l'étude des murs-parapets de Nîmes
Nîmes

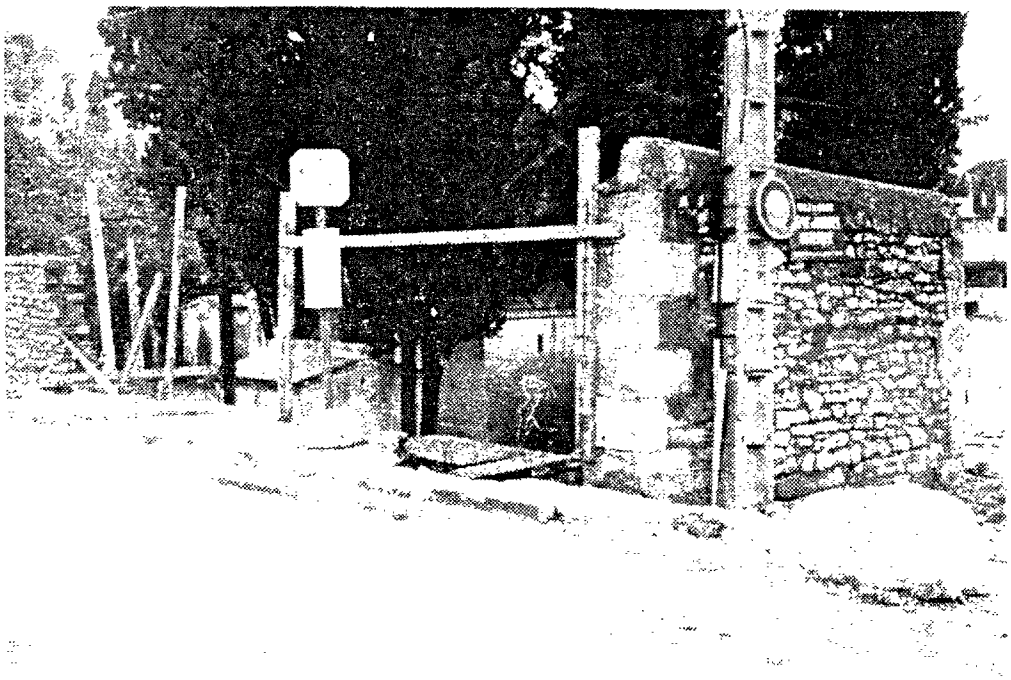


Photo 222
mur détruit pendant la crue du 3.10.1988
mur sans soutènement, l'appareillage d'angle a résisté .

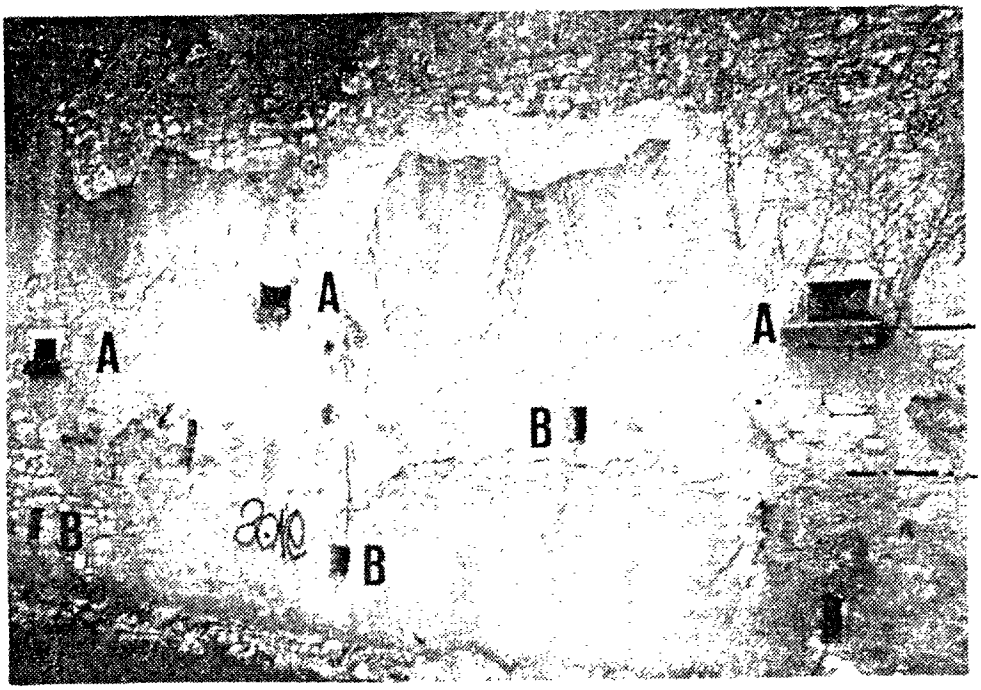


Photo 223
mur-parapet ancien ave évacuateurs(A) et barbacanes (B),qui a résisté à la crue.

——— hauteur du soutènement

——— niveau de la crue
—·— détérioration des enduits.

2- que les murs de clôture de même construction situés en périphérie du courant peuvent résister, surtout s'ils sont en partie en SOUTENEMENT[1], comme c'est le cas, et s'ils sont munis d'ÉVACUATEURS et de BARBACANES (photo 223) ;
3- que seuls les murs-parapets, lorsqu'ils sont murs de soutènement à leur base sur au moins la moitié de leur hauteur ou sur les 2/3 de leur hauteur, résistent à un écoulement préférentiel (croquis 224).

a- Description des murs-parapets de Nîmes

Les vieux murs-parapets défensifs du Chemin Vieux de Sauve ont résisté à la catastrophe de 1988, bien qu'ils se soient trouvés en position de barrage, perpendiculaire aux flots (plan 221).

- OBSERVATION DE DETAILS DES MURS (croquis 225)
Le mur-parapet est COMPOSITE en longueur (chaque parcelle à son matériau) et en hauteur (chaque parcelle à une hauteur de mur différente). Il existe une hauteur de BASE (hauteur minimale de 4,00 mètres) sur laquelle tous les riverains semblent s'être accordés.

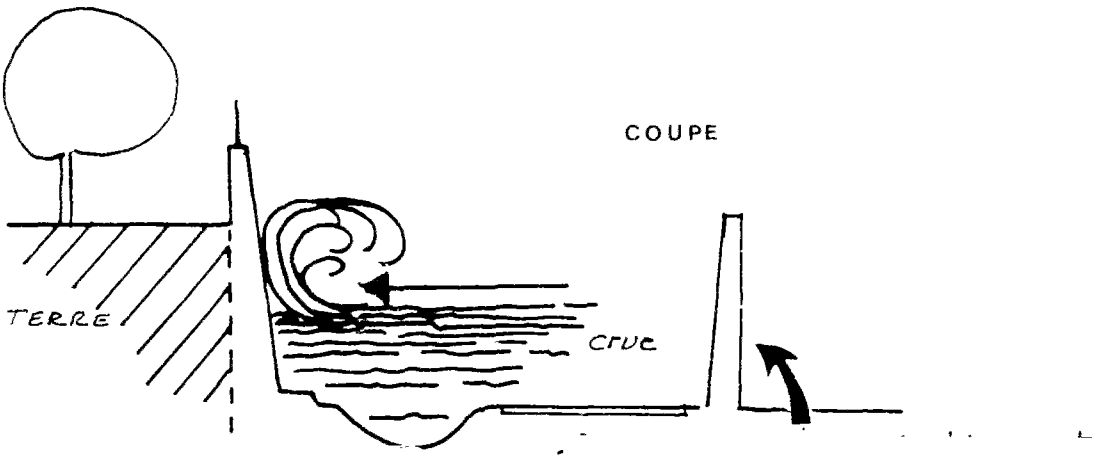
• Résistance du mur : le mur a résisté sur toute sa longueur, soit 100 mètres, à la crue de 1988.
• Ancienneté des murs : certains murs sont très anciens (XVIII^{ème} siècle) en fonction de la dimension des pierres, de leur appareillage et de l'épaisseur des joints. Le mortier de rejointoiement est à peine visible.
• Les rajouts de défenses : pourtant chaque mur de parcelle a une hauteur DIFFERENTE. Les rajouts sont faits de matériaux différents, avec des techniques de pose différentes. Il semblerait qu'à "L'USAGE DES CRUES EXCEPTIONNELLES" sur plusieurs siècles, les riverains aient rajouté des protections supplémentaires à leur mur d'origine (photos 226 et 228).

Les murs anciens sont en pierres, avec un gros appareillage et de nombreuses barbacanes carrées construites en pierres (18ème siècle). Les murs modernes sont en briques (1930) puis en parpaings (1945) avec des barbacanes rondes faites en tuyaux de zinc tronçonnés et saillants. Les murs anciens ont beaucoup de barbacanes, les murs récents très peu.

• Etude de détail : photo 226
- rajout d'un mur de 1 mètre de hauteur (mise en oeuvre, 1930) ;
- double-rajout totalisant 2 mètres de hauteur (un matériau divers recimenté et un mur en parpaings 1945) ;
- rajout d'un mur de brique de 0,50 m de hauteur sur un mur très haut (5,00 mètres environ) mais seulement sur une partie de sa longueur, correspondant au débouché du cadereau. Ce rajout indique que cette protection SUPPLEMENTAIRE (couronnée par une tuile de faîtage de toiture) s'est avérée NECESSAIRE dans le temps en fonction d'un débordement d'une crue centennale, antérieure à celle de 1988 (photo 228) ;

---

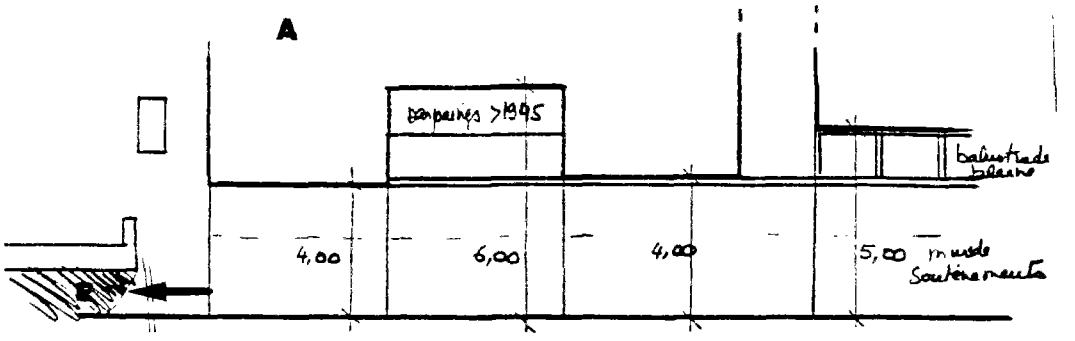
[1] Mur de soutènement : mur contreventé par de la terre



Lit mineur sec

mur sans soutènement
détruit le 3.10.1988

Croquis 224- Etude des parcelles du Chemin Vieux de Sauve à Nîmes. Seuls les murs-parapets avec soutènement résistent à une crue majeure de ruissellement.



Elévation

-Chacun a une hauteur différente pour le même risque
-Etude des rajouts
-Aucun de ces murs n'a été démoli lors de la crue

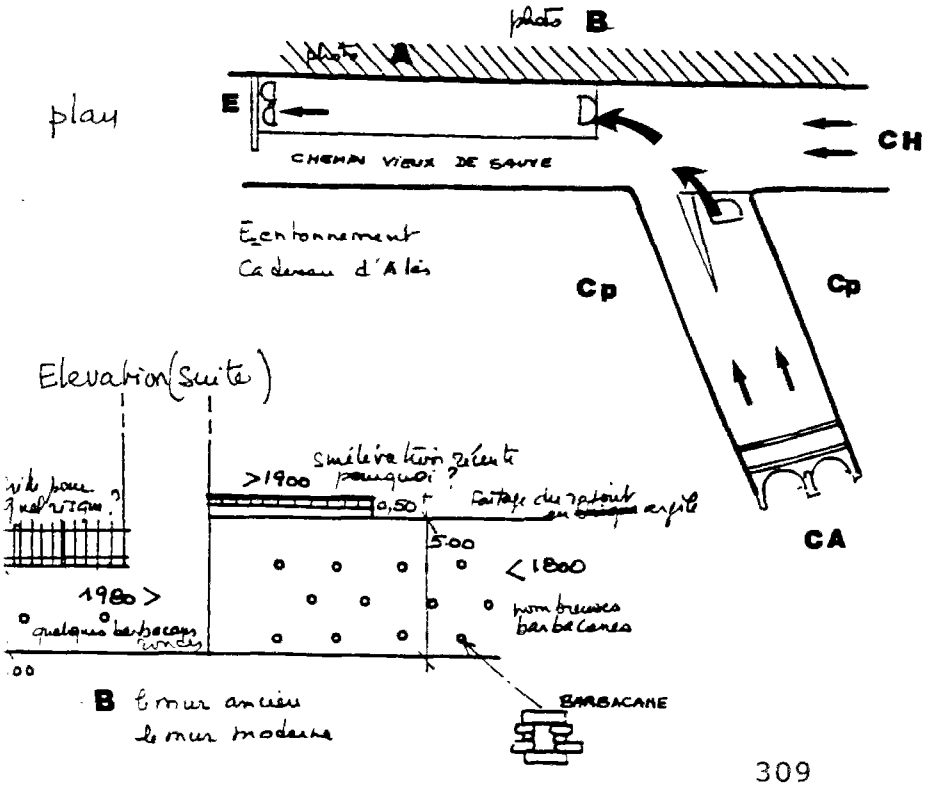


Figure 225
Etude des murs de défenses des parcelles av.Franklin Roosevelt et Chemin Vieux de Sauve, Nîmes.

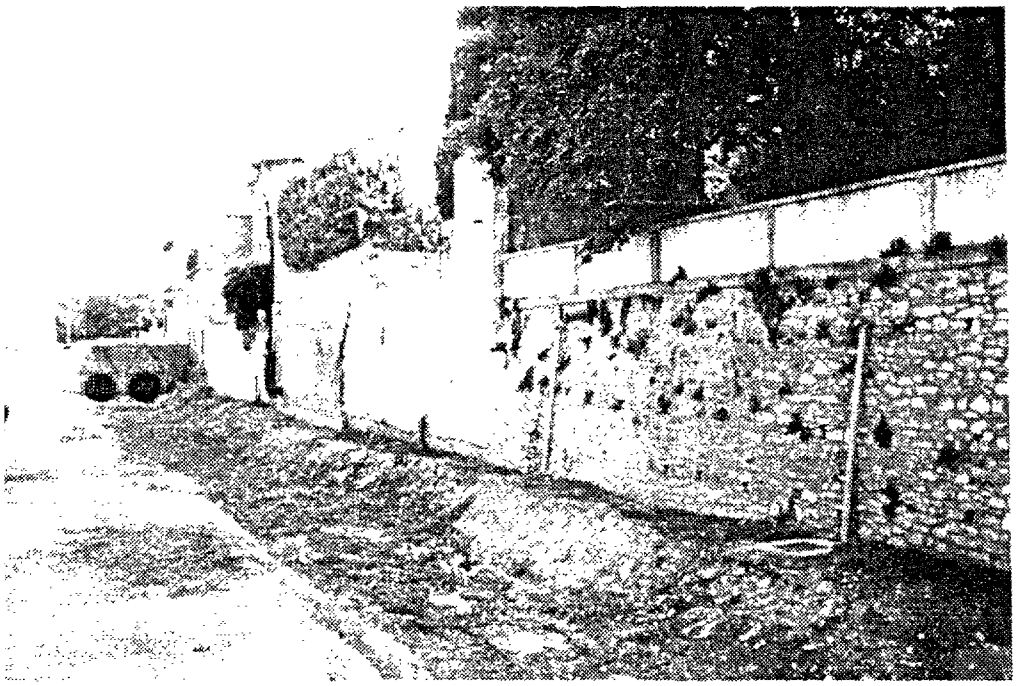


Photo 226

Chaque parcelle a une hauteur de protection différente:
-hauteur des protections
-les rajouts aux cours des temps(brique,parpaing)
-la position des barbacanes
-au fond l'entonnement principal de la rivière pour acceuillir 485 M/s erreur d'échelle pour la rivière recouverte

Photo 227

un ouvrage pour le croisement d'une route et de la rivière.

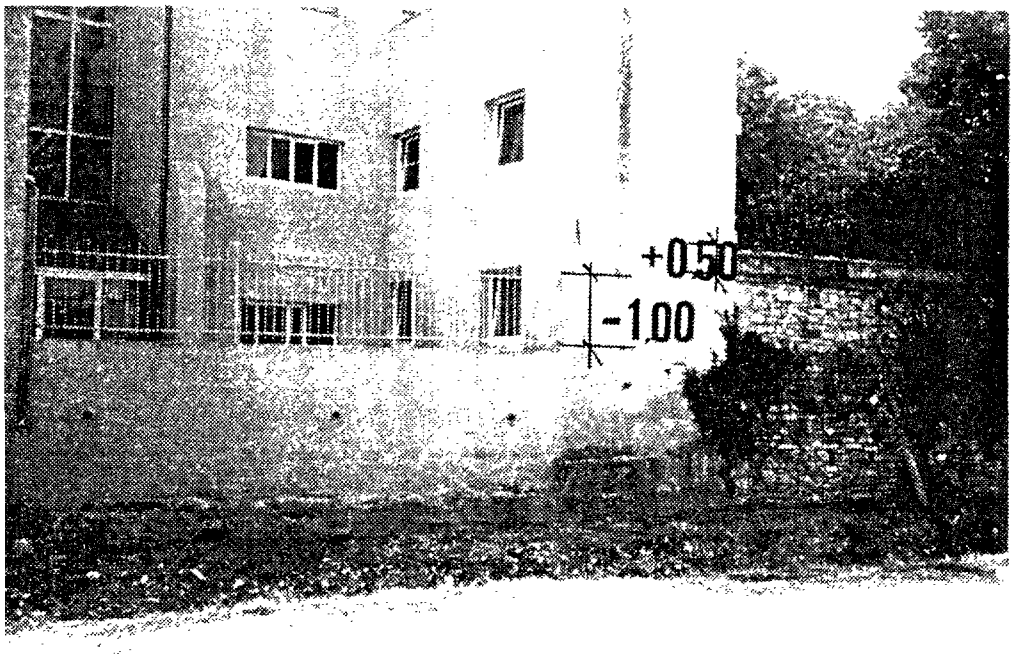


Photo 228

Le mur ancien (+ 0,50m) et le mur moderne(-1,00m) n'ont pas la même hauteur de protection.

Photo 229- Le comportement des arbres urbains pendant la crue de Vaison-La-Romaine du 22.9.1992; les platanes du parking submergé ont résisté.

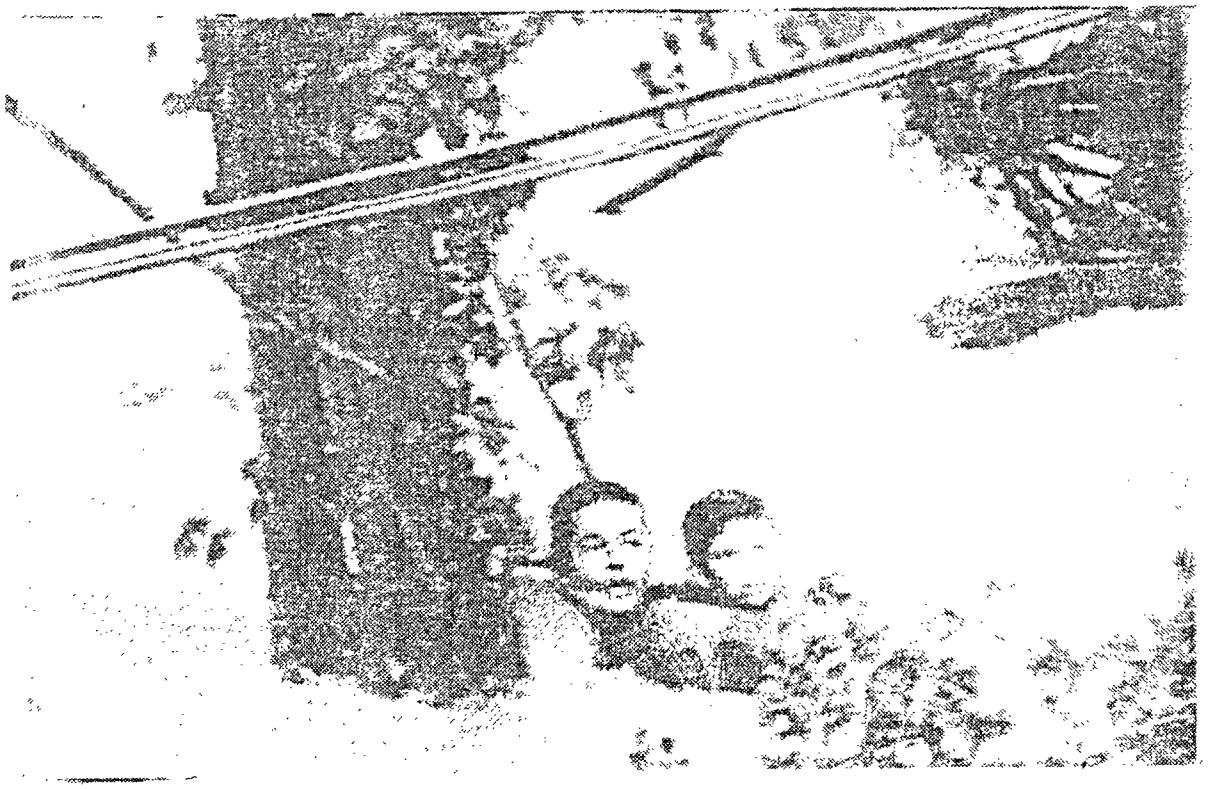


Photo 230- Les peupliers-refuges de la ripisylve à Vaison-La-Romaine pendant la crue du 22.9.1992 (extraits Paris-Match du 8.10.1992).

- la construction moderne (environ 1980) n'a qu'un mur de 3 mètres de hauteur ; elle a été inondée. Le vécu de la crue de 1988 ne l'a pas encore poussé à murer sa grille (photo 228) ;

- En conclusion : nous observons qu'un mur-parapet de soutènement ancien résiste aux crues modernes de ruissellement ; mais nous observons aussi que la hauteur finale d'un mur de défense varie d'une parcelle à l'autre (4 m, 6 m, 4 m, 5 m) au même endroit et pour le même risque hydrologique, ce qui ne laisse pas de nous étonner.

3.3.3.3. Les éléments-refuges dans les écoulements

En étudiant les quatre catastrophes de référence, nous avons trouvé un élément-refuge primordial et inattendu dans les écoulements préférentiels : ce sont les plantations (photos 229 et 230) :

a- Les arbres-refuges :

- LES ARBRES URBAINS D'ALIGNEMENT (Nîmes)

Les vieux arbres d'alignement du centre-ville de Nîmes, constitués de MICOCOULIERS et de PLATANES, se sont trouvés être des éléments-refuges pendant la catastrophe du 3 octobre 1988. Des dizaines de personnes se sont hissées dans les BRANCHES MAITRESSES, après avoir quitté les toitures de leurs voitures dérivantes (photo 231).

- LES ARBRES DE BORD DE RIVIERES

La RIPISYLVE[1] de Vaison-la-Romaine : ce sont aussi une quarantaine de personnes qui ont pu survivre en flottant, en S'ACCROCHANT pendant plusieurs heures aux branches souples des peupliers non-émondés[2] de la ripisylve (photo 99).

- DIMINUTION DU NOMBRE DE DECES

Si nous additionnons les personnes sauvées grâce à la présence d'UN arbre, nous trouvons plus de 100 personnes en regroupant la catastrophe de Nîmes et celle de Vaison-la-Romaine ; cela nous conduit à dire que les arbres (surtout adultes ou plantés en grande taille) sont indispensables dans la lutte contre les crues de ruissellement centennal ayant une fonction de REFUGE, et qu'ils ne deviennent pas des embâcles s'ils sont entretenus par un service des Parcs et Jardins.

---

[1] Ripisylve : Forêt alluviale de bord de rivière laissée à l'état naturel

[2] L'émondage est une technique horticole et forestière qui permet d'obtenir un tronc haut et droit sans branche basse

Photo 231- Platane avec branches maîtresses à Nîmes; les platanes ont servi de refuge pendant la crue du 3.10.1988.

b- Autres facteurs limitants du risque

- LA PRESENCE DE GROS ENGINS EN CENTRE URBAIN

La présence de gros engin de CHANTIER, dont la plate-forme se trouve à 2 mètres de hauteur et de véhicules MILITAIRES, à demeure avec leurs chauffeurs, et en centre-ville a permis de sauver plusieurs dizaines de personnes à Nîmes, réfugiées dans les arbres et sur les toitures des voitures dérivantes (engins de chantier EDF, engins militaires du casernement intra-muros). Par contre, les voitures de sapeurs-pompiers se sont trouvées immobilisées, car ennoyées sous 1 mètre à 1,80 mètre d'eau au parking. De plus, les voitures de pompiers de ville ont des plates-formes très basses.

- LA PRESENCE D'UN BATEAU RAPIDE EN CENTRE-VILLE

Vaison-la-Romaine a bénéficié de la présence d'un bateau rapide à moteur en centre-ville, ce qui a permis de sauver 40 personnes environ accrochées aux arbres de bord de rivière.

CONCLUSION

Au niveau des facteurs limitants, nous constatons que :

- le maintien du statu-quo au niveau urbanisme et infrastructure, avant la planification hydrologique générale d'une région, est indispensable ;

- la planification hydrologique doit se faire aux deux échelles, c'est-à-dire à grande échelle et à petite échelle ;

- les aménagements de paysage des zones péri-urbaines, tels que les terrasses et le maintien ou la constitution de murs en pierres sèches filtrants, sont une source de rétention du ruissellement ;

- la création de bassins de rétention en série est un facteur d'allégement pour les réseaux d'eaux pluviales, d'assainissement, à condition qu'ils fonctionnent ;

- les murs-parapets avec une partie en soutènement apportent une réelle protection à l'habitat ;

- les arbres urbains et péri-urbains, entretenus par les Services d'Espaces Verts, sont des lieux importants de refuge qu'il faut multiplier.

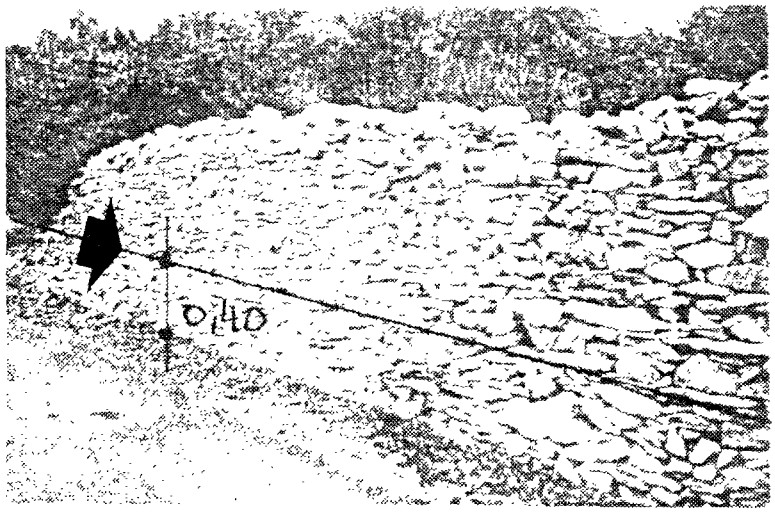


Photo 233- Traces de la crue de ruissellement du 3.10.1988 sur les murs de clôtures de la zone péri-urbaine d'amont (Le Creux de l'Assemblée)

Hauteur de la crue= 0,40m (photo juin 1989)

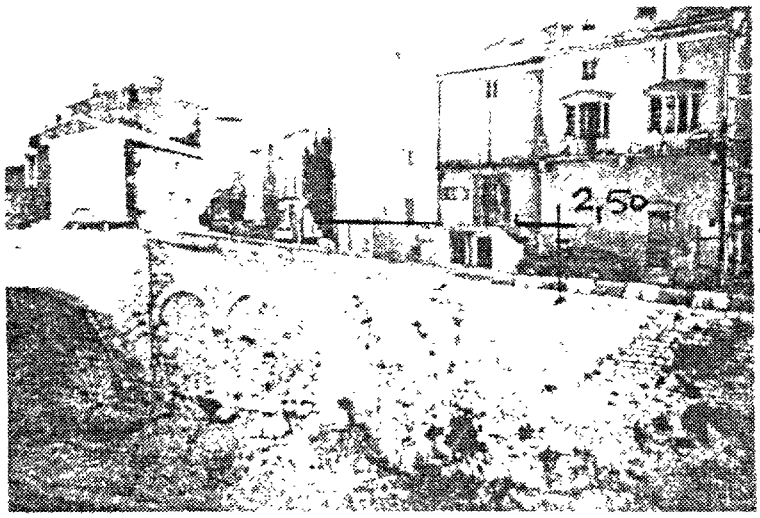


Photo 234-Traces de la crue fluviale du 22.9.1992 à Vaison-La-Romaine sur les bâtiments.

Hauteur de la crue=variable entre 1,00m et 3,00m (photo juillet 1993)

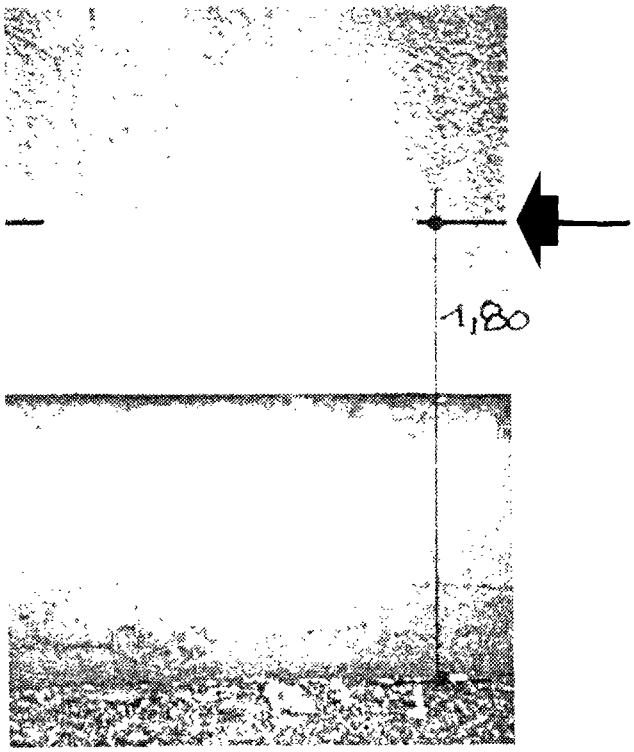


Photo 235- Traces de la crue de ruissellement du 3.10.1988 sur un mur de clôture privé.
Zone peri-urbaine d'aval de Nîmes.

Hauteur de la crue= 1,80m (photo septembre 1992)

Mur-souvenir non répertorié à 50m du magasin Casino.

3.4. DES TECHNIQUES DE LUTTE URBAINE ET PERI-URBAINE CONTRE LE RUISSELLEMENT RISQUE MAJEUR

En fonction de nos observations sur les quatre sites étudiés, nous avons regroupé les techniques de lutte urbaine que nous proposons et qui nous semblent le mieux répondre à ce nouveau type de crue, la crue de ruissellement, en quatre paragraphes correspondant de fait aux missions des différents Services Techniques Municipaux français.

3.4.1. Des techniques de lutte en urbanisme
3.4.2. Des techniques de lutte en architecture
3.4.3. Des techniques de lutte en paysage
3.4.4. Des techniques de lutte en infrastructure

Méthode de travail

Nous nous sommes appuyés sur les méthodes naturalistes : observations de terrain, simulations des risques et simulations des défenses in situ.

Pour la simulation du risque, nous avons recherché toutes les traces du risque sur l'architecture et sur la végétation en plus des interviews et des études techniques.

Traces du risque sur l'architecture

Nous avons trouvé des traces de la hauteur de la crue sur les murs de clôtures à Nîmes (photos 233 et 235), hauteur en amont : 0,40 mètre, hauteur en aval : 1,80 mètre.

Nous avons trouvé de nombreuses traces de hauteur d'eau à Vaison-la-Romaine (photo 234) :

- les maisons le long du quai du Pont Romain (+2 mètres),
- un niveau d'eau à l'intérieur de la Cathédrale Romane (+0,80 mètre).

Traces du risque sur la végétation

Nous avons aussi trouvé des traces de niveaux de plus hautes eaux (P.H.E.) de la crue de ruissellement sur l'écorce d'un alignement urbain de pins (photo 236), et des traces de la crue fluviale sur un mur avec végétation grimpante en bordure de fleuve (photo 237).
Nous notons que l'écorce de la végétation peut garder très longtemps la mémoire d'une crue, comme le confirme l'étude de Mesdames CONCHON et GAUTHIER sur les crues centennales en Corse [8]. Ces traces, aussi bien sur l'architecture que sur la végétation, nous ont permis de mieux simuler le risque pour proposer des techniques de défense.

Photo 236 -
Trace de la crue de ruissellement du 22.9.1992 sur la végétation à Vaison-La-Romaine (arbres d'alignement)

(photo juillet 1993)

Photo 237 - Trace de la crue de la rivière du 22.9.1992 sur la végétation.(photo juillet 1993). La végétation (lierre) a été coupée par la crue.

3.4.1. Des techniques de lutte en urbanisme

Nous retenons trois propositions d'urbanisme qui peuvent le mieux circonvenir la crue centennale de ruissellement en milieu urbain et péri-urbain.

a- Le Non Aedificandi,
b- L'Altius Tollendi,
c- Le Permis de Construire.

a- Le Non Aedificandi

Le "Non Aedificandi" est un outil d'urbanisme très ancien qui délimite des zones inconstructibles, et qui maintient le statu-quo pour les zones déjà construites.

Le non aedificandi peut donc s'appliquer à la crue spécifique de ruissellement et aux débordements des ruisseaux secs. Il permet de faire une gestion à très long terme du risque, sachant qu'il y a deux à trois plans successifs d'urbanisme par ville sur un siècle, durée de retour théorique de la crue majeure (figure 238).

b- L'Altius Tollendi

La construction est délimitée en ville par un NON ALTIUS TOLLENDI c'est-à-dire par une interdiction de construire plus haut, définie par le gabarit, comprenant une norme de reculement par rapport à la voirie, une norme d'alignement des façades, et une norme de faîtage correspondant à la hauteur limite des faîtages (figure 239).

PROPOSITION : nous proposons de créer un gabarit hydrologique centennal, qui permette ou oblige de surélever une construction pour un risque d'inondation. MOYENS : vide sanitaire ou pilotis.

c- Le Permis de Construire

Sont soumis à permis de construire auprès des Services de l'Urbanisme et de l'Architecture, les nouvelles constructions et les rénovations ou réhabilitations de bâtiments existants.

Un commerce modifie son agencement tous les dix ans environ, et une habitation deux à trois fois dans un siècle ; c'est-à-dire l'importance du permis de construire dans la lutte hyrdrologique.

Sont soumis au permis de construire :

- le choix de l'emplacement du bâti dans la parcelle (plan de masse échelle 1/500è),
- l'agencement des fonctions et la distribution des pièces (le permis peut donc contrôler les étages interdits au sommeil),
- le contrôle des activités pour le grand public et leur évacuation (commerces, cinémas, parkings souterrains, campings, etc.).

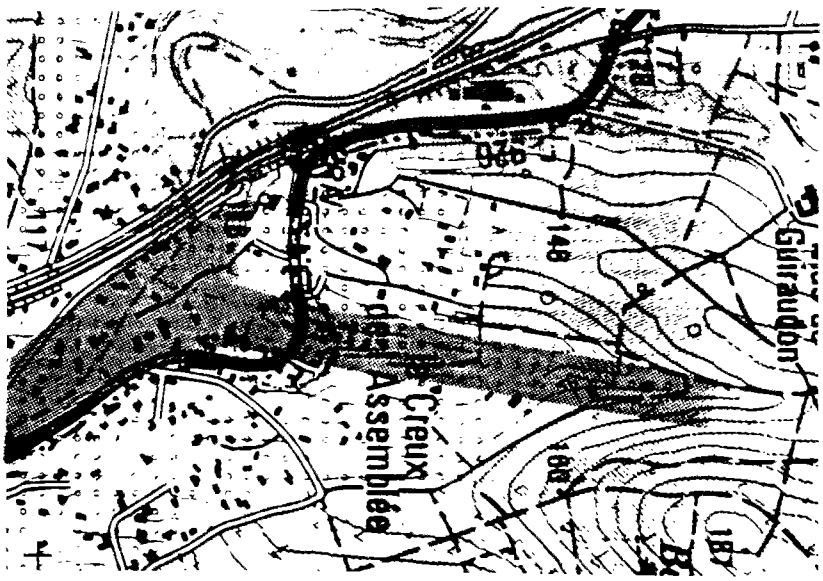
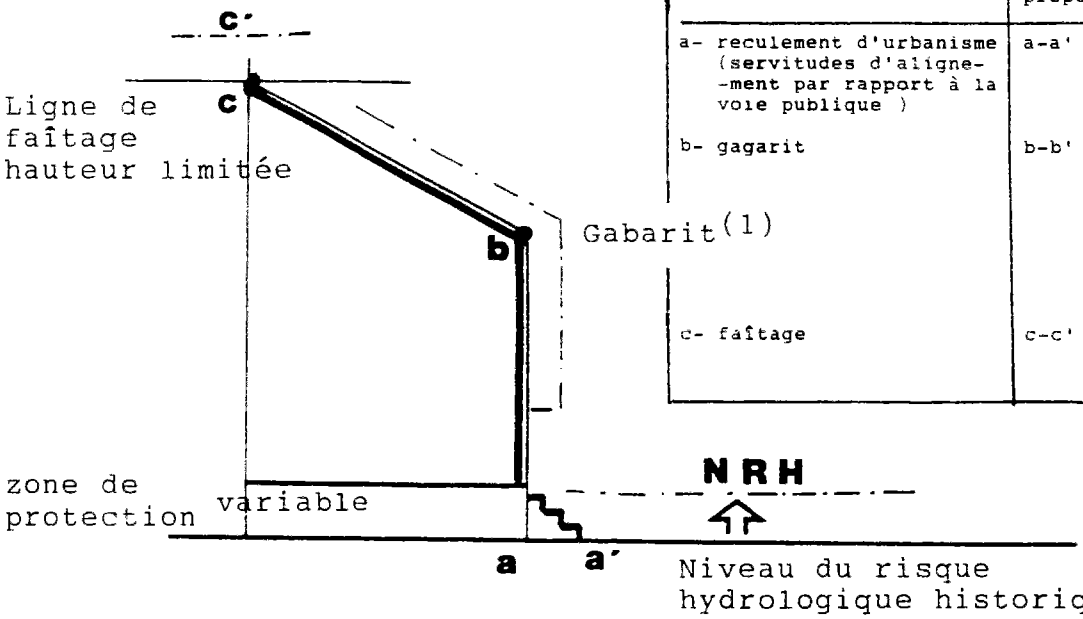


Figure 238- Zone de Non Aedificandi(schéma théorique) pour limiter l'urbanisation future et la densification de l'urbanisation actuelle.
- interdiction de nouvelles constructions,
- améliorations des défenses des constructions existantes (zone d'amont de Nîmes).



Etat des règlements	Modifications tolérées pour le risque hydrologique propositions
a- reculement d'urbanisme (servitudes d'alignement par rapport à la voie publique)	a-a' possibilité de perrons ou d'emmarchements sur le domaine public.
b- gagarit	b-b' possibilité de surélévation du gabarit correspondant à la hauteur de la crue historique la plus forte(N.R.H.) ou maintien du gabarit mais avec emmarchements au sol et diminution des hauteurs d'étage.
c- faîtage	c-c' possibilité ou non de surélévation du faîtage pour le risque hydrologique.

Figure 239- Définition du Non Altius Tollendi et du gabarit avec la proposition d'une surélévation pour un Altius Tollendi pour le risque hydrologique.

(1) Le gabarit : en urbanisme,le gabarit est l'ensemble des règlements locaux concernant les limites des dimensions des constructions.

Le risque hydrologique :

Le risque hydrologique centennal peut se traduire au niveau du permis de construire par :

- la résistance des structures et matériaux face aux probabilités de risque, avec la demande de renforcement du bâti,
- l'interdiction de dormir en rez-de-chaussée ou en première zone inondable pour les campings (exemple du bras mort remblayé du camping du Grand-Bornand),
- la création d'issues de secours vers les étages supérieurs et les toitures,
- le contrôle des activités au rez-de-chaussée, par rapport aux objets de valeur (informatique, radiologie, etc.).

Pérénnité de l'obligation : le certificat de conformité

Le permis de construire est suivi du Certification de Conformité qui est l'autorisation à usage du bien s'il est conforme au permis, sinon il y a ordre de destruction de l'ouvrage.

Le Certificat de Conformité pourrait être l'outil de contrôle clé de la pérennité des travaux de lutte réalisés par les propriétaires privés sur le domaine privé ainsi que par les responsables ou propriétaires des biens publics. Il pourrait être renforcé par un contrôle décennal des techniques mises en place.

3.4.2. Les techniques de lutte en architecture

3.4.2.1. Généralités

Suite à l'analyse de plusieurs centaines d'habitat, en zone péri-urbaine d'amont de Nîmes (Route de Sauve, Cadereau du Camplanier, Cadereau d'Alès, Cadereau d'Uzès), de Clermont-Ferrand (Aubrière, Royat) et de Vaison-la-Romaine (l'ensemble représentant plusieurs centaines de kilomètres pédestres), nous avons rassemblé les techniques de lutte en architecture et les avons classées en trois groupes :

- les techniques de rétention et de non-amplification du risque,
- les techniques de protection globale,
- les techniques de protection ponctuelle et les améliorations de l'existant.

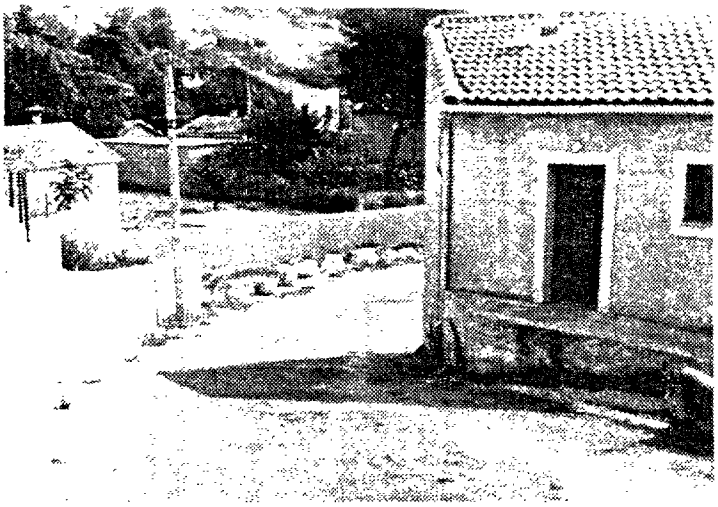


Photo 240-

Aggravation du risque hydrologique par le rejet des eaux pluviales(E.P.) des gouttières sur la voie publique. (zone péri-urbaine d'amont de Nîmes, route des 9 arcades, chemin du quartier d'Espagne ,cadereau d'Alès).

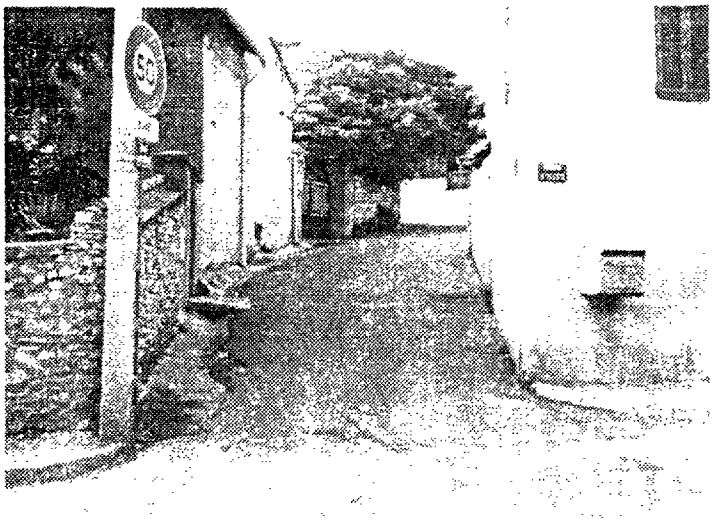


Photo 241-

Idem,
(zone peri-urbaine d'amont de Nîmes, cadereau d'Uzès).

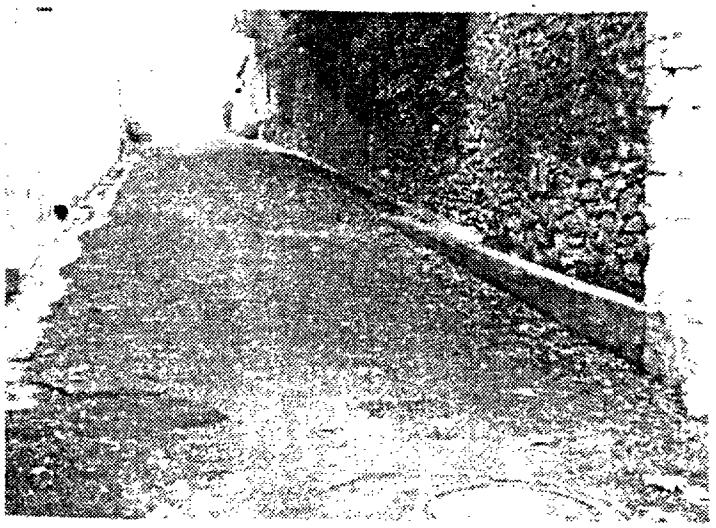
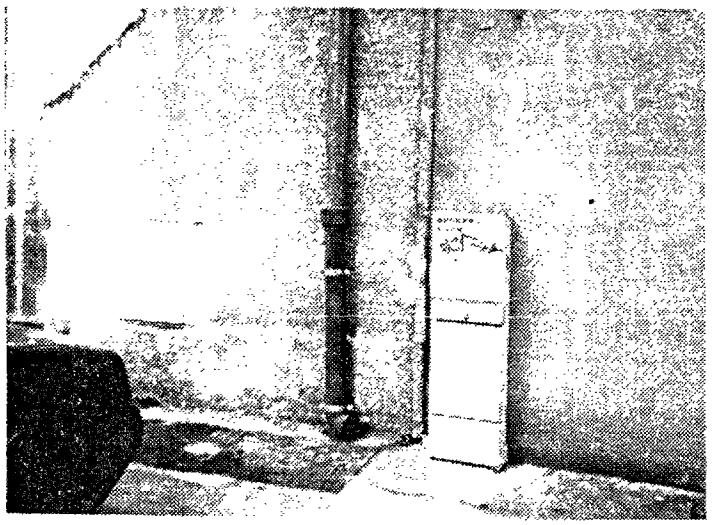


Photo 242-

Rejet de gouttières privées en centre ville sur la voie publique (Nîmes, rue annexe au Quai de La Fontaine).

Photo 243-

Rejet de gouttières privées en centre ville (Nîmes,Av. Franklin Roosevelt).



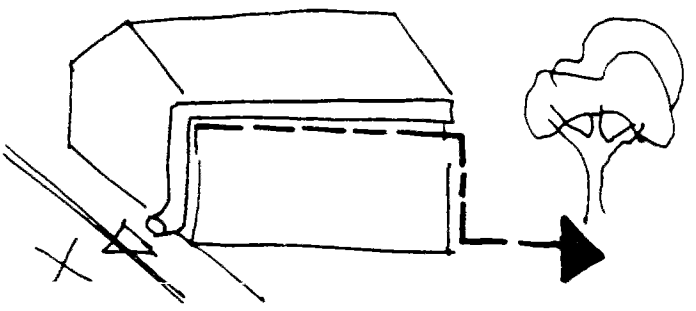


Figure 244- Schéma de reprises de gouttières avec inversion des pentes pour le rejet et stockage des pluies centennales à la parcelle, les pluies inférieures aux crues décennales pouvant être évacuées.

3.4.2.2. Les techniques de lutte au niveau de la rétention pour limiter l'amplification actuelle de la formation du ruissellement urbain

a- Les gouttières

A Nîmes, de très nombreuses gouttières privées se rejettent directement sur la voie publique (photos 240, 241, 242 et 243) aussi bien en milieu pavillonnaire qu'en centre-ville. Ce rejet direct entraîne une augmentation du volume du ruissellement sur le domaine de l'infrastructure routière, toutes voies confondues.

Proposition : interdire le rejet des gouttières sur la voie publique, procéder à l'inventaire de ces gouttières, et proposer des travaux de modification de parcours, d'inversion des pentes des gouttières horizontales (schéma 244), de mise en place de bassins d'accueil à la parcelle (cf. paragraphes 3.4.3.) avec l'aide des Services Techniques Municipaux de l'Architecture et des Espaces Verts.

b- Les toitures : la transformation des toitures-terrasses en toiture de rétention, la toiture-réservoir

• Les centres anciens

Nos centres urbains ont historiquement la prédominance des toitures à double-pente. De plus, nos villes sont gérées par les lois des Monuments Historiques, avec des "périmètres de protection" autour des bâtiments classés (églises, etc.)[1]. Cette situation fait qu'il n'est pas possible de modifier les toitures existantes en toitures-terrasses.

Seuls les immeubles collectifs de grande hauteur ont une toiture-terrasse en centre-ville (photo 245).

• Les constructions péri-urbaines

Réalisées depuis 1945, les constructions nouvelles de pavillons ont eu en dominance la toiture-terrasse accessible, avec une surcharge imposée de 200 kg/m^2, réalisée avec des hauteurs de solins sur 10 cm à 15 cm de hauteur.

Première technique : Pose d'un ralentisseur d'évacuation des crues installé sur les descentes et mis au point aux U.S.A. suivant la figure 246. La crapaudine est remplacée par une crépine perforée.

---

[1] La loi sur le Paysage du 8 janvier 1993, complétera la loi de 1930 sur les périmètres de protection

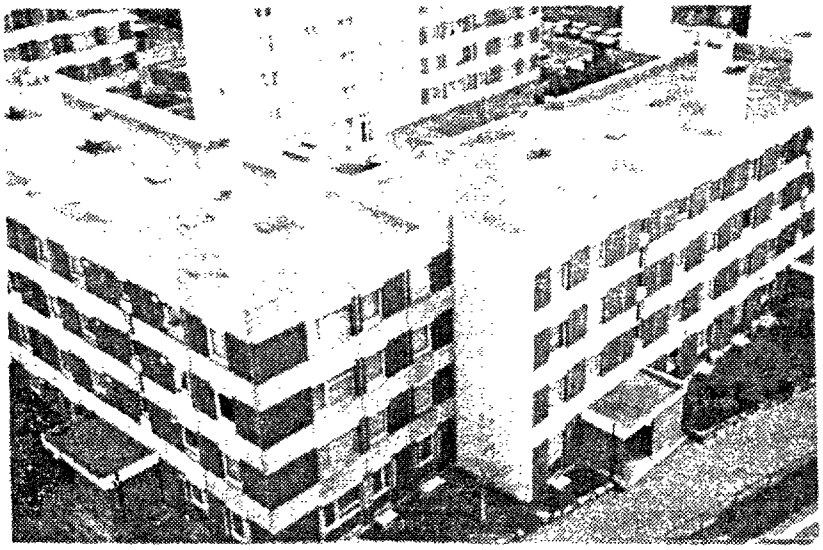


Photo 245-

Rétention à la toiture sur collectifs d'une pluie de 400mm en 6 heures, en milieu urbain (surcharge de 400 kg/m^2 correspondant à une surcharge "grand public").

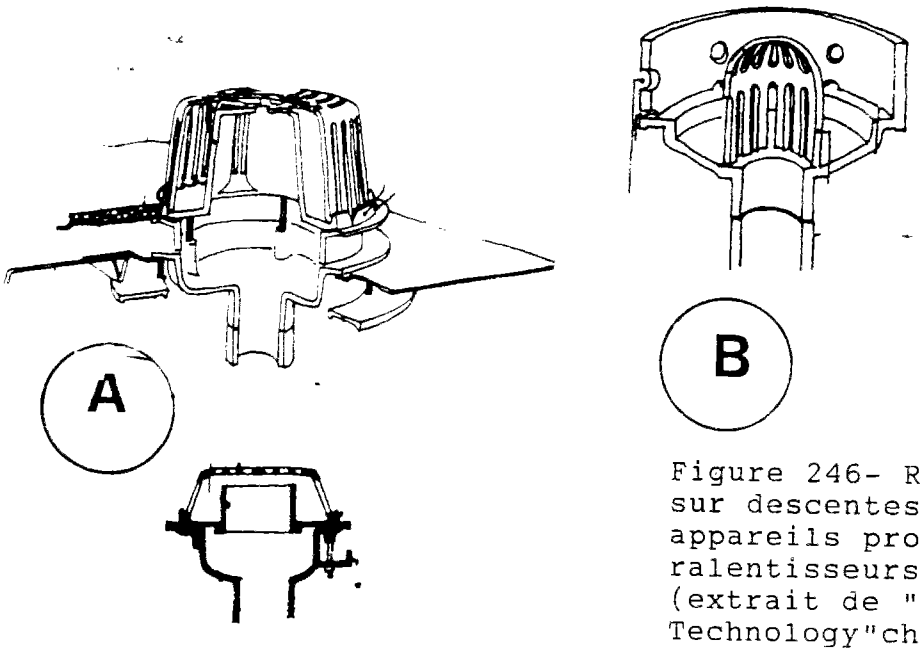


Figure 246- Rétention à la toiture sur descentes existantes: deux appareils proposés aux U.S.A. comme ralentisseurs d'évacuateurs. (extrait de "Water Resources Protection Technology"chapitre 1/1 [185]).

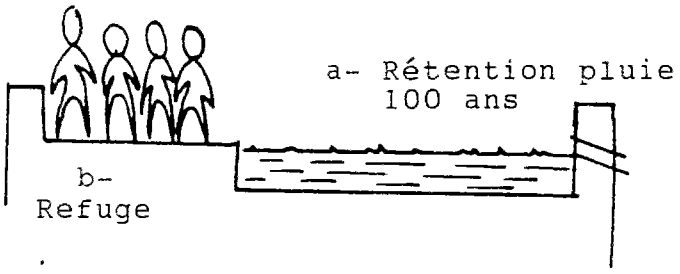


Figure 247- Proposition de rétention centennale à la toiture-terrasse - réservoir
a- rétention centennale (surcharge 400kg/m^2)
b- refuge (4 personnes/m^2 ou 400 kg/m^2).

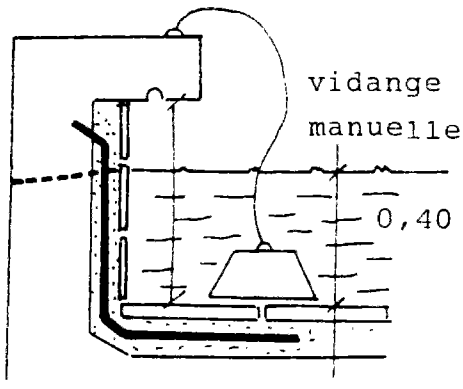


Figure 248-
Détail d'acrotère.

Deuxième technique : Rétention d'une crue centennale de type 400 mm en 6 heures sur une toiture-terrasse de nouvelle construction. Il est possible de faire une rétention centennale à la toiture, à partir du moment où l'architecte (ou l'entrepreneur) applique les taux de surcharge utilisés pour le "grand public" et qui est de 4 personnes/m^2 soit 400 kg/m^2. Pendant le nombre de jours désirés, on peut donc piéger une hauteur d'eau de 400 mm correspondant à un poids de 400 kg/m^2, les calculs étant de plus déjà faits.

Dire qu'une toiture ne peut accueillir que 14 cm d'eau, parce que les solins actuels sont en général à cette hauteur, dire qu'une toiture ne peut pas accueillir une pluie centennale de 400 mm, est une erreur. Le surcoût correspond à la différence de surcharge entre 200 kg/m^2 et 400 kg/m^2 (figure 247).

Les précautions à prendre :

• Établir des surverses importantes (gargouilles, etc.) de façon à ce que la hauteur de la pluie ne dépasse pas 0,40 mètre.

• Prévoir des refuges pour les personnes en péril, autre que les parties de rétention d'eau, pour ne pas doubler la surcharge (l'eau et les personnes atteindraient 800 kg/m^2) (figure 247).

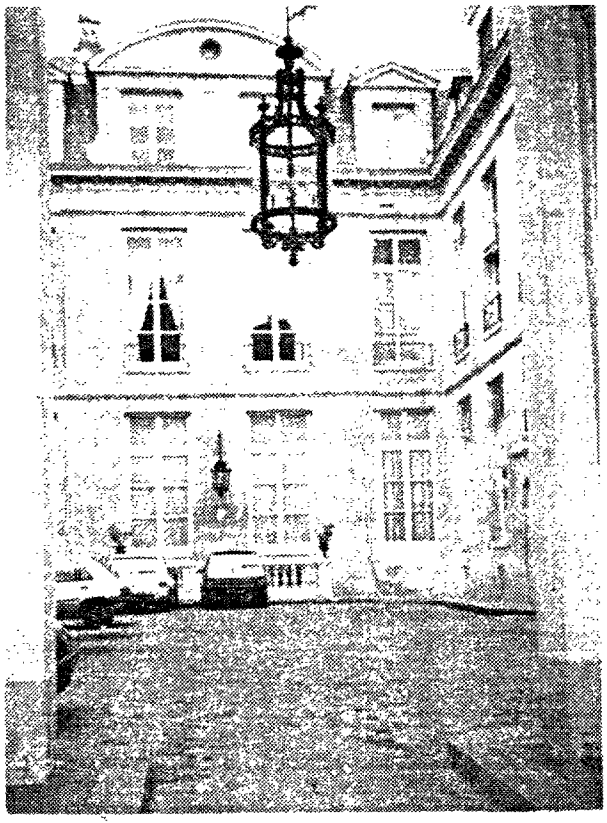
• Établir des relevés d'étanchéité sur 0,50 mètre de hauteur, supportant la température des terrasses (80°) (figure 248).

Dans ces conditions, nous ne voyons pas ce qui pourrait empêcher de construire des toitures-terrasses de rétention pour crue centennale, sinon qu'il existe d'autre capacité de rétention à la parcelle moins onéreuse.

Surcoût moyen de l'ouvrage pour une toiture-terrasse de 50 m^2 : 76 000 F (valeur 1992) soit 8 % environ du prix de la construction d'un pavillon R+1. Efficacité hydraulique (vidange manuelle programmable) = 0,40 m^3/m^2.
Coût du m^3 d'eau stockée : 3 800 F/m^3.

c- Les impluviums de cours : cour-réservoir

En reprenant l'exemple de l'impluvium du cloître de la Cathédrale Romane à Vaison-la-Romaine, qui est resté sec pendant la catastrophe, alors que la ville était couverte d'une lame d'eau de 0,40 mètre, voire plus au regroupement des rues, nous proposons de transformer des cours d'immeubles en surface de rétention, alors qu'actuellement les eaux des toitures se rejettent dans les cours, et les eaux des cours dans la rue, par le passage des portes cochères (photos 249 et 250, croquis 251).



Photos 249 et 250 - Les cours d'immeuble et la possibilité de créer des impluviums de surface pour la crue centennale (Paris,rue de l'Université).

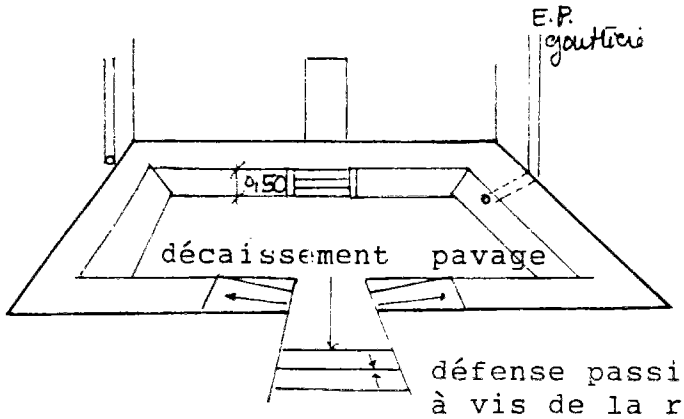


Figure 251- Création de cour -réservoir.

Proposition de rénovation des cours en fonction du risque hydrologique majeur.

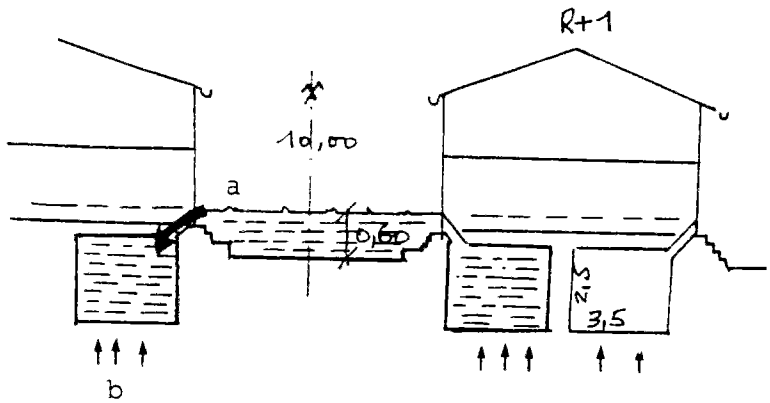


Figure 252- Création de cave-réservoir.

Inondabilité des sous-sols
a-caves inondées pouvant être aménagées pour la rétention;
b-caves inondées par les remontées de la nappe phréatique.

d- Les caves : cave-réservoir

A partir du moment où le ruissellement des rues pénètre de toute façon dans les caves et ouvrages souterrains, par les soupiraux, les rampes d'accès, etc.), il est préférable d'organiser ces ouvrages en ouvrage de rétention, de prévoir les issues de secours hors zone d'inondation, les moyens d'évacuation des eaux par pompage, sachant que le stockage de ces eaux peut avantageusement s'étaler sur plusieurs jours.

Il existe deux sources d'inondation pour les caves et ouvrages souterrains, ce sont les inondations par remontées des eaux souterraines et les inondations par ruissellement de surface :

- les inondations par remontées des eaux souterraines : à Nice, la construction de parkings souterrains publics dans la vieille ville a fait remonter la nappe phréatique qui est passée de -3,00 mètres de profondeur en 1972 à -0,50 mètre en 1979 (parking Saleya). En 1987, une petite crue de 50 m^3/s de la rivière de Nice, le Paillon, a fait remonter la nappe de 80 centimères en inondant de très nombreuses caves (observations des Services Techniques de la Ville) ;

- les inondations des caves par ruissellement sur les voies urbaines (figure 252). Toutes les caves de Nîmes ont été inondées en 1988. Les difficultés se sont présentées pour l'évacuation de ces eaux avec risques d'axphyxie pour les sapeurs-pompiers.

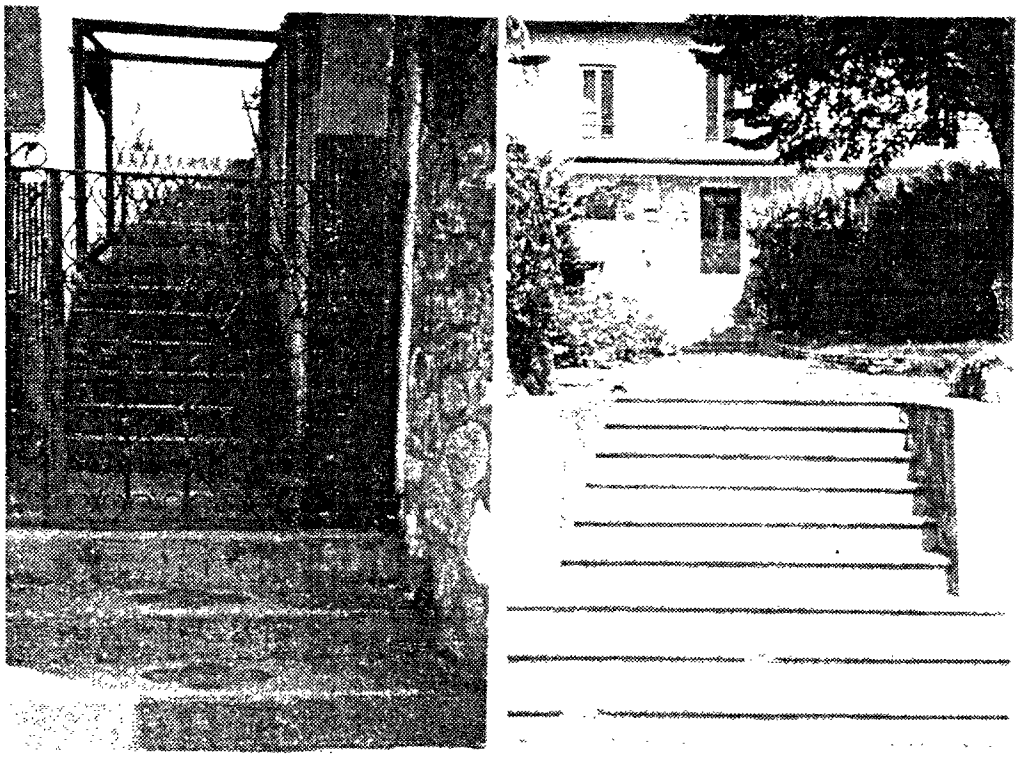
Proposition : créer des lots de caves inondables, avec portes étanches "coupe-inondations", cloisonnement des caves, murs hydrofuges et ouvrages d'accès permettant le pompage à partir de la rue. Capacité de stockage des caves : voir chapitre IV paragraphe 4.3.3.1.). Conditions : modification de l'attribution de caves, rachat, etc., avec la création de caves collectives de rétention.

3.4.2.3. Les techniques de lutte au niveau de la protection globale

Lors de nos prospections sur les maisons individuelles péri-urbaines d'amont de Nîmes, nous avons été étonnés de découvrir un nombre important de maisons bien protégées du risque, et quelques maisons par contre très vulnérables situées dans les mêmes secteurs.

a- L'emplacement du bâtiment dans la parcelle

Les maisons situées en partie haute de la parcelle, surtout si elles sont implantées plus haut que le niveau du portail d'entrée, ont peu de chance d'être inondées. Cet emplacement se définit lors du dépôt du Permis de Construire.



253 254

Photos 253 et 254-

Habitations protégées par des emmarchements de jardin(Chemin Roquemaillère et Route de Sauve, Nîmes).

Hauteur de la protection

photo 253 = 2,85m
(19 marches x 0,15m)

photo 254 = 3,75m
(25 marches x 0,15m)

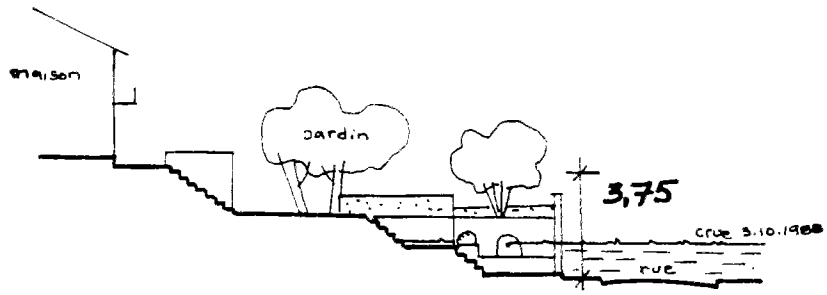
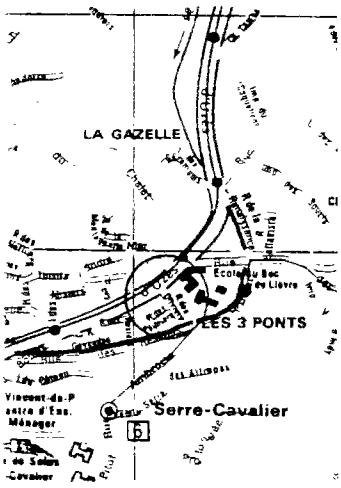
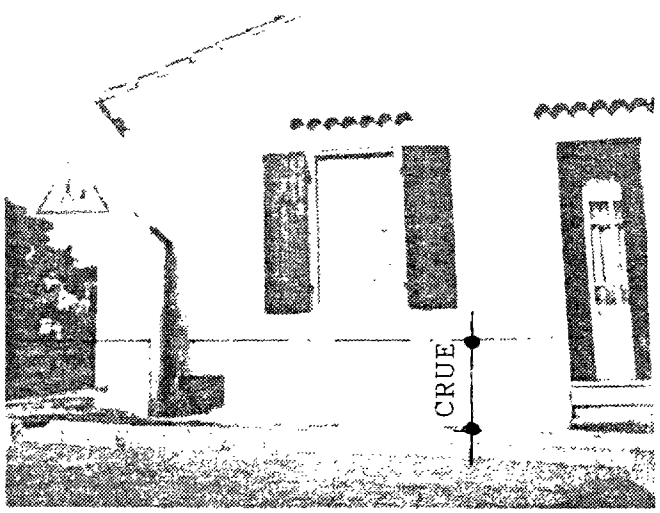


Figure 255-

Coupe sur le jardin 254; propositions de rétention sur le jardin existant.

Protection= 3,75m

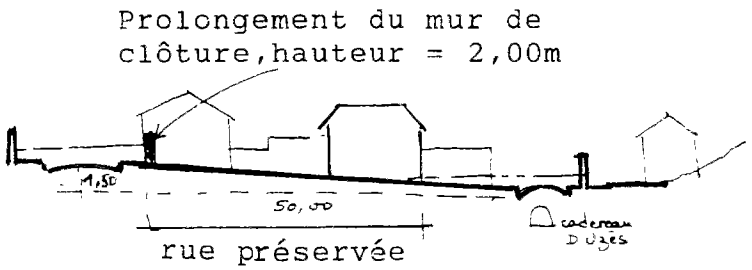




Plan et photo 256-

Habitations à risque: exemple de la rue des Oliviers à Nîmes, à proximité du cadereau d'Uzès recouvert;

hauteur de la crue présumée = 1,00m



Défense passive publique

Figure 257-

Proposition de défense: reconstruction du mur de clôture détruit pour la création de la rue et création d'une voie "préservée" en impasse.

b- Les protections par emmarchements extérieurs sur terrain en pente

Un nombre important de maisons sont protégées à Nîmes du risque de ruissellement majeur, par des emmarchements imposants totalisant une différence de niveau importante entre le niveau de la rue et le niveau de la plate-forme de la construction (photos 253 et 254, croquis 255). Les deux exemples retenus ont une hauteur de protection de 2,85 mètres (19 marches à 0,15 m) et de 3,75 mètres (25 marches à 0,15 m).

Par contre, des maisons sont en position très vulnérable, situées du côté des écoulements préférentiels sur routes et protégées par quelques emmarchements (hauteur de protection 0,45 mètre avec 3 marches de 0,15 m) (photo 256).

Dans ce cas là, nous ne voyons qu'une possibilité de protection globale, c'est de fermer la rue par la reconstruction d'un mur de clôture de 2 mètres de hauteur et de mettre la rue en impasse (croquis 257) (cf. les techniques de voies protégées en infrastructure, chapitre 3.4.4.).

c- Les protections par fossé/douve et mur-parapet en terrain plat

Nous avons trouvé à l'aval de Nîmes des exemples de protection sur terrain plat de maisons anciennes en zone inondable qui ont passé la crue du 3 octobre 1988 sans encombre .

Les protections de l'habitat (le MAS FLECHIER) comprennent un fossé de type douve avec ponceau d'accès à l'entrée du mas, un mur-parapet et un seuil de l'habitat à +0,80 mètre du sol naturel. La hauteur de la crue du 3 octobre 1988 a atteint 0,30 mètre à 0,40 mètre dans la plaine (photo 258a et coupe 258b).

Photo 258 a-

Des protections groupées en plaine : exemple du Mas Fléchier à Nîmes; protections historiques.

hauteur moyenne de la crue du 3.10.1988 = 0,30m

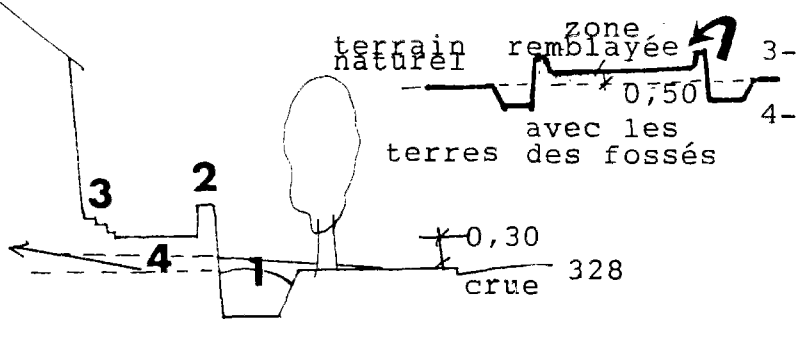
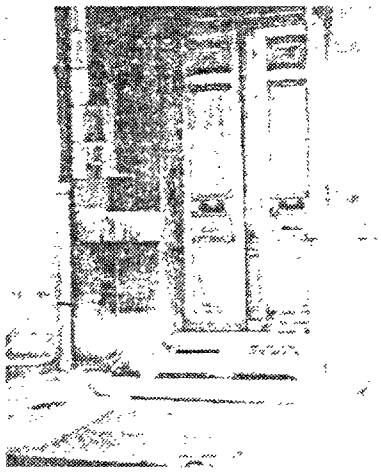


Figure 258b-

. Détail des protections

1-fossé
2-mur de souténement et parapet
3-emmarchements et surélévation de la demeure
4- ponceau d'accés en pente vers la plate-forme.



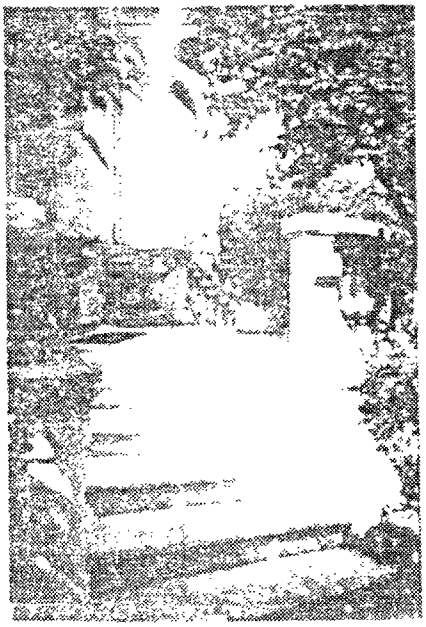
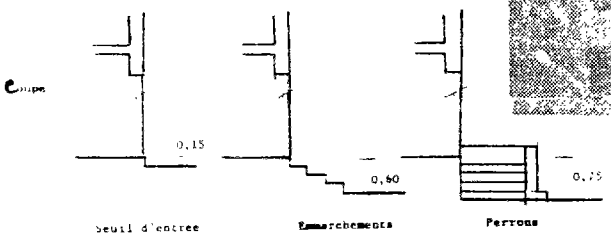


Photo 259a-
Emmarchements saillants
3 marches
protection: 3 x 0,15=0,45m
(Bl. de Prague,Nîmes).

Photo 259b-
Perron de 6 marches
avec balustrade(18ème siècle
Av.Franklin Roosevelt)
protection:
6 marches + 1 seuil
7 x 0,15= 1,05m.



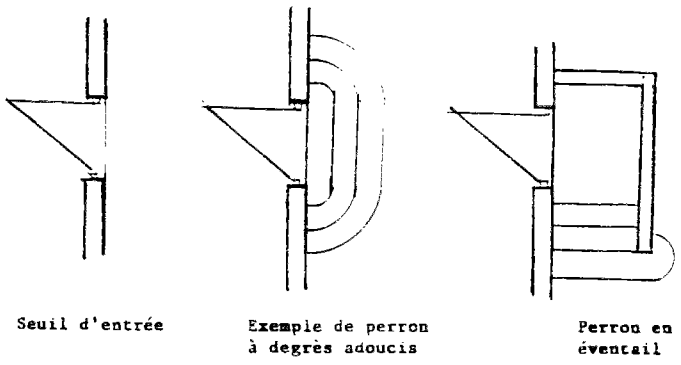
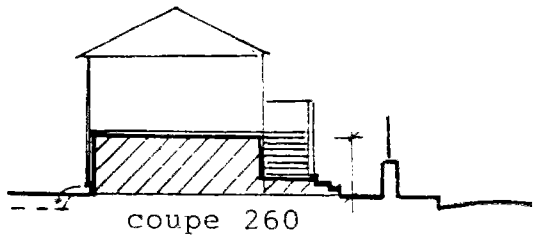


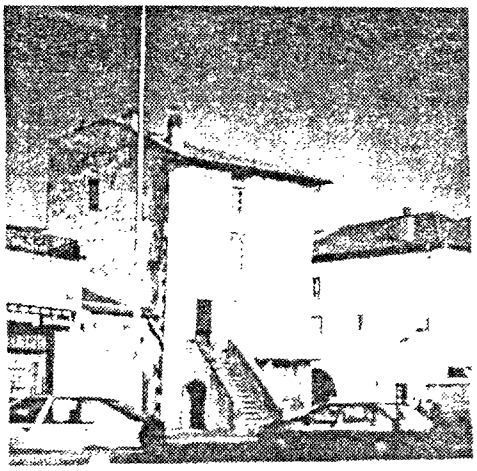
Figure 263-Plan de différents perrons.

Photo 260-

Perron droit ,hauteur de la protection
14 marches x 0,15= 2,10m
cave en rez-de-chaussée (Route d'Uzès,Nîmes)



coupe 260



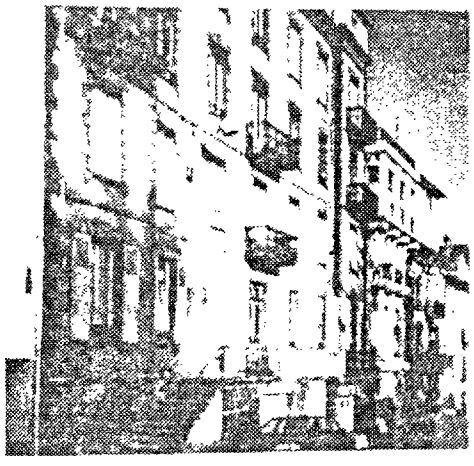


Photo 262-
Perron d'une demi-volée
ville de Royat (Clermont-Ferrand).

Photo 261- Escalier extérieur,une volée,
village d'Aubrière (Clermont-Ferrand)

d- Les emmarchements de seuil avec vide sanitaire

La tradition veut que les emmarchements de seuil se composent de trois marches et/ou une marche de seuil pour la porte d'entrée.

La protection totalise donc une hauteur de 0,45 mètre (3 marches x 0,15) à 0,60 mètre (photo 259a). Cette protection correspond soit à un vide sanitaire, soit à une cave surélevée.

Le coût d'un vide sanitaire pour une maison individuelle R+1, F4/F5[1] de 100 m2 au sol est de 30 000 F/l'ensemble soit 3 % de la valeur totale (valeur 1992).

e- Les perrons

L'adjonction d'un perron à un habitat est une défense efficace contre les crues de ruissellement majeur. Le perron a été développé dès le XVIII^{ème} siècle avec de nombreuses variantes à la fin du XIX^{ème} siècle.

Nous avons trouvé de nombreux exemples en milieu urbain à Nîmes, à Clermont-Ferrand et à Vaison-la-Romaine. Le perron comporte un palier extérieur au moins devant la porte d'entrée.

• **Perron sur une demi-volée** (soit un demi-niveau)

Nous avons retenu deux exemples :

- perron de 6 marches en "éventail double", avenue Franklin Roosevelt à Nîmes : protection de 1,05 mètre (photo 259b),
- perron de 14 marches à "double repos", rue Vincent Faïta à Nîmes : protection de 2,10 mètres (photo 260).

• **Perron sur un niveau :**

Nous avons répertorié plusieurs perrons sur un étage, assurant une protection supérieure à 2,00 mètres de crue :

- perron en pierre dans le village d'Aubrière. Ce village a été ennoyé par la crue historique de 1764 sous "6 pieds d'eau". La construction de ce palier est de la même époque (photo 261),
- perron en pierre à Royat (photo 262),
- perron à Vaison-la-Romaine en bois et fer (photo 153).

Ces trois exemples se trouvent à proximité d'une rivière.

• **La codification des perrons** (figure 263)

Le perron a été développé avec de nombreuses variantes avec 5/7/9 marches et plus : perron carré, perron droit, à éventail double, à degrés adoucis, etc. C'était un élément architectural qui valorisait la demeure, ce qui est toujours valable.

---

[1] F4 : Nombre de pièces : 4 pièces

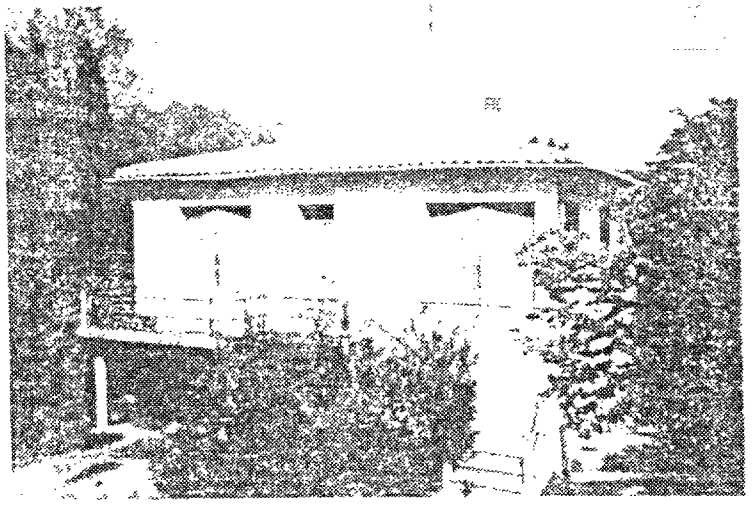
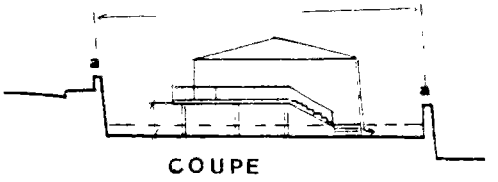


Photo 264-

Construction sur pilotis protection
h= 2,40m (16 marches x 0,15)

Exemple de défense passive pris Route de Sauve (Nîmes).



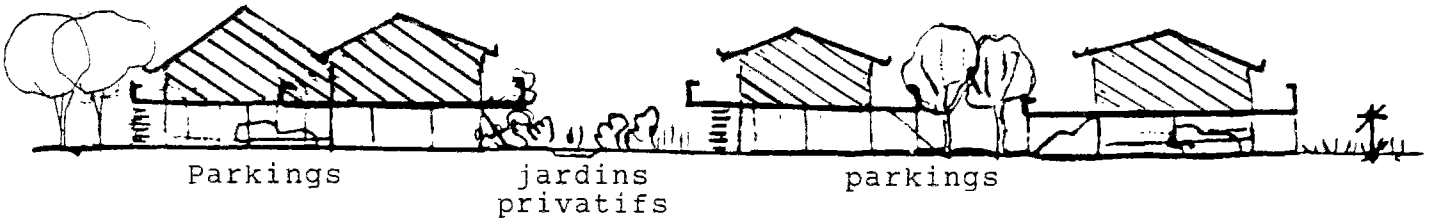


Figure 265- Proposition de lotissement sur pilotis en plaine, protection= 2,50m avec parkings sous les logements grillagés pour retenir les voitures.

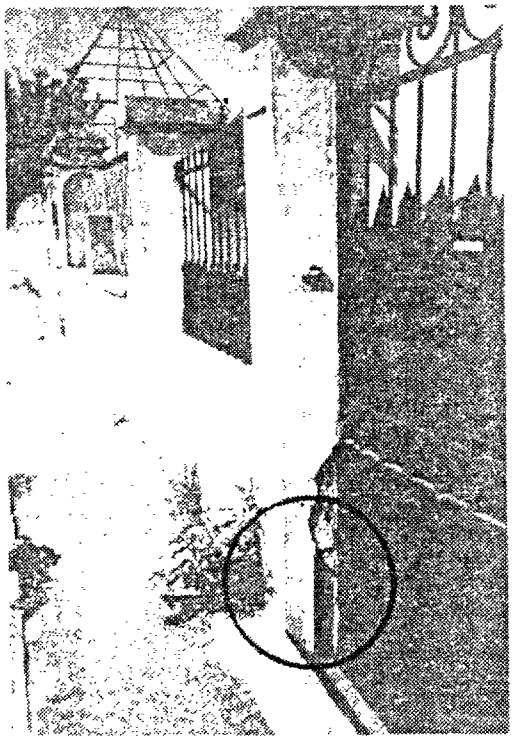


Photo 267- Défense passive avec des éléments démontables (Route de Sauve, Nîmes).

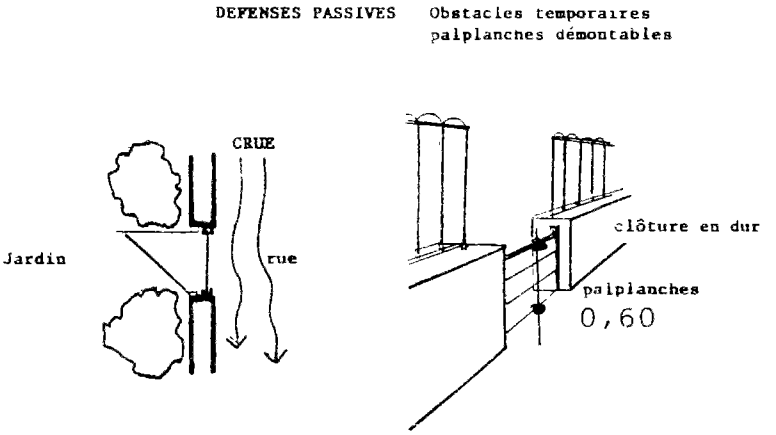


Figure 266- Fermeture de portail de jardin avec palplanches.

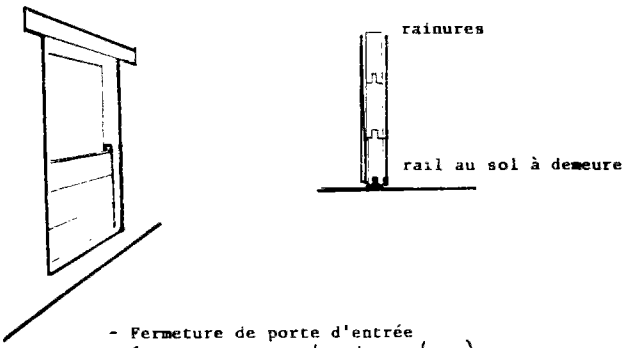


Figure 268- Proposition

Les protections temporaires sur porte d'entrée.

• **L'efficacité de la protection**

Le perron demeure donc une technique de lutte urbaine de protection efficace, dans les limites de hauteur indiquées ci-dessous.

Degré de protection :

1 seuil	1 marche	:	0,15 m
emmarchements	3 marches	:	0,45 m
	5 marches	:	0,75 m
perron d'1/2 volée	5 marches	:	0,75 m
	6 marches	:	0,90 m
	10 marches	:	1,50 m
perron d'1 niveau	15 marches	:	2,25 m

f- Les pilotis

Les maisons sur pilotis demeurent la défense par excellence des inondations. Mais quelques rares exemples seulement ont été trouvé sur nos sites :

- Nîmes : exemple d'une maison unique sur pilotis, route de Sauve, installée en contre bas de la rue. La protection ici est de 2,40 mètres, avec 16 marches de 0,15 m (photo 264).
La construction de lotissement sur pilotis est à préconiser. L'habitat reste au-dessus de la crue, la partie basse sous pilotis devient un parking. On peut même établir des grillages sur certains côtés des parkings pour éviter la dérive des voitures (figure 265). Le coût des pilotis est pris en charge en partie par les parkings.

g- Le mode de construction

Nous avons retenu parmi les facteurs aggravants (chapitre 3.2.3.) l'importance de la vulnérabilité des matériaux, en particulier les constructions en murs porteurs en parpaings sans raidisseurs en béton.

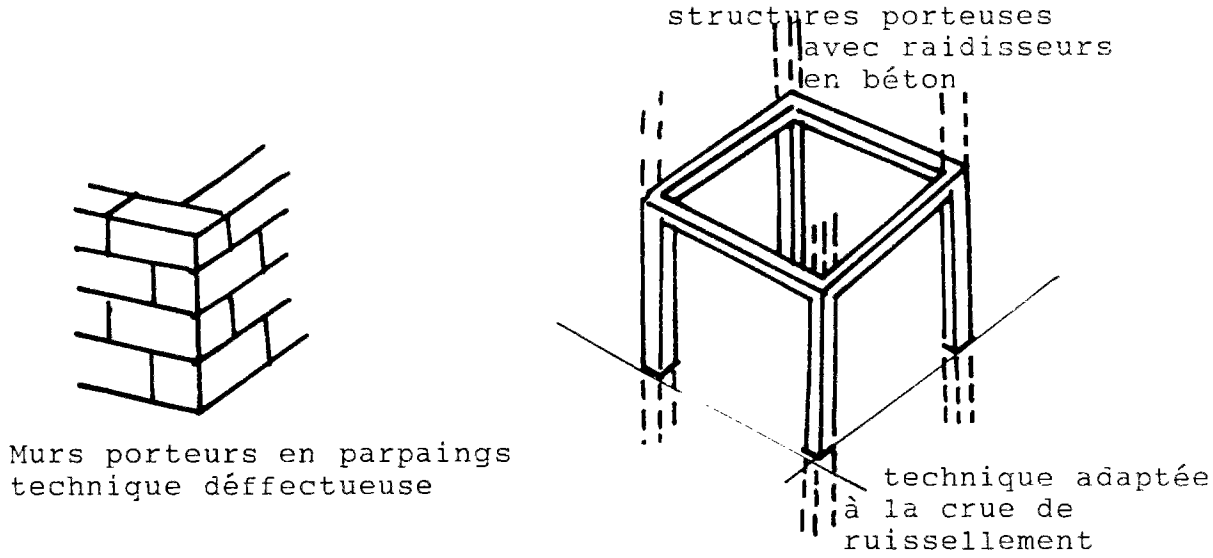
La technique adaptée à une crue de ruissellement est donc l'application d'une structure porteuse avec poteaux de béton et remplissage, sachant que le remplissage peut être dévasté (croquis 266).

3.4.2.4. Les techniques de lutte au niveau d'une protection ponctuelle et les améliorations de l'existant

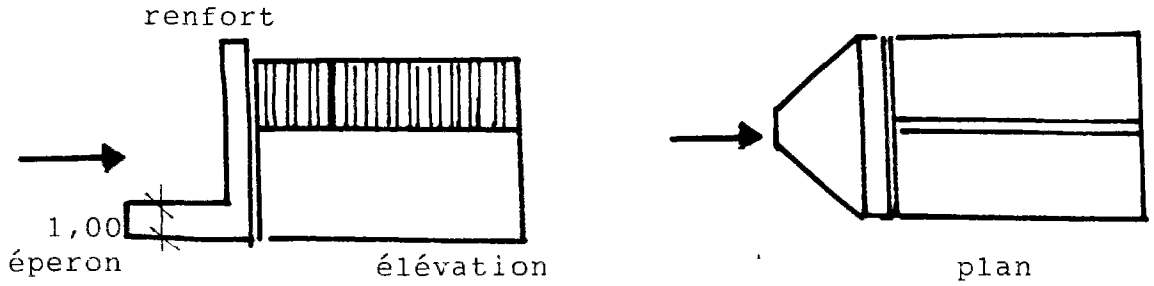
Nous avons répertorié une série de techniques de lutte qui apporte des améliorations sur les bâtiments existants pour faire face au risque.

a- Les protections temporaires

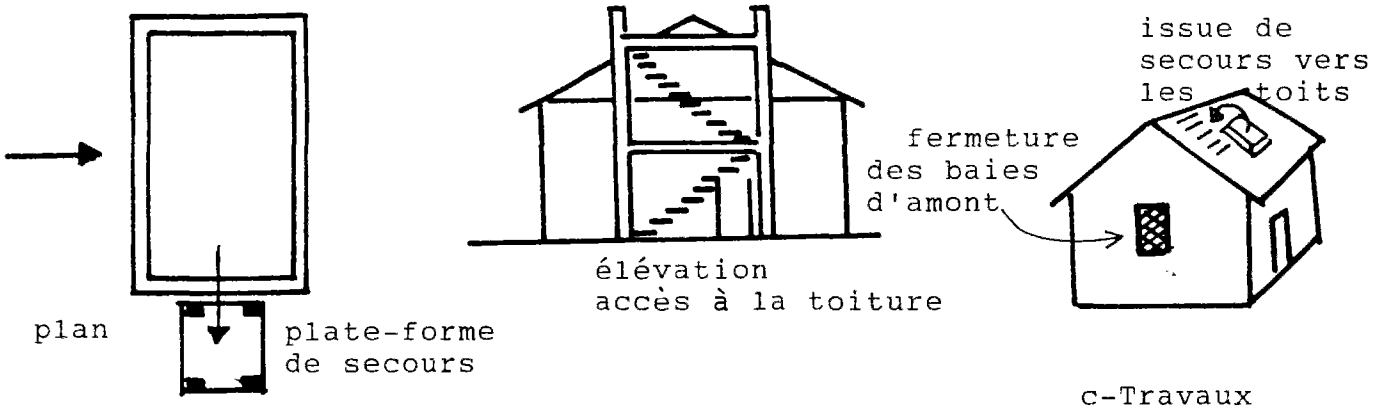
Nous avons trouvé un procédé de protection temporaire à Nîmes et dans le département de la Seine-Saint-Denis.



Croquis 266- Les modes de construction favorable ou défavorable à la crue.



a- Le renforcement des murs d'amont pour les constructions existantes



b-Apport d'une structure extérieure de refuge

c-Travaux d'adaptation au risque

Figure 269- Les contraintes du risque hydrologique sur les constructions en lit majeur

• **Procédé identifiés** : éléments démontables de type palpanches que l'on rajoute à un portail pour piéton pour se protéger de la crue. Les éléments se glissent dans des rails installés à demeure sur le portail sur les côtés et au sol (photo 267 et croquis 268).
La hauteur de la protection varie en fonction des éléments. Nous avons vu une installation de 0,40 mètre de hauteur que l'on peut enjamber : coût moyen : 1 000 F/l'ensemble (valeur 1992).

• **Extension de ce procédé** : nous proposons de mettre sur pied une gamme de fermetures étanches, à demeure, pour les portes et fenêtres, qui résistent à une crue de type Nîmes.

b- Les protections spécifiques de détails : améliorations à apporter aux constructions existantes

Nous avons noté une série de techniques spécifiques qui pourraient devenir la base de la protection des bâtiments contre les crues de ruissellement.

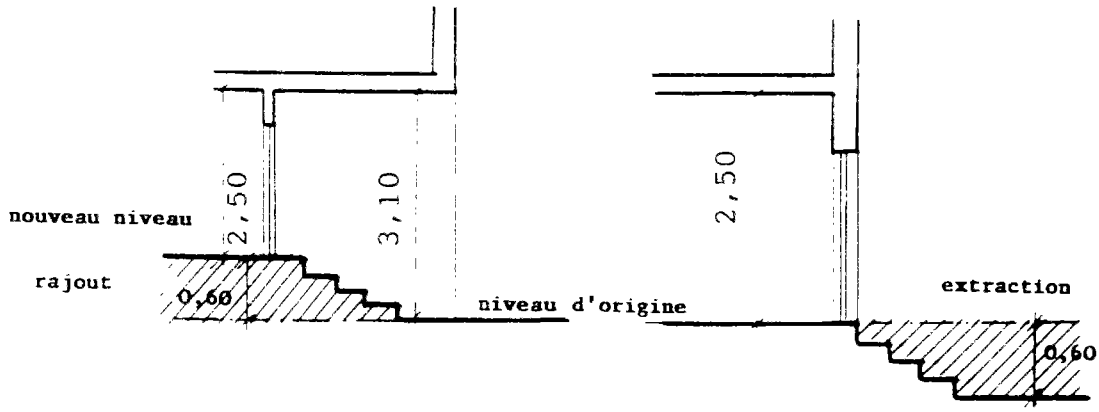
- Fermeture des fenêtres à risque
Exemple de fermeture de fenêtres dans la cathédrale médiévale de Nazareth à Vaison-la-Romaine (XII et XIII siècles) qui se trouve dans la zone des écoles. Les fenêtres, qui ont été murées progressivement au cours des siècles ont évité l'inondation du cloître le 22 septembre 1992.
Exemple de fermeture de fenêtre à Vaison-la-Romaine mais cette fois-ci après la catastrophe (photo 153) :
coût moyen : 300 F/m^2 (valeur 1992).

- Renfort des murs en rez-de-chaussée
Le renforcement des murs en rez-de-chaussée, en particulier des murs d'amont par des doublages de murs en béton banché et pierres, avec des compléments d'éperon à leur base, pourrait apporter une sécurité dans la résistance des murs face à l'écoulement de ruissellement (figure 269-a) :
coût moyen : 2 000 F/m^2 (valeur 1992).

- La vérification du rejointoiement des murs anciens
Le rejointoiement en profondeur au mortier après piochage, est nécessaire pour la stabilité d'un mur face à des pressions latérales : coût moyen : 200 F/m^2.

- La création des issues de secours
La réalisation d'issues de secours permettant l'accessibilité des toits est obligatoire, pour la sauvegarde des personnes en détresse. Soit les issues de secours sont des ouvertures dans les toitures à l'aide de vasistas, chassis à tabatières, "velux", etc., soit les issues de secours sont des structures extérieures, avec escaliers ou échelles à demeure (figure 269b, c) : coût moyen : 3 000 F/l'unité (valeur 1992).

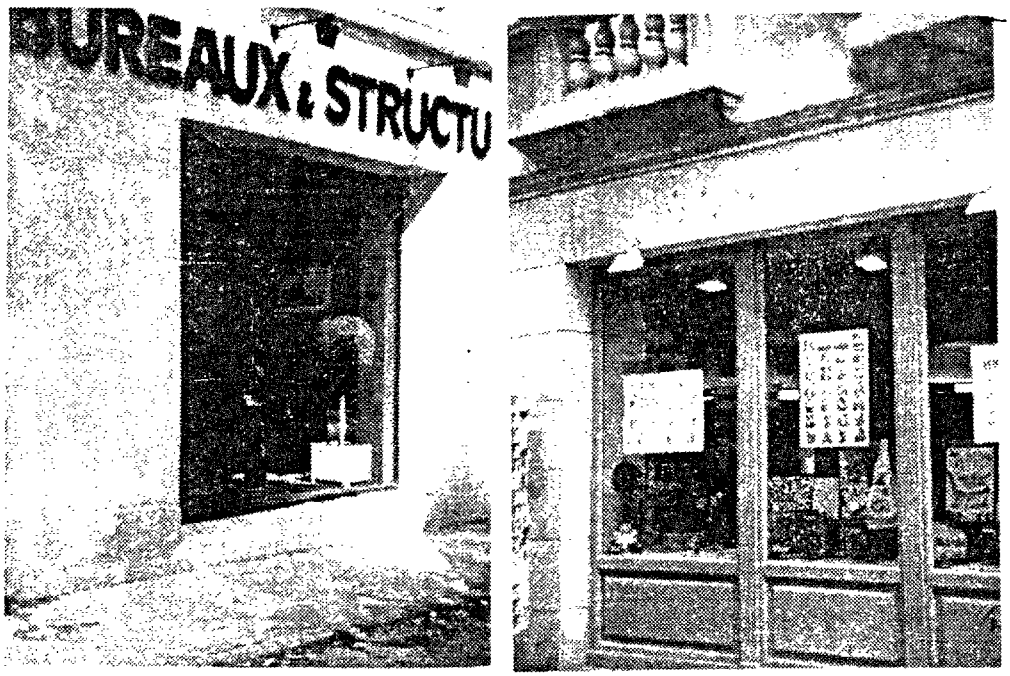
- Les plates-formes de secours
Par extension de la technique de lutte précédente, on peut envisager l'adjonction de plates-formes de secours à la construction existante, pour les bâtiments de grande fréquentation (écoles, universités, etc.).



a – Surhaussement intérieur

b– Décaissement extérieur

Figure 270 - **Travaux de reprises sur les habitations existantes face au risque hydrologique.**



Photos 271-

a-La vulnérabilité des devantures "tout vitrage" face au risque hydrologique.

b-Protection de la partie basse

a- Nîmes
Av. Franklin Roosevelt

b- Nîmes ,magasin
du centre ville ,partie piétonne

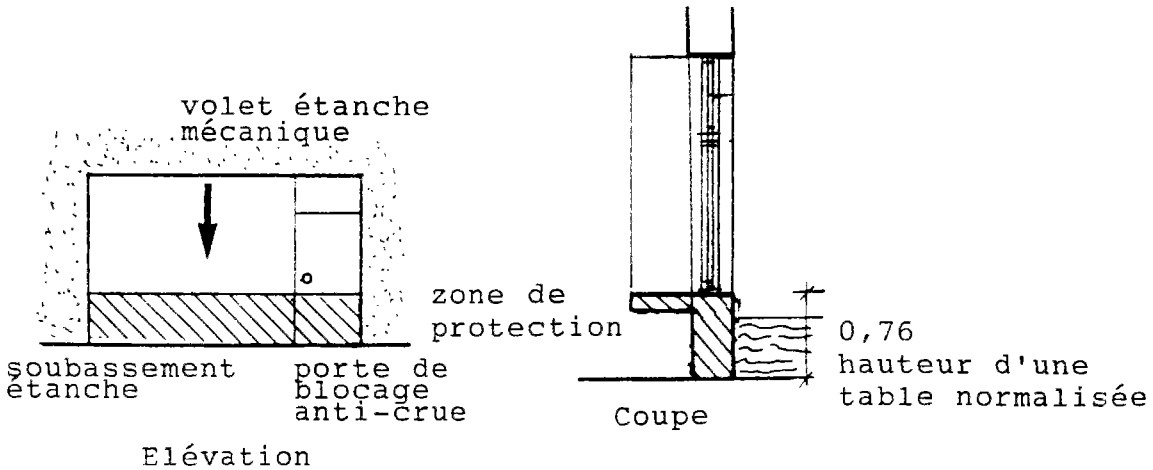


Figure 272- Adaptation des devantures au risque pluvial à chaque nouveau Permis de Rénovation délivré.

- **Les travaux de décaissement de seuil**
On peut créer "une surélévation artificielle" d'une maison en décaissant l'ensemble de son pourtour extérieur, en fonction de la topographie des lieux. Le déchaussement des fondations anciennes peut se faire sur 0,60 m à 1,00 mètre, mais avec le doublage extérieur des murs de fondation et reprises de gros oeuvre (figure 270b).

- **Les travaux de surélévation de seuil**
De même, il est possible de créer, à l'intérieur d'une maison existante, un vide sanitaire artificiel de 0,60 m de hauteur, en fonction des possibilités de hauteur sous plafond. Il faudra y adjoindre les coûts de reprise des travaux pour les portes, planchers et départs d'escalier (figure 270a).

- **La protection des devantures**
La vulnérabilité des devantures actuelles est due, entre autres, à la mode du tout vitrage inter-plancher (photo 271a et b).
Si la hauteur de la crue est inférieure à 0,75 mètre, une protection contre le risque hydrologique pourrait être mise en place, comme dans les étals du moyen-âge, avec des portes d'accès étanches et métalliques en partie basse (croquis 272).

3.4.2.5. Conclusion

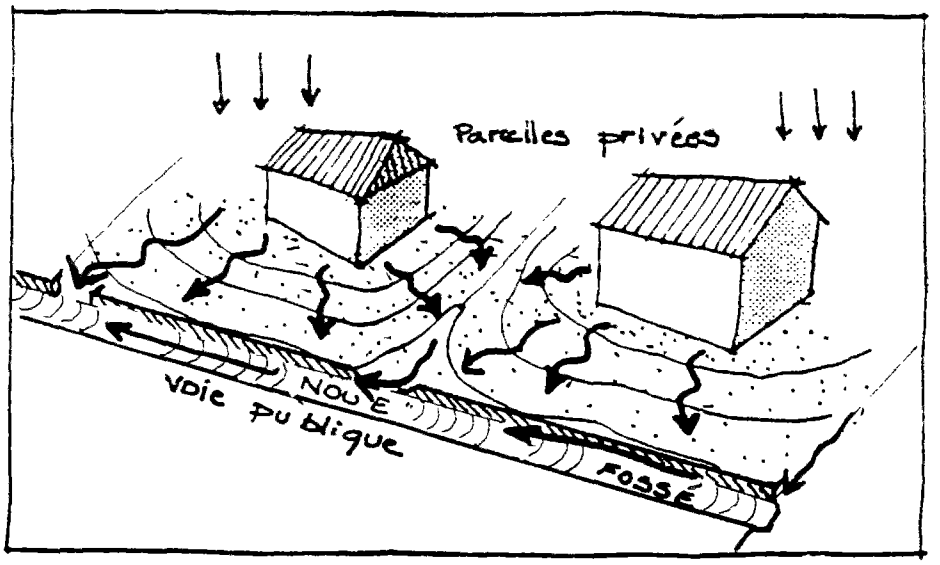
Nous avons trouvé beaucoup d'exemples sur nos parcours pendant nos recherches de terrain, qui répondent à des techniques de lutte en architecture contre le risque hydrologique et que nous proposons. Ce sont des techniques de sécurité (le renforcement des murs de rez-de-chaussée, la fermeture des ouvertures à risque, la réalisation d'issues de secours d'étage à l'étage et vers les toits, etc.), des techniques concernant des travaux de reprise (décaissement de seuil, surélévation de seuil, protection des devantures, etc.) et les techniques pour travaux neufs (la rétention à la toiture, la construction sur pilotis, sur vide sanitaire, etc.).

Nous avons constaté, lors de notre analyse historique des bâtiments, des traces de crues anciennes, et les réponses de protection que les gens avaient utilisé au cours des siècles.

Nous constatons seulement que ces techniques se sont poursuivies dans le temps jusque vers 1930 et qu'après 1945 elles ont été oubliées.

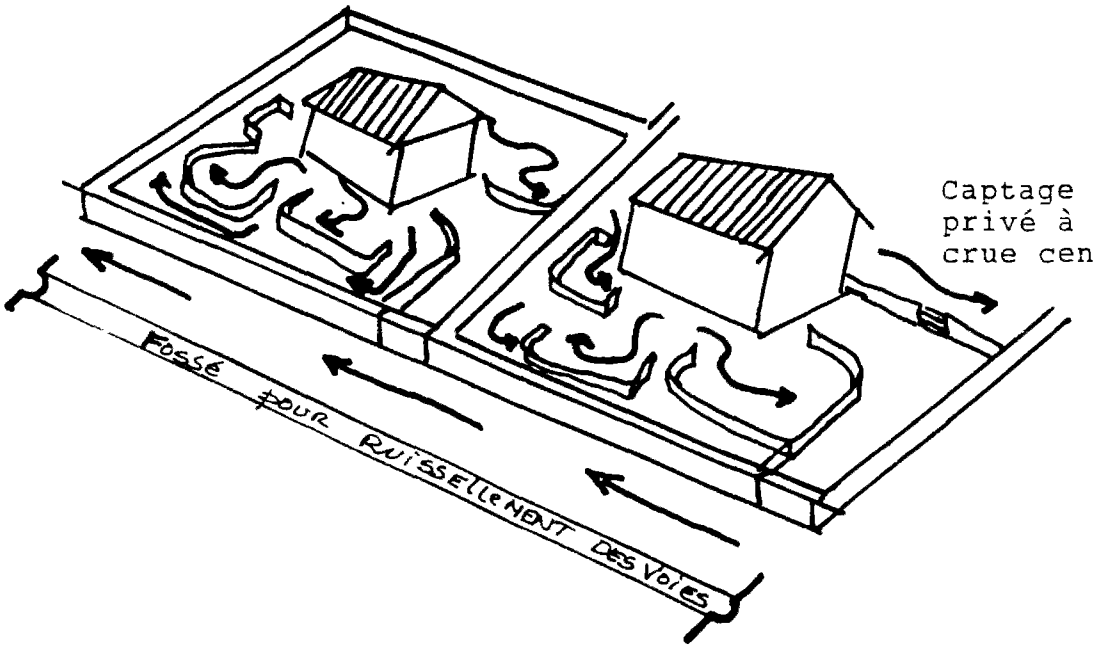
Nous avons vu aussi que la vente d'un bien en 1992, inondé en 1988, fait aussi partie de l'oubli du risque.

Au niveau du bâtiment, il reste donc tout à faire contre le risque hydrologique.



L'eau peut être conduite à travers les terrains à l'aide d'une topographie adéquate : des pentes légères (1 à 2 %) permettent à l'eau de s'écouler vers les noues(1) (extrait de l'étude sur les Techniques Alternatives [181]).

Figure 273- Ce qui était préconisé en 1985 au niveau du ruissellement de la parcelle : l'évacuation suivant le principe Caquot.



Captage du ruissellement privé à la parcelle crue centennale.

1- Objectifs : interrompre le ruissellement et ne pas réunir le ruissellement de la parcelle à celui de la rue.

2- Moyens: captage de toutes les eaux de surface

Figure 274- Limitation par tous les moyens de l'apport du ruissellement privé centennal au ruissellement public.

---

(1) Noue: fossé agricole urbain.

3.4.3. Les techniques de lutte en paysage

3.4.3.1. Généralités

Nous avons constaté que le paysage participe de façon limitante cf. paragraphe 3.3.2.3.) ou aggravante (cf. paragraphe 3.2.5.1.) à la gestion des crues majeures de ruissellement. Nous aborderons les techniques de lutte sous l'angle des deux échelles : l'échelle de la parcelle et l'échelle du grand paysage.

Ces techniques concernent les espaces libres allant du petit jardin, du parc public aux espaces de l'arrière pays. Nous nous appuyerons sur une première série de techniques à réaliser à court terme sur l'existant, puis sur des techniques à long terme, en précisant que la liste a une fonction théorique et n'est pas exhaustive.

Ce qui était préconisé jusqu'ici :

Le dessin extrait du rapport de Mme TA THU THUY et de M. MALET "Les techniques alternatives en assainissement pluvial" de 1985 [181], rapport qui fut d'une grande aide pour le développement de ces techniques, illustre bien le raisonnement de la gestion du ruissellement à la parcelle en 1985 : il était conseillé de faire passer le ruissellement à travers la parcelle en favorisant son écoulement par une topographie adéquate artificielle (croquis 273). Nous retrouverons ici l'impact de la théorie de Caquot "d'évacuer le ruissellement le plus rapidement possible vers l'exutoire", au niveau de la parcelle.

Nos observations :

Au cours de nos observations de terrain, qui ont comporté l'analyse d'une centaine de parcelles privées dans la zone péri-urbaine de Nîmes, nous avons constaté les points cruciaux suivants :
- le rejet des gouttières (cf. paragraphe 3.4.2.2.a),
- les rejets des eaux pluviales des accès privés sur la voie publique (cf. paragraphe 3.2.4.5.).

Toutes les parcelles péri-urbaines (pavillons) et même ubaines (collectifs) rejettent les eaux de surface de leur voie d'accès privative vers la rue, et ce rejet comprend non seulement le ruissellement direct de l'accès imperméabilisé mais aussi les eaux de surface regroupées du jardin et les eaux des toitures. Les exemples de cette situation abondent et nous ne retiendrons que quelques cas, sachant qu'en zone péri-urbaine ces rejets d'accès privés au portail sur la voie publique représentent 90 % de la surface totale de la zone.

Ce que nous proposons maintenant :

Nous proposons d'une façon générale d'interdire le rejet du ruissellement privé (toutes crues confondues) sur la voie publique, et de n'autoriser le rejet de ces eaux dans le réseau d'assainissement pluvial existant, que pour les pluies inférieures à la crue décennale.

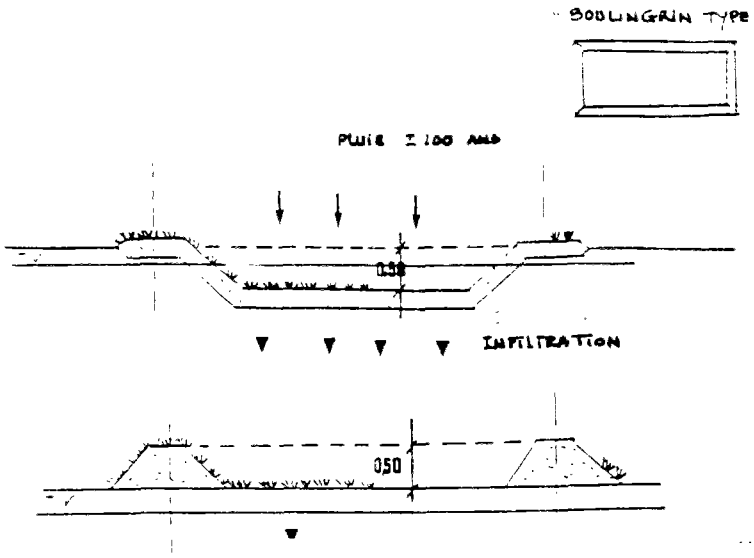


Figure 275- La fonction des jardins dans la rétention de la crue centennale.Rétention par les boulingrins encaissés ou surhaussés , engazonnés permettant l'infiltration.

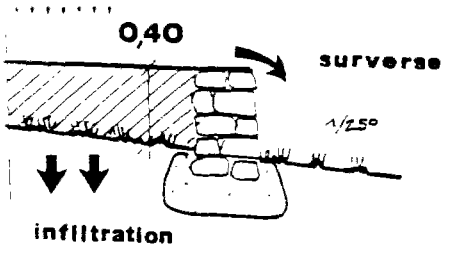
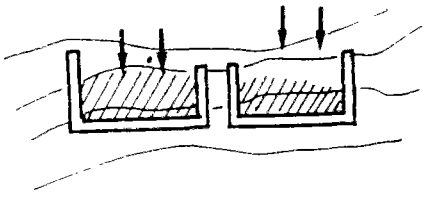


Figure 276- Muret de jardin ouvrage hydrologique de rétention du ruissellement au niveau de la parcelle: -captage,rétention,surverse de sécurité, infiltration.

Figure 277- Ecrêtement de la crue centennale par les murets et murs, avec les parties en retour d'équerre.



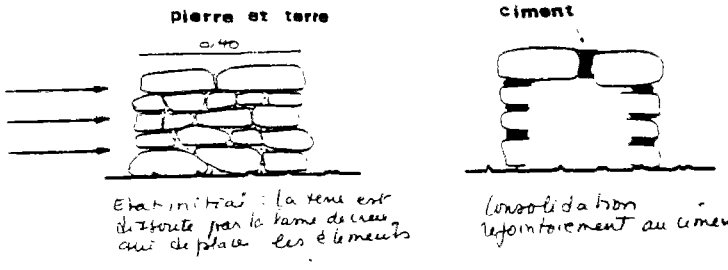


Figure 278-Adaptation d'un muret existant à une fonction de rétention hydraulique.

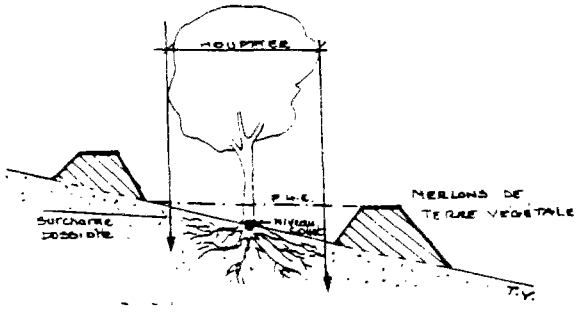


Figure 279- Aménagements de rétention dans un jardin existant avec des merlons d'apport en terre végétale;
la largeur du houppier donne l'emprise du système racinaire,
niveau du collet(base de l'arbre).Ces éléments ne doivent recevoir aucune surcharge.

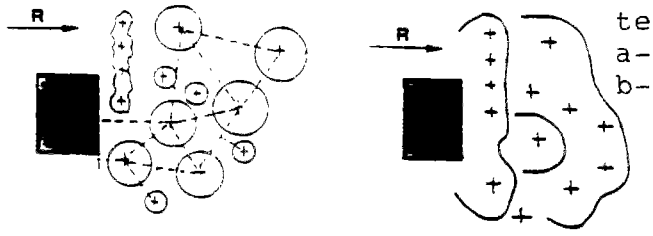


Figure 280- La contrainte des végétaux existants dans la mise en oeuvre des techniques de rétention.
a- inventaire de la végétation(3 strates
b- mise en place des défenses actives (merlons,murets,murs).

Après observations de terrain, simulations du risque, sur le terrain et travail sur les planches cadastrales, nous formulons des priorités d'amélioration de lutte au niveau des espaces libres, en notant qu'ils disposent d'un énorme potentiel de rétention non utilisé actuellement.

Ordre des interventions :
- procéder à l'inventaire des rejets,
- proposer des travaux de modifications, au fur et à mesure de la progression de l'inventaire basé sur les principes suivants :
  - modification de l'emplacement du portail si possible, souvent situé au point bas de la parcelle,
  - refermeture des voies d'eau, des brèches occasionnées avec le temps dans les murs de clôture, au point bas de la parcelle, de façon à empêcher la parcelle de se vider, dès qu'il pleut,
  - mise en place d'une rétention maximale à la parcelle par des aménagements "micro-hydrologiques" dans les jardins privatifs pour une rétention d'une pluie de 400 mm en 6 heures.

3.4.3.2. Les techniques de lutte au niveau de la parcelle : les surfaces de captage

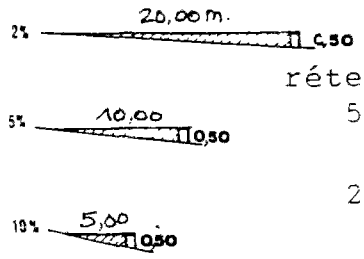
En suivant le principe du piègeage du ruissellement à la parcelle (croquis 274), l'objectif est de stocker une hauteur de pluie de 0,40 mètre moyen correspondant à un volume d'eau égal à la surface disponible x 400 mm, par des techniques à court terme et à long terme pour des jardins existants.

a- Techniques à court terme de rétention de la crue de 100 ans avec piégeage du ruissellement de la parcelle à la parcelle

• Transformation du jardin privatif en jardin-réservoir
En nous appuyant sur l'expérience de la ville d'Osaka après les inondations de 1982, et de sa technique "d'aires de captation d'eau" nous proposons de retenir le principe de la submersion des jardins par la constitution de "barrières paysagères de faible hauteur (cf. paragraphe 3.4.3.5.).
- Si le jardin est plat (pente 1 % à 2 %), la technique du boulingrin[1], encaissé ou réhaussé, permet au jardin de devenir un bassin de submersion par le reprofilage artificiel des surfaces engazonnées, sans destruction de l'aspect du jardin (figure 275) (coût moyen : 233 F/m^2, valeur 1992).
- Si le jardin est sur terrain en pente (5 % à 10 % voire plus), nous proposons la mise en place de murets par paliers successifs de 0,50 mètres de hauteur formant rétention, ou de merlons en terre (pour les pentes plus fortes entre 10 % et 30 %) qui peuvent avoir des hauteurs supérieures de 1,00 mètre à 1,50 mètre esthétiquement supportables, et constitués en terre végétale d'apport de façon à pouvoir être plantés (figures 276, 277, 278 et 279). Coût moyen d'un muret en pierres : 2 000 F/m, d'un muret en parpaings enduits : 500 F/m, d'un muret en briques : 1 000 F/m, d'un merlon en terre végétale d'un mètre de hauteur: 150 F/m (valeur 1992).

---

[1] Boulingrin : Emplacement encaissé, réservé aux Jeux de boules sur gazon depuis le XVIII^{ème} siècle. Le jardin des Tuileries à Paris a encore deux boulingrins avec exèdres (bancs pour les spectateurs semi-circulaires)

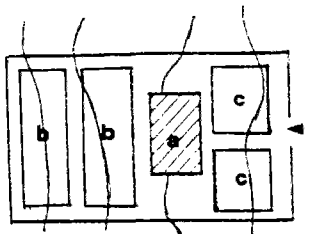


rétention
5 m^3

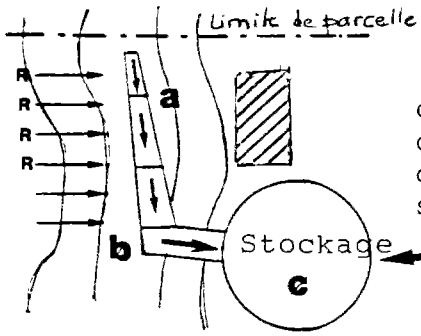
2,5m^3

1,25m^3

Figure 281- Influence de la pente sur le volume d'eau retenue par un muret d'arrêt de 0,50m:
-pente 2%== rétention de 5m^3/m d'ouvrage
-pente 5% = rétention de 2,5m^3/m
-pente 10%= rétention de 1,25m^3/m



Organigramme (1)
le bâti (a) les jardins(b)
les surfaces revêtues(c)



organigramme (2)
captage(a)
dérivation(b)
stockage(c)

Figure 282-La décomposition des surfaces d'une parcelle objectif de rétention = 100% O 100,débit de fuite= réduit

Photo 283- Utilisation des surfaces privées imperméables comme zone de submersion(Route de Sauve,Nîmes).

Photo 287- Mur de clôture surélevé APRES la crue de Vaison-La-Romaine du 22.9.1992

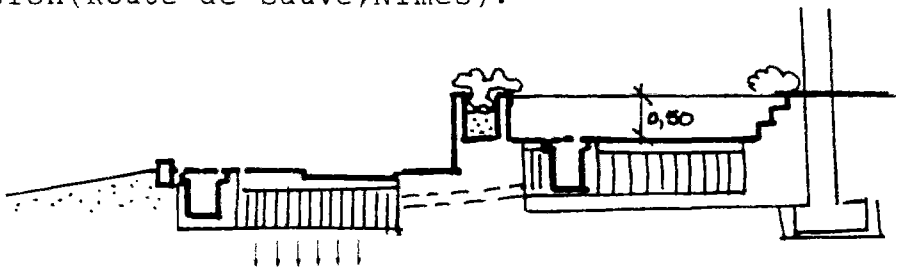


Photo 284-Structures-réservoirs sous parkings et terrasses d'agrément, dans les jardins.

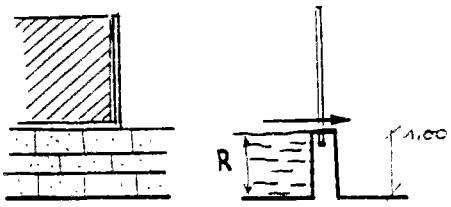


Figure 285-Clôture en grillage avec muret de soubassement pour capter une crue centennale de ruissellement

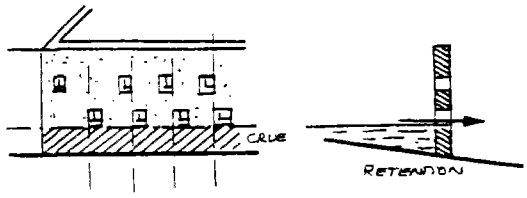


Figure 286-Adaptation de murs anciens à la rétention: ouverture d'évacuateurs pour surverse de sécurité.

Les contraintes pour ces deux techniques sont la préservation des végétaux existants pour leur fonction hydrologique d'absorption de l'eau et d'évapotranspiration, et la contrainte de la pente pour les capacités de stockage en fonction de la crue centennale (figures 280 et 281).
Ces techniques de stockage du jardin-réservoir peuvent ne dépendre que de techniques de surverse afin d'éviter l'ennoiement continuel des jardins, les jardins ne servant de réservoir que pour les fortes pluies, pour les pluies supérieures à l'occurrence décennale.

Exemple d'autres techniques de rétention :

- Création de bassins de jardin maçonnés pour recueillir les eaux pluviales des toitures, à usage multiple (arrossage, piscine).
- Création de micro-bassins de rétention privés, herbacés et plantés avec ou sans eau, au point bas de la parcelle avec un marnage d'au moins 1,50 mètre de hauteur.
- Création de fossés agricoles pour dériver le ruissellement vers les zones de submersion parcellaire (figure 282).

• Transformation des lieux privatifs imperméabilisés en lieu de rétention : terrasses d'agrément-réservoirs et parkings privés avec structure-réservoir

- Reprofilage des terrasses d'agrément permettant une submersion contrôlée de 0,50 mètre de hauteur maximale (photo 283 et figure 284).

• Renforcement des murs de clôture avec aménagement de gargouilles

Le renforcement ou l'entretien de murs de clôture font partie d'une stratégie de rétention urbaine, ou de protection vis-à-vis des écoulements torrentiels sur les voies.
Leur mission est double, retenir l'eau de ruissellement de la parcelle à l'intérieur de la parcelle et protéger la parcelle de l'eau extérieure.
Hauteur de rétention préconisée : 1 à 1,50 mètre avec la mise en place d'évacuateurs servant de surverses de secours et évitant le renversement des murs plus hauts (figures 285 et 286).
Nous avons trouvé beaucoup d'exemples de cette protection comme à Vaison-la-Romaine (photo 287) où le mur de clôture urbain a été surélevé sur une partie, sur 0,50 mètre de moyenne après la crue du 22 septembre 1992.

• Ouvrage d'arrêt installé sur voie d'accès privative à proximité du portail

- Création de caniveaux directionnels installés pour détourner les eaux de l'accès vers le jardin.
- Création de tranchées ouvertes avec caillebotis au portail pour éviter en dernier obstacle que le ruissellement privé n'atteigne la rue (photo 288, figure 289, photo 290, croquis 291).

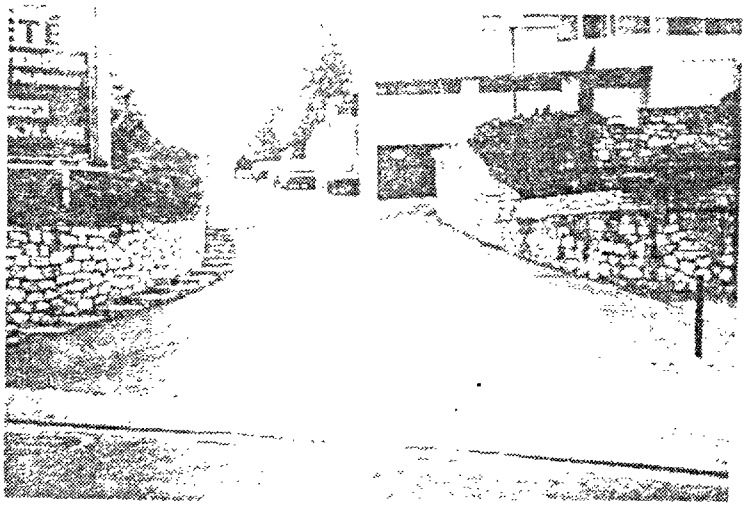


Photo 288-L'aggravation du risque hydrologique par le ruissellement des accès privés de collectifs (Route de Sauve,Nîmes).

.Zones latérales de captage avec dérivations.

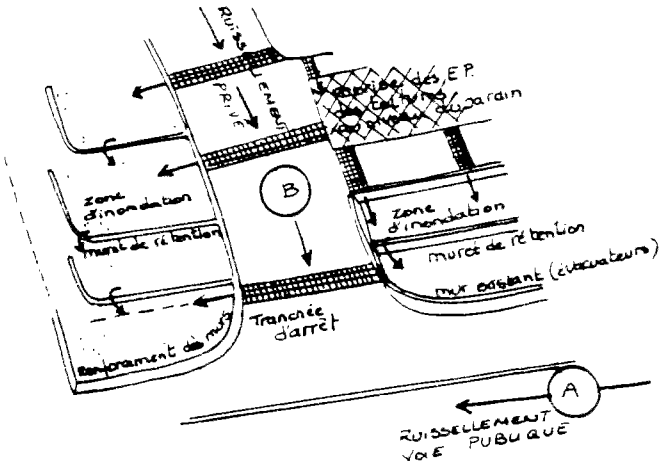


Figure 289- Application propositions de rétention centennale à la parcelle.

Photo 290- Formation du ruissellement par les nouvelles infrastructures publiques (déssertes avec forte pente) et privées (accès à la parcelle).

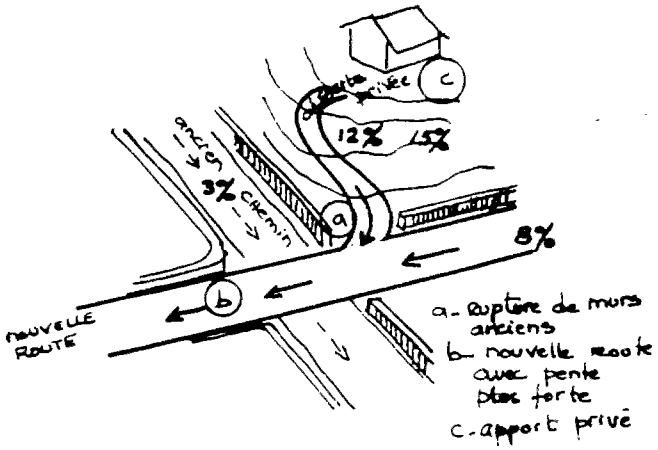
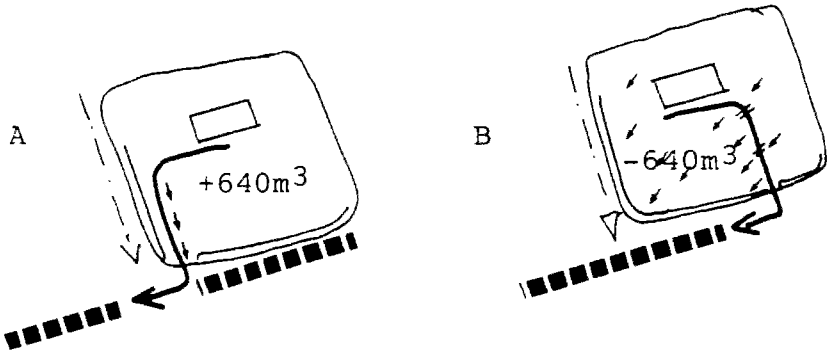


Figure 291-Croquis du lieu(Le Creux de l'Assemblée,Nîmes).



B .Déplacement du portail et des accès
. refermeture des brèches dans les murs anciens.

Croquis 292- Application pour une pluie de 400mm en 6 heures sur une surface de 1.600m^2.

b- Techniques à court terme de protection

- Création de dos d'âne de protection à proximité toujours du portail, pour protéger le jardin privatif et l'habitat des torrents d'eau de l'infrastructure publique.

c- Techniques à long terme pour le piégeage de la crue de 100 ans à la parcelle.

Nous préconisons :

- le déplacement du portail et de la voie d'accès vers le haut de la parcelle, de façon à ce que les eaux de surface de la parcelle ruissellent vers les zones de submersion (croquis 292). Actuellement les portails sont systématiquement installés en partie basse de la parcelle, avec de larges brêches dans les murs de clôtures anciens, ce qui permet à la parcelle de se vider très vite de son ruissellement ;

- la mise en place de structures-réservoirs sous toutes les aires imperméabilisées de la parcelle, sous les aires privatives de stationnement, sous la terrasse d'agrément, sous les aires gravillonnées, etc. (figure 284) ;

- la fermeture des brêches dans les murs de clôture, au point bas de la parcelle (croquis 292).

d- Le regroupement des techniques de lutte au niveau du jardin

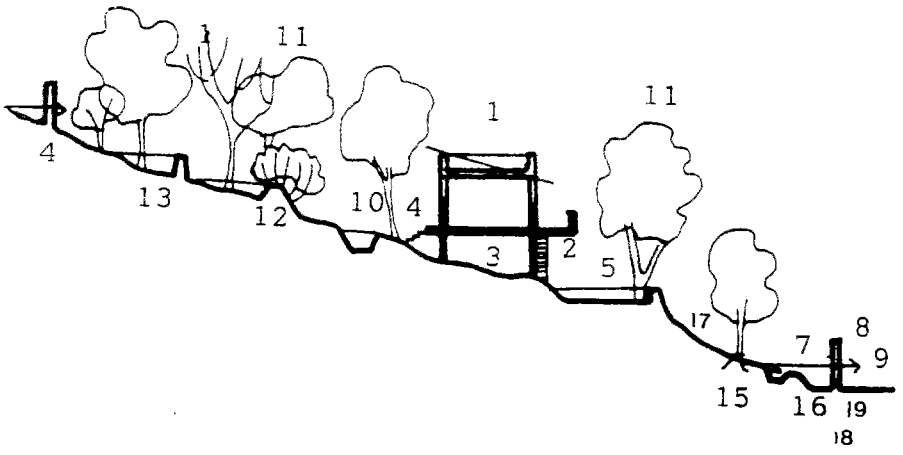
Nous avons regroupé sur la figure 293 les différentes techniques proposées au niveau du jardin. Certaines techniques peuvent faire double emploi de façon à assurer une plus grande sécurité au niveau de la rétention. Ces techniques sont à surveiller dans le temps par les services municipaux pour éviter leur disparition.

• **Défenses actives :**

- techniques de rétention : muret d'arrêt, merlon d'arrêt, mur de clôture d'arrêt,
- techniques de captage : fossé, caniveau, merlon, muret,
- techniques de dérivation : idem,
- techniques de stockage et de déversement: bassin de jardin, bassin de rétention micro-hydrologique,
- techniques de submersion : terrasses d'agrément, parkings privés, murs de clôture de submersion.

• **Défenses passives :**

- les dos d'âne à l'entrée de la parcelle,
- les murs de clôtures qui protégent la parcelle.



1- Toiture-terrasse de rétention
2- cours et terrasse d'agrement traités en impluvium de rétention
3- vide sanitaire ou remblai ou pilotis de protection
4- emmarchements plus seuil de protection
5- zone de captage (parkings de rétention
6- bassin de jardin de rétention
7- zone de déversement micro-hydrologique de rétention
8- mur de clôture de rétention
9- évacuateurs de sécurité
10- fossé de dérivation, rigoles,
11- végétation et évapotranspiration
12- merlon de rétention
13- muret de jardin de rétention
14- mur de clôture de protection
15- tranchée ouverte de rétention sur accès donnant sur voie publique
16- dos d'âne de protection au portail
17- caniveaux de dérivation
18- mur-parapet de protection
19- éléments démontables de protection sur portail ou porte d'entrée...

Figure 293- Le regroupement de différentes techniques de lutte contre le ruissellement centennal au niveau de la parcelle: le jardin-réservoir.

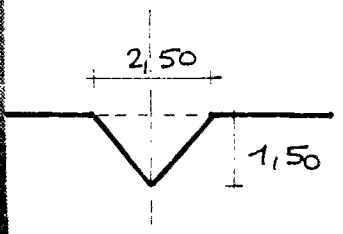


Photo 294 et figure - Fossé agricole en "V" pour le drainage des terres d'aval en plaine inondable. Ce fossé a été surcreusé APRES la catastrophe du 3.10.1988 (Nîmes).

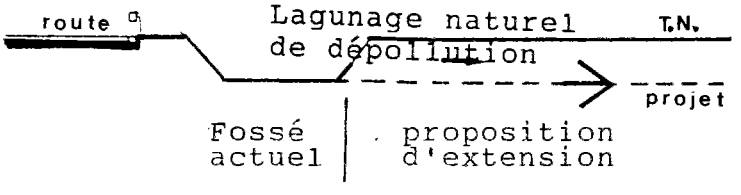


Photo 295 - Le cadereau d'Alès à l'aval de Nîmes.Le cadereau dépollue les eaux pluviales grâce aux plantes spontanées(roseaux...) qui se nourrissent d'éléments riches et nettoient l'eau des hydrocarbures,huile et métaux lourds, aménés par le ruissellement routier.

3.4.3.3. Les techniques de lutte au niveau de l'îlot

Nous disposons de plusieurs techniques pour protéger un regroupement de parcelles :

a- la technique de l'encerclement par des murs de clôtures mitoyens (voir l'étude sur Nîmes, paragraphe 4.3.3.2.) ;

b- la technique du fossé agricole classique en forme de V, sans remblai latéral, où toutes les terres sont évacuées (photo 294) : coût moyen : 265 F/m de section (valeur 1992) ;

c- la technique du fossé agricole plat doublé d'un merlon de protection. C'est la technique la plus appropriée pour la protection en plaine pour s'opposer aux crues centennales (exemple de Caissargues, village à l'aval de Nîmes inondé sur 0,30 mètre lors de la catastrophe du 3 octobre 1988) (photos 296, 297 et croquis 298).

Description de l'ouvrage de lutte (figure 290) :

Fossé à fond plat de 4,00 mètres de largeur, d'une profondeur de 1,00 mètre et doublé d'un merlon de protection d'une hauteur de 1,00 mètre et planté. Le merlon est réalisé avec les terres de déblais du fossé.
La protection de l'îlot est assurée par un accès routier avec un "dos d'âne" prononcé de façon à bloquer l'accès des eaux.
Coût moyen de l'ouvrage de protection : 1 260 F/m de section (valeur 1992).

d- Le fossé agricole de dépollution : action du fossé-réservoir après la crise (photo 295 et figure)

A partir du moment où un ouvrage de rétention peut aussi avoir une fonction de dépollution, nous préconisons au niveau coût de règler différents problèmes (inondations, dépollution, recharge de nappes phréatiques, etc.) par un même ouvrage.

Certains fossés agricoles, en eau sur une faible hauteur de 0,30 mètre, fonctionnent naturellement comme des ouvrages de dépollution pour les eaux pluviales polluées par les chausées (hydrocarbures, huile, métaux lourds, etc.). La dépollution s'effectue grâce à la présence de plantes aquatiques terrestres, flottantes et immergées. Ces fossés naturels sont donc à préserver : le faucardage régulièrement executé, devrait y être interdit. Ils peuvent être développés avec l'extension du fossé en lagunage naturel par l'acquisition des champs limitrophes, pour servir de zone de rétention et de dépollution.

La dépollution des eaux est basée sur le double principe : dépollution par les plantes macrophytes et microphytes et par les rayons solaires germicides (exemples des stations d'épuration écologique de Saintes-Maries-de-la-Mer et de Mèze, cf. DEA de M. GUITON [106]).

3.4.3.4. Les techniques de lutte au niveau de la ville sur le mobilier urbain. La recherche des refuges urbains

La responsabilité du choix du mobilier urbain et de leur emplacement est du ressort des Services des Espaces Verts.

En fonction des facteurs aggravants et limitants que nous avons cités concernant le mobilier urbain et les arbres de ville (paragraphes 3.2.7 et 3.3.3.3.), nous suggérons de revoir l'ensemble du mobilier urbain sous l'angle hydrologique et nous proposons des modifications au niveau des modèles de lampadaires, d'abribus, de bancs, de corbeilles, etc. (figure 299a, b,).

Nous proposons aussi de "conduire" les arbres d'alignement dès la pépinière pour devenir systématiquement des arbres-refuges avec des branches maîtresses basses côté trottoir (figure 300).

Photo 296- Exemple de défense passive du village de Caissargues (Nîmes), ;Fossé plat et merlon de protection.

Photo 297-L'accès au village se fait par un ponceau.

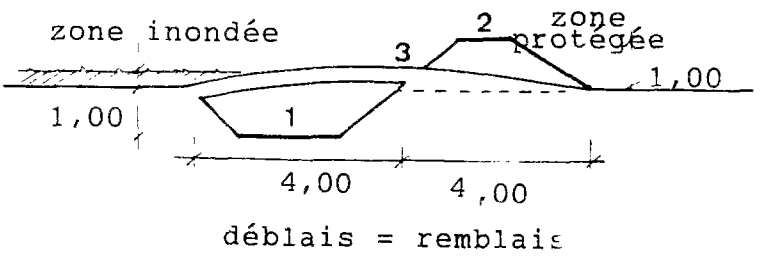


Figure 298- Coupe sur le dispositif de lutte,
1- fossé d'arrêt de la zone inondable,
2- merlon de protection planté
3- ponceau en dos d'âne point vulnérable s'il y a une brèche entre le merlon et le dos d'âne du ponceau.

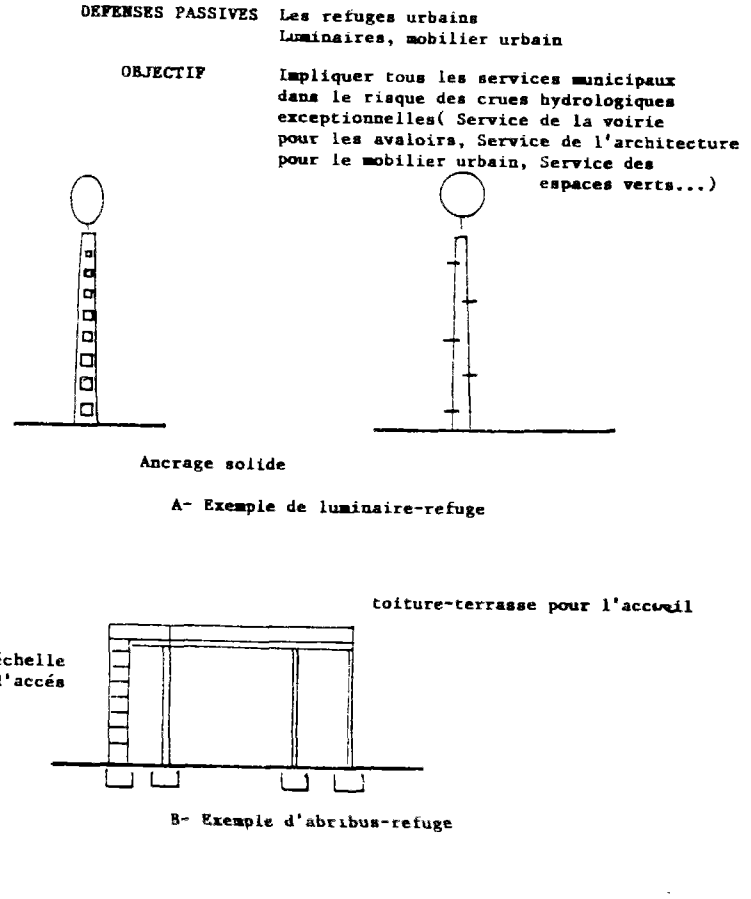


Figure 299- Les refuges urbains hydrologiques dans le mobilier urbain.

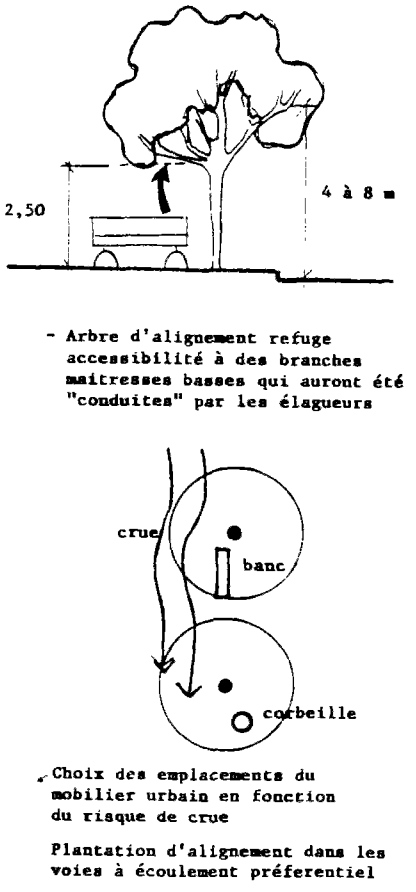
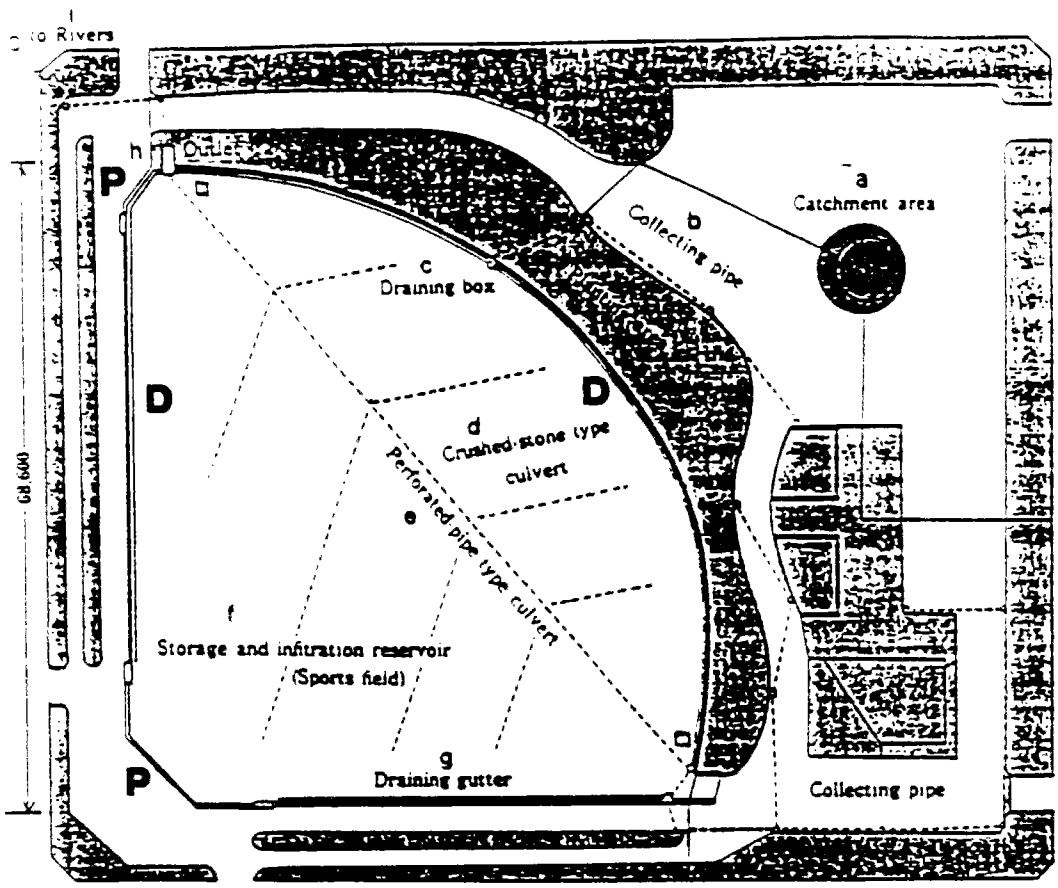


Figure 300- Les refuges hydrologiques dans les arbres d'alignement.

O S A K A - " les espaces ouverts de captation d'eau "
(d'apres la revue [33] ,les surfaces de captage
KAMIKURATSUKURI PARK



FONCTIONNEMENT : Les eaux de ruissellement sont collectées par des impluviums (a), des collecteurs (b), des tranchées drainantes (d) , dans le bassion de rétention (c), puis amenées dans le réservoir d'infiltration et d'orage par des rainures (g) drains et collecteurs perforés(e) -débit de fuite (h) ,exutoire (i) , plantations (j) terrains de sport (f).

Figure 301 - **BASSIN DE RETENTION SEC ET PARC URBAIN**

D **Digues en palplanches métalliques surélevées pour capter les eaux des canalisations d'assainissement qui refoulent**

P **Portes de fermeture en cas de crues exceptionnelles**

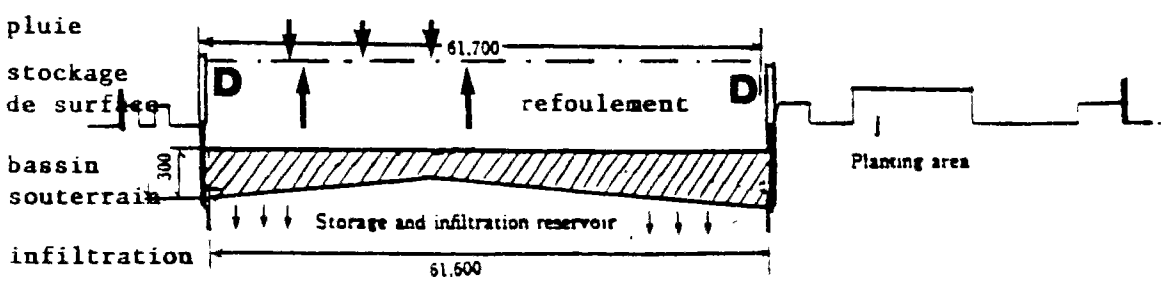


Figure 302 - Coupe sur le parc-réservoir

3.4.3.5. Les techniques de lutte par les grands ouvrages ou aménagement paysagers : mise au point de nouvelles défenses centennales

Certains pays ont mis au point des ouvrages hydrologiques de rétention pour des grandes crues (Japon, Autriche, France, Grande-Bretagne). Nous rappelons ci-après quelques techniques ayant fait leurs preuves.

a- Le parc urbain de rétention (Japon) : les surfaces de déversement et le parc urbain-réservoir

La ville d'Osaka a choisi de transformer ses parcs urbains et terrains de sport en espaces de rétention de grand volume. Exemple du Parc de Kamikuratsukuri : la rétention s'effectue à trois niveaux : au-dessus, au niveau et sous la pelouse centrale de jeux (figure 301).

Les eaux de ruissellement sont collectées par des impluviums, des collecteurs, des tranchées drainantes et ennoyées dans le bassin de rétention souterrain, puis infiltrées sur place.

L'originalité de cet espace de captage est la mise en place d'un mur en palplanches métalliques de 2,00 m de hauteur, tout autour de la pelouse de jeux, avec trois portes qui sont fermées dès refoulement des réseaux d'assainissement qui saturent en cas de crise de type centennal (coupe 302). Ces murs en palplanches métalliques sont curvilignes, afin de mieux résister à la pression de l'eau stockée.

La ville d'Osaka a retenu le principe de la MULTIPLICATION de ces espaces urbains RÉSERVOIRS MIXTES de surface et souterrains pour ne pas être obligée d'augmenter la hauteur des hauts parapets actuels des rivières traversant la ville.

1- Rétention par submersion du terrain de jeux, qui est aussi un bassin de rétention sec de 0,50 mètre de profondeur. Capacité de stockage : 0,50 m^3/m^2 (la crue centennale de type Nîmes est déjà assurée pour sa propre surface).
Coût : 220 F/m^2,
Coût du m^3 stocké : 440 F/m^3 (valeur 1992).

2- Rétention complémentaire souterraine :
Hauteur de la rétention visitable : 2,50 m
Capacité de stockage : 2,50 m^3/m^2
Coût : 5 000 F/m^2, coût du m^3 stocké : 2 000 F/m^3 (valeur 1992).

3- Rétention supplémentaire hors-sol par refoulement
Hauteur de la rétention : 2,00 m
Capacité de stockage : 2 m^3/m^2
Coût : 2 000 F/m d'ouvrage, coût du m^3 stocké : 40 F/m^3 (valeur 1992).

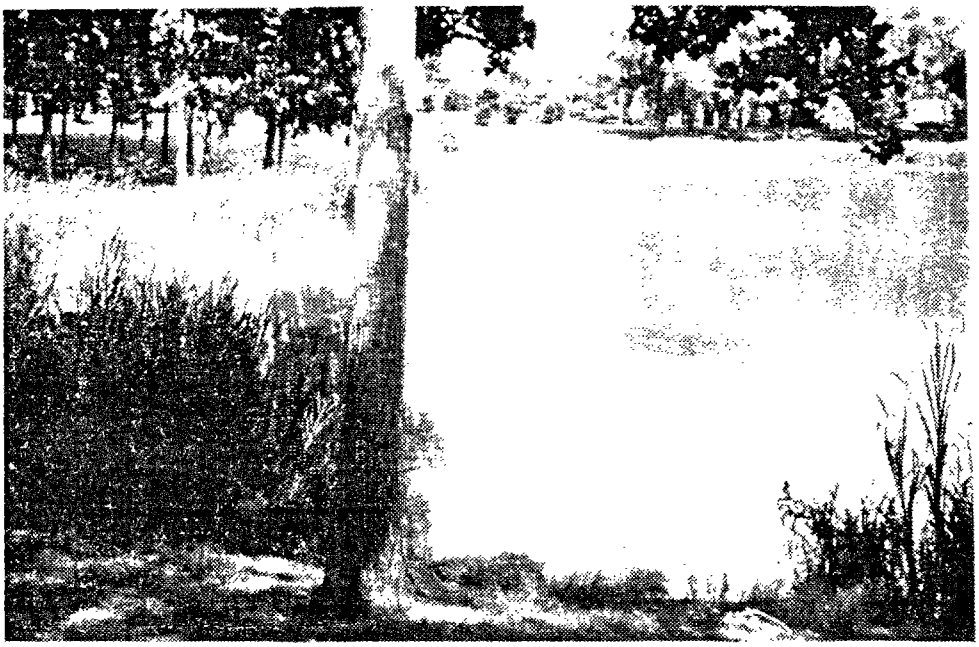


Photo 303-

Bassin de rétention paysager de la Ville-Nouvelle de Melun-Senart.

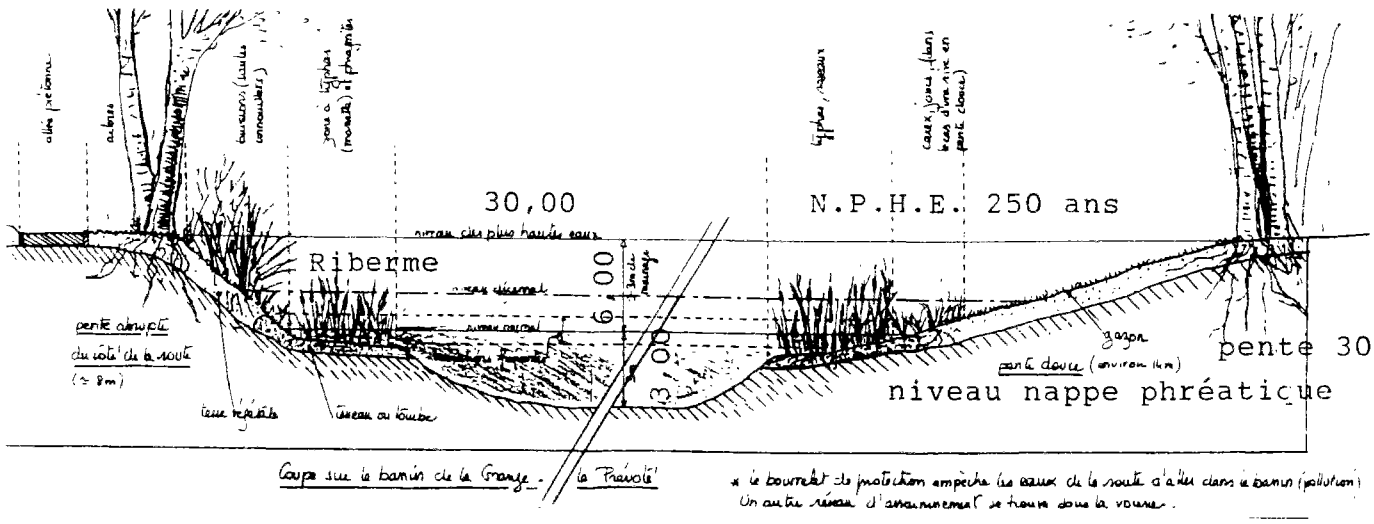
Date de réalisation:1972

. pêche autorisée

Photo 304-

Bassin de rétention architecturé

Date de réalisation:1990 (études et réalisation du bureau Sauveterre M.E. Jacobsen).



Coupe 305- Coupe sur le bassin de la photo 303.
Le bassin est alimenté par la nappe phréatique et le marnage est de 6,00m pour la rétention de crues de 250 ans.

4- Total des capacités de stockage : 5 m^3/m^2.
Pour une surface de 1 ha de parc existant, capacité de stockage de 36 000 m^3/ha.
Coût de l'ouvrage :
36 000 m^3 : 5 m^3 = 7 200 m^2 x 7 220 F = 51 984 000 F soit 51 millions (valeur 1992).
Coût du m3 stocké : 1 444 F/m^3 (valeur 1992).

Pour la France, à Nîmes par exemple, il est donc possible d'appliquer ces techniques aux lieux suivants, en plus des parcs urbains :
- bassin sec avec bassin d'orage souterrain :
    - pour les cours privées d'immeubles,
    - pour les cours d'écoles,
    - pour les cours d'établissements publics (casernes, hôpitaux, pompiers, EDF, etc.).

b- Les bassins de rétention paysagers péri-urbain (France)

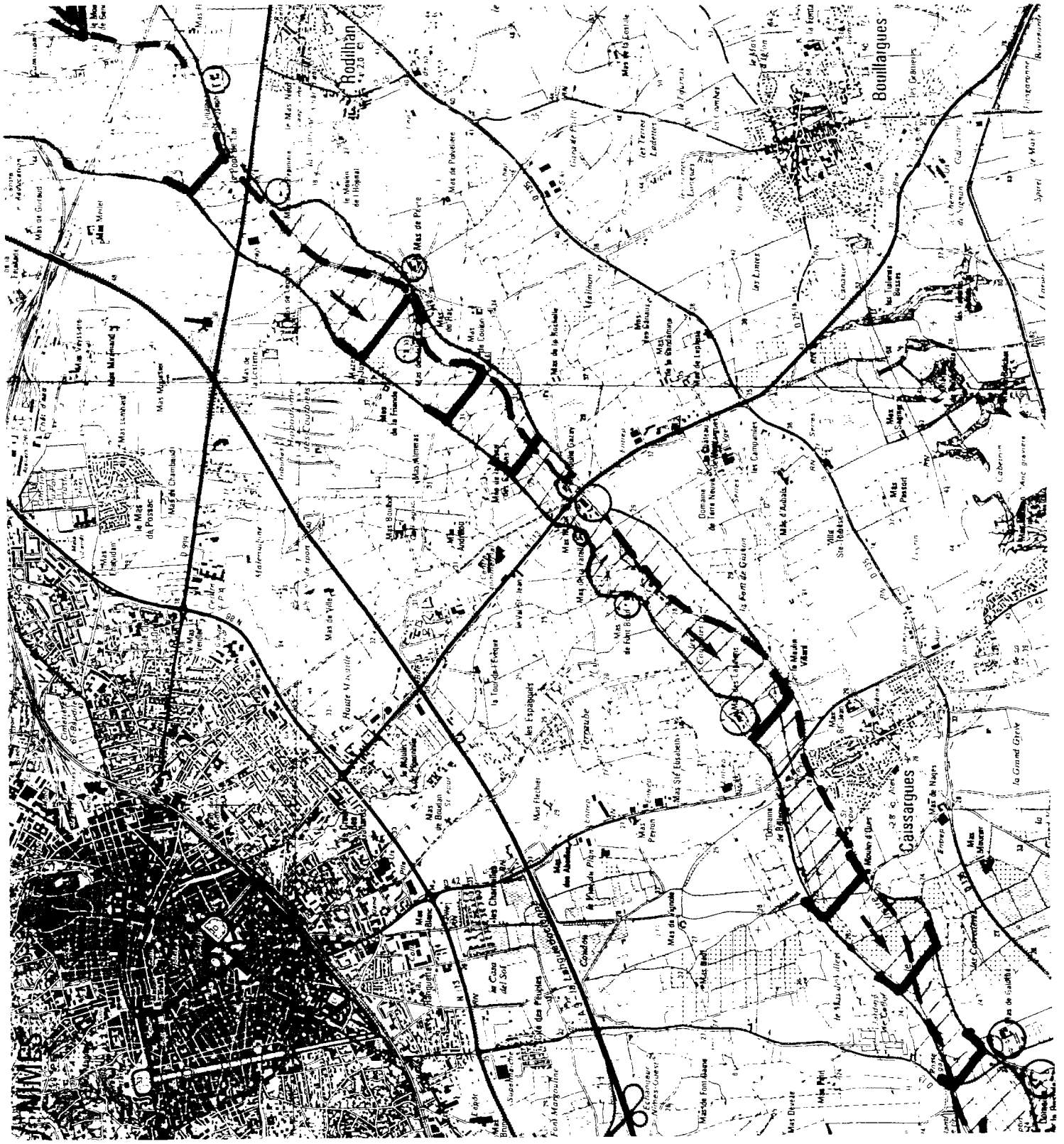
Pour répondre à l'urbanisation de deux bassins-versants agricoles totalisant 11 225 ha, la Ville-Nouvelle de Melun-Senart, comme toutes les autres Villes-Nouvelles, a créé depuis 1972 plus de 20 bassins de rétention aux formes multiples (photos 303 et 304).

Le débit des deux petites rivières d'origine était, à l'occasion d'une pluie d'occurence décennale, de l'ordre de un à deux litres par seconde et par hectare. Avec l'imperméabilisation des sols (toitures et voiries), le ruissellement engendré par la même pluie décennale aurait dû avoir un débit de pointe de 150 à 300 litres/seconde/hectare selon l'ampleur de la surface durcie et le temps de concentration.

Les solutions possibles pour l'évacuation des eaux ruissellées étaient :

- une galerie forée de grande dimension,
- des bassins de retenue permettant de retenir provisoirement l'excédent d'eau ruissellée.

Une comparaison économique entre les deux techniques a fait adopter la solution des bassin, par E. JACOBSEN, Ingénieur ENGREF, Bureau Sauveterre, malgré les préjugés sur l'insalubrité éventuelle de l'eau, les difficultés d'entretien, etc. Cette solution a permis un investissement des travaux d'eaux pluviales pouvant s'étaler dans le temps sur 20 ans au rythme de la création des bassins et de l'évolution de l'urbanisation.



Tracé actuel de la rivière

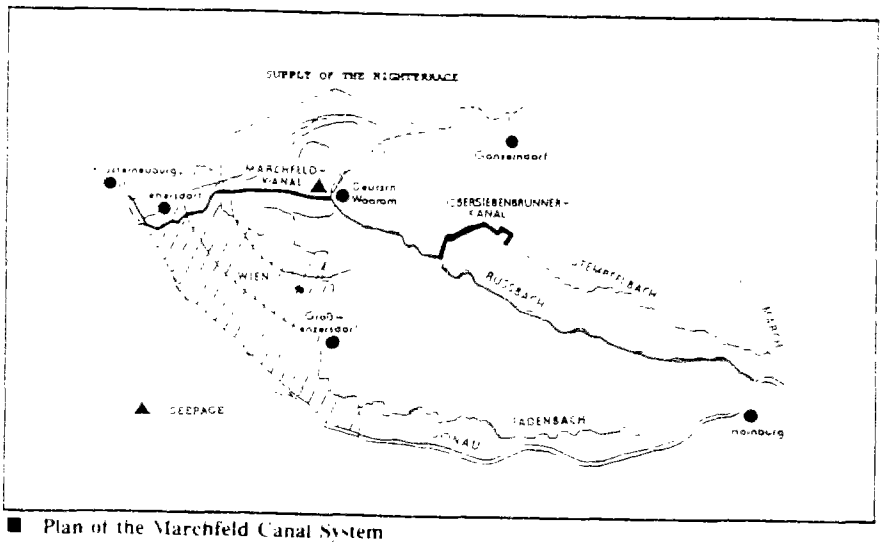
200 m

propositions d'élargissement et de surcreusement du lit

1- avec mini-barrages de rétention multifonctionnels (irrigation , réserves pour incendies...)

2- avec protection de l'habitat existant par endiguement .

Figure 306- Possibilité d'adaptation théorique d'un canal peri-urbain à Nîmes,en zone aval.



■ Plan of the Marchfeld Canal System

Figure 307-a-

Plan de situation

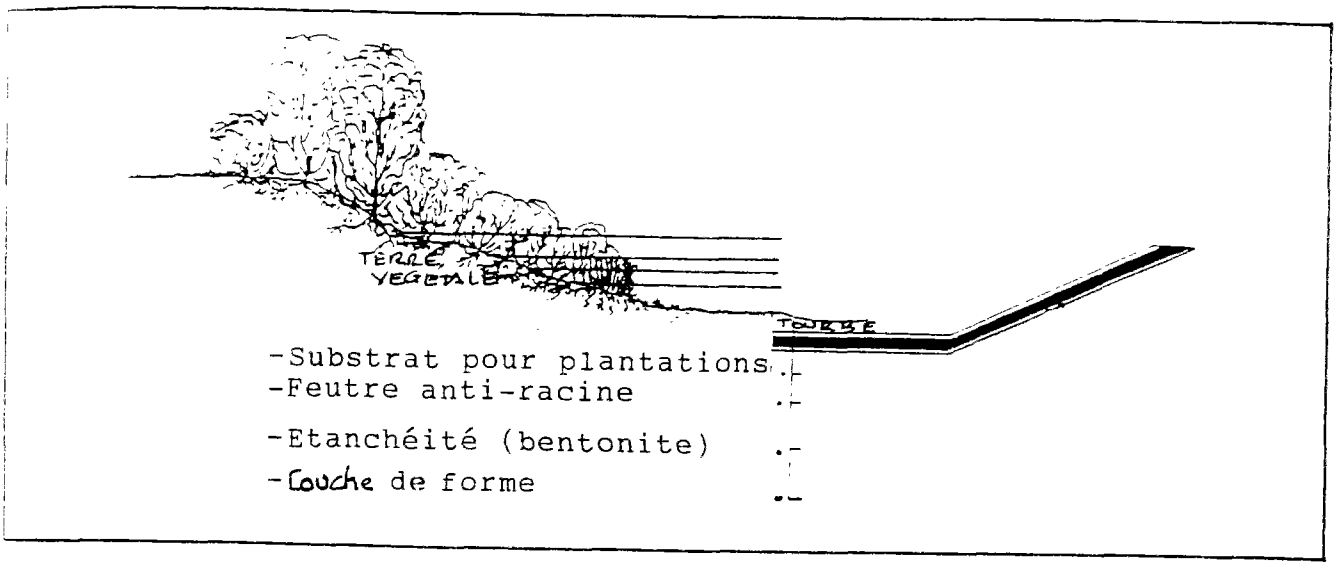


Figure 307-b- Coupe de détail

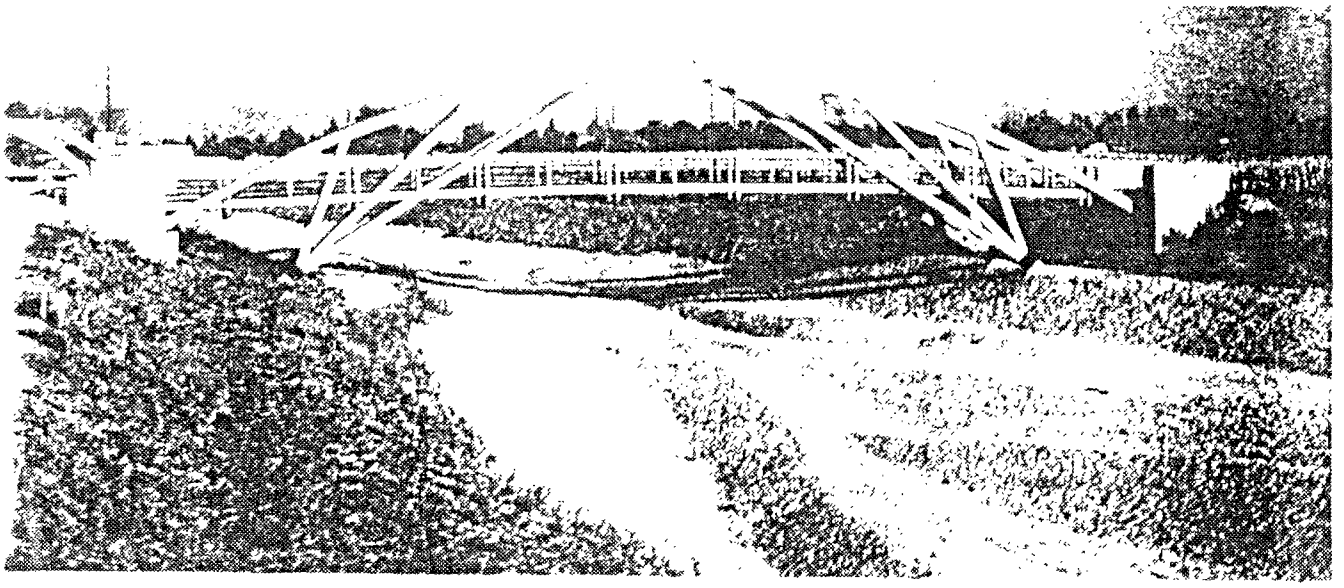


Figure 307 -c- Vu d'ensemble sur le canal péri-urbain réalisé à Vienne (Autriche) (extrait de la revue "Landscape Design" n° 198 ,Mars 1991,pp. 24 à 26)

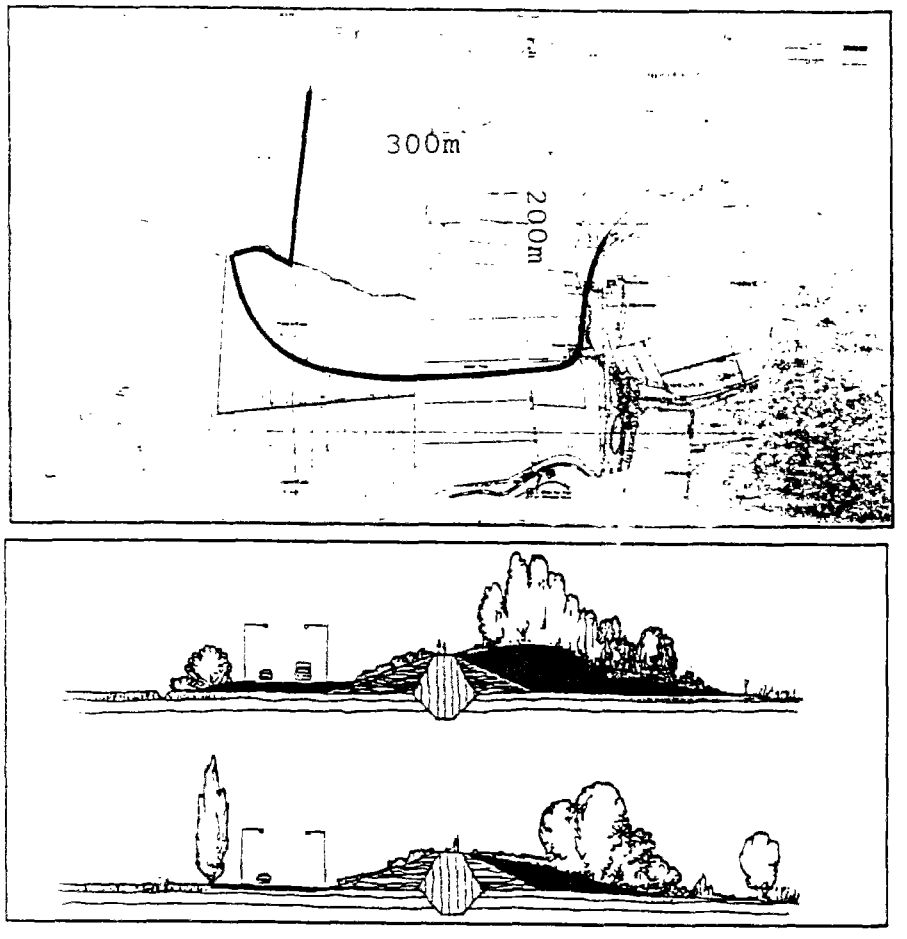


Figure 308- Retenues collinaires:
Nouveaux aménagements pour le piégeage de l'eau de ruissellement en plaine (pente moyenne 2%) à Westmere (Cambridge, G.B.)
(extrait de la revue "Landscape Design" n° 199, avril 1991 , pp. 18 à 20).

Résultat : les bassins peuvent recevoir une pluie d'occurrence de 250 ans, grâce au marnage prévu. L'aspect paysager des bassins est agréable ; ils servent d'espaces verts. Enfin, une épuration des eaux existe du fait de la consommation par les biocénoses des nutrients introduits (présence d'algues, de roselières et de plantes aquatiques flottantes dépuratrices) (coupe 305).

La Ville-Nouvelle de Vitrolles (Bouches du Rhône) a mené le même type d'expériences, avec des bassins de rétention paysagers et multi-fonctionnels (rétention et terrain de football, parcs, piste de vélodrome, etc.).

c- Le canal péri-urbain (Autriche)

La ville de Vienne vient de se construire un canal artificiel péri-urbain pour se protéger contre les inondations (figure 307a, b, c).

La première proposition technique, abandonnée, avait été de construire des endiguements pour protéger Vienne. La solution retenue a été la création d'un large canal reliant deux rivières, et multifonctionnel (luttes contre les crues, irrigation, recharge des nappes phréatiques par infiltration, détente et promenades plantées avec création de zones humides de type sauvage).

Longueur du canal : 3 km
Profondeur : 10 m à 30 mètres
Largeur du canal : 30 m à 200 mètres
Capacité de stockage du canal traité en rivière : 6 ha de surface x 20 m de profondeur moyenne : 1 200 000 m^3/l'ouvrage
Coût approximatif : 84 000 000 F soit 84 millions sans les ouvrages de franchissement (valeur 1992)
Coût du m^3 stocké : 70 F/m^3

Proposition d'adaptation théorique d'un canal péri-urbain à Nîmes en zone aval (figure 306).

d- Les retenues collinaires

La Ville-Nouvelle de Westmere (Angleterre), avec la construction de 3 000 nouvelles habitations en zone agricole, a décidé de faire construire une retenue collinaire sur une zone légèrement déclive (2 %) en y intégrant infrastructure et reboisement (figure 308).

Le principe de la retenue collinaire est basée sur le captage des eaux, ici de ruissellement, par des levées de terre de hauteur variable sur le terrain existant.

Coût du m^3 stocké : 9,33 F/m^3 (valeur 1992).

-A-

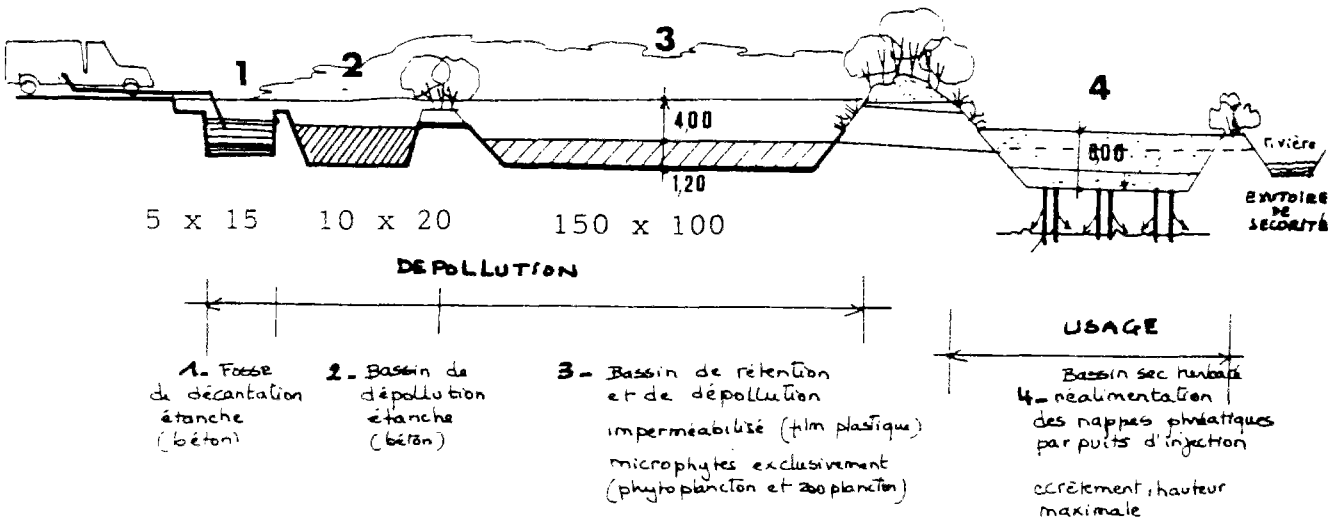


Figure 309 -a- La fonction de dépollution de bassins de rétention paysagers .Le bassin n°3 est étanche et le bassin n°4 est un bassin de réalimentation de nappe phréatique.

-B-

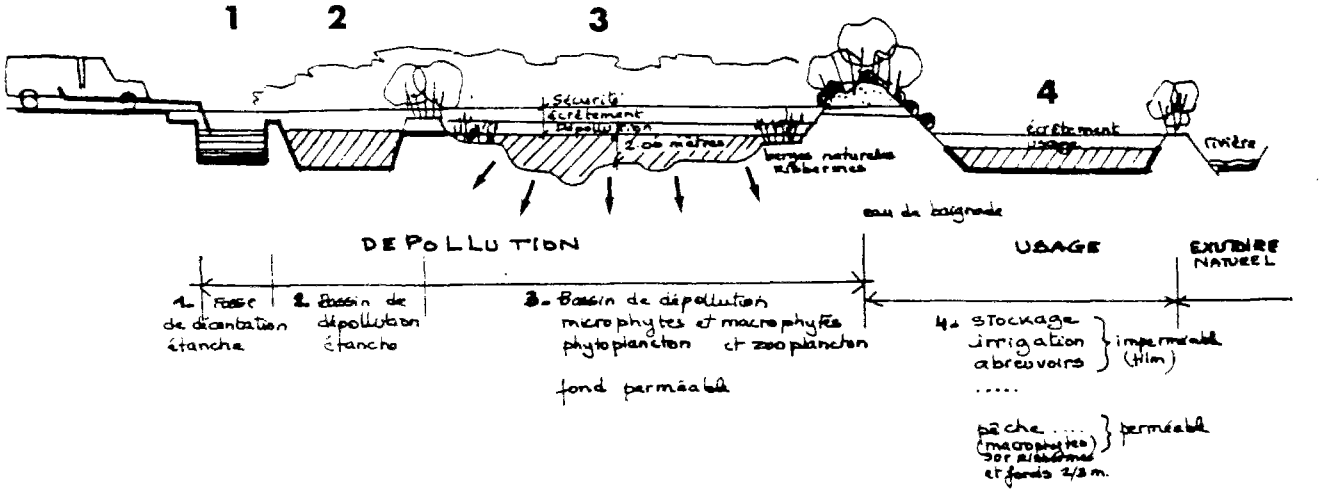


Figure 309 -b- Fonction de dépollution et de rétention mais avec comme variante le bassin n°3 perméable, et le bassin n°4 imperméable , de façon à pouvoir stocker l'eau.

Les retenues collinaires peuvent avoir plusieurs fonctions :
- fonctions d'écrêtement,
- fonction de rétention avec stockage de l'eau pour la lutte contre les feux de forêts (à Nîmes, 6 mois après l'inondation, il n'y avait plus d'eau pendant l'été 1989 pour éteindre les incendies de garrigue).

e- La fonction de dépollution des bassins de rétention paysagers

En nous appuyant sur les expériences de Mèze (Hérault, France), station d'épuration écologique basée sur une dépollution des effluents par des algues microscopiques, par le zooplanction, par les rayons solaires et par des plantes aquatiques flottantes (cf. DEA de M. GUITON [106]), nous proposons de retenir le principe des trois bassins montés en série pour la rétention des eaux de ruissellement et de commencer à engager les mécanismes de dépollution naturelle, en même temps que ceux de la rétention des crues centennales (figure 309a et b).

Premier bassin : fonction de décantation - bassin étanche.
Deuxième bassin : fonction de dépollution - bassin étanche avec les algues microscopiques.
Troisième bassin : fonction de dépollution. Temps de séjour 2 à 3 mois. Soit le bassin est étanche et il n'y a que des microphytes, avec le phytoplancton et le zooplancton. Soit le bassin est perméable et l'on trouve en plus une dépollution avec des macrophytes. L'eau sortante est de qualité "eau de baignade".
Quatrième bassin : le quatrième bassin a une fonction d'usage. Mèze l'utilise pour la reproduction piscicole. On peut l'utiliser pour la réalimentation des nappes phréatiques, ou l'irrigation ou la pêche, etc.
Coût du m^3 stocké : 57,24 F/m^3 (valeur 1992).

Figure 310- Ouvrage maçonné de laminage de crue ; seuils en pierres séches (ravin d'Areste Alpes de Haute Provence,Le Moniteur décembre 1986)Service R.T.M.

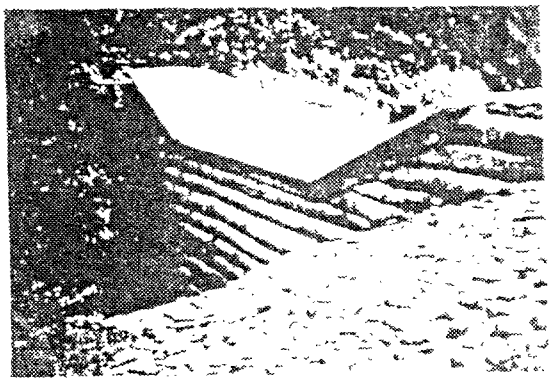


Figure 311- Ouvrage en terre renforcée de nappes géotextiles (extrait J.C.Piguet [128]).

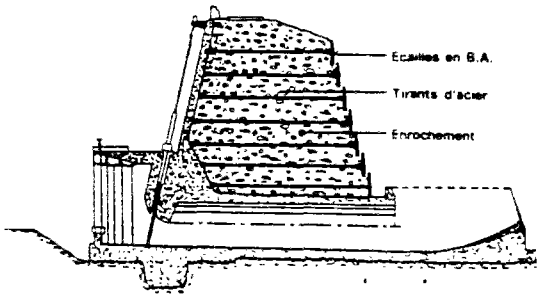


Figure 312-Ouvrage de laminage avec écailles en béton armé maintenant les parements par des tirants. [128].

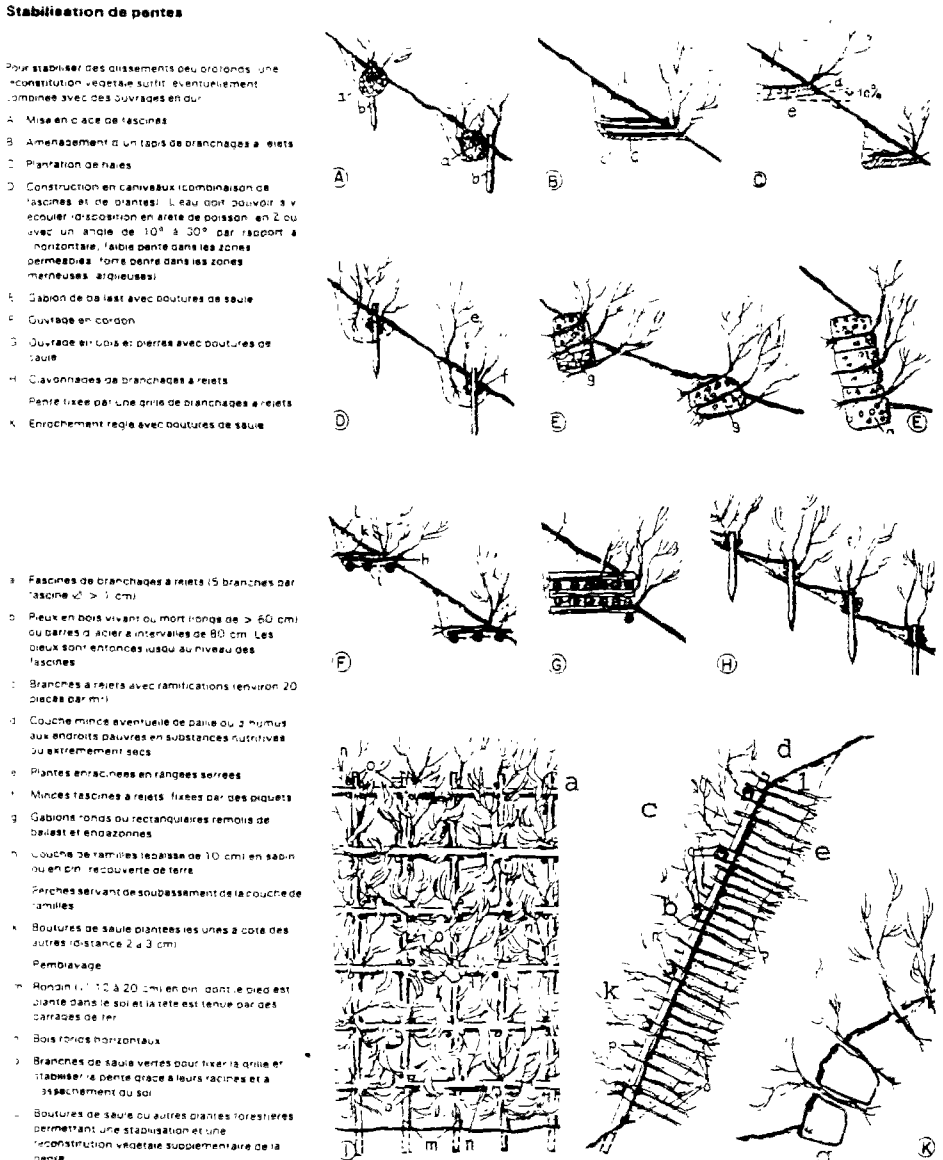


Figure 313-

Stabilisation des pentes par le reboisement contre le ruissellement. (extrait des Directives helvétiques de 1982 [221]).

3.4.3.6. La gestion hydrologique des grands paysages

a- Le service R.T.M.

Le service de Restauration des Terrains en Montagne (R.T.M.), créé au siècle dernier pour contrecarrer le déboisement excessif des montagnes françaises, a acquis des techniques de ralentissement du ruissellement et de contrôle des torrents.

Les principales techniques adaptées aux crues centennales sont :

- les ouvrages de laminage micro-hydrologiques installés dans les ravins, mini-barrages en série tous les 10 à 20 mètres par exemple, construits avec les matériaux locaux (gabions de pierres, seuils en bois, etc.) (photos 310, 311 et 312) ;
- le reboisement systématique des pentes désertiques montagneuses, des alpages abandonnés, etc. (figure 313) ;
- la création de banquettes pour ces reboisements ;
- la gestion des ouvrages construits, en particulier, la gestion du drainage en montagne et du contrôle des crues.

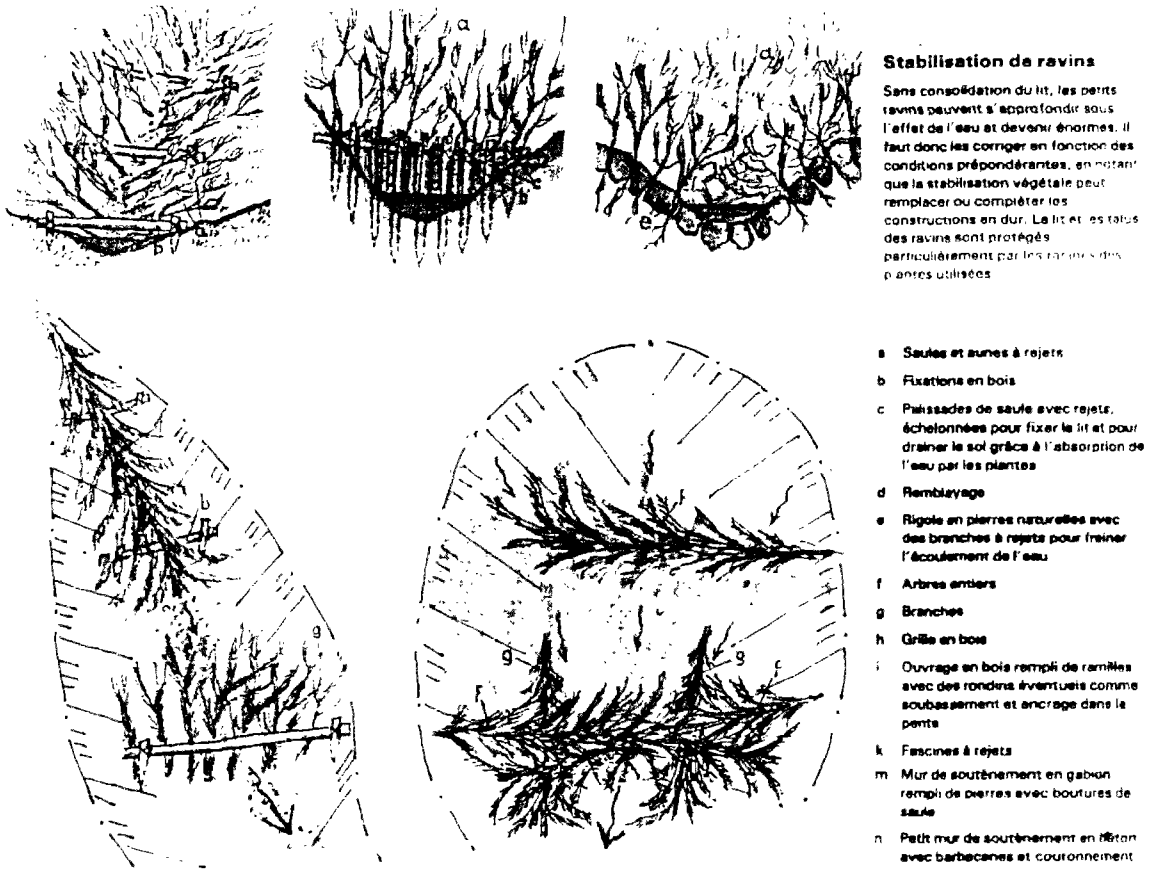
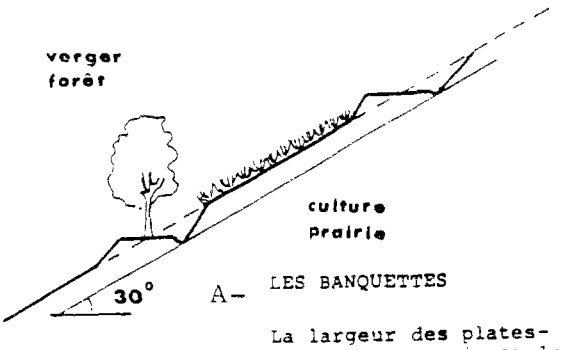
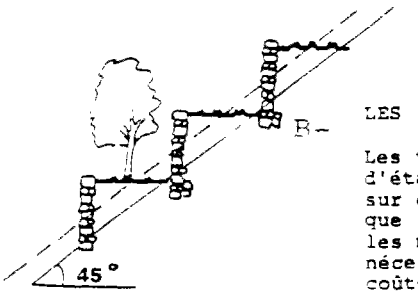


Figure 314 : Plantation des ravins ou dépôt d'arbre entier, ces deux techniques ayant fonction d'ouvrage de laminage (extrait des Directives Helvétiques [221])



A- LES BANQUETTES

La largeur des plates-formes varie suivant la pente et l'épaisseur du bon sol.



B- LES TERRASSES

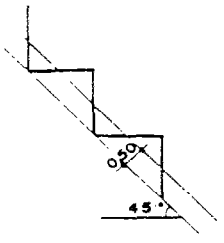
Les terrasses permettent d'établir des plates-formes sur des pentes plus raides que les banquettes ,et ont les mêmes avantages, mais nécessitent des ouvrages coûteux.

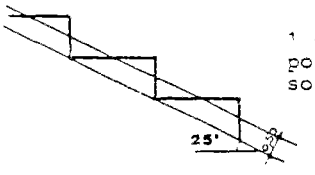
Les banquettes et terrasses servent à interrompre le ruissellement , à retenir l'eau et les terres , et permettent des productions agricoles et forestières (DRS - défense et restauration des sols dans l'Afrique du Nord).

Figure 315- Les moyens de lutte contre le ruissellement sur des terrains en pente; captage des crues centennales avec quelques modifications des faîtages des terrasses de culture.

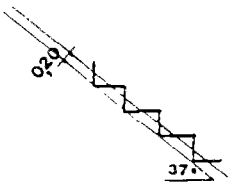
A-PROFILS TYPES DE BANQUETTES

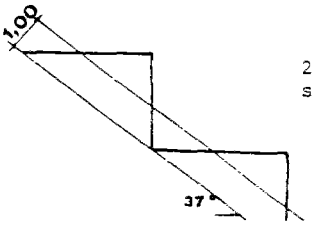
Les décisions d'aménagements de banquette varient d'après les facteurs physiques suivants :





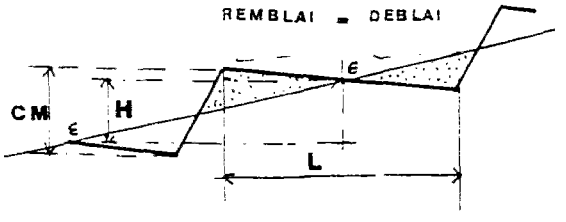
1 - D'après la pente du terrai pour une même épaisseur de bon sol.





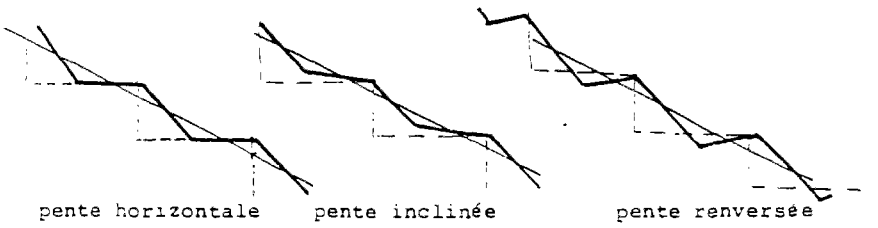
2 - D'après l'épaisseur du bc sol pour une pente identique.

B DEFINITION DE LA CONTRE-MARCHE



3- Profil type d'une banquette calculée pour la crue centennale.

C-CHOIX DE LA PENTE DE LA PLATE-FORME (d'après les schémas de N.Hudson).

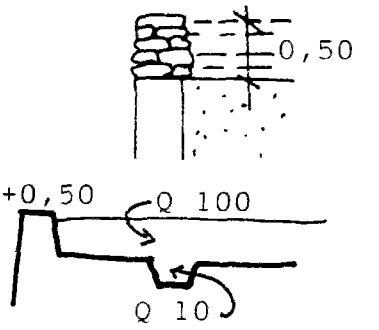


L'inclinaison de la plate-forme varie suivant les facteurs de production,la résistance du sol au ruissellement(l'érodabilité) et les facteurs climatiques(intensité et durée des pluies).

Figure 316-

Profils types de banquettes (extrait N.Hudson [120]).

TERRASSE-RESERVOIR



Le rehaussement des murs des terrasses existantes.

Bien que réduit actuellement à environ 90 personnes[1] réparties sur dix centres, au lieu de 2 000 personnes au début du siècle, ces agents du Ministère de l'Agriculture devraient être aussi affectés à l'aménagement des talwegs et ruisseaux des zones péri-urbaines des villages et villes adossées à un relief collinaire ou montagnard, de par leur longue expérience de terrain sur la gestion des torrents en montagne.

L'ensemble de ces techniques sont des techniques de génie-civil (barrage, plage de dépôt, digue, ...), mais aussi des techniques de génie biologique (clayonnage, reboisement en courbe de niveau, banquettes grillagées végétalisées, seuils grillagés, seuils végétalisés, etc.) (figure 314).

b- Les terrasses et banquettes de moyenne montagne

Historiquement, pour des pentes comprises entre 12 % (7°) et 36 % (20°), le remodelage du sol se faisait par TERRASSES, pour trois motifs : interrompre le ruissellement, maintenir les terres en place et convertir une pente raide en surfaces d'exploitation agricole (paysages de terrasses de R. AMBROISE, P. FRAPA et S. GIORGIS [50]).

Ces techniques, avec les techniques des BANQUETTES, sont des techniques qui répondent au captage et stockage des crues de 100 ans, si elles sont complétées par :
- un rehaussement des murs de soutènement en murets d'arrêt de 0,50 mètre de hauteur pour les terrasses (figure 315),
- l'inversion de la pente des marches pour les banquettes (figure 316).

UNE INCONNUE, L'IMPACT DE LA DÉPRISE AGRICOLE : la déprise agricole actuelle fait peser une grande incertitude sur l'entretien et la conservation de milliers de kilomètres de terrasses de culture (Cévennes, Alpes du Sud, Alsace, etc.). En cas d'abandon, il est à prévoir d'ici une décennie une très grande modification des données hydrologiques pour beaucoup de villes en aval de ces ouvrages.

c- Reboisement, haies bocagères et levées de terre

Les haies bocagères par le besoin total en eau d'une plante, variable d'une plante à l'autre, apportent une solution au ruissellement, au même titre qu'un reboisement forestier. Le REBOCAGEMENT et le REBOISEMENT sont aussi efficaces au niveau de la rétention du ruissellement qu'un ouvrage hydraulique (figures 317 et 318).

Selon M.A. PONCET [163] reboiser 1 000 ha, soit 10 km^2, coûte moins cher que construire des ouvrages maçonnés pour le même pouvoir de rétention, ouvrages qui peuvent de plus être détériorés ou envasés par le ruissellement.

---

[1] 67 personnes techniques en 1993

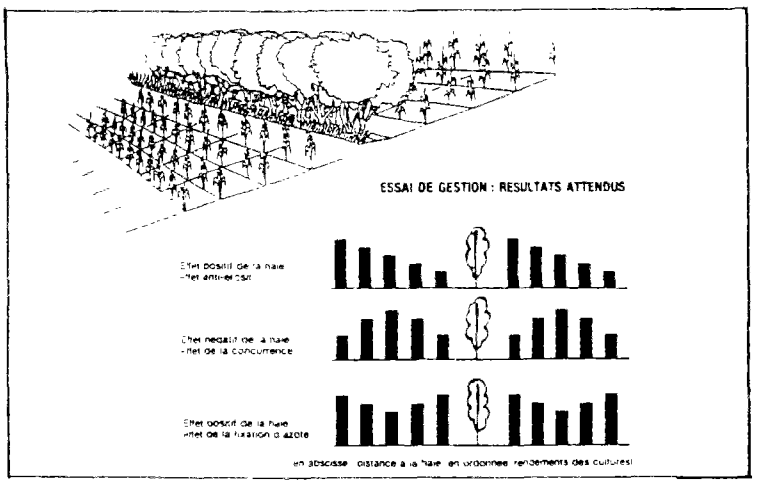


Figure 317- Effets d'un rebocagement sur le ruissellement avec effet secondaire anti-érosif (extrait de la Revue Forestière 1-1991 F.Besse,PH.Guizol, A·de Ligné)

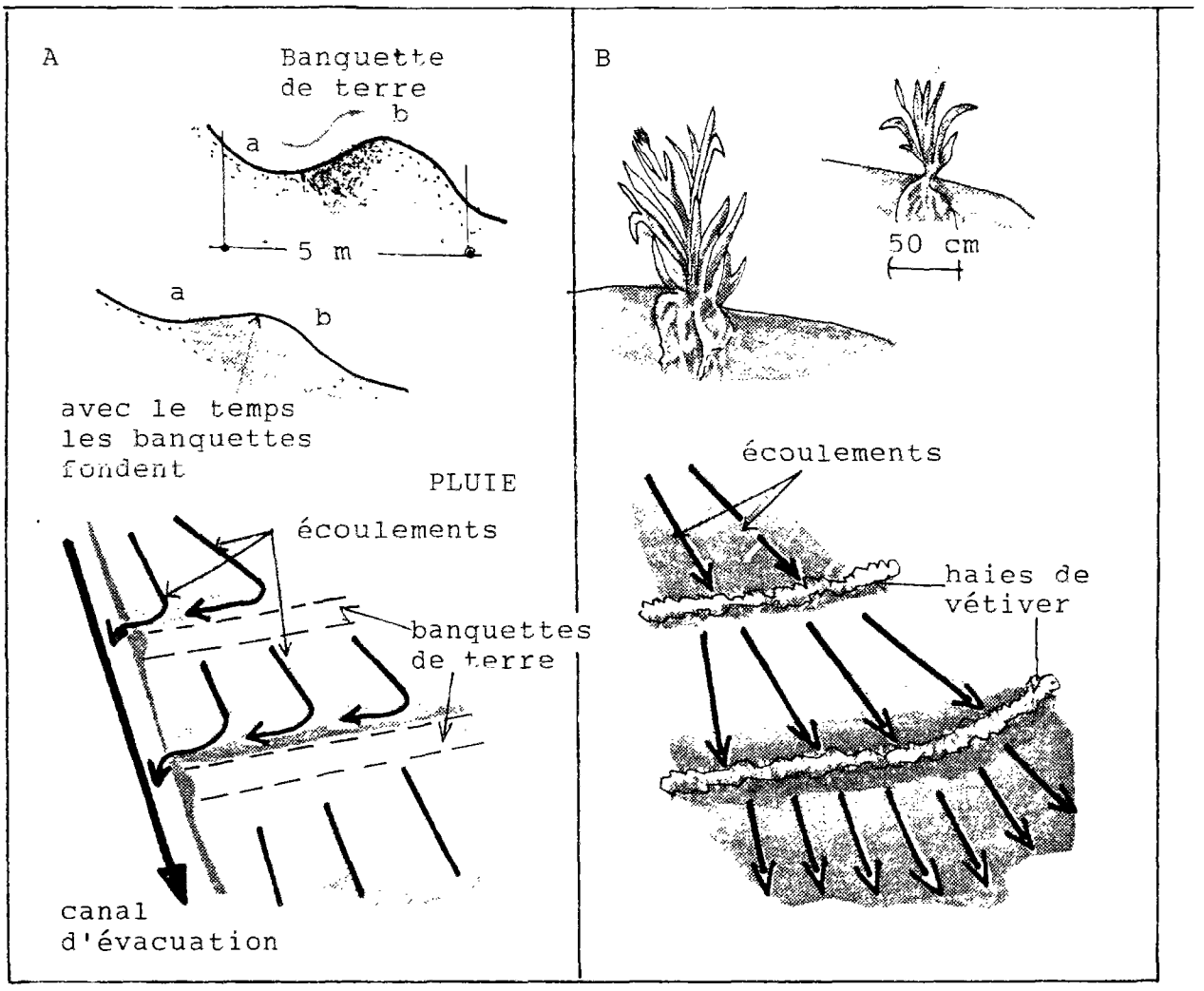


Figure 318- Effet d'un rebocagement permettant la gestion du ruissellement (extrait de'La Recherche"n°216 décembre 1989 ,M.Gutelman [109]).

L'extension des techniques de haies bocagères et levées de terre en milieu péri-urbain, pavillonnaire, permettrait d'envisager la gestion du ruissellement centennal à l'échelle de la parcelle. En particulier, les levées de terre en quadrillage, clôturant les parcelles d'un nouveau lotissement avec des haies bocagères, sont un moyen mécanique de circonvenir ce type de crue (exemple d'ennoiement programmé de prairies d'épandage paragraphe 3.1.3.1.c3) (photos 108 et 109).

3.4.3.7. L'aménagement spécifique des campings

Les campings ont la caractéristique en France d'être pour leur plus grand majorité des campings municipaux donc publics.

Plusieurs solutions de lutte se sont présentées après la catastrophe du Grand-Bornand et après celle de Vaison-la-Romaine:

- surélever les campings : c'est oublier que celui de Vaison-la-Romaine bien que surélevé, a été balayé ;
- interdire les campings en bordure de rivière : c'est avoir le risque d'un camping sauvage non contrôlé, vu l'attractivité des lieux, et donc encore plus dangereux ;
- fermer les campings à partir du 1er septembre : c'est oublier que la catastrophe du Grand-Bornand est arrivée le 14 juillet, et que la pression touristique est encore très forte en septembre.

Etude d'un camping type (exemples pris sur les campings de l'Ariège, Tarascon-sur-Ariège, le Mas d'Azil, ...)

Le camping est implanté en zone inondable, avec un important endiguement pour le protéger (figure 319) mais il y a une BRECHE à l'amont du camping par où les eaux d'une crue peuvent s'engouffrer en ennoyant d'un seul coup le camping, et en piégeant les campeurs réfugiés sur l'endiguement de protection devenu un ilôt.

Des propositions ?

Proposer des solutions pour les campings présente des difficultés, des incertitudes sur la réussite des procédés, qui varient en fonction de chaque terrain.
Les techniques que nous préconisons sont :
- le choix de sites limitant le risque, avec la recherche d'implantation des tentes et caravanes sur un terrain dénivellé contigu, par exemple 2 ou 3 mètres au-dessus de la première zone inondable où se trouvent les activités,
- des techniques favorisant l'évacuation,
- des techniques ne favorisant pas de faux refuge, comme les digues latérales de protection le long des petites rivières.

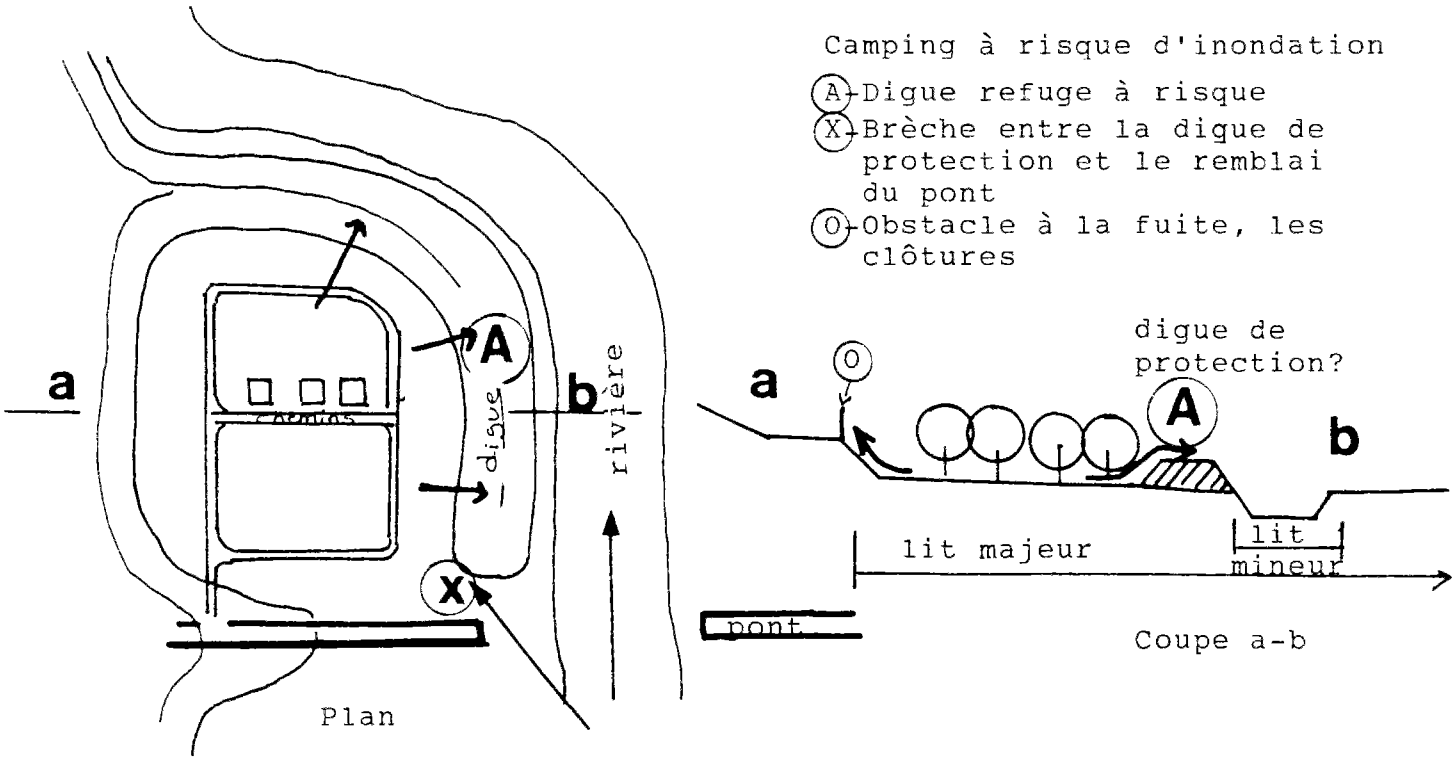


Figure 319- Etat des lieux d'un camping municipal implanté dans un lit majeur avec digue de protection de 2,00 mètres de hauteur, mais submersible.

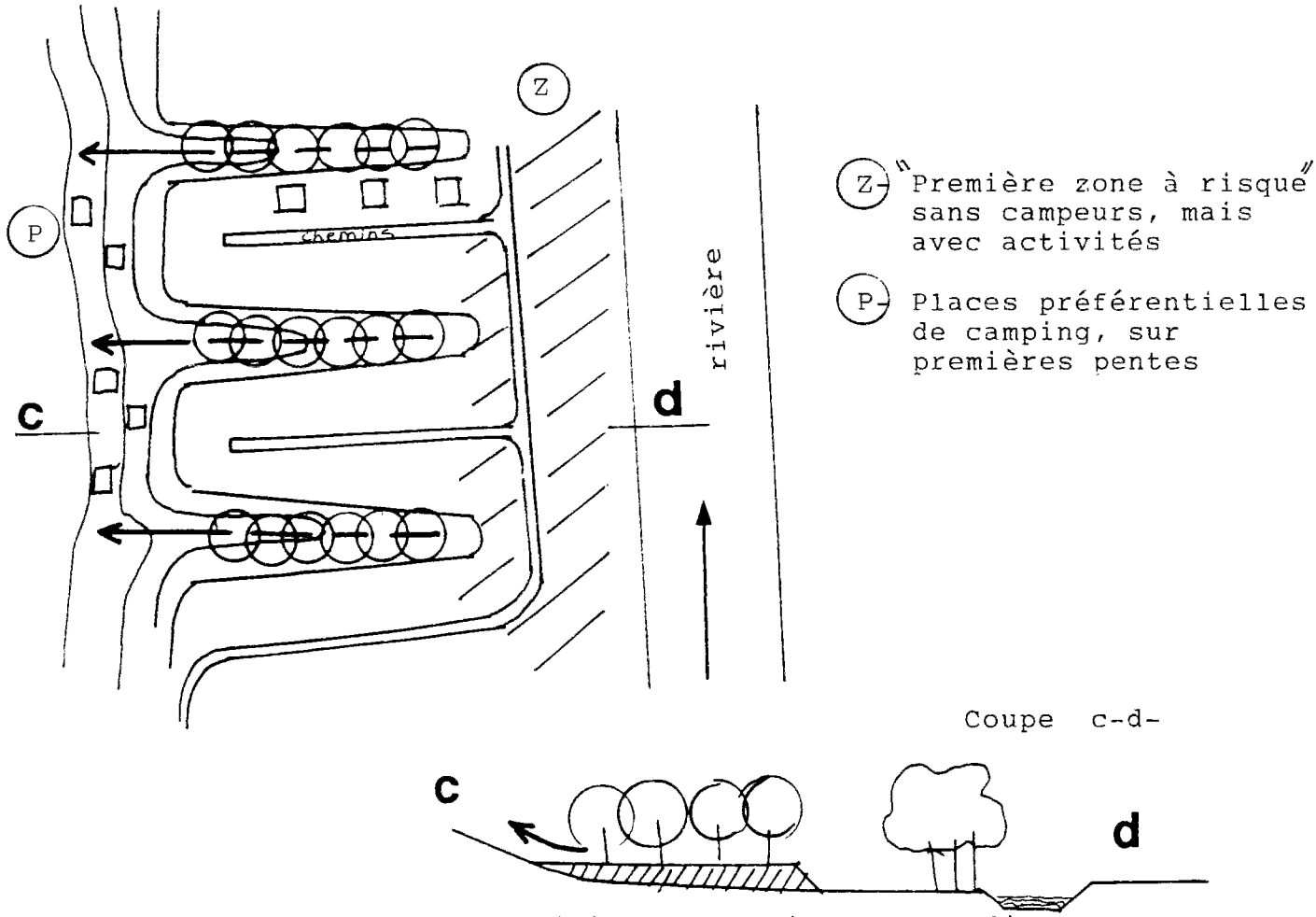


Figure 320- Propositions : camping avec endiguements de secours perpendiculaires à la rivière,pour la fuite.

Pour le camping cité, il nous semblerait préférable de (figure 320) :

- créer des endiguements perpendiculaires à la rivière, en forme de doigts, formant épis et raccordés à la colline,
- fermer les brêches existantes dans les protections, mais avec l'interdiction de dormir au-dessus,
- construire les services sur deux étages,
- installer des sirènes autonomes d'évacuation,
- afficher des plans d'évacuation trilingues dans le camping avec les issues de secours correspondant dans les clôtures,
- séparer les zones de parkings et les zones de campings déclives,
- implanter un mirador-refuge type ONF, comme refuge et symbole du risque,
- rendre obligatoire la présence d'un gardien de nuit, de nombreux campings n'étant pas gardiennés la nuit, et parfois pas non plus le jour (exemple de la vallé de La Roya, etc.).

3.4.3.8. Conclusion

Pour les espaces verts et paysages, nous retenons qu'une grande potentialité de rétention, non encore pratiquée, existe aussi bien à l'échelle de la parcelle qu'à l'échelle de l'arrière pays, mais qu'il faut prévoir des aménagements favorables à la non-formation du ruissellement risque majeur, plutôt que des aménagement favorisant ce risque, tels que les vignobles, le domaine skiable, le busage et le recouvrement des ravins, etc.

3.4.4. Des techniques de lutte urbaine en infrastructure voirie publique

Les problèmes soulevés par le stationnement et les évènements pluvieux exceptionnels sont de plus en plus fréquents et coûteux. Il devient pour cette raison indispensable de déterminer :

- comment éviter les embâcles de voitures, comment éviter que les voitures ne partent à la dérive, comment stocker les véhicules, quitte à accepter leur ennoyement ;
- comment éviter que les grandes surfaces imperméabilisées de parkings n'augmentent les volumes d'eau de ruissellement ;
- comment éviter que les revêtements de parkings ne partent aussi à la dérive.

Nous aborderons nos propositions sous deux angles :

- DES PROPOSITIONS A COURT TERME

  - Des propositions pour le stationnement,
  - Des propositions pour la circulation,
  - Des propositions pour le réaménagement des parkings publics existants ;

- DES PROPOSITIONS A LONG TERME

  - Les voies d'écoulement préférentiel,
  - Les voies de délestage hydrologique,
  - Les voies préservées,
  - Les voies de dérivation,
  - Les revêtements de chaussée,
  - Les structures-réservoirs,
  - Les grands ouvrages souterrains (pour mémoire).

3.4.4.1. Des propositions à court terme

En fonction des observations de détériorations relevées dans le paragraphe précédent, nous avons élaboré une série de propositions répondant au problème du ruissellement exceptionnel et du stationnement en milieu urbain, et qui sont des propositions à très court terme (1 à 2 ans), avec un coût minimum d'investissement.

Réglementations permanentes :

Nous avons travaillé sur le principe de réglementations permanentes et non pas de réglementations pour les périodes à risques, beacoup trop aléatoires en fonction des dates des catastrophes étudiées (juin, juillet, septembre, octobre) qui sont donc arrivées pendant tout l'été, sachant que la formation de nuages à risques, les cumulo-nimbus, peut s'étaler sur toute l'année.

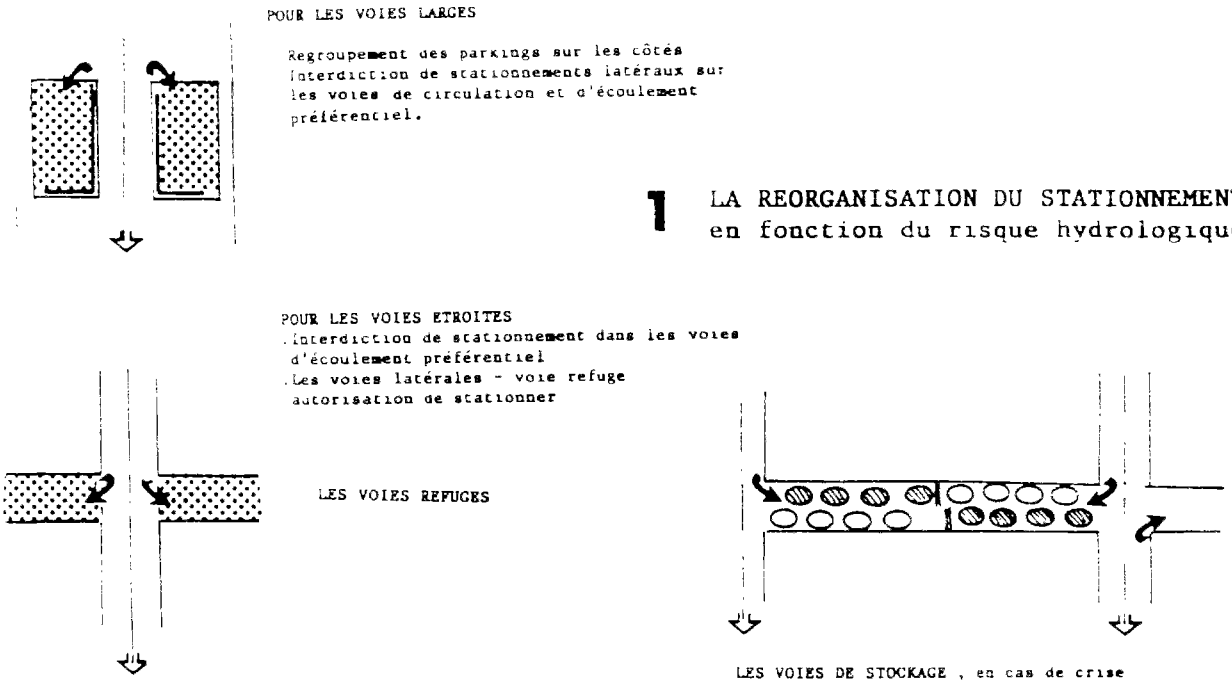


Figure 321- Les propositions à court terme pour la voirie publique.

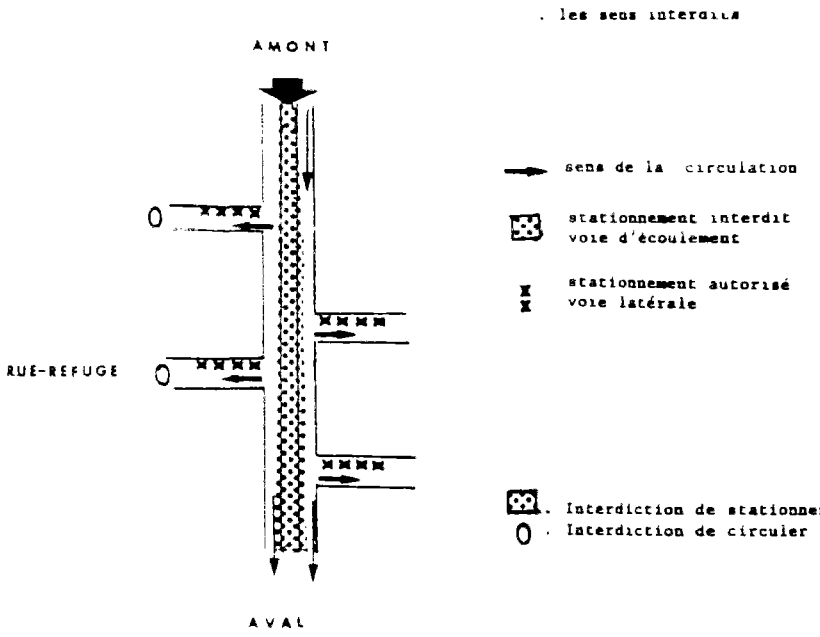


Figure 322- Les voies-refuges les voies de stockage.

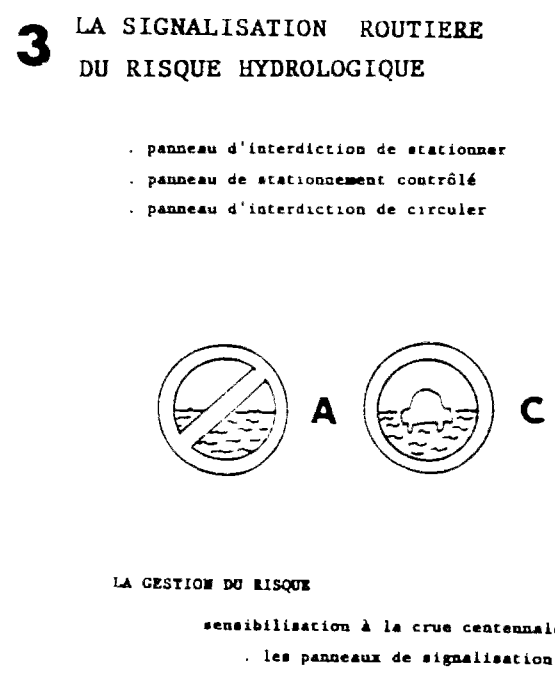


Figure 323- Signalisation routière.

3.4.4.1.1. La réglementation du stationnement en fonction du risque hydrologique (figure 321)

a- Stationnement interdit :

• Interdiction de stationner dans l'axe des voies à écoulement préférentiel, correspondant aux anciens tracés des rivières intra-muros

b- Stationnement contrôlé :

• Regroupement des véhicules sur les côtés des grandes artères avec piégeage des véhicules grâce à la mise en place de BALUSTRADES URBAINES ANTI-EMBACLES.

c- Stationnement autorisé :

• Autorisation de stationner dans les voies latérales perpendiculaires à l'écoulement préférentiel de surface :

- création **de voies refuges** : à stationnement journalier correspondant aux voies à faible courant ;
- création **de voies de stockage** : en cas de crise ;
- création **de cloisonnement** de certaines voies avec interdiction de circuler, pour renforcer le principe des voies de stockage et éviter le risque de déboucher dans une autre artère à écoulement préférentiel et courants violents.

3.4.4.1.2. La réglementation de la circulation (figure 322)

La prise en compte du facteur du risque hydrologique entraîne :

- la modification du SENS de la circulation de l'amont vers l'aval,
- des sens uniques et des sens interdits.

3.4.4.1.3. La signalisation routière (figure 323)

Trois panneaux sont à créer :

- panneau d'interdiction de stationner en fonction du risque hydrologique,
- panneau de stationnement contrôlé, avec risque d'ennoyement,
- panneau d'interdiction de circuler.

Coût : 1 000 F l'unité.

3.4.4.1.4. Propositions de refonte de la circulation et du stationnement à Nîmes

a- Cas d'application : le cadereau d'Alès intra-muros : (plan figure 324)

- Les voies à écoulement préférentiel.
- Les voies refuges.
- Les voies de stockage.

EXEMPLE DE NIMES - LE CADEREAU D'ALES INTRA-MUROS

ORGANISATION DE LA CIRCULATION ET DU STATIONNEMENT
face au risque hydrologique d'inondation par ruissellement

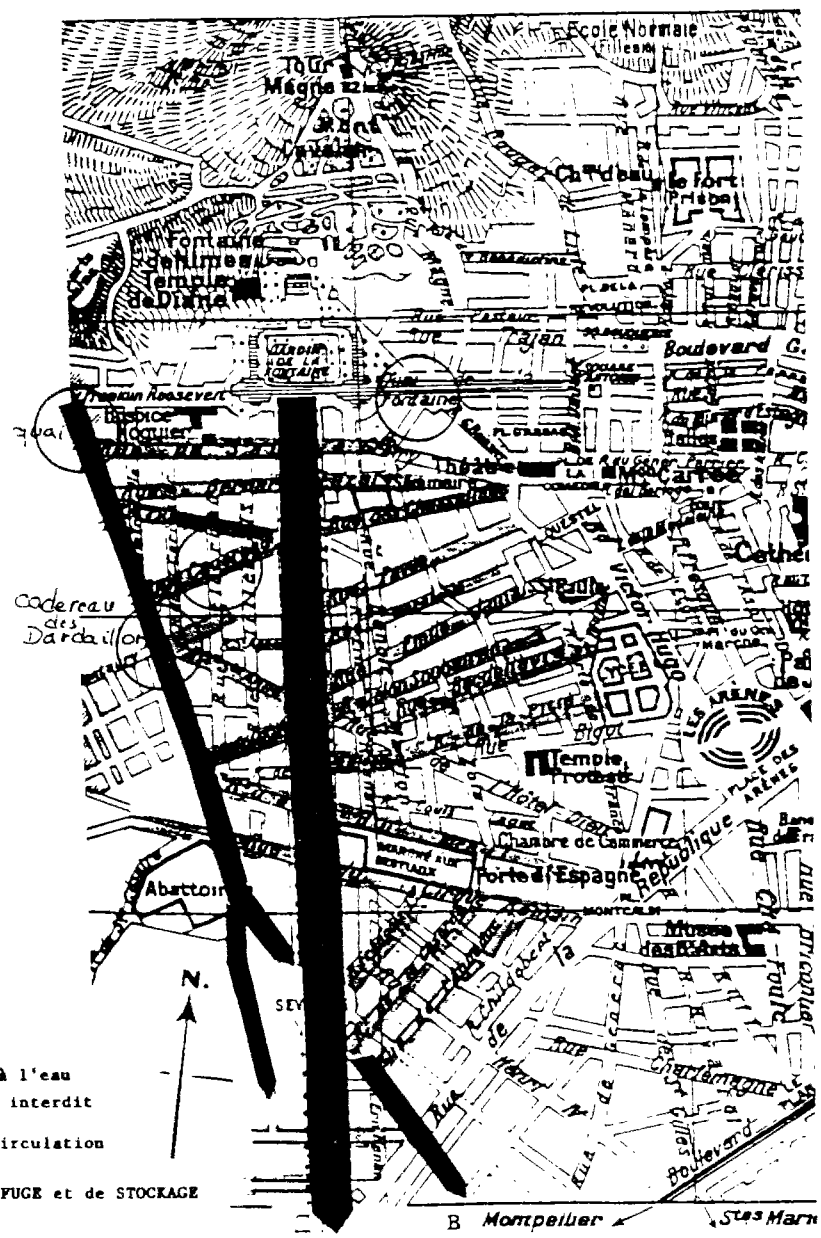


Figure 324

noms de rues ayant trait à l'eau
stationnement contrôlé ou interdit
sens préférentiel de la circulation
stationnement autorisé
les voies latérales de REFUGE et de STOCKAGE

b- Cas d'application : le cadereau d'Uzès intra-muros : (plan figure 325)

- Les voies de delestage hydrologique.
- Les voies preservees : avec barrage de la rue aux courants violents.
- Les voies cloisonnees.

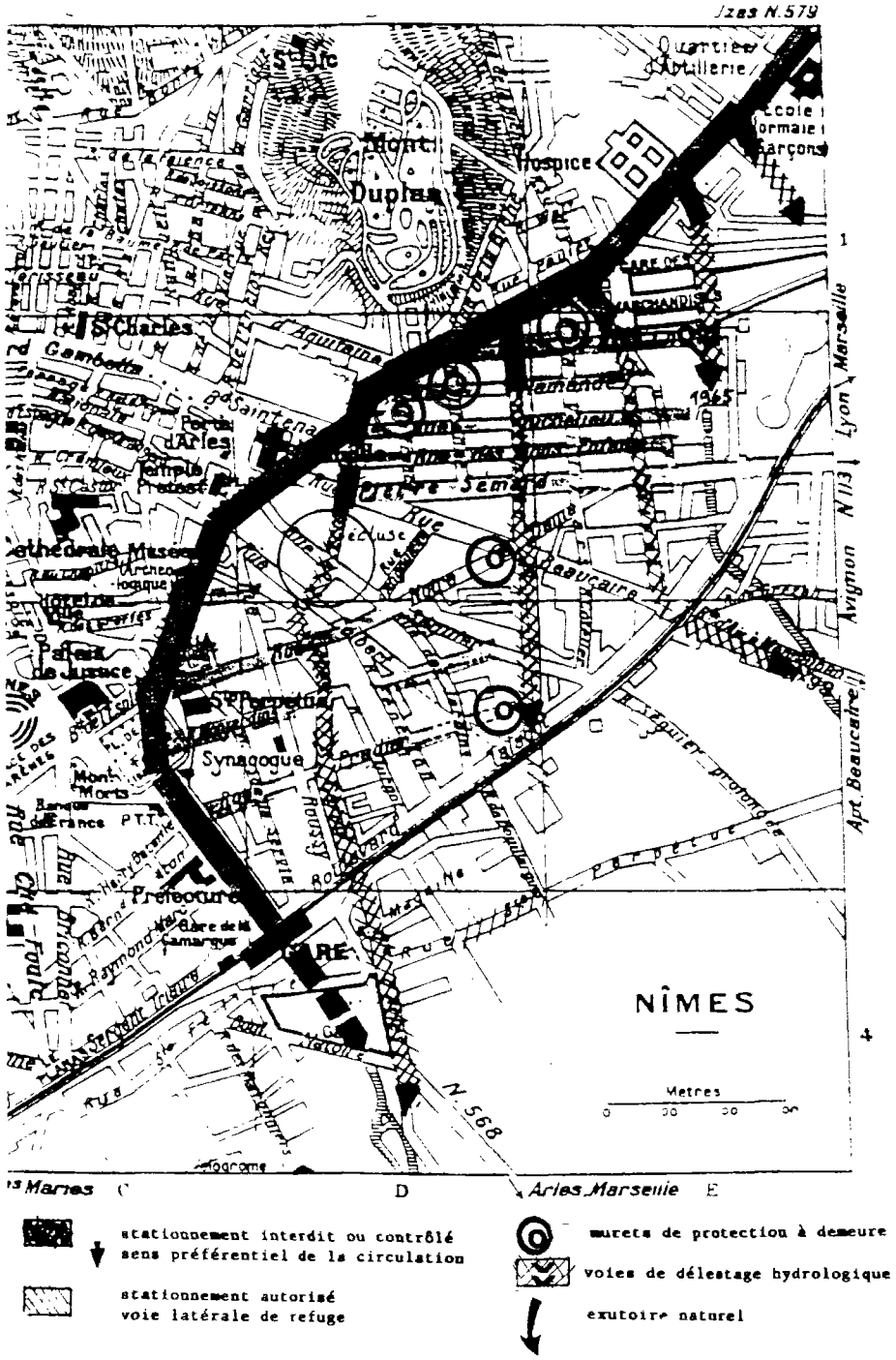


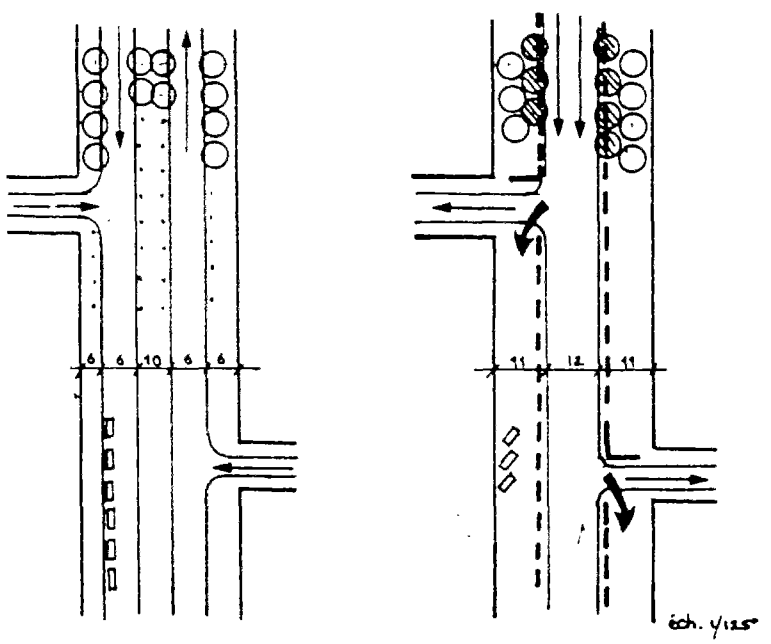
Figure 325 LE CADEREAU D'UZES INTRA-MUROS

ORGANISATION DE LA CIRCULATION ET DU STATIONNEMENT
face au risque hydrologique d'inondation par ruissellement

CAS D'APPLICATION : NIMES
Boulevard Jean Jaurès
PLAN

PRISE EN COMPTE DU RISQUE HYDROLOGIQUE
AU NIVEAU DU STATIONNEMENT

. modification du stationnement
. modification de l'infrastructure



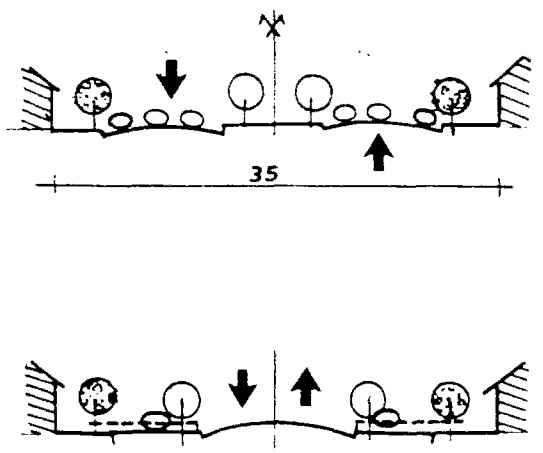
ETAT DES LIEUX

MODIFICATIONS DE SURFACE
sans surcreusements

Figure 326-a-

Déplacement des bordures
Mise en place de balustrades de retenue
piègeage des véhicules

COUT DU REAMENAGEMENT EN FONCTION DE LA RETENTION
DES VOITURES SUR VOIE PUBLIQUE



destruction de chaussée
12mx 1ml x 100F = 1.200F/ML
construction de chaussée
12m x 1ml x 200F = 2.400F/ML
construction de balustrade
anti-embâcle urbaine
1 ml x 2 x 500F = 1.000F/ML
déplacement d'arbre d'alignement
$\frac{5.000F \times 2\ U}{7\ ml}$ = 1.428F/ML
pavage du mail
5m x 2 x 1ml x 300F = 3.000F/ML

total = $\frac{9.028F}{22m}$ =410F /m2

Figure 326-b-

REORGANISATION DU STATIONNEMENT
.regroupement des véhicules
.mise en place de balustrades de retenue
.regroupement de la circulation
.déplacement des arbres d'alignement
à l'aide de machines Vermer

CAS D'APPLICATION : NIMES
Boulevard Jean Jaurès
COUPE

.aménagements de surface le M2 = 410F

3.4.4.1.5. Propositions de réaménagement des parkings publics

Pour les parkings publics existants, notre objectif est de proposer des travaux à un coût minime et réalisables à très court terme (deux ans, par exemple).

Les objectifs sont les suivants :
• Piégeage de la voiture par des balustrades urbaines,
• Piégeage de l'eau correspondant à la surface imperméabilisée du parking :
  - diminution maximale des évacuations,
  - cloisonnement du parking ;
• Piégeage de la crue centennale (100 ans) :
  - estimation du coût marginal des travaux correspondants ;
• Détermination du rapport coût-efficacité :
  - pour le prix au mètre carré (m^2),
  - pour le prix au mètre d'eau de ruissellement piégée, avec rejet différé (m^3),
  - pour le prix de la lutte contre le ruissellement par place de parking.

Les moyens :
- modification du stationnement,
- modification minimale de l'infrastructure.

Les cas d'application :
a- Nîmes - Stationnement latéral, réaménagement du boulevard Jean Jaurès (figure 326a, b et c)

- état des lieux,
- remodelage des lieux en fonction du risque d'inondation :
• Regroupement du stationnement sur les côtés,
• Balustrades anti-embâcles,
• Regroupement de la circulation sur l'axe central,
• Déplacement d'arbres d'alignement,
• Création de MAILS (avantage multifonctionnel).

Coût de l'opération : 410 F/m^2

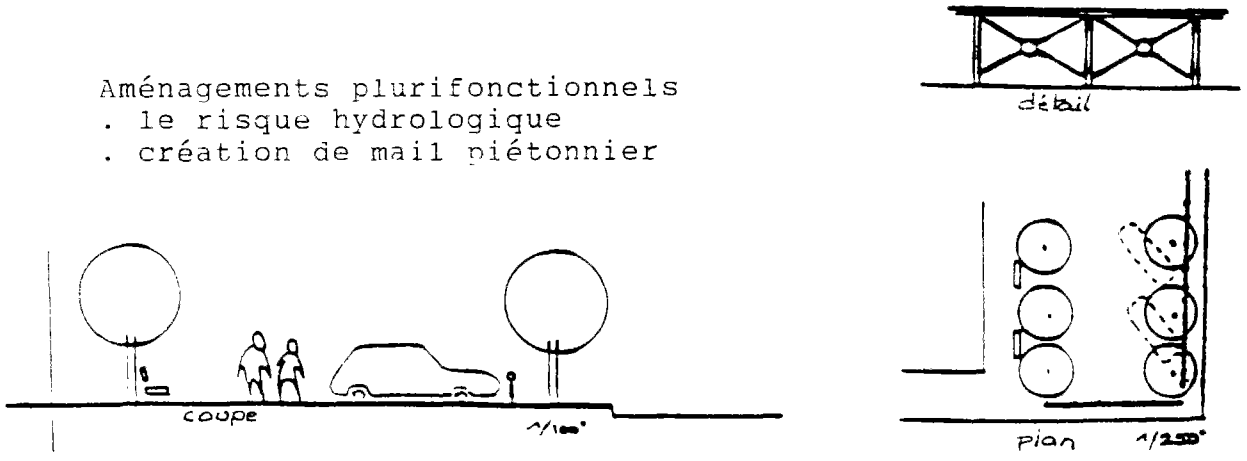


Figure 326-c- Balustrades urbaines de retenue de voitures. Détail du boulevard Jean Jaurès (Nîmes).

ADAPTATION DES PARKINGS PUBLICS EXISTANTS

- AU PIEGEAGE DES VOITURES
- A LA RETENTION DES EAUX

① PARKINGS PUBLICS - CAS N° 1 -

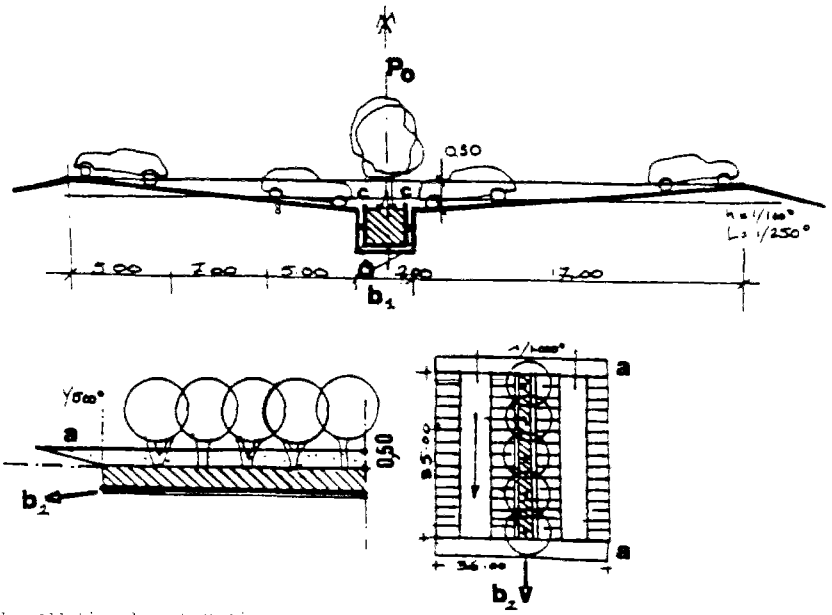
60 places 35M x 36 M

DESCRIPTION DU PARKING

. assainissement central avec 4 rangs de voitures
. pente du parking à 3%
. capacité de retention
  -sans aménagements : 0
  -avec aménagements : 0,50
  -avec surelévation : 0,65
. piégeage des voitures : balustrades

INCONVENIENTS

.pollution des végétaux si la plantation est située au point bas(huile,sel, hydrocarbure, détergents...)
.ennoiement des moteurs sur deux rangs.



légende

Po risque de pollution des plantations
b1 évacuation existante
b2 modification des évacuations pour la rétention par leur diminution
a apport de remblais pour le cloisonnement du ruissellement
c nouvel accès routier au parking

PARKINGS PUBLICS - CAS N° 1 - 60 places 35M x 36 M

. POSSIBILITE DE RETENTION
avec remblais latéraux et diminution des avaloirs

$\frac{36M \times 0,50\ b}{2}$ = 9 M3 / ML de section de parking

. BESOINS DE RETENTION POUR UNE CRUE CENTENNALE
36M x 400 mm = 14,40 M3 / ML de section

. DEFICIT DE RETENTION
14,40M3 - 9M3 = -5,40 M3

. BESOIN POUR UNE RETENTION SUPPLEMENTAIRE
A LA MARGE : bordure de 0,15 pour assumer une rétention de 400mm

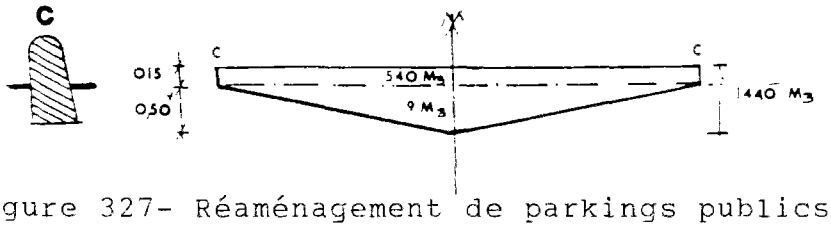


Figure 327- Réaménagement de parkings publics existants à faible pente, sur deux pentes.

b- Parkings courants: parkings publics existants en grande surface à faible pente sur 2 pentes (figures 327 et 328, cas 1)

Solution de base : piégeage des voitures = 52,38 F/m².
Solution moyenne : piégeage des voitures et piégeage d'une crue de 250 mm de hauteur d'eau, en fonction de l'état des lieux.

Coût du m² = 76,11 F/m² (valeur 1992)
Coût du m³ = 304,44 F/m³ avec rejet différé

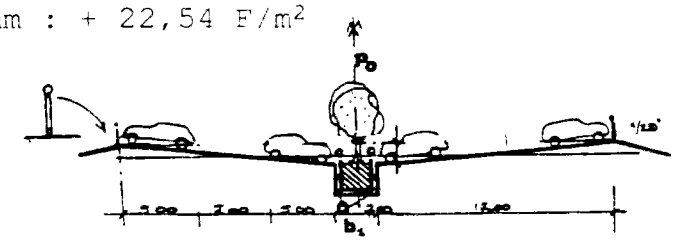
- Balustrades anti-embâcles,
- Diminution au minimum des avaloirs,
- Cloisonnement du parking suivant l'état des lieux.

Solution maximale : rétention d'une crue centennale théorique (100 ans) de 400 mm de hauteur d'eau en 6 heures

- Investissement d'une bordure supplémentaire de 0,15 m de hauteur

Coût du m² = 98,65 F/m²
Coût du m³ = 246,63 F/m³ avec rejet différé

Coût marginal pour passer de la rétention de la crue de 250 mm a la crue de 400 mm : + 22,54 F/m²

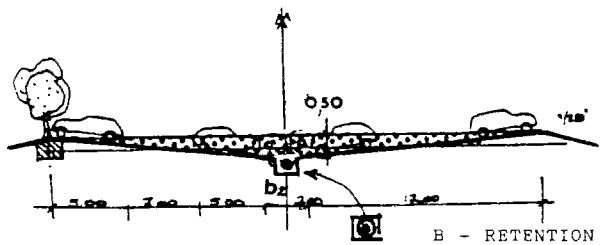


A - PIEGEAGE DES VOITURES

coût à la place de parking
66.000F:60 = 1.100F

coût: balustrade anti-embâcles
132 ml x 500F = 66.000F/60places

prix ramené au M2 de parking
66.000F:1.260M2 = 52,38F/M2

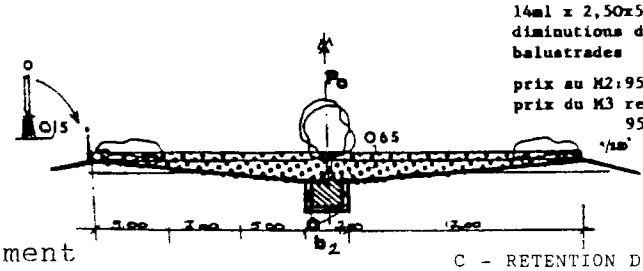


B - RETENTION D'UNE CRUE avec l'état des lieux, soit 250 mm de hauteur d'eau (9m² de section mouillée)

coût à la place
95.900F:60 = 1.598,33F

remblais latéraux pour bloquer l'eau
36mlx3Mx0.50hx50Fx2 =5.400F
accés voitures
14ml x 2,50x500F =17.500F
diminutions des évacuations= 7.000F
balustrades =66.000F

prix au M2:95.900F:1260M2 = 76,11F/M2
prix du M3 retenue avec rejet différé
95.900F:315M3 = 304,44/M3



C - RETENTION D'UNE CRUE CENTENNALE DE 400 mm.
400 mm x 1260m² = 504m³

coût à la place
124.300F:60 =2.071,67F

bordure supplémentaire pour maîtriser le risque hydrologique de 0,15 cm
COUT MARGINAL
142ml x200F = 28.400F:1260M2= + 22,54F/M2

prix au M2 : 124.300F:1260M2= 98,65/M2
prix au M3 : 124.300F:504 M3= 246,63/M3

Figure 328 - Simulation de l'ennoiement du parking cas n°1 pendant les crues de ruissellement.

REAMENAGEMENTS DES PARKINGS PUBLICS EXISTANTS

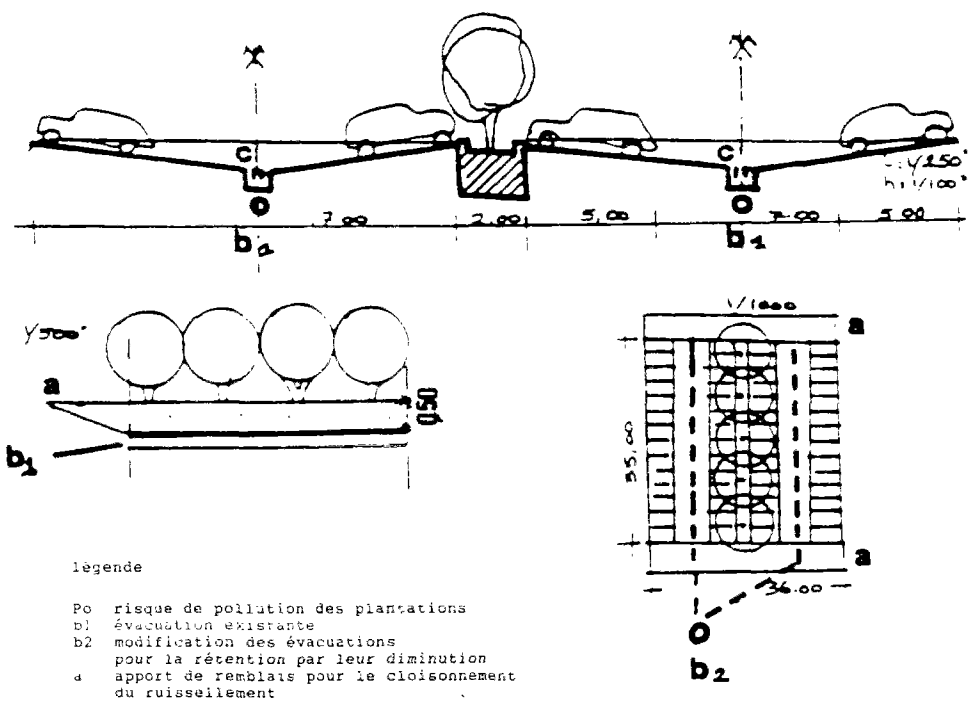
- contre les embâcles de voitures
- pour la rétention du ruissellement

2 PARKINGS PUBLICS - CAS N°2 -
60places 35m x 36m

DESCRIPTION DU PARKING

.assainissement latéral double
et 4 rangs de voitures
.pente du parking: 2% à 3%
.capacité de rétention
-sans aménagements: 0
-avec aménagements: 0,50
-avec surélévation: 0,65
.piégeage des voitures : balustrades

AVANTAGES
.végétaux préservés de la pollution
.moteurs non ennoyés



légende

Po risque de pollution des plantations
b1 évacuation existante
b2 modification des évacuations pour la rétention par leur diminution
a apport de remblais pour le cloisonnement du ruissellement
c nouvel accès routier au parking

Figure 329-a- Réaménagement de parkings publics existants cas n°2, à faible pente et sur quatre pentes.

c- Parkings courants : parkings publics existants en grande surface à faible pente sur 4 pentes (figure 329a - cas 2)

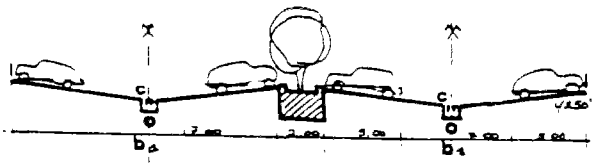
Solution de base : piégeage des voitures = 52,38 F/m².
Solution moyenne : piégeage des voitures et piégeage d'une crue de 250 mm de hauteur d'eau = moteurs non ennoyés.
- Balustrades anti-embâcles,
- Diminution au minimum des avaloirs,
- Cloisonnement du parking suivant l'état des lieux.

Coût du m² = 81,67 F/m²
Coût du m³ = 345,88 F/m³ avec rejet différé

Solution maximale : rétention d'une crue centennale théorique (100 ans) de 400 mm de hauteur d'eau en 6 heures.
- Investissement d'une bordure supplémentaire de 0,15 m de hauteur.

Coût du m² = 104,21 F/m²
Coût du m³ = 260,52 F/m³ avec rejet différé

Coût marginal pour passer de la rétention de la crue de 250 mm à la crue de 400 mm = + 22,54 F/m²

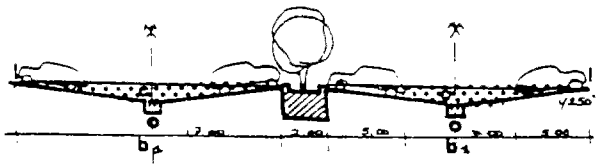


A- PIEGEAGE DES VOITURES

coût à la place
66.000F:60 = 1.100F

balustrades anti-embâcles
132 ml x 500F = 66.000F pour 60 places

prix ramené au M2 de parking avec acces
66.000F: 1.260 M2 = 52,38F/M2

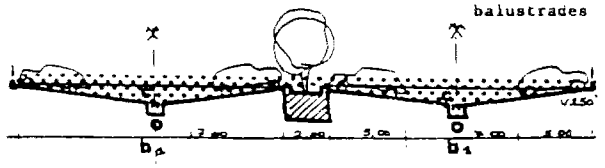


B- RETENTION D'UNE CRUE avec l'état des lieux

coût à la place
102.900F:60 =1.715F

(8,5M3 de section soit 240mm de hauteur d'eau
remblais latéraux pour bloquer l'eau
54M3 x 50F x2 = 5.400F
accès voitures
14ml x 2,50M x 500F = 17.500F
diminution des evacuations (2)= 14.000F
balustrades = 66.000F

prix du M2:102.900F=81,67F/M2
1260M2
prix du M3 :102.900F=345,88F
297,5M3



C- RETENTION D'UNE CRUE CENTENNALE(400mm)

coût à la place
131.300F:60 = 2.188,33

400mm x 1260 M2= 504 M3
bordure supplementaire pour maîtriser
le risque hauteur = 0,16 cm
COUT MARGINAL
142ml x 200F = 28.400F.1260M2= + 22,54F/M2

prix au M2: 131.300F:1260M2= 104,21F/M2
prix du M3: 131.300F: 504M3= 260,52F/M3

Figure 329-b- Simulation de l'ennoiement du parking cas n°2

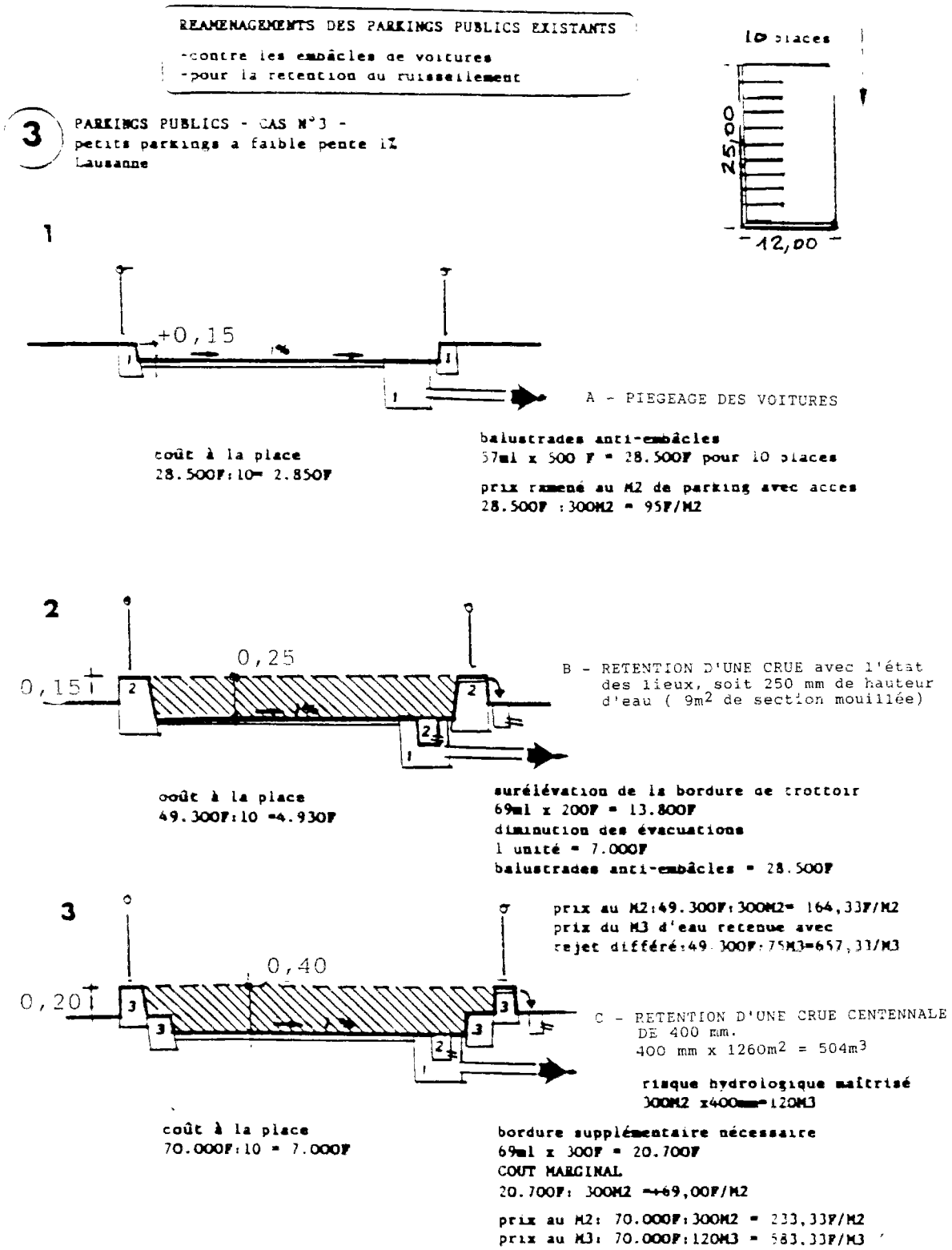


Figure 330- Réaménagement de parkings existants cas n°3, à faible pente et de petite surface.

d- Parkings plats : Parkings publics existants en petite surface à faible pente (Lausanne) (figure 320 cas 3)

Solution de base : piégeage des voitures.

Coût du m^2 = 95 F/m^2

Solution moyenne : piégeage des voitures et piégeage d'une crue de 250 mm de hauteur d'eau.

- Balustrades anti-embâcles,
- Mise en place d'une bordure surélevée de 0,15 m,
- Diminution au minimum des évacuations.

Coût du m^2 = 164,33 F/m^2 (valeur 1992)
Coût du m^3 = 657,33 F/m^3 avec rejet différé

Solution maximale : rétention d'une crue centennale théorique (100 ans) de 400 mm de hauteur d'eau en 6 heures.

- Investissement d'une double bordure de 0,40 m de hauteur.

Coût du m^2 = 233,33 F/m^2
Coût du m^3 = 583,33 F/m^3 avec rejet différé

Coût marginal pour passer de la rétention de la crue de 250 mm à la crue de 400 mm = + 69 F/m^2.

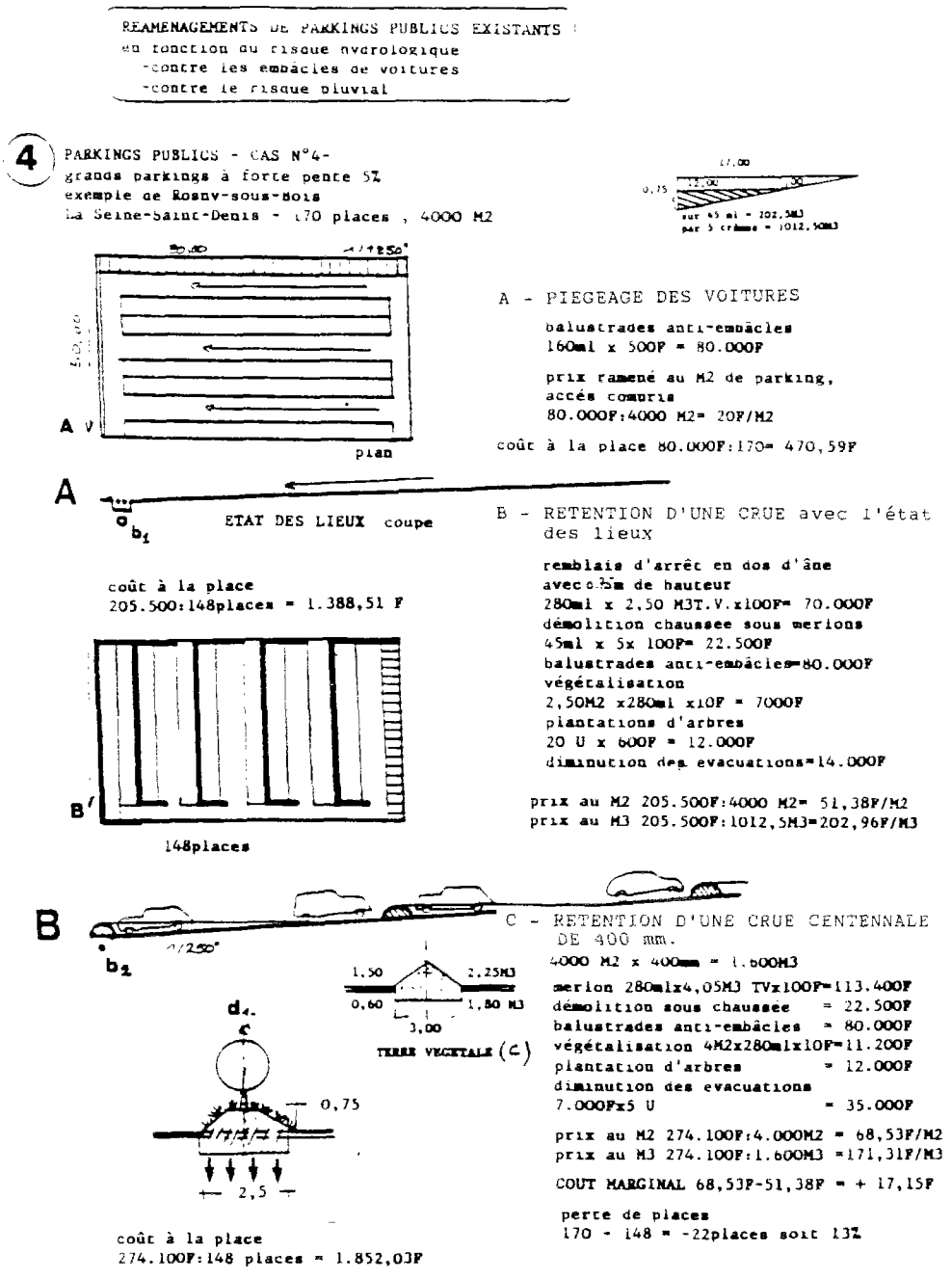


Figure 331- Réaménagement de parkings publics existants cas n°4 , en grande surface et à forte pente.

e- Parkings en pente : parkings publics existants en grande surface à forte pente (Rosny-sous-Bois, figure 331 cas 4 et photo 338)

Solution de base :

- Inversion du sens de stationnement,
- Balustrades anti-embâcles.

Coût = 20 F/m²

Solution moyenne : piégeage des voitures et piégeage d'une crue de 250 mm de hauteur d'eau.

- Inversion du sens de stationnement,
- Balustrades anti-embâcles,
- Merlons de retenue tous les 17 mètres de 0,75 m de hauteur,
- Plantations d'arbres et engazonnement,
- Cloisonnement du parking suivant l'état des lieux.

Coût du m² = 51,38 F/m² (valeur 1992)
Coût du m³ = 202,96 F/m³ avec infiltration

Solution maximale : rétention d'une crue centennale théorique (100 ans) de 400 mm de hauteur d'eau en 6 heures.

- Merlons de retenue de 1,20 mètre de hauteur.

Coût du m² = 68,53 F/m²
Coût du m³ = 171,31 F/m³ avec infiltration

Coût marginal = + 17,15 F/m².

- Perte de place de stationnement = - 22 places soit 13 %.

3.4.4.1.6. Conclusion

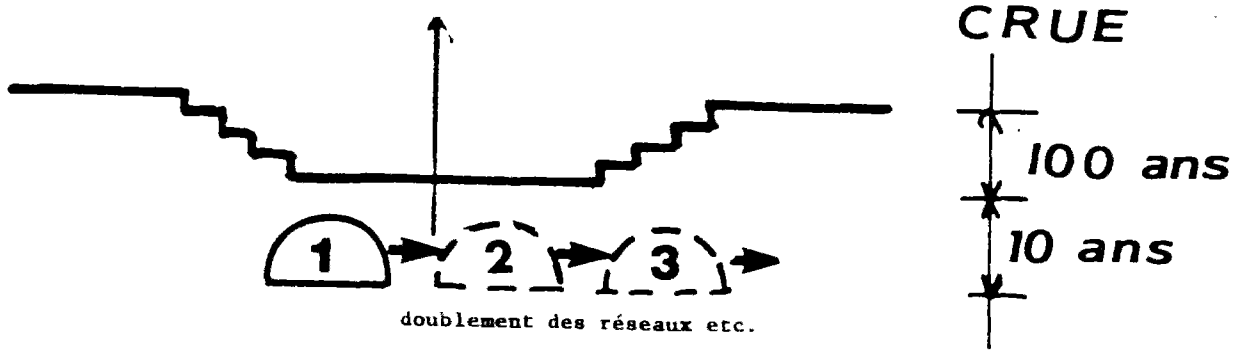
Nous avons abordé les techniques légères et à court terme (2 ans) qui représentent les travaux d'amélioration immédiate, à partir de lieux existants. Quatre principes de voies ont été définis suivant une hiérarchie face au risque hydrologique et avec un traitement spécifique. Ce sont :

- **Les voies à écoulement préférentiel,**
- **Les voies refuges,**
- **Les voies de stockage,**
- **Les voies cloisonnées.**

Nous analyserons dans le chapitre suivant les techniques lourdes et à long terme (10 ans), qui consistent à refaire entièrement les chaussées sur les principes de décaissement de profils et d'absorption des eaux sur place.

AMENAGEMENTS A LONG TERME : LA RUE-CANAL

aménagements de surface → risque hydrologique - crue de 100 ans



aménagements souterrains → risque hydraulique - crue de 10 ans

Figure 332- La rue-canal
Domaine des infrastructures.
Décaissement des chaussées.
Les réponses au risque hydrologique
et au risque hydraulique.

3.4.4.2. Des propositions à long terme

1- Objectifs :

• **Principes** : Les aménagements s'effectuent sur l'état existant avec comme objectif de tendre vers l'évacuation de la crue centennale.

• **Critères** : autant les propositions à court terme (2 ans) ne nécessitent pas de délai et peu de budgets, autant les travaux à long terme (10 ans) doivent être planifiés, avec la recherche de fonctions et budgets plurifonctionnels groupés.

• **La couverture du risque : définitions**

Nous rappelons notre position en tant qu'aménageur (figure 332).

1. Le risque hydraulique : crues de 0 à 10 ans

Il concerne les crues comprises entre 0 et 10 ans. Nous proposons que ces crues soient prises en charge par le réseau d'assainissement SOUTERRAIN, quitte à doubler ou tripler les capacités d'accueil actuel, pour assurer la protection décennale.

Cette proposition paraît répondre à une double demande :
- permettre aux entreprises de réseaux souterrains de poursuivre leurs travaux, la moyenne des réseaux actuels d'eaux pluviales assumant en France les crues d'occurrence quinquennale ;
- diminuer les conséquences régulières des dégâts des pluies courantes, les dépôts de boues en particulier, sur l'ensemble de la ville.

2. Le risque hydrologique : crues de 10 à 100 ans

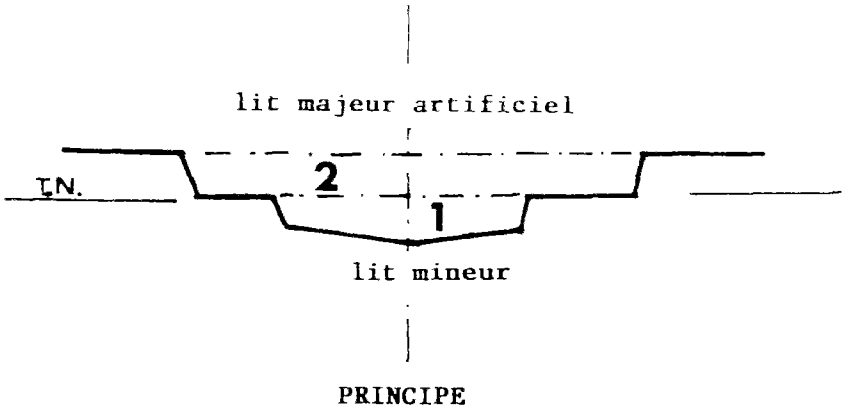
C'est l'objet de notre mémoire. Il concerne les crues entre la crue décennale (10 ans) et la crue centennale (≤ 100 ans). Nous avons pris arbitrairement pour notre étude la hauteur de la lame d'eau de la catastrophe de Nîmes, soit 400 mm en 6 heures.

Les propositions que nous avons élaborées sont des propositions de TRAVAUX D'AMENAGEMENTS DE SURFACES EXISTANTES s'adaptant au maximum des possibilités de l'urbanisme, en particulier en fonction de la LARGEUR des voies. Nous favorisons la maîtrise de l'écoulement et la limitation des dommages. Ces propositions sont à intégrer aux plans de SECOURS.

3. Le déluge[1] : ou la crue de 1 000 ans
Au-dessus de la crue centennale, la crue historique millénaire doit être vue par simulation cartographique, en fonction de la morphologie du terrain. Elle fait aussi partie des plans de secours.

---

[1] Nous retenons le terme de "déluge" déjà utilisée en Suisse dans les planifications hydrologiques



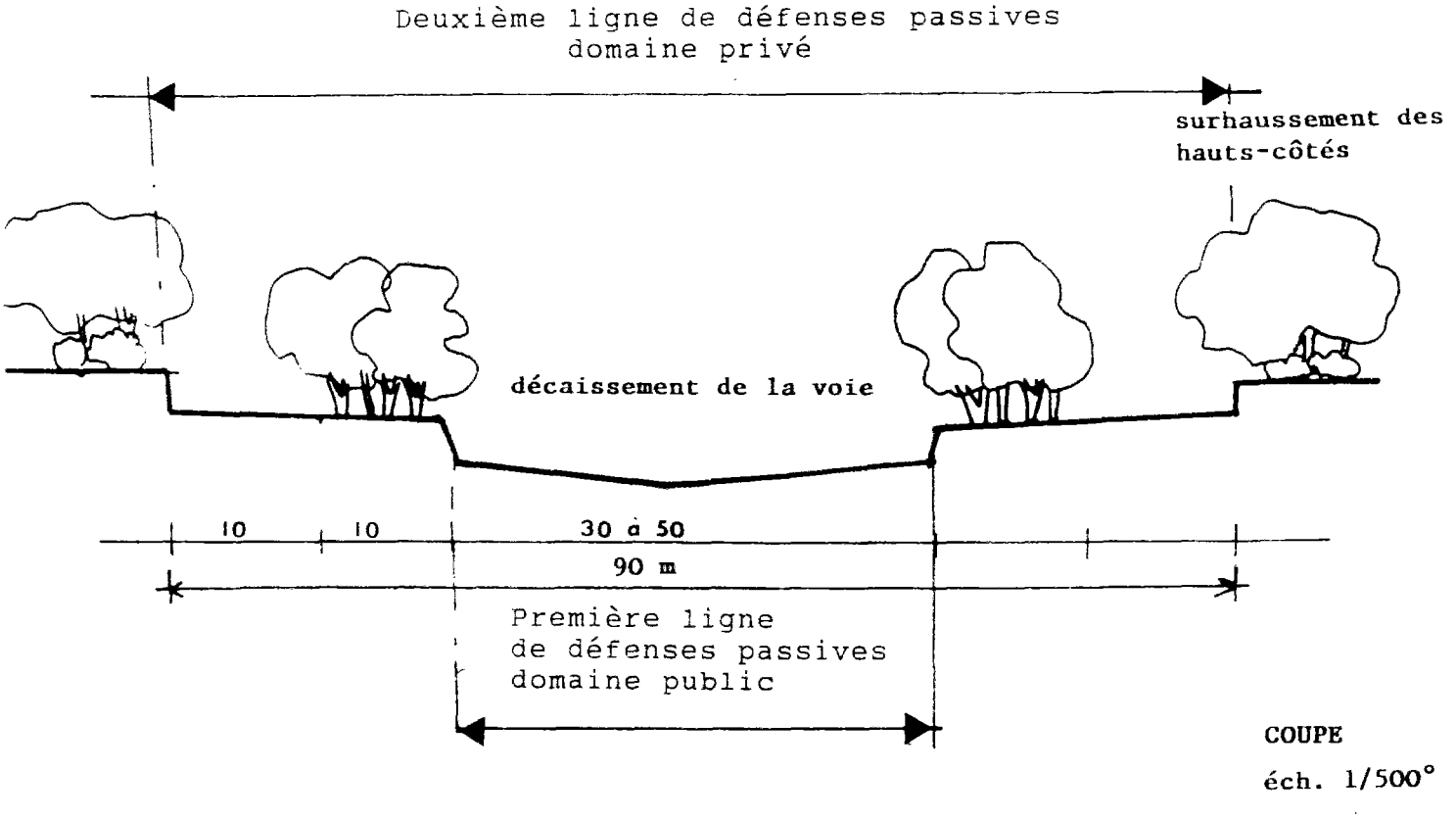


Figure 333- **La maîtrise du ruissellement dans le domaine de l'infrastructure à NEW-DELHI .**

3.4.4.2.1. Les décaissements de voies à écoulement préférentiel

a- L'exemple de NEW-DELHI - Analyse d'une voie à écoulement préférentiel (figure 333)

• **Historique**
La ville de New-Delhi s'est construite entre 1912 et 1931, sur le principe d'une infrastructure répondant aux risques hydrologiques des moussons.

Les rues et boulevards ont été conçus de façon à conduire les écoulements de surface vers la Yamuna, affluent du Gange (photos 335, 336, 337).

a1- La rue-canal de New-Delhi - La prévention de base : immersion des voies

• **Décaissement général de la chaussée** : 0,80 m

Le premier axe de prévention a consisté, au moment de la construction de cette ville nouvelle, à un SURCREUSEMENT généralisé des voies principales, sur une profondeur de 0,80 m.

• **Surdimensionnement des largeurs des voies**

La largeur des rues, de 30 mètres à 50 mètres, a été surdimensionnée pour faire face au risque hydrologique.

• **Cuvette avec fil d'eau central :**

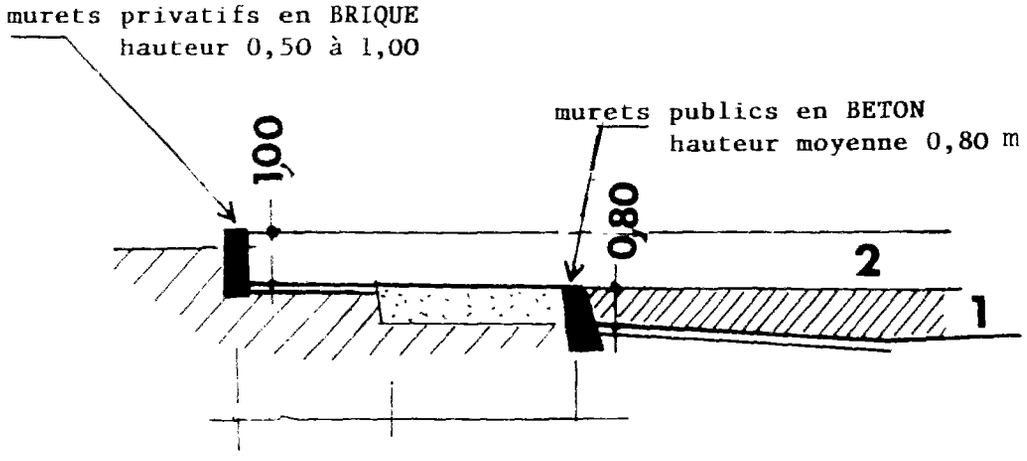
Le profil de la rue a une forme de cuvette avec fil d'eau central. Ce profil permet d'augmenter les capacités hydrologiques de contenance ; il permet aussi de regrouper les eaux des petites crues et les dépôts (boues).

• **Les butoirs latéraux publics :**

La rue-canal est limitée par des butoirs latéraux de 0,50 m à 0,80 m de hauteur, en béton.

• **Lit mineur artificiel :**
L'ensemble de cette première ligne de défense passive forme le lit mineur artificiel des écoulements de surface, pour toutes les crues de ruissellement.

Figure 334 - Urbanisation de NEW-DELHI (Inde)
1912 - 1931
Maîtrise des pluies de moussons
par les voies de circulation



Capacités de transit hydrologique

2 - 90 m3/ m de section
1 - 40 m"/ m de section
TOTAL
130 m3/ml de section
avant dommages

a2- La prévention maximale : immersion des hauts - côtés plantés et des trottoirs latéraux (figure 334)

• Les butoirs latéraux privés :

L'ensemble "rue-canal, hauts-côtés plantés et trottoirs" est limité par une seconde ligne de défenses passives. Ce sont les MURETS délimitant le domaine privé.

Hauteur des murets : 0,50 m à 1 m,
Matériau : briques,
Emmarchements dans le domaine privé pour franchir le dénivellé.

• Les espaces annexes à la voie :

Largeur des trottoirs : 10 m x 2 = 20 m
Largeur des hauts-côtés plantés : 10 m x 2 = 20 m
Ce qui fait 40 m supplémentaires à pouvoir être immergés.

a3- Les capacités hydrologiques

Les capacités hydrologiques pour le transit des crues tournent autour des cubages suivants :

• La rue-canal

Capacité de transit par mètre linéaire de section : 50 m x 0,80 m/h. = 40 m^2/section mouillée.

• L'immersion des hauts-côtés :

Capacité supplémentaire de transit par mètre linéaire de section : 90 m x 1,00 m = 90 m^2/section mouillée.

• Total des possibilités d'immersion AVANT DOMMAGES :

Rue-canal et hauts côtés = 130 m^2/section mouillée.

a4- L'efficacité du système : Prévision et maîtrise

En construisant une infrastructure sur le principe de la MAITRISE des eaux de pluies de la mousson, la ville de New-Delhi a depuis 60 ans pu faire face aux crues exceptionnelles, le passage des crues en centre urbain étant PREVU.

BANGLADESH
DACCA - 1992

LES DEFENSES PASSIVES
traitement du ruissellement
en milieu urbain

Photo 335-

1-ENCAISSEMENT D'UNE VOIE
PERI-URBAINE

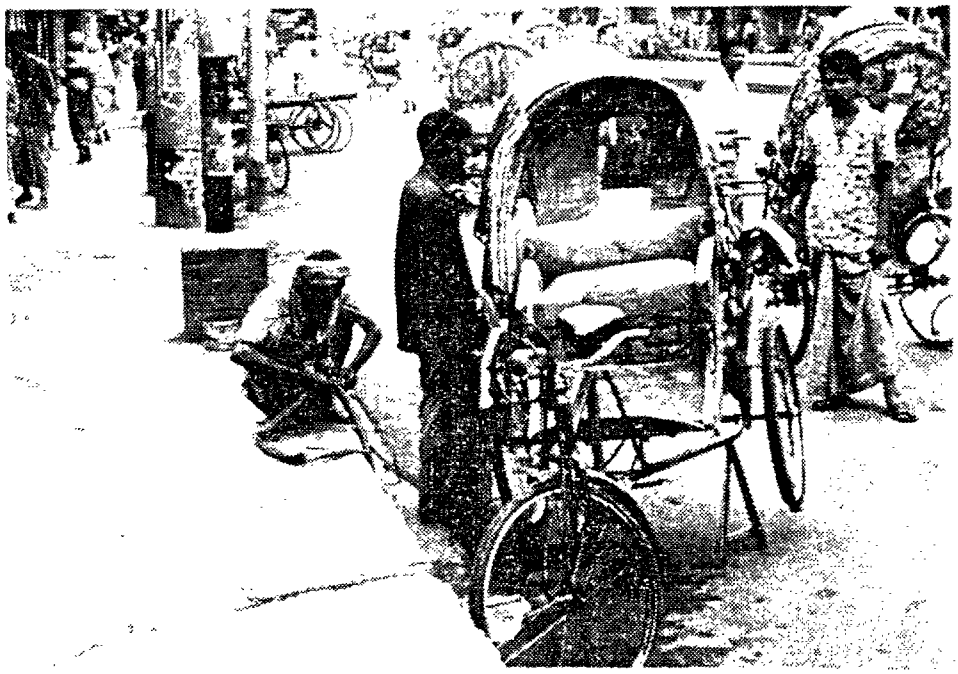


Photo 336-

2- ENCAISSEMENT D'UNE
VOIE URBAINE

Photo 337-

3- LES PROTECTIONS DES
HAUTS-COTES

Les murets privés
contre les crues

a5- L'aspect esthétique du système

L'aspect de ce réseau hydrologique de surface est satisfaisant grâce aux points suivants :

- présence d'espaces verts publics de part et d'autre de la rue-canal,
- végétation supportant l'ennoyement annuel avec peu de détériorations,
- dissimulation de l'ouvrage hydrologique central principal par son encaissement visuel,
- importance de la couleur du matériau-brique pour la deuxième ligne de défenses privées.

En conclusion, la fragmentation de l'espace minéralisé de l'ouvrage hydrologique "rue et trottoirs" par les deux espaces verts publics, ainsi que l'encadrement des espaces verts privés latéraux, rend l'ensemble agréable malgré le surdimensionnement des éléments, qui aurait pu apparaître HORS D'ECHELLE, sans ces plantations.

a6- La maintenance

On ne peut que constater la bonne maintenance du système, construit il y a 80 ans pour les axes les plus anciens (photo 337).

Le nettoyage des crues s'effectue comme un nettoyage de surface, après un chantier de terrassement.

a7- La notion du risque

• Ralentissement des courants

Les pentes de "l'infrastructure maîtresse" du réseau hydrologique de surface varient entre 1 % et 2 %, ce qui permet d'atténuer au maximum les prises de vitesses des masses d'eau en mouvement.

• Réseau gravitaire

Tout le système hydrologique est établi sur le principe d'un fonctionnement gravitaire, donc toujours opérationnel, même en cas de crise.

a8- Avantages multifonctionnels

• Trafic

Le surdimensionnement de l'infrastructure a permis une adaptabilité à l'augmentation actuelle du trafic.

Photo 338-

ROSNY-SOUS-BOIS
SEINE-SAINT-DENIS

Les parkings du centre commercial de 1.000 places.

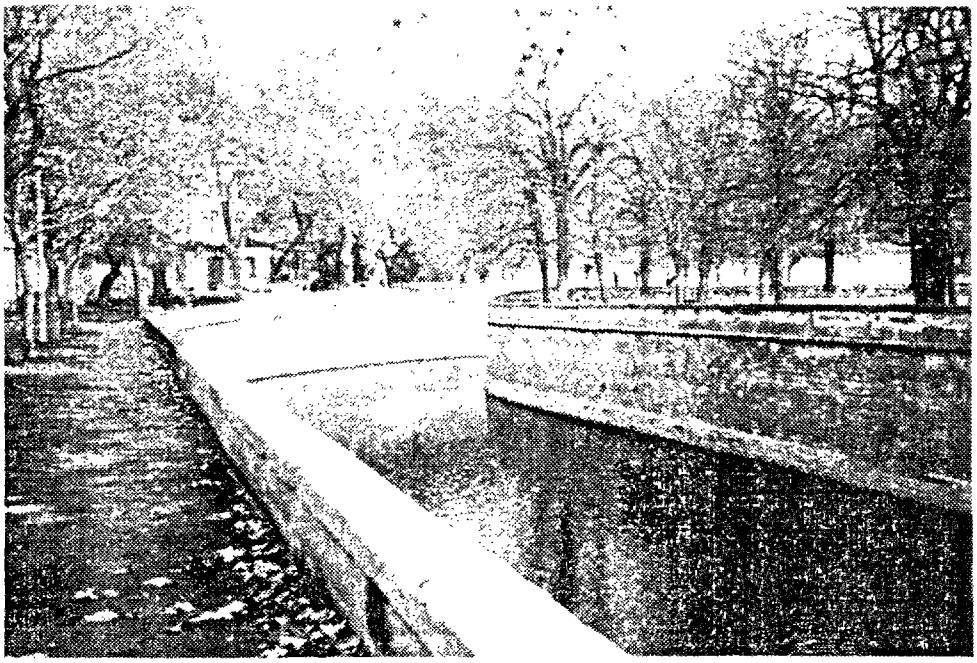


Photo 339-

NIMES-LE QUAI DE LA FONTAINE

Exemple de canal urbain réalisé au XVIII siècle.

Les voies historiques de dérivation hydrologique.

Photo 340

PARIS CHAMPS-ELYSEES

Les voies encaissées, ici pour un motif de non-stationnement.

• **Bruit**

L'encaissement du réseau hydrologique où se concentre la circulation automobile participe à la diminution des nuisances acoustiques, les mini-parapets et les plantations formant un écran phonique.

a9- Conclusion

- Le projet d'infrastructure de la ville nouvelle de Delhi a été conçu selon un PRINCIPE HYDROLOGIQUE pour maîtriser et faciliter le passage des crues.

- Ces ouvrages de surface fonctionnent à chaque mousson depuis 60 à 80 années, de façon satisfaisante.

- L'axe central routier assure l'écoulement dans le lit mineur artificiel, alors que les trottoirs et espaces verts latéraux publics assurent l'écoulement de crise dans le lit majeur.

- Par contre, les problèmes de POLLUTION des eaux de la rivière Yamuna (un des affluents du Gange) sont très importants.
Il y a le problème des boues déversées dans la rivière et surtout l'évacuation des égouts de Delhi qui se font par des canaux à ciel ouvert, sans décantation ni traitement de la pollution.

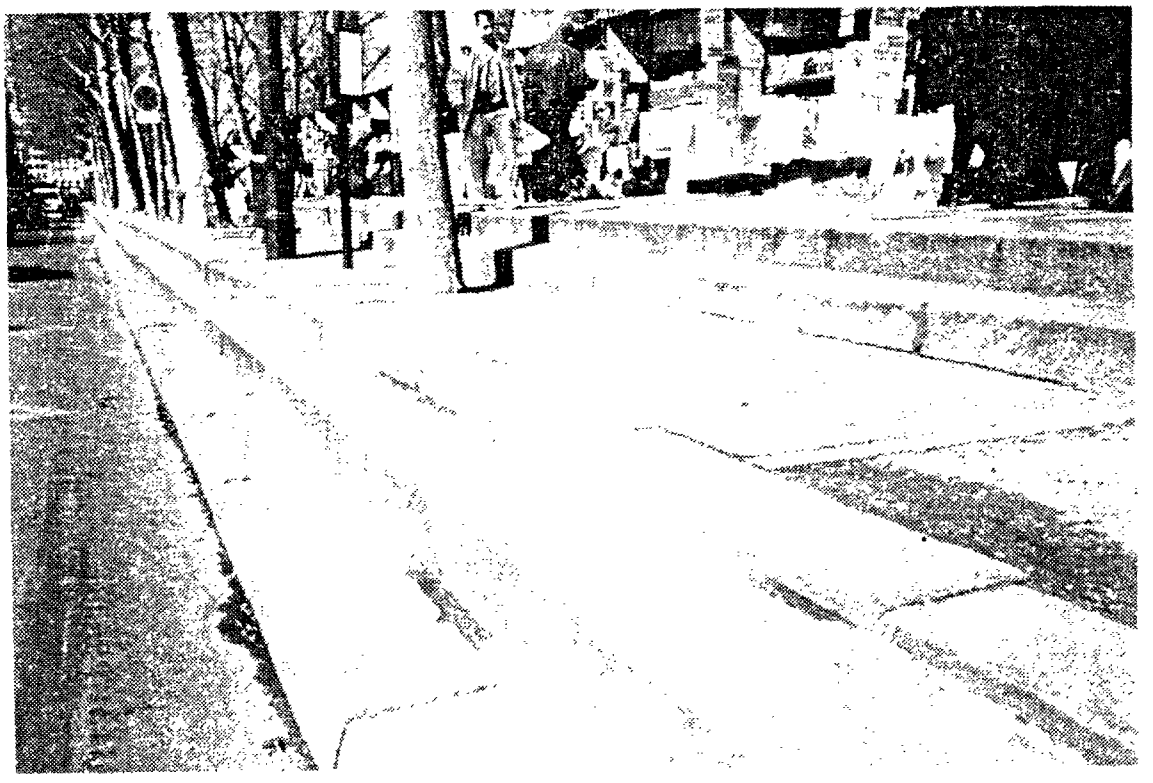


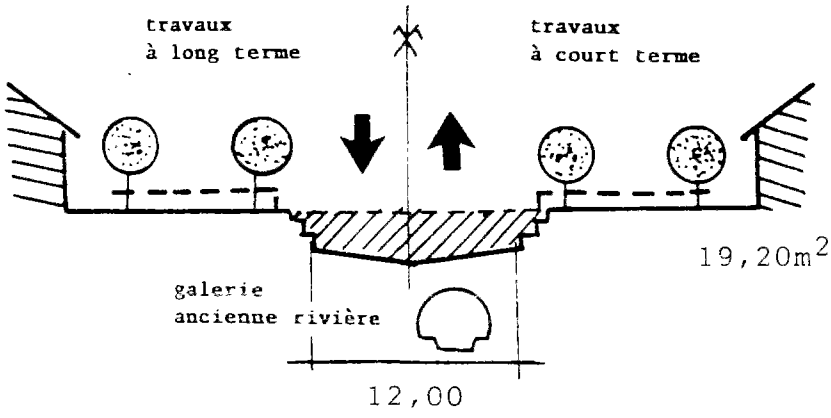
Figure 341- Voies encaissées pouvant servir d'exemple d'aménagement hydrologique urbain pour le transit du ruissellement
(Paris,Quai de la Tournelle).

Figure 342- Le risque hydrologique
construction d'une rue-canal sur large artère
Application: Bl.Jean Jaurès à Nîmes

Transit d'une crue par voie centrale

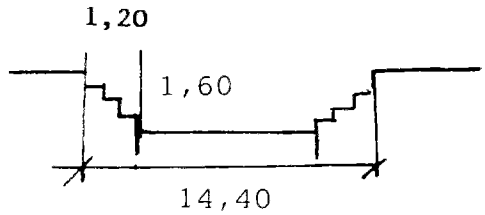
destruction chaussée existante
14,40m x 100F= 1.440F/ml de section
déblaiement 14,40x1,60 prof.x50F=1.152F/ml
construction de la rue-canal
gradins 2m2x2x3.000F=12.000F/ml
pavage de fond 12mlx1.000F= 12.000F/ml
diminution des évacuations 7.000F/ml

prix du m2=33.592F:14,40=2.332,78F/m2
prix du m3=33.592 : 19,20 m3=1.749,58F/m3



19,20m^2/section mouillée

PRINCIPE



A - Solution minimale
décaissement de la voie centrale

b- **Les décaissements de voies à écoulement préférentiel - Propositions pour Nîmes**

Les décaissements de voies à écoulement préférentiel, basés sur le principe de New-Delhi, sont applicables dans des villes existantes comme Nîmes.

Nous allons faire nos essais de traitements de surface sur trois types d'infrastructures intra-muros :

- une voie de grande largeur telle le Boulevard Jean Jaurès,

- une voie étroite telle la route d'Uzès intra-muros et son prolongement par la rue Vincent Faïta,

- une place urbaine.

Exception : il existe des impossibilités d'aménagement hydrologique de surface pour certaines voies urbaines dont le profil en long comporte des points bas.
Les voies de Nîmes citées, en pente déclive régulière, n'ont pas cet handicap.

b1- **Décaissement sur voie de grande largeur. Création d'une rue-canal sur le Boulevard Jean Jaurès** (figure 342)

• Largeur de l'artère : 35 mètres,
• Pente générale : 1 % à 2 % sur tout le profil en long,
• Proposition de décaissement à partir des aménagements à court terme, déjà réalisés (paragraphe 3.4.4.1.) qui incluaient la création d'une circulation centrale pour le passage des eaux, le regroupement du stationnement sur les côtés avec le piégeage des véhicules et le déplacement de rangs d'arbres d'alignement.

Variantes : 1- Décaissement partiel de la voie centrale,

2- Décaissement général sur la largeur du boulevard, avec application des principes de New-Delhi.

1- Solution minimale décaissement partiel de la voie centrale (figure 342a)

- Travaux à long terme,
- Travaux sur des voies existantes.

- **Décaissement**

- Possibilité hydraulique :

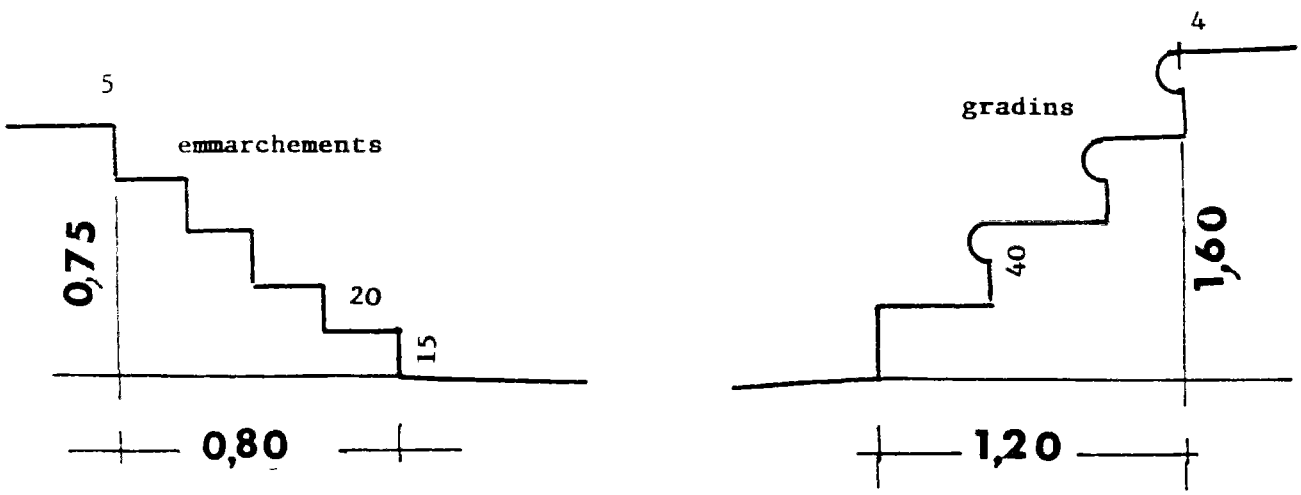
On remodèle le profil de la voie (largeur 14,40 m) en fonction des possibilités d'encaissement liées à l'enfoncement actuel des égoûts principaux et galeries maîtresses auxquels on ne touche pas ;

- Possibilité urbanistique :

On remodèle le profil de la voie en fonction des seuils de tolérance pour le franchissement piétonnier, de l'aspect visuel de l'ouvrage hydrologique et de son intégration à son environnement existant.

Il semble qu'il existe des seuils de franchissement dont le maximum d'encaissement se situe en milieu urbain :

- au nombre de marches à franchir (5 marches de 0,15 m),
- au nombre de gradins (4 gradins de 0,40 m),
- à la largeur disponible pour ce dénivellé.



a- solution minimale avec emmarchements

b- solution maximale avec gradins

Figure 343 : Aménagements d'une RUE-CANAL
Emmarchements et gradins

Les possibilités urbanistiques d'encaissement varient donc entre 0,75 mètre et 1,60 mètre de profondeur ; elles sont aussi définies par les seuils de SECURITE, contre les chutes de personnes. A ce sujet, les gradins sont préférables aux parapets, lorsque la largeur nécessaire aux marches existe (figure 343).

• **Les capacités hydrologiques :**

Capacité hydrologique pour le transit des crues :

- pour un décaissement par emmarchements :
  0,75 x 12 m = 9 m²/section mouillée
- pour un décaissement par gradins :
  1,60 x 12 m = 19,20 m²/section mouillée

• **L'efficacité du système : La rue-canal**

Dans les voies à écoulement préférentiel et donc à COURANTS TRES VIOLENTS, la technique de la rue-canal REGROUPE LES EAUX LES PLUS AGRESSIVES LE PLUS LOIN DES FACADES. Mais l'efficacité du système dépend aussi des possibilités physiques, urbanistiques de la rue qui sont :

- la largeur de la rue,
- la pente de la rue,
- la profondeur des égoûts principaux,
- l'aspect esthétique des décaissements et le seuil de tolérance du franchissement piétonnier des pentes des raccords des voies perpendiculaires.

• **La maintenance du système :**

Face à la violence du courant, deux secteurs sont à consolider:

- les parois de la rue-canal. La résistance des emmarchements et gradins doit être assurée face au laminement des eaux et embâcles de voitures ;
- le revêtement de la chaussée au fond du décaissement central (photo 176). En s'appuyant sur le rapport Ponton, seuls ont résisté, lors de la catastrophe de Nîmes en 1988 :

  • Les sols en béton coulé,
  • Les pavés autobloquants.

• **La notion du risque :**

Ce type de travaux visibles marque le site. Tous les travaux de surface VISIBLES entraînent donc une prise de conscience du RISQUE. La dénégation du danger n'est plus possible.

• **Avantages multifonctionnels :**

- le bruit : un encaissement d'une voie à grande circulation entraîne automatiquement une diminution du bruit des véhicules. Les sons butent sur les emmarchements et les courbes phoniques sont relevées.

- les festivités : au niveau urbanisme, une voie encaissée par gradins ou emmarchements apporte une possibilité de lieux aptes à recevoir des festivités (défilés, etc.).
L'investissement dans un ouvrage hydrologique de surface peut donc servir à d'autres fonctions (et avoir des budgets annexes) suivant les traitements des aménagements retenus.

• **La planification**

1ère phase à court terme :

- règlementation de la circulation,
- règlementation du stationnement.

2ème phase à long terme :

- décaissement solution minimale.

• **Le coût d'investissement**

Calcul pour le cas des décaissements minimaux de la voie centrale avec gradins (solution à long terme)

Par m^2 = 33 592 F : 14,40 large = 2 332,78 F/m^2 par m de section construite.
Par m^3 transité = 33 592 F : 19,20 m^3 = 1 749,58F/m^3.

• **Coût-efficacité de la solution partielle :**

- Coût global pour l'avenue Jean-Jaurès (1,5 km)
1 500 m x 2 332,78 F x 35 m = 122 470,95 F/ l'ouvrage
soit 122 millions de Francs (valeur 1992)

- Capacité hydrologique théorique sans mouvement d'eau
1 500 m x 19,20 m^2 = **28 800 m^3**/l'ouvrage.

Et, à raison d'une vitesse de 4 m/s (rapport Ponton) on a, si le débit d'aval peut s'évacuer sans obstruction :

$$Q = vS = 19,20\ m^2 \times 4 = 76,80\ m^3/s$$

où v représente la vitesse de l'écoulement
et S la section mouillée

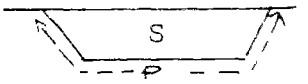
• CALCUL DU DEBIT D'UNE RUE-CANAL

Le calcul du débit d'une rue-canal peut être assimilé à la formule classique de CHÉZY, ou le débit (Q) est égal à la vitesse (v) par la section mouillée (S), $\boxed{Q=vS}$

$$v = C\sqrt{R_h\, i}$$

ou la vitesse est égale à :
la rugosité du fond(C) x racine carrée du rayon hydraulique (R_h) x pente en % (i),

$R_h = \frac{S}{p}$ surface mouillée / périmètre mouillé

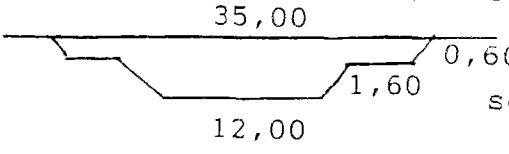


$C = K\, R_h^{1/6}$ formule de Manning-Strickler pour le problème de la rugosité du fond

K= 60 pour les maçonneries
90 pour les canaux de béton très lisse

• APPLICATION

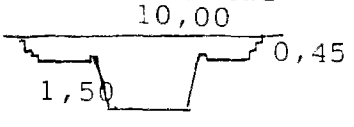
1- Calcul pour l'estimation du débit d'un Boulevard-canal pente 1%



section 40,2m²

p=12+4+22 =38m
$R_h = \frac{S}{p} = \frac{40}{38}$
v= 6m/s
Q= vS = 6 x 40m² = 240m³/s

2- Calcul pour l'estimation du débit d'une rue-canal pente 1%



section 13,5m²

$R_h = \frac{13,5}{12} = 1,1$
v= 6m/s
Q= vS = 6 x 13 m² = 80m³/s

3- Calcul pour l'estimation du débit d'une rue-canal pente 4% (rue Vincent Faïta, Nîmes)

v= 12m/s
Q= 13m² x 12 m/s = **160m³/s**

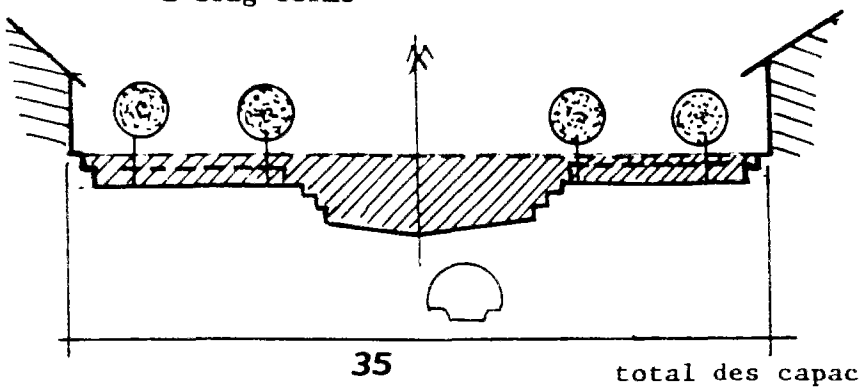
B - Solution maximale
décaissement général de la voie et des trottoirs
suivant le principe de NEW-DELHI

Transit d'une crue sur toute la largeur du boulevard
Surcoût par rapport à la solution A.

destruction chaussée existante
20,5m x100F = 2.050F/ml
déblaiement 35mx0,60x 50F= 1.050F/ml
déplacement des concéssionnaires= pour mémoire
déplacement des arbres d'alignement sur 2 ans
2 arbres tous les 7 m = 5.000Fx2 : 7ml = 1.500F/ml
construction des emmarchements privés (3 marches)
1m2x 2x 300F : 7 ml(entrées) = 857,14F/ml
décaissement bâti et renforcement fondations:parement
0,60x 500Fx 2 = 600F/ml
pavage mail = 3mx éx 300F = 1.800F/ml
sol stabilisé = 16mlx 1mlx 100F =1.600F/ml

prix du m2 = 8.847:35m = 252,77F/m2
prix du m3 = 8.847:21m3= 421,29F/m3 évacué

travaux
à long terme



zone d'ennoiement possible
avant dommages

35x0,60= 21m^2/section

total des capacités hydrologiques
21m^2+19,20m^2= 40,20m^2/section mouillée

PRINCIPE

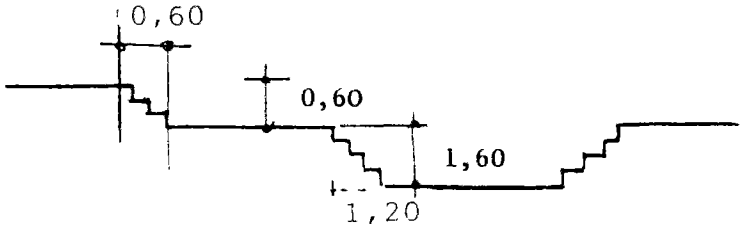


Figure 344- Solution maximale:décaissement de la voie et des trottoirs

Les capacités de transit hydrologique s'adaptent
aux capacités d'accueil urbanistique et à la
profondeur des réseaux hydrauliques principaux.

2- Solution maximale. Décaissement général de la voie suivant des principes de New-Delhi : (figure 344)

• Décaissement

- possibilité hydraulique : les mêmes contraintes que pour la solution minimale, à savoir la profondeur des égoûts principaux

- possibilité urbanistique :

• Décaissement généralisé des "hauts côtés" par un surbaissement des trottoirs de 0,60 maximum (3 marches x 0,15 de contremarches + pente) qui correspond au : seuil de franchissement acceptable pour accéder à une porte d'entrée (avec possibilité de rampes) et au seuil acceptable de déchaussement des mûrs de fondations du bâti existant.

• Les capacités hydrologiques :

Les capacités hydrologiques sont très importantes :
0,60 x 32 m = 21 m^2/section mouillée.
Elles sont à rajouter à l'écoulement central déjà calculé.

Total : 19,20 m^2 + 21 m^2 = 40,20 m^2/section mouillée.

• Vitesse d'écoulement :

Si l'on s'appuie sur le rapport Ponton, la vitesse d'écoulement était de 4 mètres/seconde minimum lors de l'évènement de Nîmes.

Capacité théorique de débit de l'écoulement :
Q = vS = 40,20 m^2 x 4 m/s = 160,80 m^3/seconde.

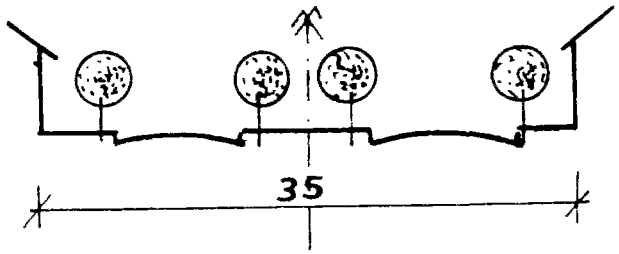
• L'efficacité du système :

La solution maximale n'est efficace, c'est-à-dire maîtrisable, que si la phase minimale de l'écoulement central est réalisée, l'objectif premier étant de canaliser la violence des eaux.

• La maintenance du système

La solution maximale risque de provoquer de légères détériorations (sol en stabilisé, vulnérabilité des aires de stationnement, laminage du bâti sur 0,60 cm.) que l'on peut envisager d'accepter face à l'espacement théorique des catastrophes de ce type (50 ans/ 100 ans/ 250 ans).

PLANIFICATION A LONG TERME D'UNE RUE-CANAL



ETAT DES LIEUX

SOLUTION.1
SOLUTION MINIMALE

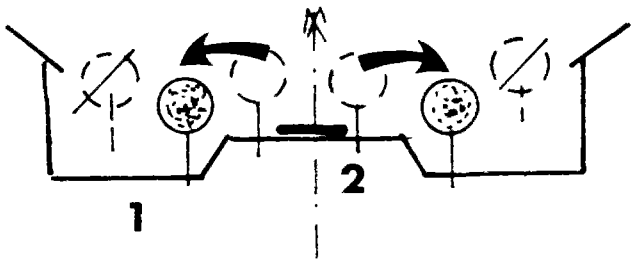
décaissement partiel de la voie centrale.On garde les 4 rangs d'arbres d'alignement.

Transplantation de 2 rangs planifiée sur 2 ans(machine Vermer)

canalisation du risque
création d'écoulement préferentiel

____ ciculation provisoire

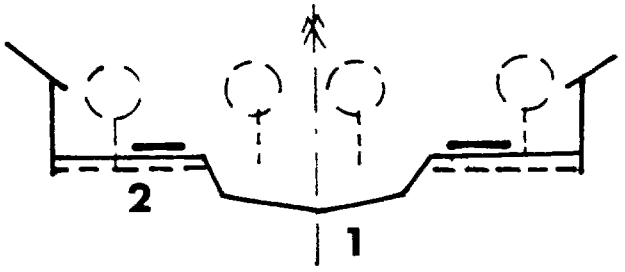
SOLUTION.2
SOLUTION MAXIMALE
décaissement général



1-décaissement des bas-côtés en premier.
2-réalisation de la rue-canal en second.

On perd 2 rangs d'alignement
Replantation de tiges transplantées 25/30 après la phase 1 des travaux.

SOLUTION MIXTE -3
décision échelonnée de travaux à long terme.(solution à retenir si budget échelonné)



1-réalisation de la rue-canal en premier.
2-réalisation des bas-côtés en 2

On perd 4 rangs d'arbres replantation de tiges transplantées 25/30. On perd de la profondeur en réalisant la phase 2 après la phasel sauf si on avait déjà atteint l'égoût

Figure 345 - Les choix entre les différentes protections

• **La notion du risque**

La solution maximale du décaissement généralisé de la voie ne renforce pas l'image du danger.
Par contre, le décaissement central, à l'image d'un RAVIN, par sa présence anachronique, est un moyen sûr de marquer le site et donc de préserver la mémoire du risque hydrologique sur de très longues durées telles que 100 ans.

• **Avantages multifonctionnels**

Aucun à notre connaissance pour un décaissement général.

• **La planification** (figure 345)

La planification d'un décaissement général est très difficile à réaliser, en fonction des difficultés de chantier et de la conservation des arbres d'alignement existants.

D'autre part, il vaut mieux retenir le choix de cette décision dès le début des aménagements à court terme.

Solution 1 : décaissement partiel central, solution minimale :

- On sauve les 4 rangs d'arbres d'alignement en faisant une transplantation planifiée,
- La ciculation n'est pas entravée pendant les travaux, par l'organisation d'une circulation provisoire.

Solution 2 : décaissement général, solution maximale :

- On ne peut sauver que 2 rangs d'arbres d'alignement,
- La décision d'un décaissement général a été prise dès le début de la planification,
- Le creusement de la partie centrale vient en phase 2.

Solution 3 : décaissement général, solution maximale, mais décision prise après la réalisation de la solution minimale :

- La rue-canal est déjà réalisée,
- On perd les 4 rangs d'arbres d'alignement mais on peut envisager leur remplacement par des sujets de pépinières (arbres transplantés 20/25),
- On perd de la surprofondeur du canal central.

• L'investissement d'un encaissement général de la voie:

Coût marginal par rapport à la solution minimale déjà planifiée d'un encaissement central.

Coût du m^2 : 8 847 F : 35 m = + 252,77 F/m^2 par m de section construite
Coût du m^3 d'eau transité : 8 847 F : 21 m^3 = + 421,29F/m^3

• Coût-efficacité de la solution globale

1- **Coût global** du mètre linéaire de section pour 40 m^3/m évacués
le m^2 = 2 605,54 F/m^2 par m de section construite
le m^3 = 2,170 F/m^3 transité

2- **Coût global de l'ouvrage**
1 500 m x 35 m de large x 2 605,54 F = 136 790 850 F/l'ouvrage
soit 137 millions de Francs (valeur 1992).

3- Capacité hydrologique théorique (sans mouvement) de l'avenue Jean Jaurès sur 1,5 km
1 500 m x 40 m^2 = 60 000 m^3/l'ouvrage

4- Si la vitesse est de 4 m/s, le débit d'aval sans rétrécissement est de 40 m^3 x 4 = 160 m^3/seconde.

Le cadereau d'Uzès.

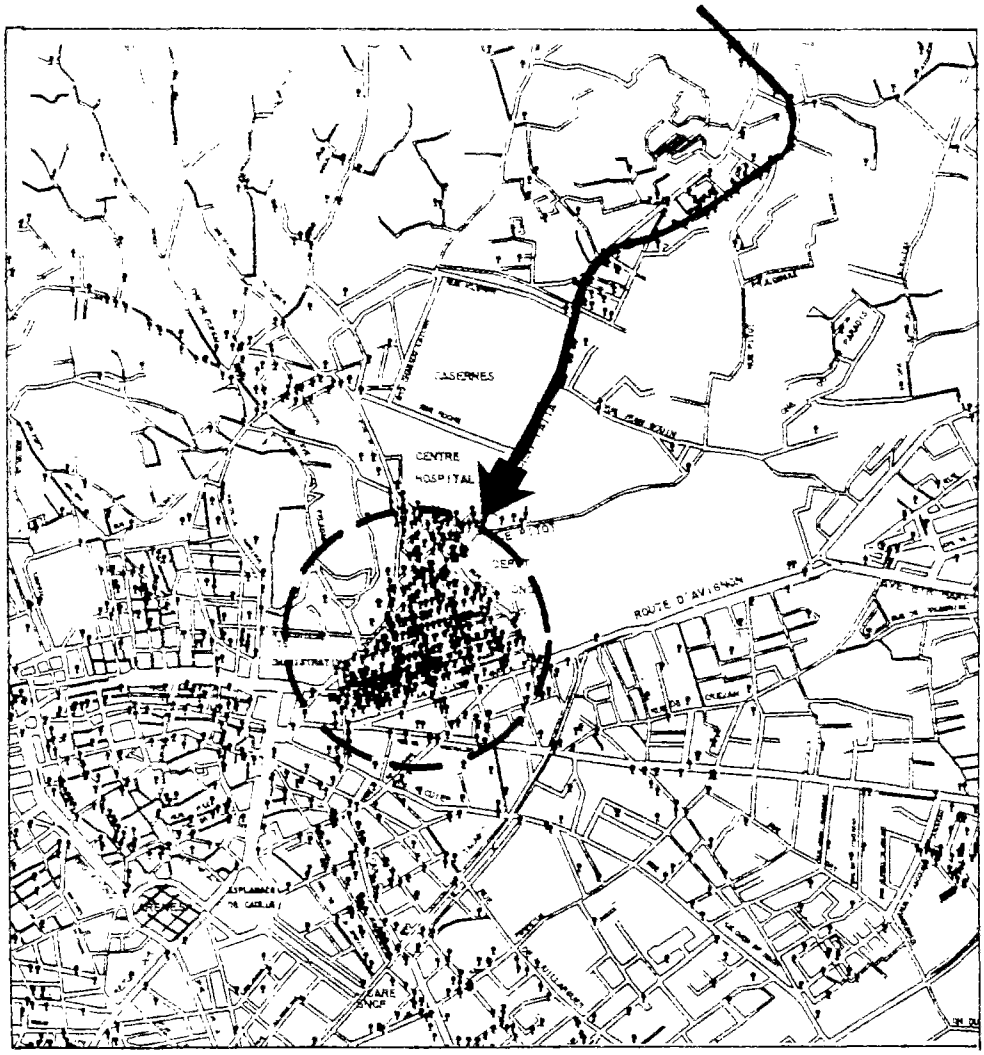


Figure 346 - Quartier Richelieu -Nîmes

Le plus fort taux de sinistres après la crue de 1988.

b2- La rue-canal sur voie étroite application : la rue Vincent Faïta et la route d'Uzès intra-muros (Nîmes)

Situation de la rue :

La rue Vincent Faïta se trouve à l'amont du quartier Richelieu, fortement endommagé lors de la catastrophe de 1988 (le plus fort taux de sinistres sur Nîmes, figure 346).

Etat des lieux :

- Rue implantée sur le tracé d'une ancienne rivière
- Rivière mise en souterrain (galerie)
- Étroitesse de la voie : 8 à 10 mètres
- Forte déclivité dans certains secteurs : + 5 %
- Habitat ancien : R+1 et R+2

En Octobre 1988, la rue s'est transformée en un véritable TORRENT (figure 347).

PROPOSITIONS : **1-** Décaissement de la voie principale et mise en place de parapets,
2- Décaissement supplémentaire des trottoirs.

1- Décaissement de la voie principale et mise en place de parapets (figure 348)

- **Décaissement**

- Possibilité hydraulique :

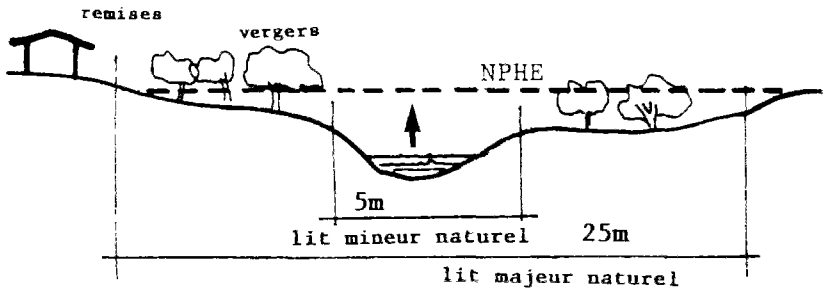
On remodèle le profil de la voie en fonction de l'enfoncement actuel de l'égoût principal et des galeries anciennes.

- Possibilité urbanistique :

On remodèle le profil de la voie en fonction de la largeur de la rue, de la proximité des façades , de l'aspect visuel de l'ouvrage hydrologique de surface, du seuil de tolérance du franchissement piétonnier et des pentes des raccords des voies perpendiculaires.

Origine des lieux

1800



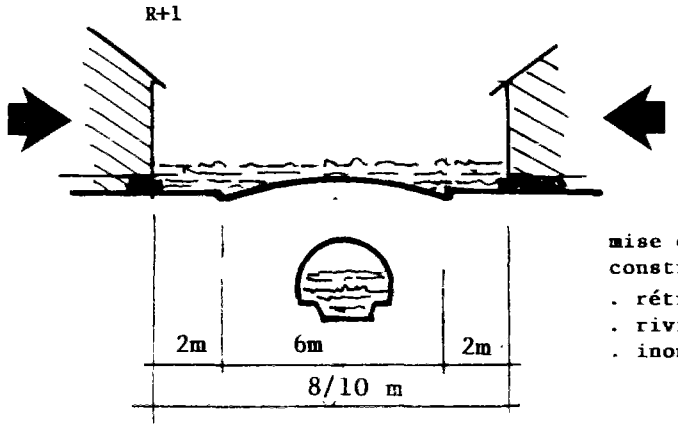
CAPACITE D'ACCUEIL HYDROLOGIQUE NATUREL

limites visuelles géomorphologiques
(site de Clermont-Ferrand - l'Artière)

rivière séche ou en eau

EVOLUTION

1988

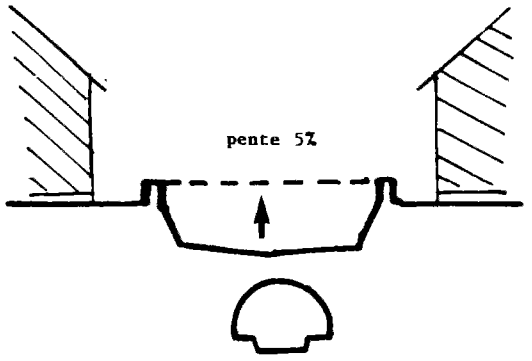


Voie étroite
rivière canalisée
Etat des lieux actuels

mise en place de l'infrastruture sur l'hydrologie
constructions en limite de propriétés

. rétrecissement du lit majeur par l'urbanisation
. rivière busée mise en souterrain
. inondations de 1988 . niveau d'eau.

2000



Proposition
travaux à long terme

décaissement de la voie
mise en place de parapets
pour s'adapter àl'étroitessse de la voi
et à la violence des courants.

possibilité hydrologique
6x 1,5 = 9m3/ ml

éch. 1/250°

Figure 347 - LA RUE-CANAL SUR VOIE ETROITE
Evolution urbanistique et hydraulique.
la rue Vincent Falta . Nîmes.

Nos propositions sont les suivantes :

• Décaissement de la partie centrale, avec le maintien des trottoirs et de leur niveau actuel,
• Mise en place de parapets, plutôt que de gradins, vu l'étroitesse de la rue et la force des courants,
• Franchissement de l'ouvrage hydrologique par des escaliers et des rampes aux croisements des rues et mise en place d'escaliers de sécurité intermédiaires.

Le seuil "d'acceptibilité" de l'ouvrage dans son environnement paraît être un encaissement maximum de 1,50 mètre. Ce seuil a été déterminé en fonction des problèmes des raccords de pentes entre la rue-canal et les voies perpendiculaires (figure 351), en fonction du nombre maximum de marches par palier usuellement limité à 9 marches, du seuil de tolérance du franchissement piétonnier, et en fonction de l'enfoncement supposé des égouts, les autres réseaux des concessionnaires se trouvant généralement sous les trottoirs.
Au niveau de la SECURITE, et contre les chutes de piétons, il est à prévoir :
• Une balustrade urbaine de sécurité qui peut être du même type que la balustrade anti-embâcle
• Ou un mur d'appui de 1,10 mètre de hauteur.

2- Décaisement supplémentaire des trottoirs

Il est possible de décaisser l'ensemble de la largeur de la voie sur 0,45 m de hauteur, ce qui correspond à des seuils pour l'habitat de 3 marches avec 0,15 m de contremarche (figure 348b).

• Les possibilités hydrologiques :

Capacité hydrologique pour le transit des crues :

- un décaissement central (6,00 mètres de voie) :
  6,00 m x 1,5 m de profondeur = 9 m^2/section mouillée
- un décaissement général de 0,45 m en plus du décaissement central (principe de New-Delhi) :
  10,00 x 0,45 m de profondeur = 4,50 m^2/section mouillée

Total des possibilités : 9 m^2 + 4,50 m^2 = 13,50 m^2/section mouillée.

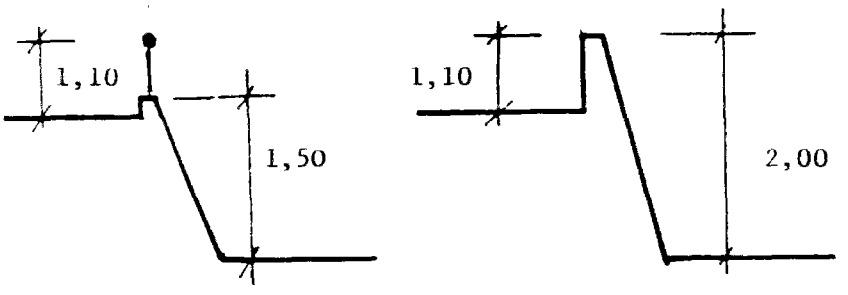
• L'efficacité du système

Il est évident que des rues aussi étroites, à écoulement préférentiel, peuvent difficilement garantir une protection de type centennale.

Par contre, la violence des eaux est concentrée dans l'axe de la voie, le plus loin possible des façades.

Les parapets
avec balustrades

Les parapets
avec mur d'appui

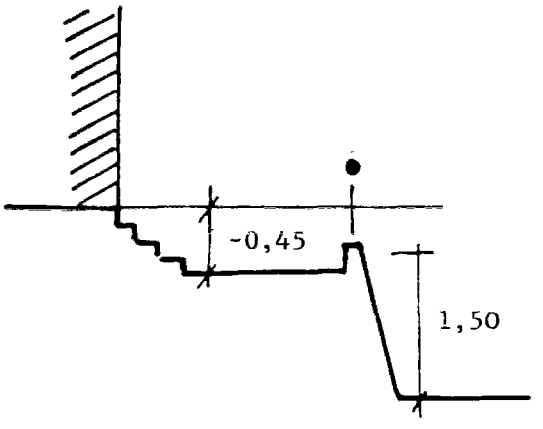


a- SOLUTION MINIMALE

Décaissement de la voie centrale.

Capacité de transit hydrologique
$9m^2$/section mouillée

b- SOLUTION MAXIMALE



Surcreusement des trottoirs et décaissement de la voie centrale

Capacité de transit
(6mx1,50)+(10mx0,45)=
$13,50m^2$/ section mouillée

Figure 348 - LA RUE-CANAL AVEC PARAPETS

Ces travaux participent à l'amélioration générale des passages des eaux d'inondations par ruissellement intra-murcs et donc à une diminution des dommages.

C'est pour cela que nous relions cet investissement à un plan de gestion hydrologique d'ensemble tels les voies de délestage, de dérivation (paragraphe 3.4.4.1.4.), les aménagements de rétention à la parcelle d'amont, etc.

• La maintenance du système

Face à la violence des courants, sont à assurer :

- la résistance des parapets dont les parois servent de berges aux courants,
- la résistance du revêtement de fond de la chaussée, qui a une fonction de coursier de sortie de barrage.

Nous rappelons que les deux revêtements de chaussée qui ont le mieux résisté à la catastrophe de 1988 sont les pavages autobloquants et les sols en béton.

• La notion du risque

Les travaux d'aménagements de surface de type parapets peuvent difficilement faire oublier le motif de leur présence de la mémoire collective.

La dénégation du danger n'est pas possible. Mais on peut toujours renforcer la prise de conscience du risque par des plaques commémoratives intégrées aux parapets.

• Avantages multifonctionnels :

La sécurité des piétons, qui se trouvent isolés de la circulation automobile.

• Les inconvénients :

Les difficultés de franchissements transversaux de l'ouvrage hydrologique pour le piéton, ainsi que pour les réseaux des concessionnaires perpendiculaires à la voie.

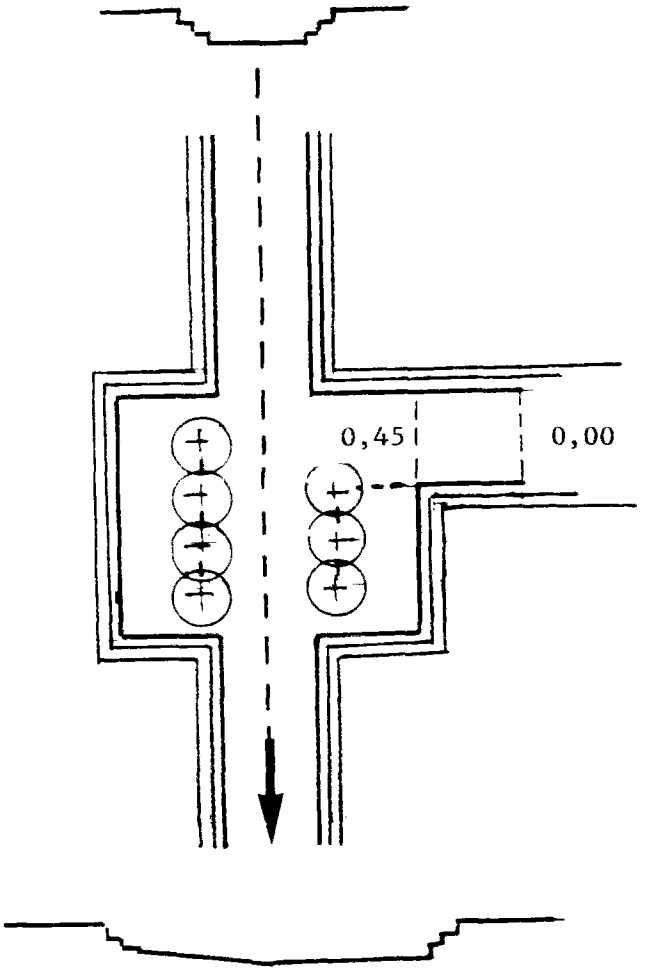
• La planification :

1ère phase à court terme :

- réglementation de la circulation,
- stationnement interdit.

2ème phase à long terme :

- interruption de la circulation pendant les travaux,
- travaux par secteurs pour limiter la gêne.



PLACE D'IMMERSION

Sens de l'écoulement préférentiel
Stationnement autorisé
Balustrades anti-embâcles
et arbres d'alignement

Piégeage des véhicules stationnées
voitures ennoyées

Figure 349- **PRINCIPE DE LA PLACE URBAINE DECAISSEE**
pour la maîtrise du risque hydrologique

• **Le coût d'investissement**

1- Pour un décaissement central, avec les trottoirs conservés.

Coût du m^2 = 17 050 F : 6 m = 2 841,67 F/m^2 par m de section construite
Coût du m^3 = 17 050 F : 9 m^3 = 1 894,44 F/m^3 transité

2- Coût marginal d'un décaissement supérieur incluant le décaissement des trottoirs suivant le principe de New-Delhi.

Coût du m^2 = 2 677,14 F : 10 m = + 267,71 F/m^2
Coût du m^3 = 2 677,14 F : 4,50 m^3 =+594,92 F/m^3

3- Solution globale :

Le m^2 = 19 727,14 : 10 m,00 = 1 972,71 F/m^2 par m de section construite
Le m^3 = 19 727,14 : 13,50 m^3 = 1 461,27 F/m^3 transité

• **Coût-efficacité pour 500 mètres d'ouvrage de rue-canal**

1- Coût global de l'ouvrage :

500 m x 10 m^2 x 1 972,71 F = 9 863,550 F soit
10 millions de Francs (Valeur 1992).

2- Efficacité hydrologique théorique :

500 m x 13,50 m^2 = 6 750 m^3/l'ouvrage

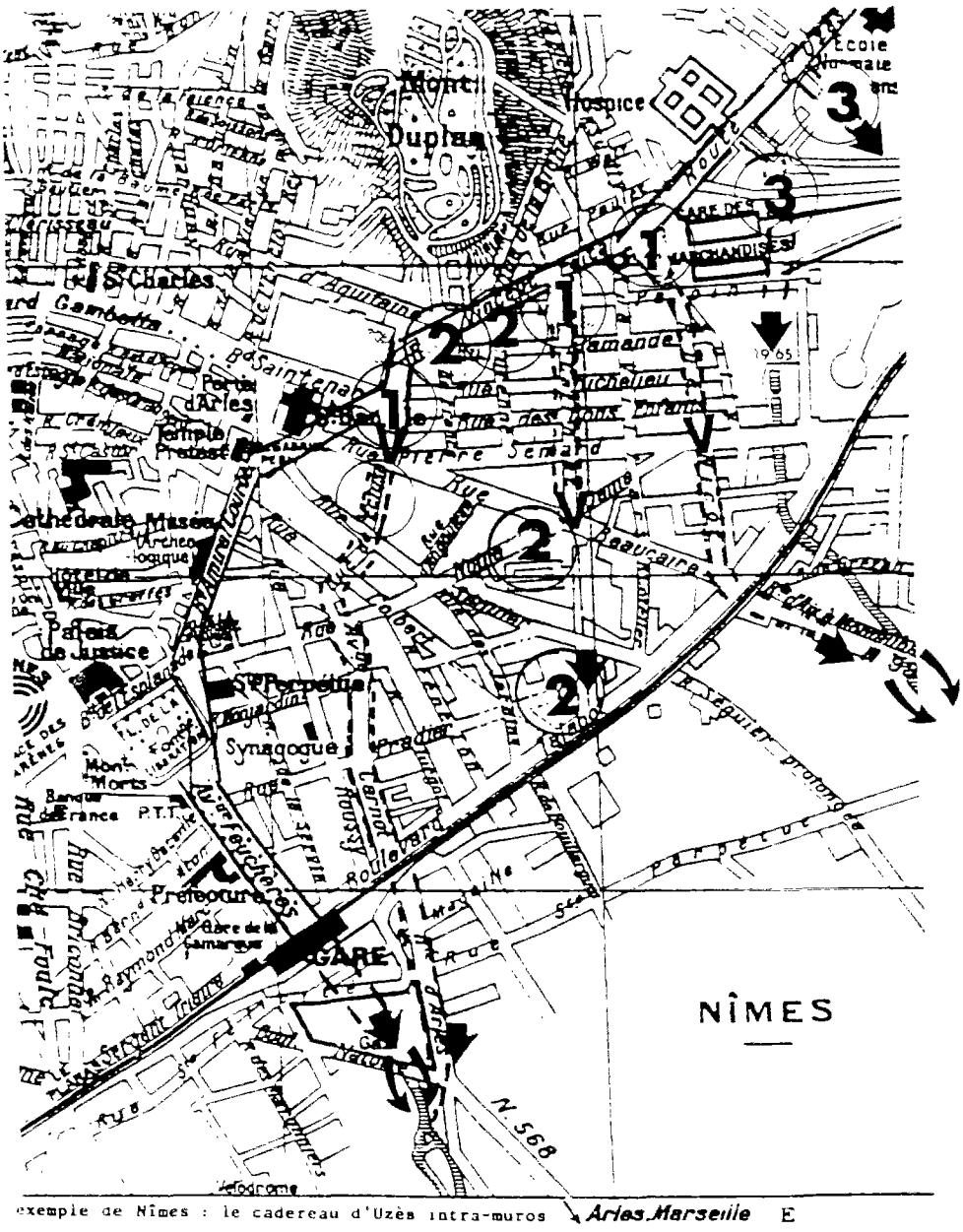
3- Si la vitesse atteint 4 mètres/seconde : Q = vS

Q = 13,50 m^2 x 4 = 54 m^3/s de débit.

b3- Décaissement de place urbaine (figure 349) :

On peut aussi envisager le décaissement de places urbaines se trouvant dans l'axe des écoulements préférentiels.
La place, dans le prolongement de la rue-canal, devient une PLACE D'IMMERSION.

L'esthétisme doit diriger la construction de l'ouvrage hydrologique, de façon à l'intégrer dans son environnement.
Les stationnements : en cas de crise, les voitures sont ennoyées mais ne doivent pas partir à la dérive (présence d'arbres, de balustrades de rétention faisant obstacles ...).



exemple de Nîmes : le cadereau d'Uzès intra-muros

1 VOIES DE DELESTAGE HYDROLOGIQUE

2 VOIES PRESERVEES

3 VOIES DE DERIVATION

Figure 350- **Différentes possibilités d'aménagements hydrologiques de voies.**

3.4.4.2.2. **Les voies de delestage hydrologique par surverse - application à Nîmes : rue Sully, rue Catinat, rue de l'Ecluse** (figure 350)

Afin de désengorger la voie-canal principale, lors des crues exceptionnelles, surtout si cette voie est étroite, nous préconisons des voies de DELESTAGE hydrologique basées sur la fonction de SURVERSE de secours par rapport à la rue principale.

Le procédé :

A titre d'exemple pour une rue-canal de 1,50 mètre de profondeur, la voie latérale de SURVERSE, située sur le côté aval, est à une profondeur moindre comprise entre 0,50 m et 1,00 mètre (figure 351).

Ces surcreusements latéraux nécessitent la réorganisation des jonctions avec les exutoires naturels et avec la création de passages souterrains si nécessaire.

Proposition :
Elle varie suivant la définition de la surverse:

• Décaissement d'une rue de 4,00 mètres de largeur sur une profondeur de 0,60 par exemple, correspondant à un décaissement de 4 marches,
• Maintien des trottoirs,
• Emmarchements de sécurité de 4 marches,
• Stationnement interdit.

• **Les capacités de passage hydrologique**
Capacité hydrologique pour le transit des crues :

Voie de délestage : 4 mètres x 0,60 = 2,40 m^2/section mouillée

Capacité hydrologique théorique de l'ouvrage :
300 mètres en moyenne pour les rues citées,
300 m x 2,40 m^2 = 720 m^3 l'ouvrage.

• **L'efficacité du système**

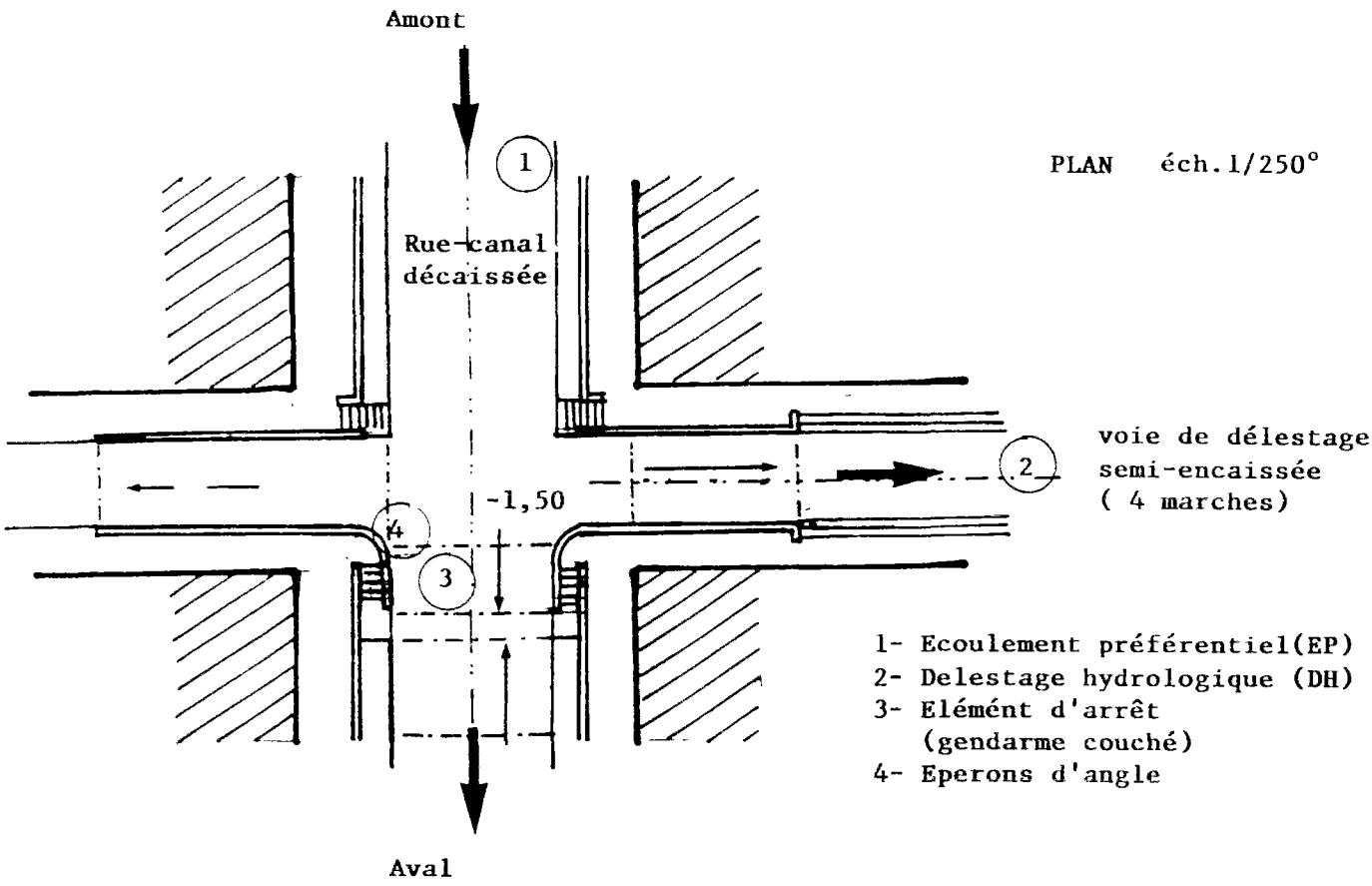
Il dépend de la résistance des éperons d'angle formant butoirs et de la facilité avec laquelle les eaux pourront être dérivées.

• **La maintenance du système**

Une bonne maintenance dépend de la résistance à une crue exceptionnelle des parapets et du fond de forme.
La gestion consistera en des nettoyages de boues après les crues.

• **La notion du risque**

L'image de l'encaissement des voies et l'interdiction d'y stationner font perdurer la notion du risque.



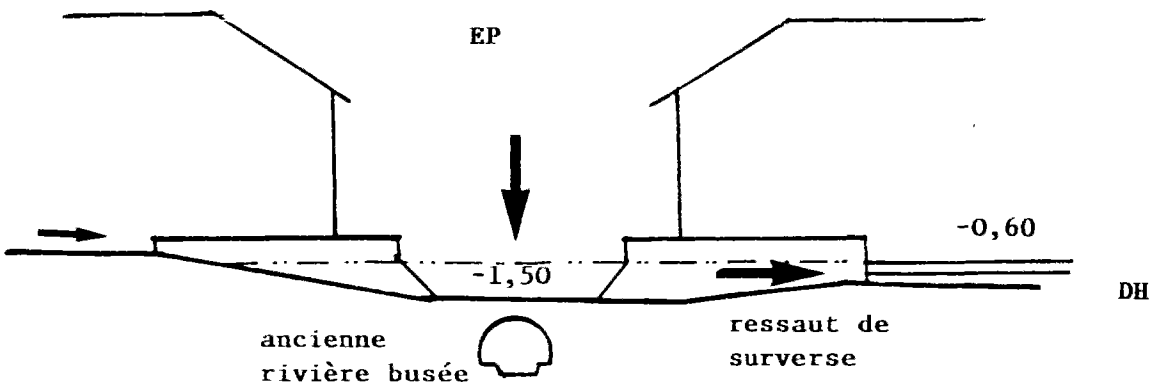


Figure 351 - LA VOIE DE DELESTAGE HYDROLOGIQUE

• **Le coût d'investissement**

Surcreusement 750 F/m d'ouvrage
Construction 3 200 F/m d'ouvrage

Coût de l'ouvrage hydrologique au mètre linéaire = 3 950 F/m de section

Coût de l'ouvrage par m^2 = 3 950 F : 5 m = 790 F/m^2 par m de section construite

Coût de l'ouvrage par m^3 maîtrisé et évacué : 3 950 F : 2,40 m^3 = 1 645 F/m^3 transité

• **Intérêt multi-fonctionnel :**

Néant, en dehors de l'intérêt hydrologique et de la réduction des dommages.

• **Rapport coût-efficacité** : Pour 300 mètres de rue :

1- Coût global de l'ouvrage :
300 m x 3 950 F = 1 185 000 F/l'ensemble,
soit 1 million de Francs (Valeur 1992)

2- Efficacité hydrologique théorique
300 m x 2,40 m^2 = 720 m^3/l'ouvrage

3- Si la vitesse atteint 4 mètres/seconde
Q = 2,40 m^2 x 4 = 9,60 m^3/s de débit
par la formule classique de Chézy, pour un canal à surface libre, avec une pente de 1 %
Q = vS (vitesse x section mouillée)

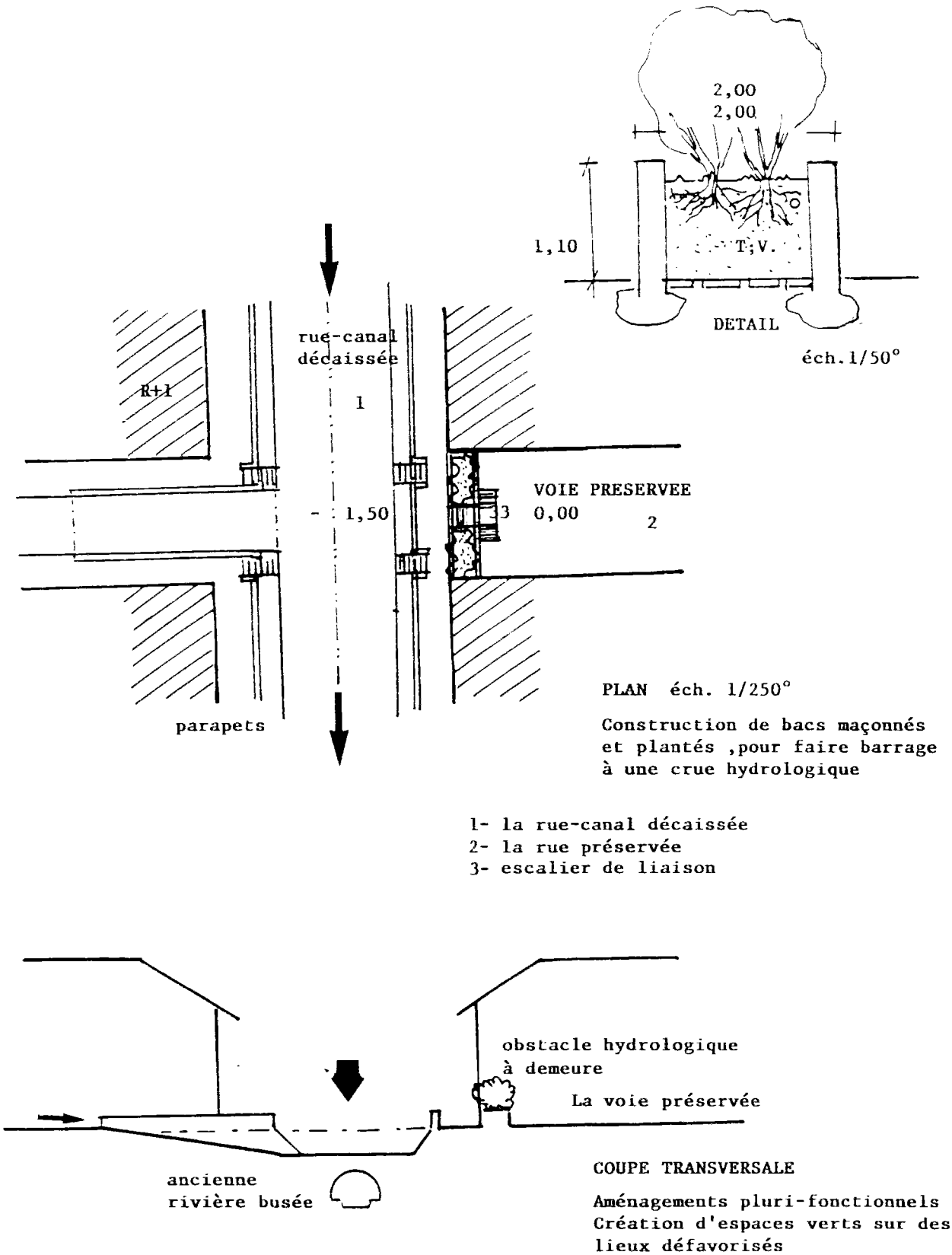


Figure 352 - LA VOIE PRESERVEE

3.4.4.2.3. **Les voies préservées** (figure 352) - Exemple à titre indicatif : rue de Turenne - Nîmes

• **Situation de la rue**

La rue de Turenne fait partie de l'ensemble très sinistré lors de la catastrophe de 1988. Mais le choix des rues à préserver dépend d'une étude générale de la circulation et des risques hydrologiques à mener par le Maître d'Ouvrage.

• **Le procédé**

Face au risque du passage d'une crue centennale avec de forts courants, nous proposons de barrer certaines voies de façon définitive :

- constitution de murets de 1,00 m de hauteur en béton banché coulé sur place,
- aspect agréable : constitution de bacs d'arbustes à fleurs,
- franchissement possible par petit escalier.

• **Les capacités hydrologiques** : nulles.

• **L'efficacité du système**

Système très efficace vis-à-vis des courants violents, la rue préservée en étant protégée.
Système efficace vis-à-vis de l'absence de l'eau si la rue est en pente.
Sinon, il peut y avoir des "retours" d'eau par l'autre bout de la voie, en cas de terrain très plat, mais sans courants violents.

• **La maintenance du système**

Le système est maintenu tant qu'il n'est pas démoli. C'est pour cela que nous préconisons des bacs à fleurs en béton coulés sur place, plutôt que des bacs amovibles.

• **La notion du risque**

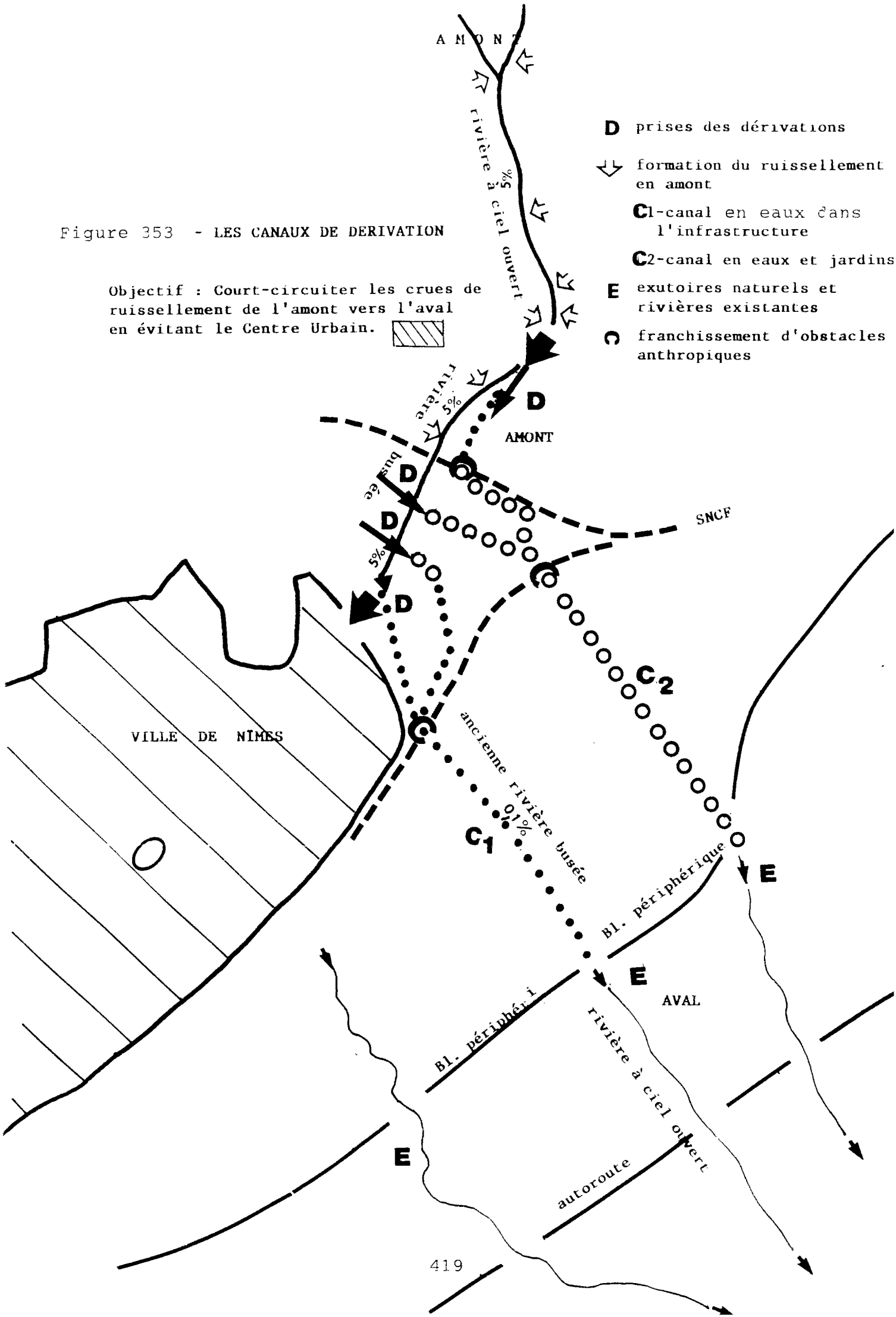
Ce type de travaux, par leur obstacle physique, ne peut que maintenir la prise de conscience du RISQUE dans la mémoire collective.
S'il le faut, une plaque commémorative sur le muret rappellera le motif de sa présence.

• **Avantages multifonctionnels**

Apport de plantations dans un îlot très déshérité.

Figure 353 - LES CANAUX DE DERIVATION

Objectif : Court-circuiter les crues de ruissellement de l'amont vers l'aval en évitant le Centre Urbain.



• **La planification**

La "rue préservée" aurait pu faire partie des travaux à court terme, vu la facilité d'exécution de l'ouvrage et le faible coût, mais nous la maintenons dans les études à long terme, sa définition étant liée aux autres ouvrages à long terme : la rue-canal, la voie de délestage hydrologique et la voie de dérivation.

• **Le coût d'investissement**

Le mètre de muret de protection (avec escalier de franchissement) = 5 056,67 F/m.

• **Coût-efficacité de l'ouvrage**

- Coût global d'un barrage de rue : prix de l'ouvrage : 5 056,67 F x 6 m = 30 340,02 F/l'ouvrage (valeur 1992).

- Protection de toute la voie, 100 mètres de long par exemple, des courants violents et du passage de l'eau, s'il n'y a pas de débordement du muret ou de retour du courant par l'aval de la rue.

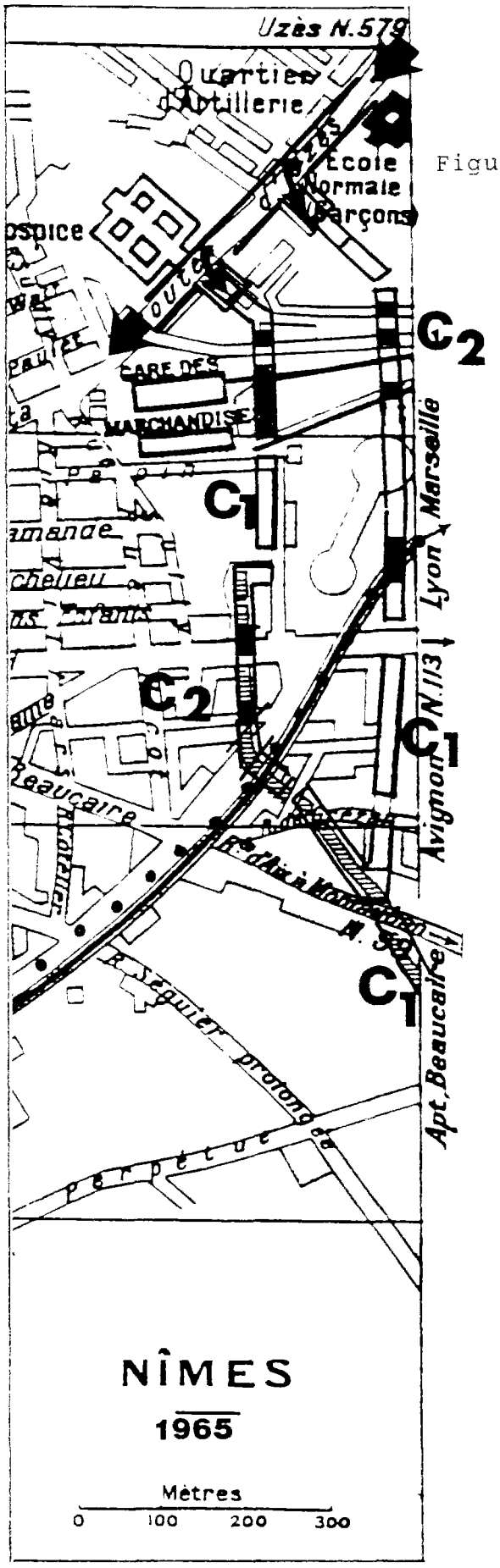


Figure 354 - LES VOIES DE DERIVATION

Enchaînement de canaux urbains en eaux

C1 = canal et infrastructure
C2 = canal et jardins

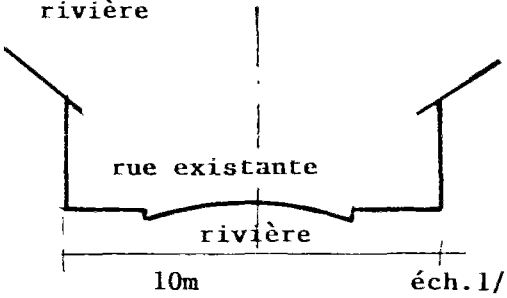
les voies de captage
piles des arches de la SCNF construites en 1900 , à dégager.

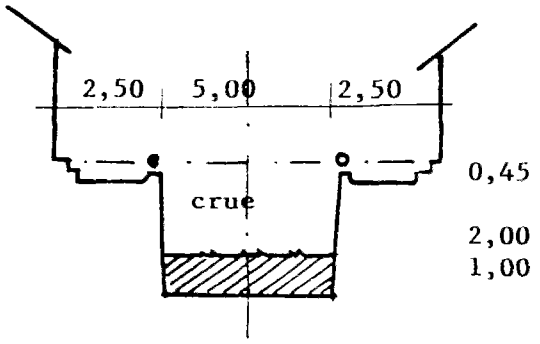
parties à ciel ouvert

parties souterraines

C1 - CANAL ET INFRASTRUCTURE

- sur terrain plat
- dans le lit d'une ancienne rivière





. réalisation d'un canal urbain

. rétention des crues de ruissellement et transit 14,50m^2/section mouillée

3.4.4.2.4. Les voies de dérivation

• **Situation** : Nîmes, route d'Uzès - gare des Marchandises
Création d'un canal de dérivation pour capter une partie des eaux de ruissellement de la route AVANT l'entrée en ville (figure 353).

• **Proposition** : Canal de dérivation comprenant une succession de BIEFS, aériens et souterrains, en fonction des obstacles (bâti, routes ...) les reliant aux exutoires naturels d'origine.

• **Canal en eau** : (figure 354)

1- Pour avoir un aspect satisfaisant et une gestion facile, les boues s'accumulant au fond du premier bassin ;
2- Pour effectuer une dépollution naturelle des eaux pluviales du secteur par :

- Décantation des matières en suspension (M.E.S.),
- Action des végétaux aquatiques,
- Action des rayons ultra-violets.

• **Alimentation du canal** : Renouvellement des eaux

L'alimentation de ce type de canal urbain doit être assurée par une source pérenne à reprendre sur le réseau d'eaux pluviales ; il existe plusieurs sources à Nîmes, actuellement rejettées dans les réseaux d'assainissement souterrains.

• **Décaissement**

Décaissement de bassins de 15,00 mètres x 5 mètres en moyenne sur 3 mètres de profondeur comprenant :

- 2 mètres pour la rétention des crues exceptionnelles,
- 1 mètre pour le niveau d'eau constant.

• **Construction**

- De bassins maçonnés, reliés entre eux par le principe gravitaire. Il n'est pas nécessaire de placer des balustrades, comme le long d'un canal.

Au niveau de la sécurité : mise en place de 2 échelles de secours par bassin :

- bassins maçonnés aériens en eau,
- bassins maçonnés souterrains à sec pour franchir les obstacles.

- aménagement d'espaces verts sur les côtés destinés à la promenade : création de "jardins".(figure 355).

• **Les possibilités hydrologiques**

Les capacités de hydrologiques pour le transit des crues sont les suivantes pour l'exemple retenu :
5 m x 2 m de prof. x 1 m = 10 m^2/section mouillée.

DES PROPOSITIONS A LONG TERME

. sur terrain dénivellé

C 2

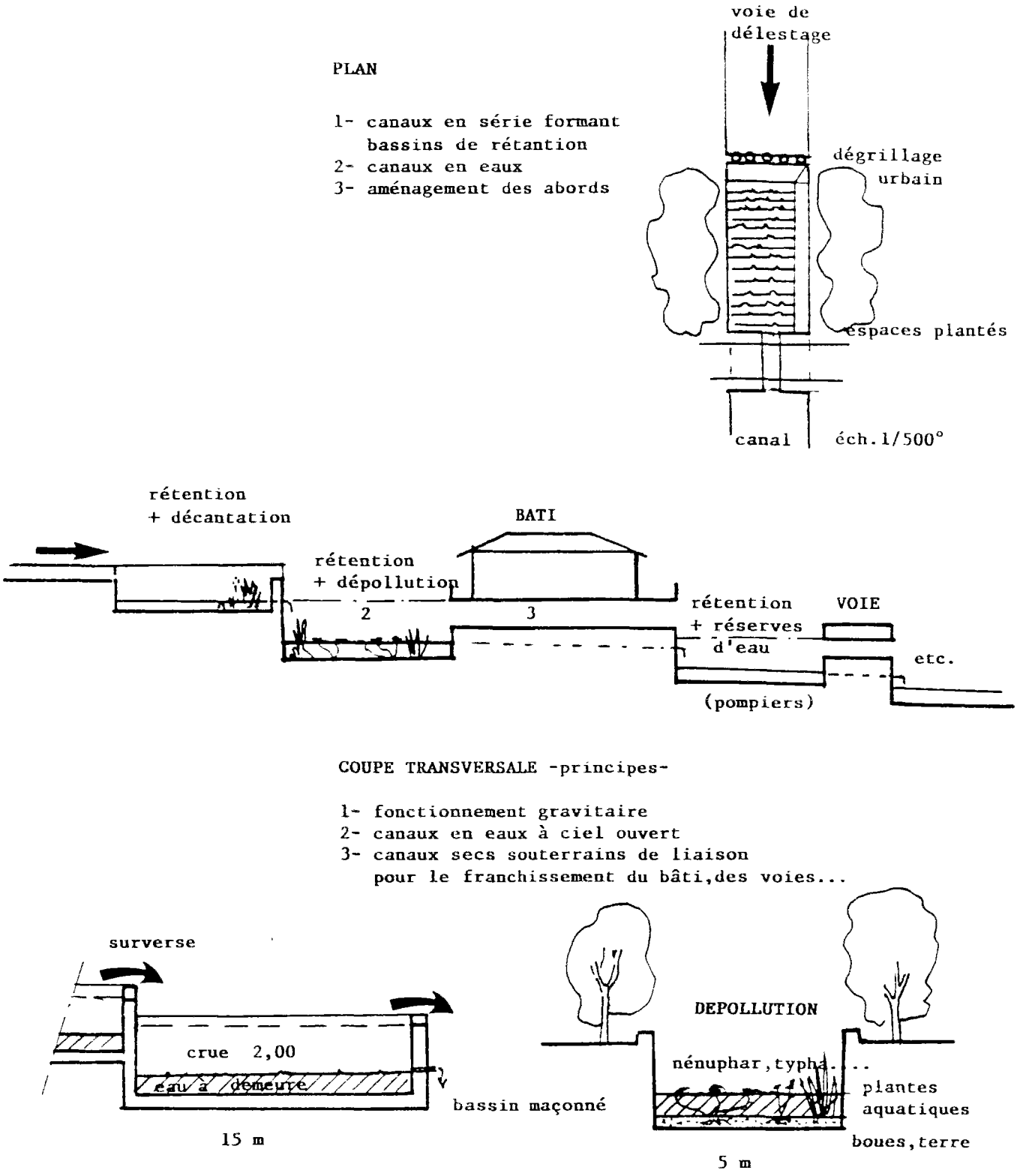


Figure 355 - LES VOIES DE DERIVATION
LES CANAUX EN EAUX
Détails.

• **L'efficacité du système**

L'efficacité dépend de la façon dont les eaux de la rue principale (ici la route d'Uzès) sont détournées :

- création d'un seuil sur voirie (gendarme couché pour la prise d'eau),
- renforcement de l'angle de défense,
- détournement par encaissement.

Les bassins du canal fonctionnent, soit au minimum par canalisation d'évacuation d'un bief à un autre, soit au maximum par SURVERSE, en cas de crise.

• **La maintenance du système**

Elle dépend de la solidité des ouvrages.

• **La notion du risque**

Comme tous les travaux maçonnés, ces ouvrages, au même titre que les canaux actuels du jardin de la Fontaine dans Nîmes, marqueront le site d'une présence constante de l'eau.

• **Avantages multifonctionnels**

- rétention ;
- dépollution par le principe du lagunage ;
- réserves d'eau pour les pompiers (accès à aménager) : il est à rappeler que 6 mois après les inondations d'Octobre 1988, Nîmes n'a pas eu l'eau nécessaire pour éteindre les feux de l'été suivant, dus à une sécheresse excessive ;
- promenade.

• **Le coût d'investissement :**

- Décaissement et construction d'un BIEF type de 15 m x 5 m sur 3 m de profondeur avec plantations,
Coût de l'ouvrage partiel = 160 400 F
Le m^2 = 160 400 F : 75 m^2 = 2 138,67 F/m^2
Le m^3 d'eau retenue : 160 400 F : 150 m^3 = 1 069,33 F/m^3 retenu.

• **Coût-efficacité pour 300 mètres de voie de dérivation**

- Coût de l'ouvrage : 300 m x 5 m x 2 138,67 F = 3 207 000 F soit 3 millions de Francs l'ensemble (valeur 1992)

- Efficacité hydrologique de l'ensemble
10 m^2 x 300 m = 3 000 m^3 l'ouvrage de rétention.

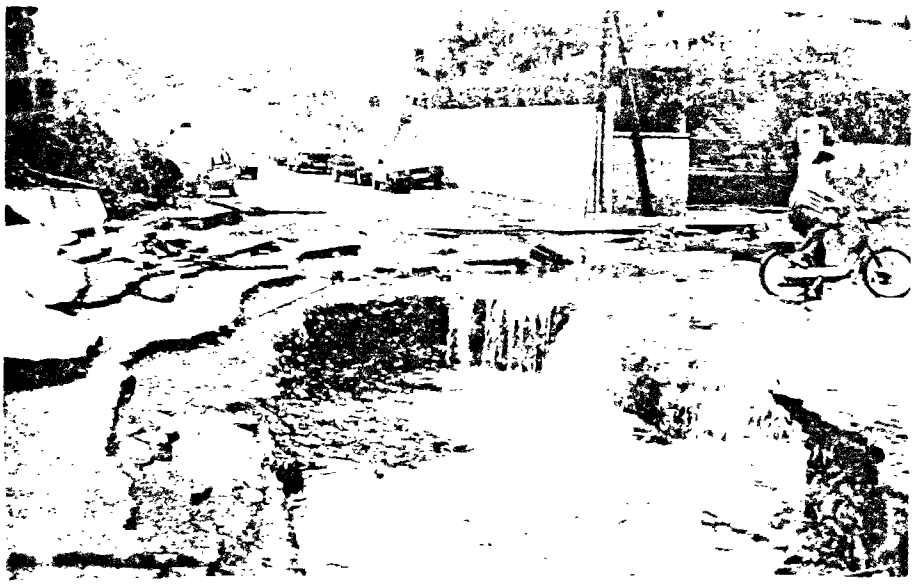


PHOTO 356
CATASTROPHE DE NIMES

Chaussée à revêtement souple détériorée en 4 heures lors de la crue de ruissellement de 1988.

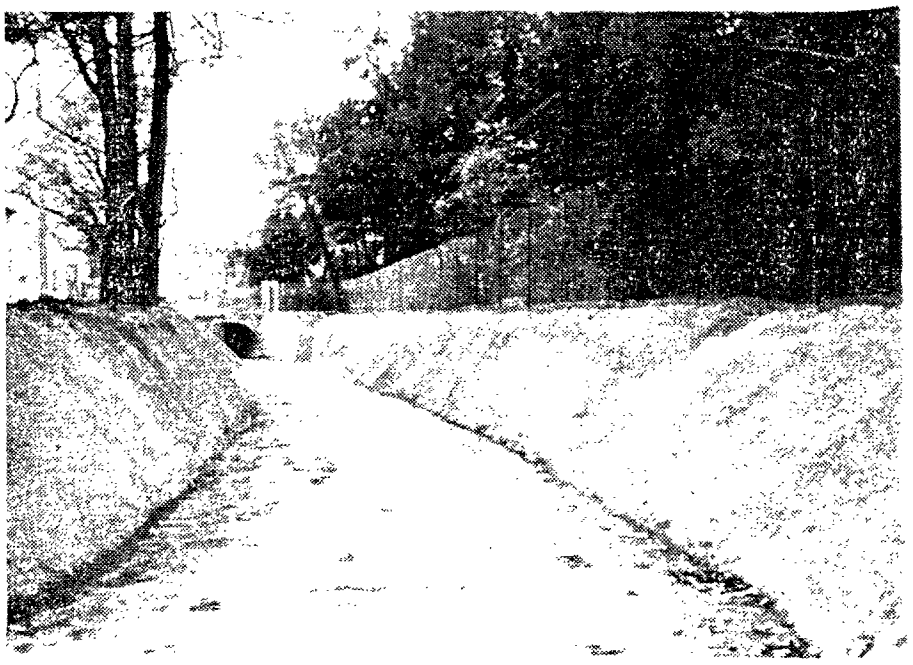


PHOTO 357
NIMES- ENTONNEMENT

Entrée du cadereau d'Alès dans un premier souterrain au-dessus du cimetière protestant. l'entonnement a été obstrué par des plaques de bitume et des voitures.Les pierres du mur de clôture se sont étalées au fond du lit sans obstruer.

1990:Travaux de restauration
-fond du lit en béton
-projection de ciment sur talus
-remplacement du mur de clôture par un grillage

Objections des sapeurs-pompiers
-le grillage ira obstruer,pour une crue identique,l'entonnement
-la protection des talus sera arrachée.

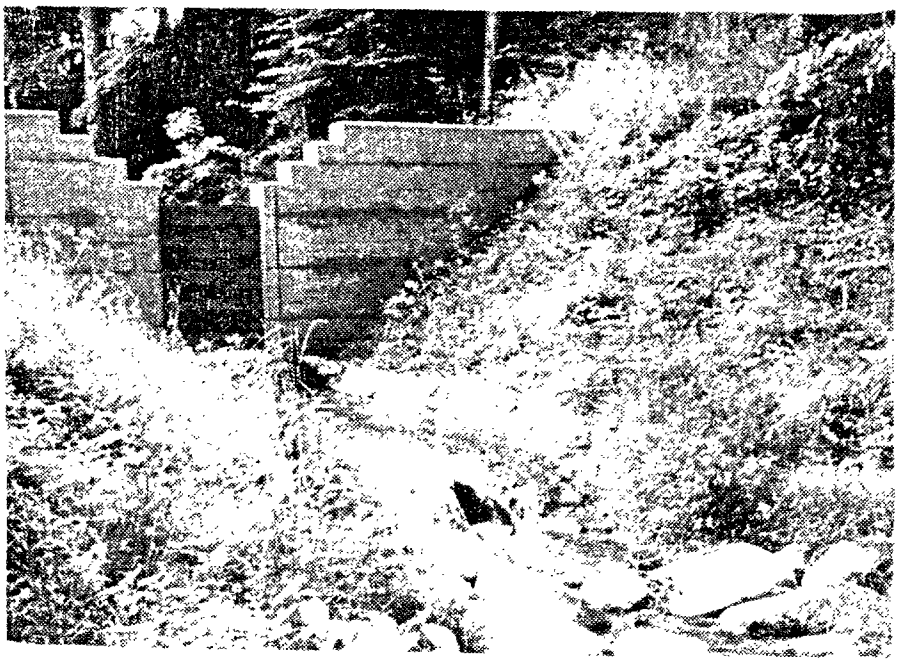


PHOTO 358
CANTON DE VAUD -SUISSE-

renforcement des coursiers après pertuis, des petits ouvrages hydrologiques.

3.4.4.2.5. Les modifications de revêtement de chaussée

Constat

Lors de la catastrophe de Nîmes d'octobre 1988, des pans entiers de revêtements de chaussée sont partis à la dérive (photo 356).

• Le rapport PONTON

Le rapport de décembre 1988 mentionne ce type de détériorations [39] (p.49).

"En matière de voirie, on a pu constater des différences de comportement entre différents types de chaussées : les chaussées bétonnées (trottoirs en général) ou en pavés autobloquants (places) résistant manifestement mieux à l'agression torrentueuse que les enrobés traditionnels, qui souvent ont été soulevés par pans entiers comme des tapis, laissant alors à nu les sous-couches qui, naturellement, ont été alors fortement ravinées par les flots. Là aussi le risque est à prendre en compte lors du choix de la solution technique".

• Les sapeurs-pompiers

Au cours de l'interview de juin 1989, les sapeurs-pompiers de Nîmes ont mentionné des décollements de chaussée en bitume lors de leur sauvetage. "Les chaussées en bitume se sont décollées et enroulées comme des "crêpes" pour venir se plaquer contre les principaux entonnements et les engouffrements".

Ce sont les revêtements de chaussées décollés avec les véhicules qui ont été les principales obstructions à l'accessibilité des eaux dans les réseaux d'assainissement et non les pierres des murs de clôtures, comme on aurait pu le penser.

Les sapeurs-pompiers ont d'ailleurs participé à une analyse sur les éléments reliquats devant l'entonnement situé au-dessus du cimetière protestant après la crise (photo 357). Ils ont surtout participé au "déblaiement" des éléments perturbateurs.

CONSTITUTION DES CHAUSSEES SOUPLES

Définition des différentes couches

La coupe d'une chaussee peut être schématisée suivant la figure ci-dessous :

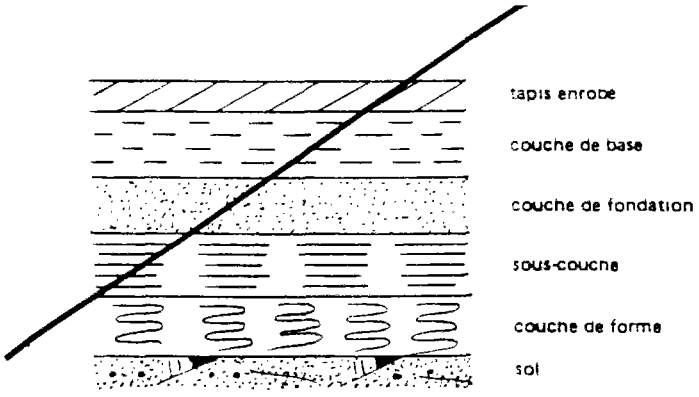


Figure 359 - L'utilisation de la chaussée souple est à PROSCRIRE pour le risque hydrologique

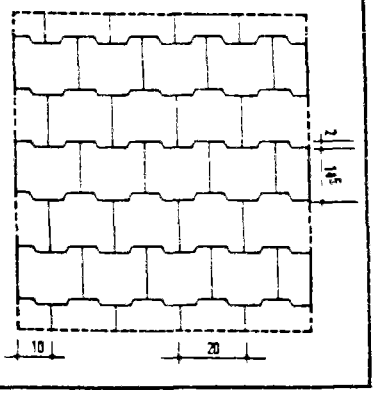
CARACTÉRISTIQUES

Les paves CK-BLOC, en béton vibré, sont fabriqués industriellement sur presses automatiques.

PRINCIPAUX COLORIS :
gris, rouge, noir, jaune, brun, ocre, ton pierre...

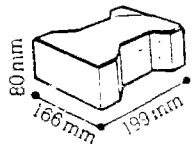
DIMENSIONS : 20 cm x 14,5 cm x épaisseurs : 6 et 8 cm.

- **PAVE NORMAL de 6 CM :** poids : 4 kg par pièce, 34 paves par m², soit : 136 kg au m²
- **PAVÉ NORMAL DE 8 CM :** poids : 5,2 kg par pièce, 34 paves par m², soit 176,8 kg au m²
- **BLOC DECORATIF :** epaisseur : 4 à 5,5 cm.



TRAFIC

Paves type H autobloquants.



CONDITIONNEMENT :

- livrés par cubes cerclés autopalettisés.
- 10,60 m² par palette.
- 34 paves par m²
- 170 kg par m²

DESCRIPTION :

- béton vibré et compacté, teinte dans la masse,
- lignes de contact chanfreinees.
- insensibilite au gel et aux hydrocarbures, antiderapants.
- pose et depose aisees,
- finition par pieces de rives.

Figure 360 - PAVAGE AUTOBLOQUANT

Utilisation recommandée face au risque hydrologique - descriptions -

a- Le choix du revêtement en fonction du risque hydrologique

Nous proposons de tirer les leçons suivantes de la crise de Nîmes d'une crue centennale en milieu urbain :
- il faut éviter l'emploi de revêtement souple de type bitumineux ;
- il faut utiliser des matériaux résistants au passage des eaux dans les écoulements préférentiels correspondant aux anciens lits de rivières ;
- on peut s'inspirer du traitement "des coursiers" aux sorties des barrages.

A ce sujet, nous rappelons le soin apporté au traitement des coursiers des petits ouvrages hydrologiques du Canton de Vaud (Suisse) par le Service des Améliorations Foncières (photo 358).

a1- Les chaussées en bitume ou goudron : utilisation à proscrire (figure 359)

Les revêtements souples semblent subir des déformations importantes qui entraînent leur destruction. Il est donc déconseillé de les employer face au risque hydrologique urbain. Pour M.RIOU, c'est sous le poids de la nappe d'eau que les décollements latéraux ont lieu (cf.paragraphe 3.2.4.4.).

Pour M.LIVET (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand), c'est sous la pression de l'eau hypodermique que la chaussée se soulève (cf. paragraphe 3.2.4.4.)

Les deux explications se complètent.

Coût d'une chaussée bitumineuse (valeur 1992) :
- voirie légère = 165 F/m^2,
- voirie lourde = 350 F/m^2.

a2- Le pavage autobloquant : utilisation recommandée

Le pavage autobloquant, en éléments durs et rigides, ne semble pas subir de déformation et donc a peu de chance de se disloquer, surtout s'il est posé sur mortier maigre.

• **Le procédé** (figure 360)

Les pavés autobloquants multidirectionnels sont des éléments préfabriqués en béton de 8 cm d'épaisseur, s'imbriquant les uns dans les autres dans les 2 directions, en longueur et en largeur et mis en quinconce.

Ils sont placés généralement avec des joints de 2 mm remplis de sable et vibrés sur lit de sable et posés sur fond de forme de 10 à 35 cm en tout venant concassé et parfaitement compacté. L'ensemble devient monolithique.

Pour les fortes pentes, les lieux humides et généralement inondables, ce qui est l'objet de l'étude, ils sont posés sur une forme en BETON MAIGRE.(figure 361)

MODE DE POSE :

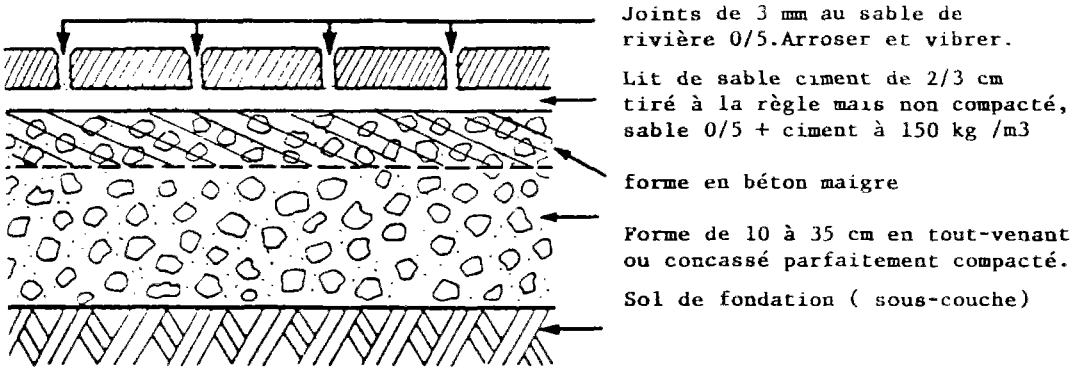


Figure 361 - MODE DE POSE D'UN PAVAGE AUTOBLOQUANT

Pour les fortes pentes, les lieux humides et géneralement inondables, le pavage est posé sur une forme en béton maigre et un lit de sable ciment.

. CLASSES DE TRAFIC

Les classes de trafic s'établissent à partir d'une moyenne journalière comptée en poids lourds de charge utile superieure à 5 tonnes, selon le décompte suivant :

classe T0	>750 poids lourds	
classe T1	300 à 750	>6000 véh./jour
classe T2	150 à 300	3000 à 6000
classe T3	50 à 150	500 à 3000
classe T4	25 à 50	<500
classe T5	0 à 25	
classe T6	aucun poids lourds	

Figure 362 - CIRCULATION

• **Les principaux types de blocage :**

Il y a deux principes de blocage pour les pavés autobloquants : blocage sur 2 faces (figure 363) ou sur 4 faces (figure 364), mais toujours posés en quinconce.

Tous ces pavés autobloquants multidirectionnels sont adaptés aux circulations intensives de véhicules : poids lourds, bus... (figure 362)

• **Le coût d'investissement**

Prix de la fourniture : 80 F/m^2 (valeur 1992)

Coût pour voirie légère = 250 F/m^2
Coût pour voirie lourde = 350 F/m^2

• **L'aspect** : très satisfaisant

Les différents coloris (gris, rouge, noir, jaune, brun, ocre) permettent de faire des CALEPINAGES variés (figure 365).

• **La durabilité du système pendant 1 siècle**
L'usure semble plus rapide pour les pavés en béton que pour les pavés en pierre.

Le recul concernant la durabilité de la résistance in situ du pavé en béton n'existe pas, ce procédé ayant été créé vers les années 1970. Il a la garantie décennale.

Il n'y a que la MEMOIRE ADMINISTRATIVE qui puisse se souvenir de l'utilité d'une chaussée en pavés autobloquants, en renouvelant le même principe si l'usure se fait sentir.

• **Contrainte de maintenance**

Il n'y a aucune contrainte de maintenance spécifique en dehors d'un nettoyage classique urbain.

• **La notion du risque**

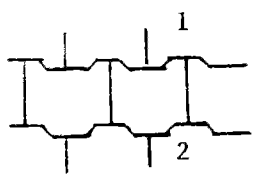
De par son aspect, qui n'a pas de caractéristique spécifique d'un élément de lutte contre une crue hydrologique, la notion du risque est inexistante.

• **Avantage multifonctionnel**

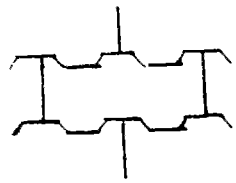
Le matériau a l'attrait d'un pavage et peut s'utiliser comme un dallage (figure 365).

Figures 363 et 364 - DIFFERENTS TYPES DE PAVES AUTOBLOQUANTS

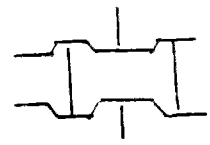
1- Principe du pavé autobloquant avec blocage sur 2 faces



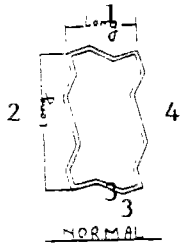
type CK-Bloc



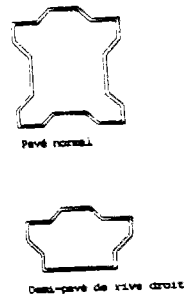
type RINN
(spécial dentele)



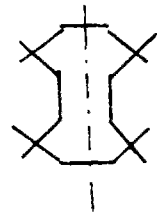
type BONNA



type BLEIJKANT



type BLEIJKO
Pacolith

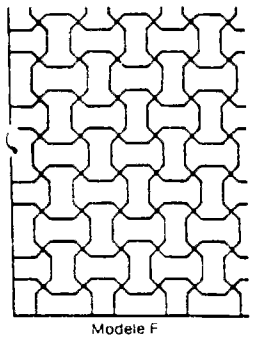


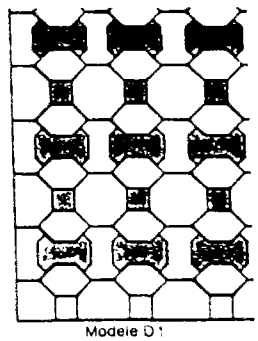
type QUADRO

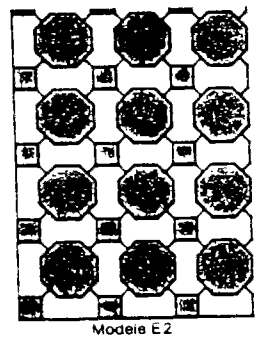
type UNI

2 - Principe du pavé autobloquant avec blocage sur 4 faces

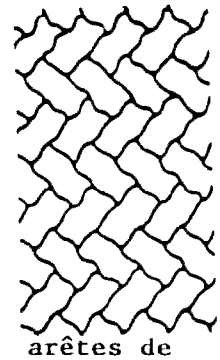
Figure 365- PAVAGE AUTOBLOQUANT ET CALPINAGE
Avantage multifonctionnel hydrologique et esthétique



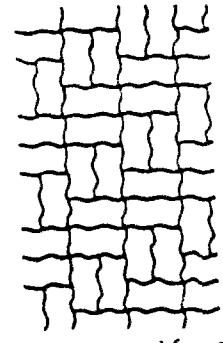




MODELE QUADRO



arêtes de poisson



parquet décalé

MODELE UNI

• **Coût-efficacité**

Le procédé est à développer pour s'adapter au risque hydrologique, en prévoyant un fond de forme en béton maigre sur la couche de fondation.

Il est donc recommandé pour :

- les voies implantées sur le tracé des anciennes rivières,
- les voies étroites où les courants de surface sont violents.

a3- Les chaussées bétonnées : utilisation recommandée

• **Le procédé** (figure 366)

Les chaussées bétonnées sont des chaussées rigides.
La chaussée est formée d'une dalle de béton, avec armature, reposant sur une couche de forme.
La chaussée en béton est coulée sur place, sur la base d'un dosage de 300 à 360 kg/m^3 de ciment CPA 45.

La présence d'armatures dans la chaussée s'oppose à l'ouverture progressive de fissures dues au retrait et permet d'augmenter l'écartement des joints.
L'armature est constituée de 2 treillis soudés pour les voiries lourdes et d'un treillis soudé pour les voiries légères. (figure 367).

Les joints de retrait permettent de diriger la fissuration pendant le séchage du béton. Ils sont espacés de 5 à 7 m et ont une profondeur d'un tiers (1/3) de l'épaisseur de la dalle sur 5 à 10 mm de largeur, pour éviter l'interruption des armatures. La mise en place des réserves perdues se fait en polystyrène au moment du coulage.

Pour les voies en pente, il faut prévoir de plus des "bêches" perpendiculaires s'enfonçant dans le sol, pour éviter toute tendance au glissement des chaussées de béton.

• **Le coût d'investissement**

Coût pour voirie légère = 285 F/m^2 (valeur 1992)
Coût pour voirie lourde = 400 F/m^2

• **L'aspect** : satisfaisant.

• **La durabilité du système pendant un siècle**
Les chaussées en béton coulé ont une très bonne résistance pour l'usure face à une circulation et face aux crues hydrologiques répétées.
C'est sans doute le meilleur matériau pour une durabilité sur un siècle.

CONSTITUTION DE CHAUSSEES RIGIDES

GENERALITES - DEFINITION

La structure de la chaussée rigide est la suivante :

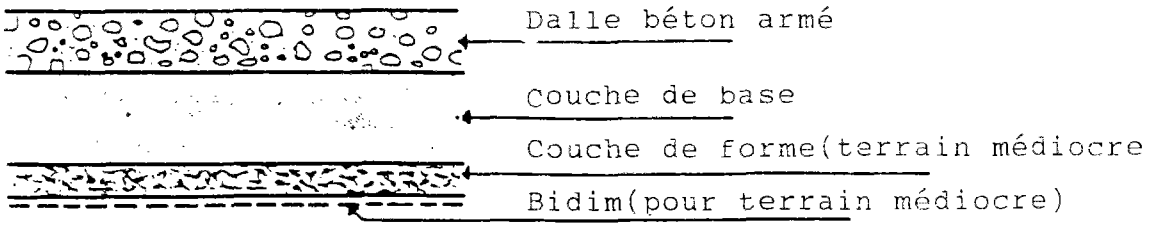


Figure 366 - **L'UTILISATION DE LA CHAUSSEE BETONNEE EST RECOMMANDEE face au risque hydrologique**

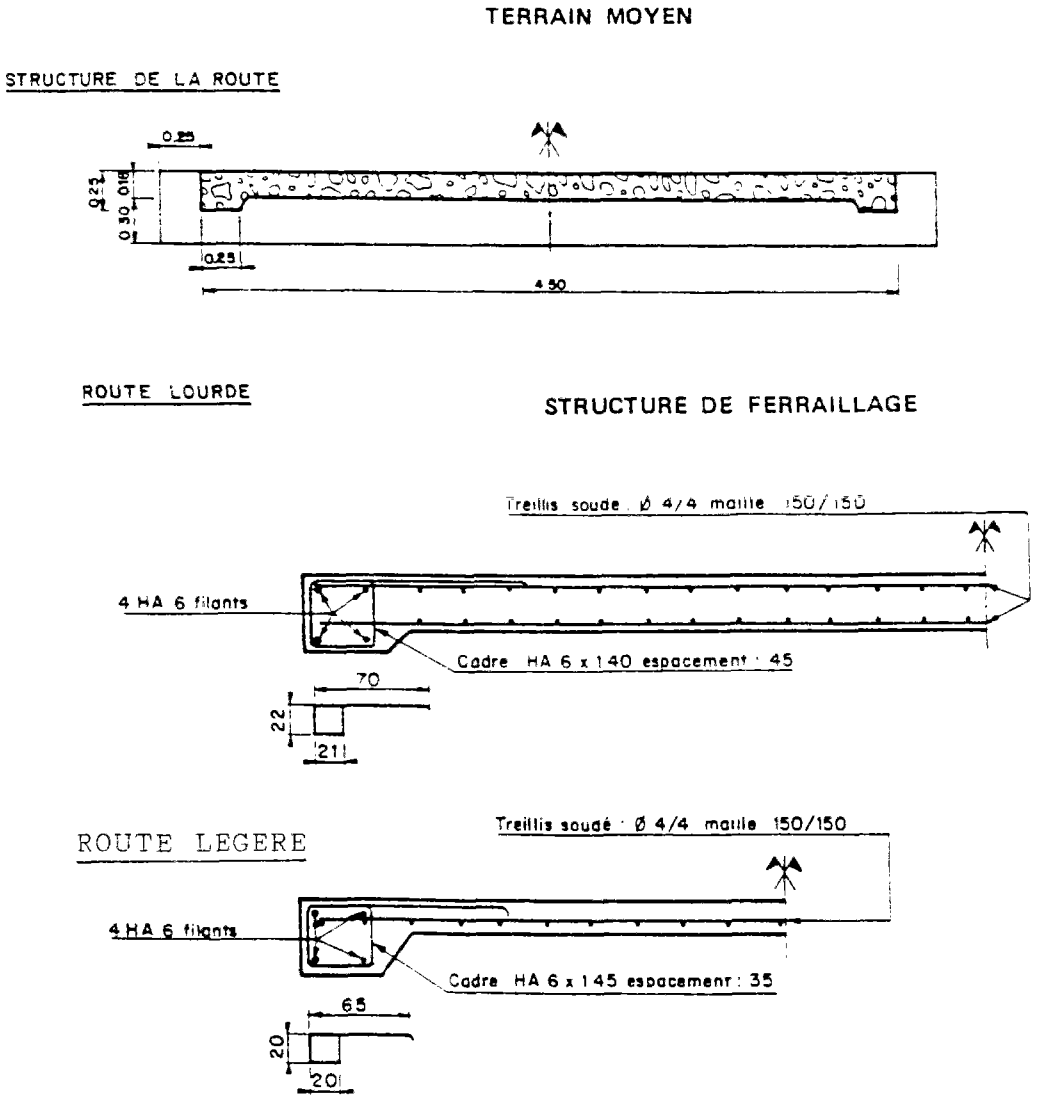


Figure 367 -**CHAUSSEE BETONNEE**
Structure de la route et du ferraillage

Dans ce cas, c'est la mémoire administrative qui devra veiller au maintien du même principe lors des réfections des chaussées bétonnées.

• **Contrainte de maintenance**

Il n'y a aucune contrainte de maintenance spécifique.

• **La notion du risque**

La "solidité" d'une chaussée bétonnée en milieu urbain PEUT participer au rappel du risque hydrologique dans les voies à écoulement préférentiel, par contraste avec les autres voies transversales maintenues en revêtement souple, type bitume.

• **Avantage multifonctionnel** : aucun.

• **Le rapport coût-efficacité :**

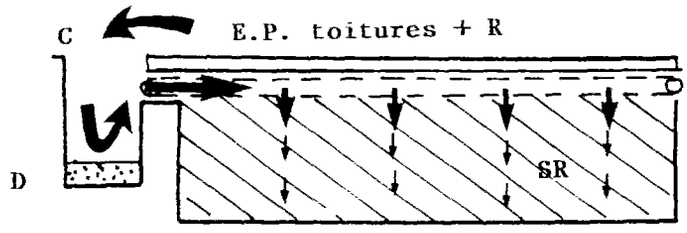
Les chaussées en béton ont une très bonne résistance dans le temps pour un coût légèrement supérieur à un pavage auto-bloquant.

a4- Conclusion

Les modifications de revêtement de chaussée pour passer d'un revêtement souple (bitume) à un revêtement rigide (pavé en béton autobloquant ou chaussée en béton coulé) peuvent s'effectuer lors des travaux de réfection de voirie.

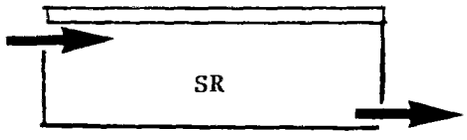
Remarque : Il est regrettable à ce sujet que les réfections des voiries de Nîmes n'aient pas tenu compte du Rapport PONTON et qu'elles aient été refaites à l'identique.

RETENTION DU RUISSELLEMENT SOUS CHAUSSEE
avec captage des eaux par tranchées ouvertes

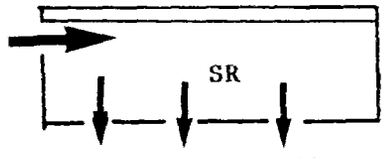


Revêtement imperméable
(pavé autobloquant ou
dalle de béton)

R = Ruissellement
C = Captage
D = Décantation
SR = Structure-réservoir



1- Rejet au réseau
d'assainissement
(eau polluée)



2- Infiltration directe
(eau dépolluée)

Figure 368 - SCHEMA DE FONCTIONNEMENT
D'UNE STRUCTURE-RESERVOIR avec un revêtement imperméable
pour la lutte contre les crues hydrologiques

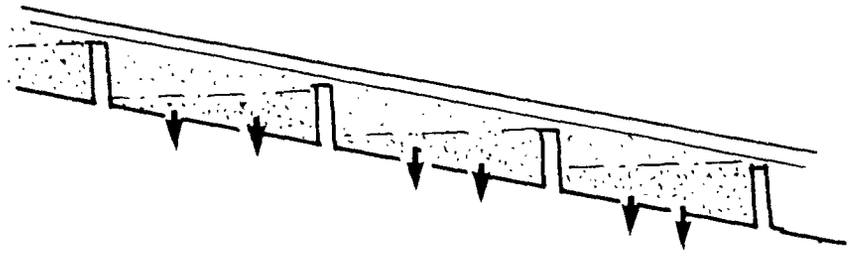


Figure 369 - RETENTION SOUS CHAUSSEE EN PENTE
création de mini sous-bassins souterrains cloisonnés.
(L.C.P.C. Nantes - G.RAIMBAULT)

3.4.4.2.6. Les structures-reservoirs

Si le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, avec G. RAIMBAULT, Responsable de la Division Eau et H. ANDRIEU de la Section Hydrologie en milieu urbain, considère que la technique de la chaussée poreuse, avec structure-réservoir, concerne en priorité les crues inférieures à la crue d'occurrence décennale (≤ 10 ans), les techniques de la structure-réservoir font partie des ouvrages d'efficacité complémentaire pour lutter contre les crues de ruissellement supérieures à 10 ans.

• **Objectifs** (figure 368) :

- Captage du ruissellement, en état de crise
- Décantation
- Dépollution

• **Conditions d'utilisation**

- Faible pente : la pente de la voie ou du trottoir où se trouve la structure-réservoir doit tourner autour de 1 % à 2 %.

- En cas de pentes plus fortes, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a mis au point des techniques de cloisonnement pour maintenir un fond de forme horizontale, sous chaussée en pente. Les structures-réservoirs sont découpées en sous-bassins souterrains pour obtenir une capacité maximale de rétention (figure 369).

- Engouffrement rapide : il faut arriver à capter l'eau de surface en mouvement. La meilleure solution nous semble être LES TRANCHEES OUVERTES BETONNEES, avec caillebotis ou grilles d'arrêt horizontales.

- Conditions de stockage : les tranchées de captage ou des zones d'immersion décaissées sur 0,50 m par exemple (figure 370).

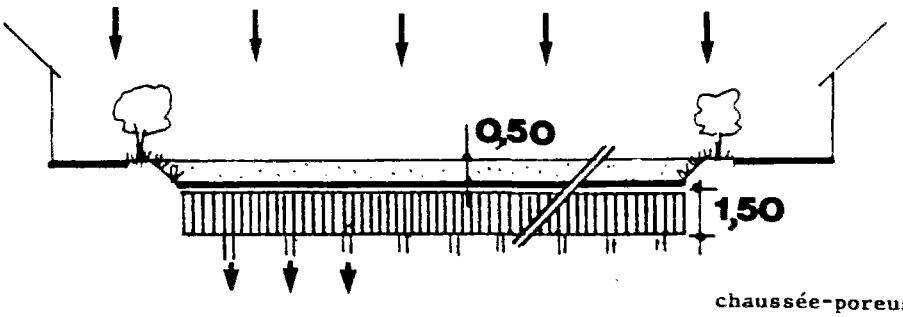
• **Description de l'ouvrage :**

Ouvrage de rétention souterrain avec infiltration ou évacuation des eaux stockées.

• **Procédés**

Il existe deux procédés :

a) les structures-réservoirs à structure artificielle,
b) les structures-réservoirs à structure naturelle.



chaussée-poreuse
et structure-réservoir

SOLUTION AVEC INFILTRATION

Nidaplast ou Géo-light
Géotextile perméable

rejet = 0
coût = 1.200F/ M2

Figure 370 - STRUCTURE - RESERVOIR SOUS PARKINGS
avec captage des crues hydrologiques par une zone d'immersion décaissée.

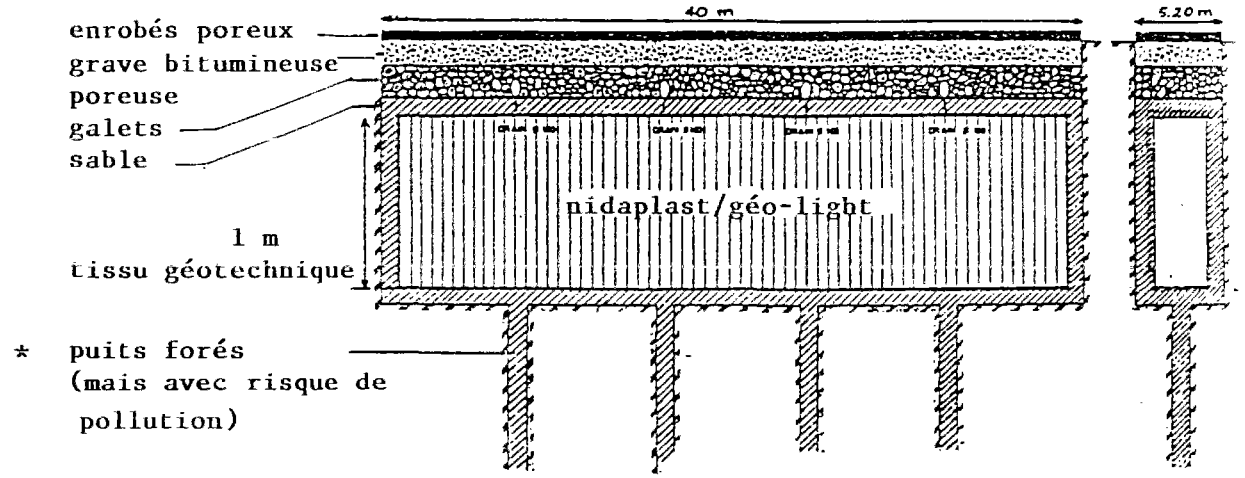
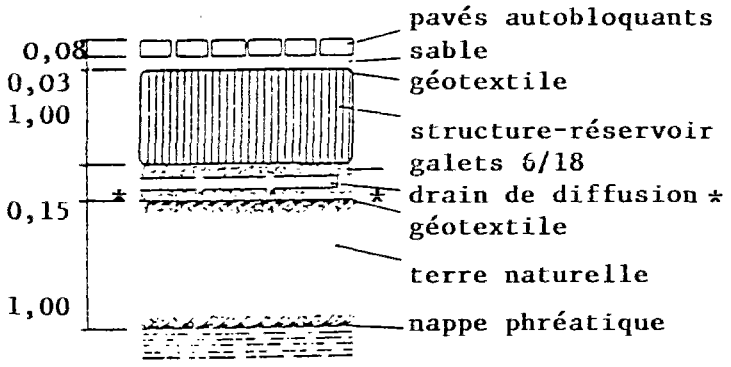


Figure 371 - STRUCTURE-RESERVOIR A STRUCTURE ARTIFICIELLE

Géotextile perméable :
bâche plastique tissée en polypropylène de type MYPEX ou similaire de 5 m de largeur.
(coût : 15F/M2)



* éléments à risque pour la pollution de la nappe phréatique

a- Les structures-réservoirs à structure artificielle (figure 371), appelées aussi structures alvéolaires

Cette technique est commercialisée sous forme de blocs, en structure hexagonale thermoplastique alvéolaire, prévus pour stocker en souterrain l'eau de ruissellement. Les Sociétés Eternit et Mécaroute vendent ce type de produit sous les noms de Nidaplast et Géo-Light.

• **Description**

- Hauteur des éléments souterrains = 1,00 m
  Blocs standards = 2,00 x 0,5 m x 1,00
- Capacité de stockage = 90 % du volume d'eau
- Éléments sensibles aux ultra-violets
- Coût d'investissement : (non compris le prix des tranchées de captage et des chaussées) = 1 200 F/m^2.

• **Capacités hydrologiques**

- piégeage de l'eau : excellent engouffrement rapide par les tranchées ouvertes,
- rétention du volume : 0,90 m^3/par m^2 de surface.

• **Maintenance du système pendant un siècle**

- risque de COLMATAGE de l'ouvrage par les eaux de ruissellement toujours chargées de BOUES.
La solution réside dans une très bonne DECANTATION au niveau des tranchées ouvertes, avant pénétration des eaux dans le système.

• **L'aspect** : les éléments sont invisibles

• **La notion du risque**

IL n'y a pas perception d'un risque à partir du moment où les structures de défenses sont invisibles.
Seules les tranchées d'engouffrement peuvent maintenir le "souvenir" du risque hydrologique.

• **Avantage multi-fonctionnel** : aucun.

Il faut prévoir le déplacement de tous les réseaux des concessionnaires pour implanter la structure artificielle.

• **Rapport coût-efficacité** : bon.

Un ouvrage de 1 200 F/m^2 retient 0,90 m^3 d'eau de ruissellement qui doit être rejetée.

SUEDE - "L'UNIT SUPERSTRUCTURE" : structure-réservoir à structure naturelle.

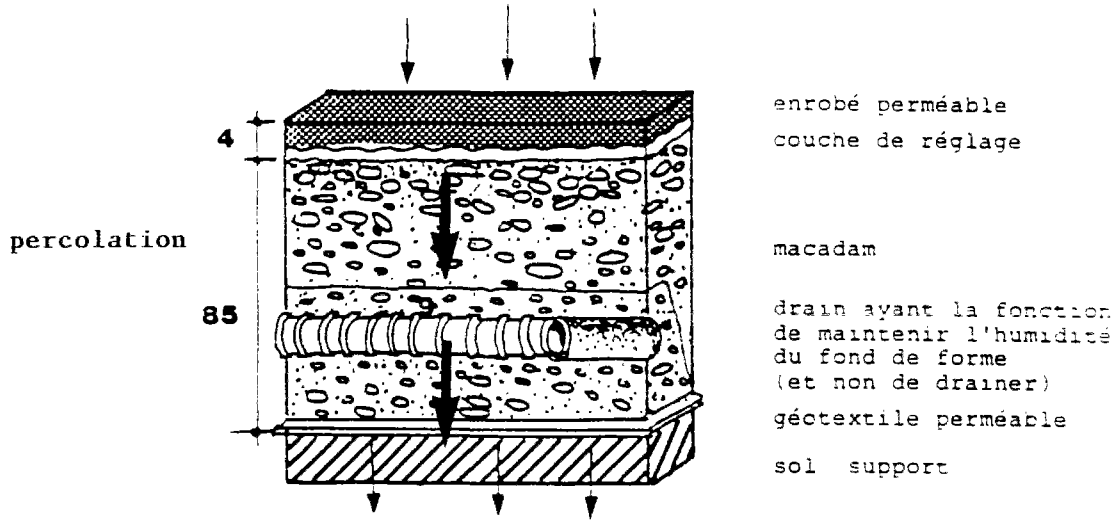
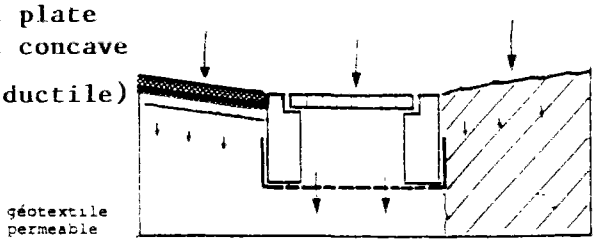


Figure 372- STRUCTURE-RESERVOIR A STRUCTURE NATURELLE
COUPE SCHEMATIQUE D'UNE RETENTION SOUS CHAUSSEE
Pollution: piégeage des polluants par la forte épaisseur du macadam (85 cm) qui agit comme un sol

Coût :
décaissement 1m3x50F=50F
graves et drainage 1m3x100F=100F
géotextile et fond de forme
1m2x50F= 50F
total : 200F/m2

grille avaloir
grille plate
grille concave
(en fonte ductile)



- Pas de raccord sur le collecteur
- Infiltration des eaux de surface des chaussées dans les sols.

(dessins repris d'après le rapport [169] de G.Raimbault)

Figure 373 - AVALOIR DE SECURITE
BOUCHE D'ENGOUFFREMENT

b- Les structures-réservoirs à structure naturelle (figure 372)

La Suède a développé, depuis 1981, une technique de structure-réservoir, appelée "UNIT SUPERSTRUCTURE", et basée sur la rétention du ruissellement sur place.
Le but de cette technique était de supprimer les réseaux d'assainissement, de maintenir l'humidification des fonds de forme sous chaussées pour éviter les tassements différentiels et de permettre une fonte des neiges anticipées (rapport de M. Raimbault, L.C.P.C. Nantes, Mission en Suède [152]).

• **Le procédé**

- La structure-réservoir est formée par une couche de MACADAM de 85 cm d'épaisseur (Suède),
- Ou bien par un matériel concassé à granulométrie comprise entre 20 mm et 90 mm (L.C.P.C.).

• **Le coût d'investissement**

(sans les tranchées de captage ni les chaussées) coût du m^2 = 200 F/m^2 (valeur 1992).

• **Capacités hydrologiques**

- Piégeage progressif de l'eau correspondant au temps nécessaire à l'humidification du Macadam ;
- Rétention du volume après humidification : 0,35 m^3 par m^2 de surface (procédé avec concassé).

• **Maintenance du système pendant un siècle**

- Même problème de colmatage que pour les structures-réservoirs à structure artificielle.
La solution est un entretien fréquent de la couche de surface.

• **Risque de pollution**

Elle est quasi nulle pour la pollution chronique et assure une meilleure garantie vis-à-vis d'une pollution accidentelle qui peut être piégée.

• **L'aspect** : ouvrage non visible.

• **La notion du risque**

Identique aux structures-réservoirs à structure artificielle.

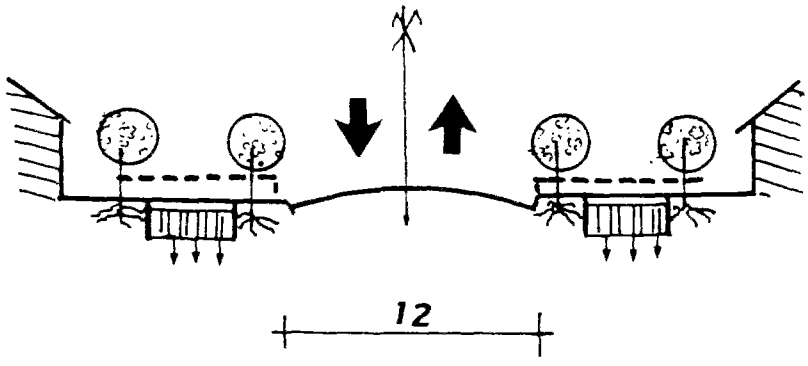
• **Avantage multi-fonctionnel**

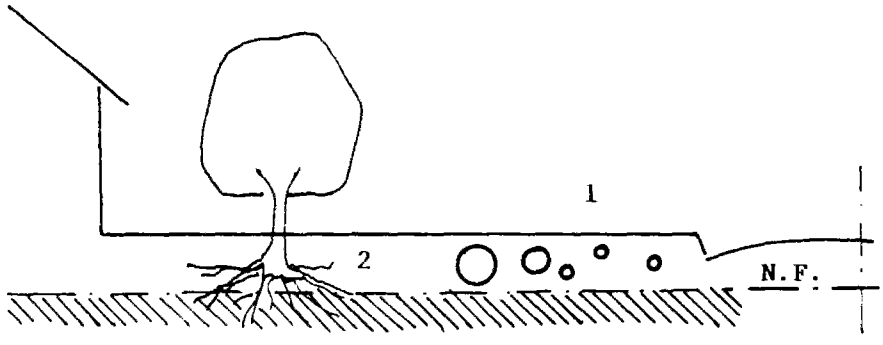
Possibilité de recharger les nappes phréatiques.
Possibilités de maintenir les réseaux des concessionnaires à leur place, noyés dans la structure-réservoir en grave concassé.

• **Rapport coût-efficacité**

Un ouvrage de 200 F/m^2 retient 0,35 m^3 d'eau de ruissellement, qui peut être infiltrée sans risque.

INTEGRATION DES STRUCTURES-RESERVOIRS EN MILIEU URBAIN
sous trottoirs existants



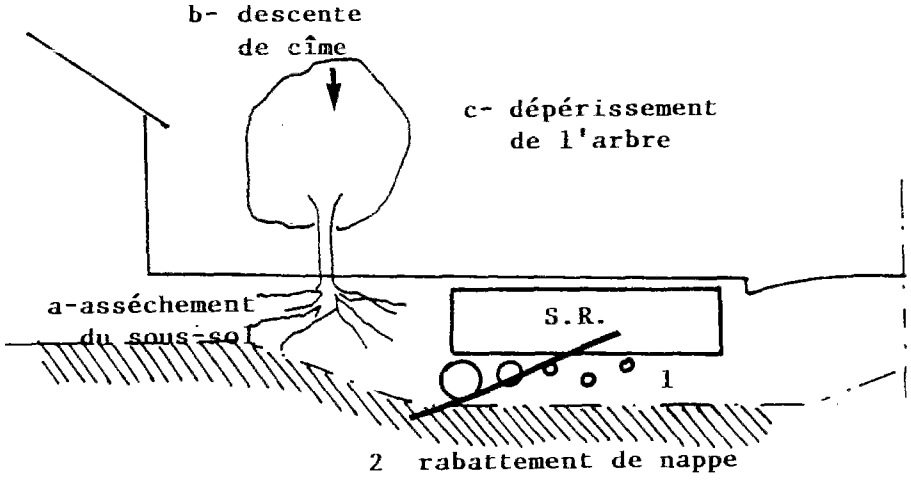


ETAT DES LIEUX

1- Contraintes des réseaux des concessionnaires (gaz,EDF,eau potable ,PTT chauffage urbain...)

2- Relation entre le niveau de la nappe phréatique de surface et les arbres existants

Figure 374 - L'ENCOMBREMENT DU SOUS-SOL DES TROTTOIRS



1- Prévoir l'accessibilité pour l'entretien des réseaux

2- L'installation d'une structure-réservoir entraîne le rabattement de la nappe minime,mais qui peut toucher les arbres existants.Cela ne concerne pas les nouveaux arbres.

Figure 375 - MISE EN PLACE D'UNE STRUCTURE-RESERVOIR

avantages : rétention de 0,90 m3/ m2 d'ouvrage
inconvénients: inaccessibilité des réseaux pour l'entretien
dépérissement des arbres existants

c- Intégration des structures-réservoirs en milieu urbain :

- Sous trottoirs
- Sous chaussées
- Sous cours

• **Sous trottoirs** : Cas des trottoirs de l'avenue Jean Jaurès à Nîmes

Les difficultés d'intégration des structures-réservoirs en milieu urbain sont de deux ordres :

- L'encombrement du sous-sol des trottoirs par les réseaux des concessionnaires (eau potable, E.D.F., gaz, téléphone ...) présente de sérieux obstacles (figure 374) ;
- Les arbres d'alignement sont très sensibles aux modifications du degré hydrométrique de la terre. Et tout nouveau ouvrage souterrain, ici les structures-réservoirs, amène un RABATTEMENT de la nappe phréatique de surface.

L'atteinte apportée aux arbres d'alignement existants peut être un DEPERISSEMENT PROGRESSIF correspondant au dessèchement du sous-sol, et concrétisée par une DESCENTE DE CIME, avec assèchement des branches les plus hautes, entraînant à terme la mort de l'arbre sur 3 à 4 ans (figure 375).

• **Sous chaussées :**

- L'encombrement du sous-sol sous chaussées est quasi nul, excepté les réseaux transversaux. Il est donc plus facile d'implanter une structure-réservoir à 1,30 m de profondeur sous les chaussées que sous les trottoirs (figure 378).
- La résistance au trafic des structures-réservoirs en construction routière a été démontrée.

• **Sous cours :**

La ville d'Osaka (Japon) a pris des mesures importantes, suite à la catastrophe d'Août 1982 où 30000 maisons nouvelles ont été inondées (inondation par ruissellement).
Osaka a créé, dès 1983, "des espaces ouverts de captation d'eau" pour retenir temporairement les eaux de pluie et pour les infiltrer ensuite dans le sol (d'après la revue [33]).
Ces constructions ont été réalisées dans les PARCS et dans les COURS D'ECOLES, afin d'éviter de charger les rivières déjà saturées.
L'école élémentaire de URIWARI-NISHI en est un exemple: la cour d'école a été creusée sur 30 cm d'épaisseur en-dessous du niveau initial, pour servir de "BASSIN SEC" de rétention. Le réservoir d'orage et d'infiltration est placé sous la cour décaissée.

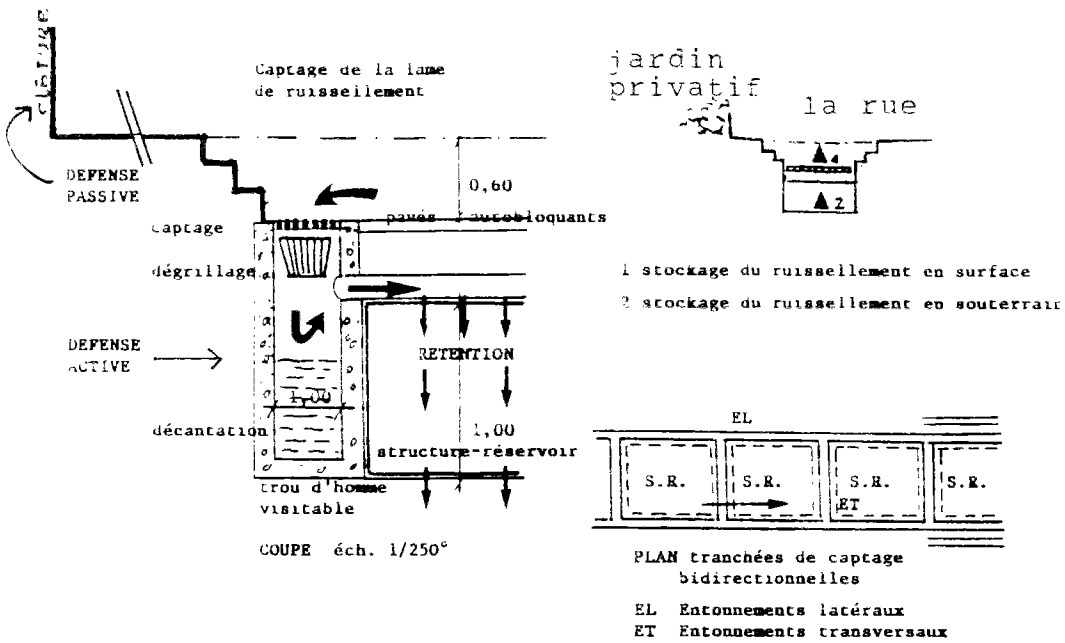


Figure 376 - LES TRANCHEES D'ENGOUFFREMENT SUR CHAUSSEES

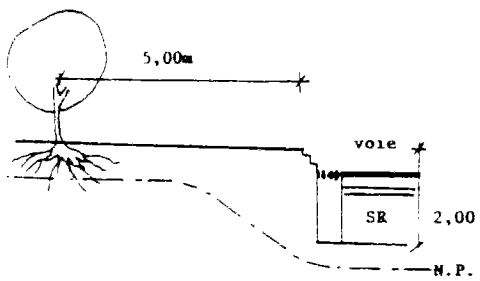


Figure 377 - PROTECTION DES ARBRES D'ALIGNEMENT EXISTANTS face a la modification du niveau de la nappe phréatique , liée à l'installation d'une structure-réservoir sous chaussée.

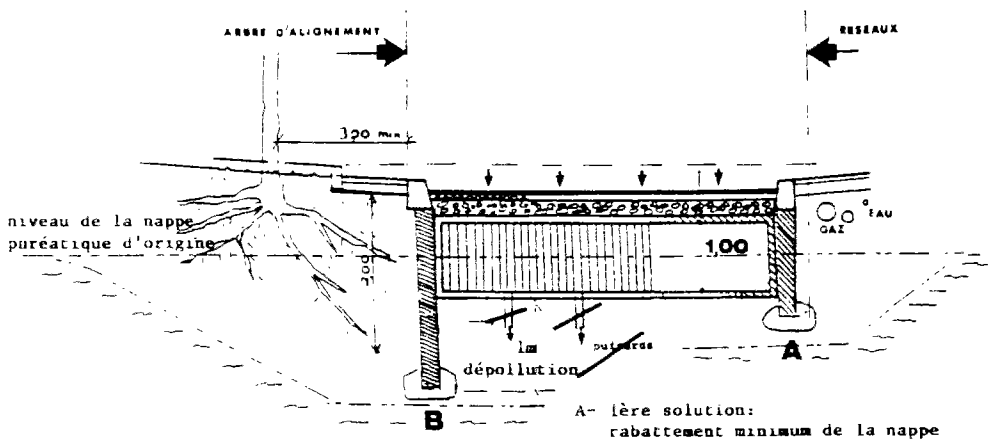


Figure 378 - RETENTION SOUS CHAUSSEE

Les problèmes urbains et les choix pollution chronique et rabattement de nappe phréatique

A- 1ère solution:
rabattement minimum de la nappe mais risque de pollution directe de la nappe sans filtration des polluants

B- 2ème solution
mur de protection contre la pollution

3.4.4.2.7. Conclusion des propositions techniques à long terme

a- Captage du ruissellement

Avec des vitesses de 4 m/s, les lames d'eau de ruissellement posent le problème des ENGOUFFREMENTS.

Nous préconisons le principe de la TRANCHEE OUVERTE DE CAPTAGE avec caillebotis (figure 376). Pour éviter les descentes de cimes des plantations d'alignement, les TRANCHEES DE CAPTAGE doivent être éloignées des arbres d'au moins 5 mètres, soit deux fois et demi la profondeur théorique des fosses d'arbres (figure 377).

Pour les chaussées, les tranchées de captage doivent être bi-directionnelles, dans le sens de l'écoulement, et perpendiculaires à l'écoulement. De fait, elles doivent avoir la plus grande surface possible.

b- Décantation

Les crues exceptionnelles, supérieures à 10 ans (> 10 ans) transportent de la terre. Il faut pouvoir GERER les dépôts de BOUES.

L'extraction des boues des caves et des rues a été, pour les sapeurs-pompiers de Nîmes, un travail très pénible.
Nous proposons de provoquer une DECANTATION maximale des eaux dans les tranchées de captage :

1- par l'augmentation des réceptacles à boues (D) (figure 379),
2- par une gestion facile de leur retrait (C) (caillebotis amovibles).

Ces deux principes vont modifier les croquis actuels des "catalogues de techniques de rétention" (figure 379).

c- Pollution

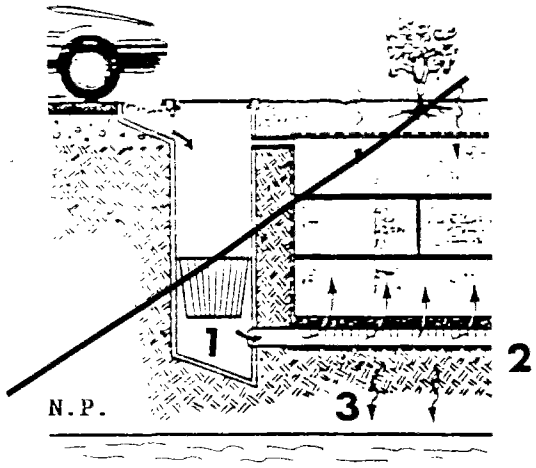
Il y a risque de pollution de la nappe phréatique de surface par l'infiltration d'eaux pluviales non dépolluées (huiles, hydrocarbures, plomb, herbicides, détergents, sel de déverglaçage ...) (figure 380).

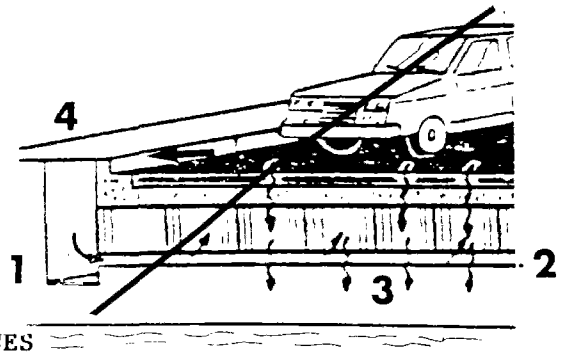
En fonction de notre principe de regrouper plusieurs fonctions sur le même ouvrage (ici rétention, dépollution), nous proposons deux solutions :

1- soit une non-infiltration avec une imperméabilisation du fond de forme par un géotextile imperméable pour les structures-réservoirs artificiels ;
2- soit une infiltration avec une percolation à travers les structures-réservoirs naturels avec matériaux concassés où peuvent se développer des bactéries anaérobies.

Figure 379- RETENTION ET DEPOLLUTION SOUS CHAUSSEE

CATALOGUE

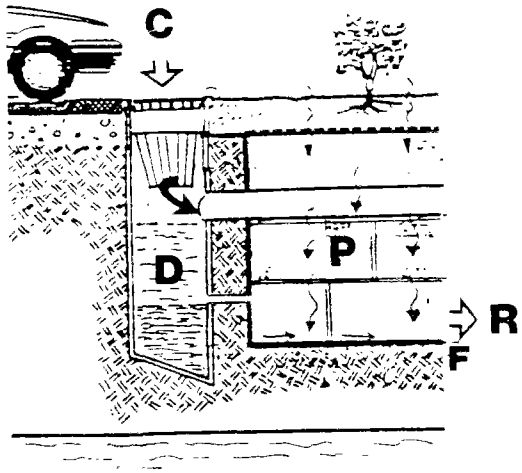


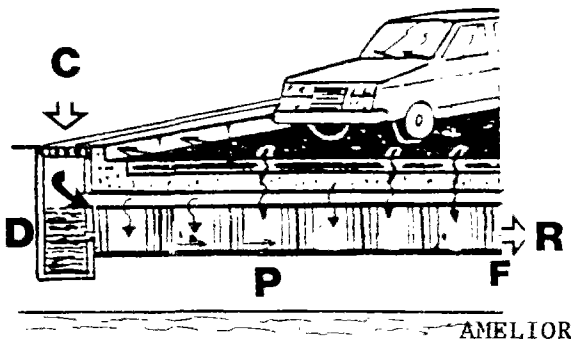


CRITIQUES

1-décantation trop minime
2-géotextile perméable
3-infiltration sans dépollution
risque de pollution de la nappe

PROPOSITIONS





AMELIORATIONS

C- importance du captage
D- décantation maximale
P- essai de dépollution par filtration
R- rejet à la station d'épuration
F- géotextile imperméable

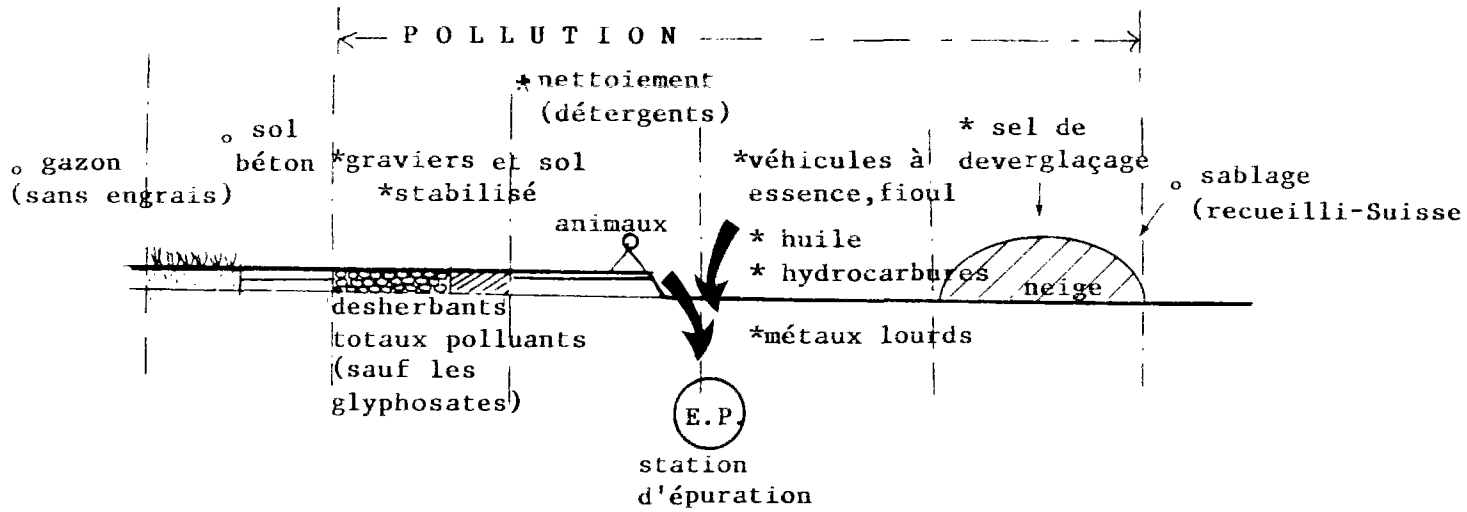


Figure 380- POLLUTION CHRONIQUE URBAINE
*techniques et procédés polluants
° recherches de techniques non-polluantes
La ville de Toulouse a décompté 50.000 chiens
équivalantà une station d'épuration de 15.000hab./jour

d- Dépollution

Nous nous appuyons sur deux expériences :

- la technique de dépollution par filtration dans un sol qui a été appliquée pour l'épuration des eaux d'égoûts à la station d'épuration d'Oppède [156] ;
- les analyses de l'Université de LUND (Suède) sur la qualité des eaux pluviales rejetées après passage dans une structure-réservoir à matériau naturel [169].

Dans le premier cas, comme dans le second, il apparaît que les divers polluants et les M.E.S. sont piégés dans l'épaisseur du matériau naturel, grâce aux phénomènes de percolation et de filtration.

Il apparaît aussi que le développement des BACTERIES ANAEROBIES se réalise et que leurs actions, assimilation et décomposition des éléments, participent au fort taux de dépollution (cf. notre D.E.A. "Ruissellement, sol et végétation dans les travaux d'infrastructure" [106] (pages 17 à 21, figures 11,12,13,14 et annexe VII.).

e- AVANTAGES

Les structures-réservoirs à structure naturelle ont les avantages suivants, qui nous semblent primordiaux:

1- elles participent à la dépollution des eaux polluées de façon chronique en site urbain ;

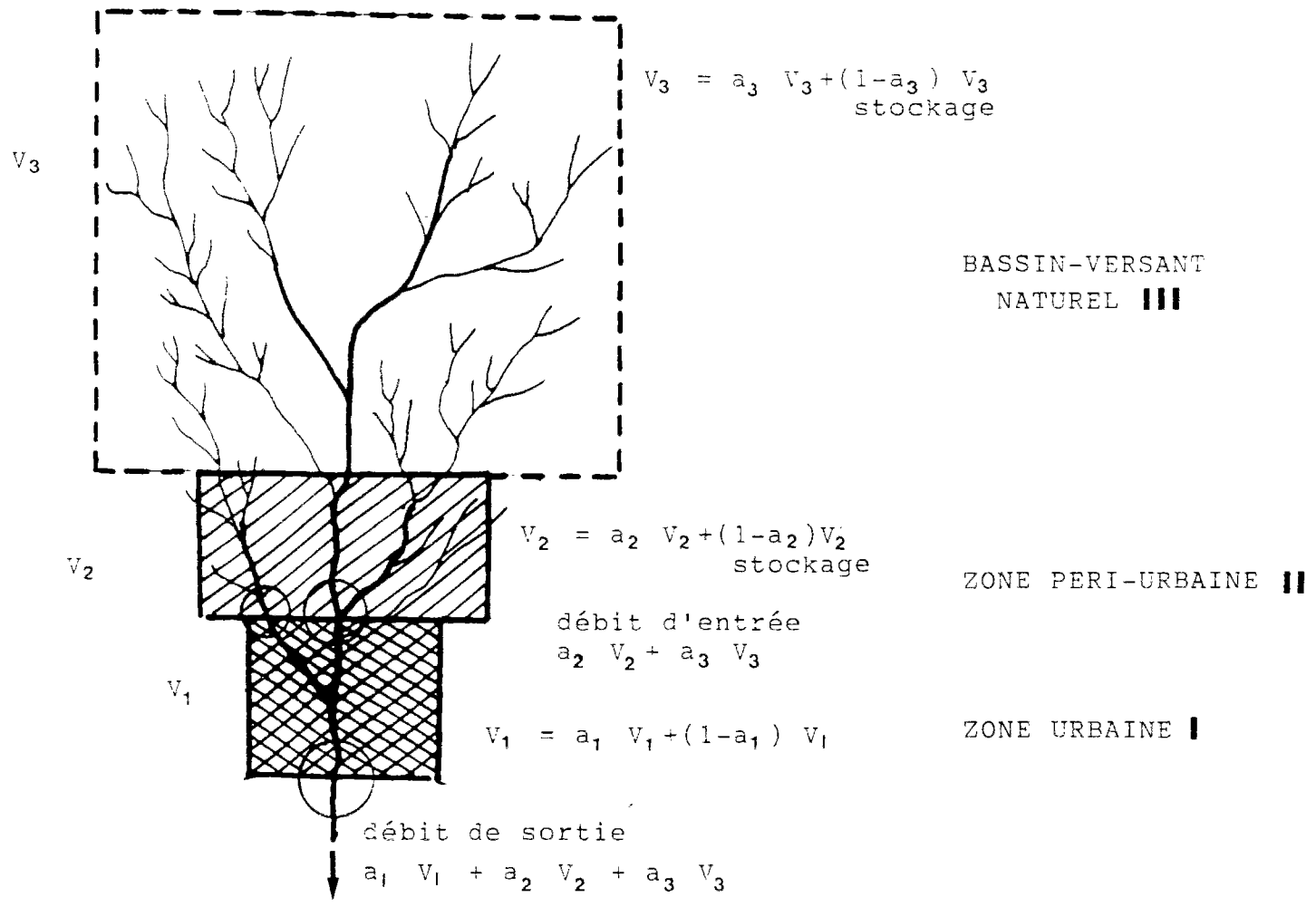
2- elles permettent le maintien des réseaux des concessionnaires à leur place en intégrant ces réseaux dans leur structure ;

3- elles sont peu onéreuses ;

4- elles préservent mieux les arbres d'alignement existants, par un rabattement de nappe moins violent et une possibilité aux racines de s'implanter dans la structure-réservoir.

Le principal avantage des structures-réservoirs à structure artificielle est d'avoir une meilleure capacité de rétention, mais en contrepartie, les structures-réservoirs à structure artificielle obligent de déplacer les réseaux des concessionnaires et sont d'un coût bien supérieur aux structures-réservoirs à structure naturelle.

PRECIPITATIONS DEBITS



ou V_i = précipitations qui tombent sur chaque zone
a_i = % non stocké

DEBIT ACCEPTABLE A TRAVERS LA VILLE = D max.

condition : $a_2 V_2 + a_3 V_3 (+a_1 V_1) \leqslant$ D max
le débit non stocké cumulé = la capacité d'écoulement non catastrophique à travers la ville

stratégie : diminuer le débit à // accepter ou augmenter le débit // maximal

Figure 381 - Démarche pour contrôler le risque de ruissellement

QUATRIÈME CHAPITRE

GESTION PRÉVENTIVE DU RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT DANS UN CENTRE URBAIN

Faisabilité technique et économique

4.1. INTRODUCTION

Le travail exposé dans ce mémoire ne concerne pas la résolution quantitative des flux d'écoulement des bassins-versants mais porte sur l'inventaire et l'analyse des moyens qui permettent d'agir soit sur la rétention, soit sur la capacité d'écoulement et la protection par des techniques d'aménagement urbain.

Dans ce cadre, nous avons pu établir des estimations globales de l'effet de ces différentes techniques en termes de pourcentage des quantités stockées et des débits admissibles.

4.2. OBJECTIFS

4.2.1. Origine du risque de ruissellement

Quand on doit gérer le risque de ruissellement pour un centre urbain, on doit prendre en considération l'ensemble du bassin-versant, qui comporte trois zones, définies sur la figure 381 :

- la zone urbaine,
- la zone péri-urbaine,
- le bassin-versant naturel sans urbanisation.

La condition à respecter pour qu'il n'y ait pas de catastrophes est que le débit potentiel soit inférieur au débit maximal admissible : D potentiel < D maximal.

4.2.2. Démarche pour contrôler le risque de ruissellement

La démarche que nous retenons pour contrôler le risque est soit de diminuer le débit potentiel par la rétention, soit d'augmenter le débit maximum en structurant un réseau d'écoulement préférentiel.

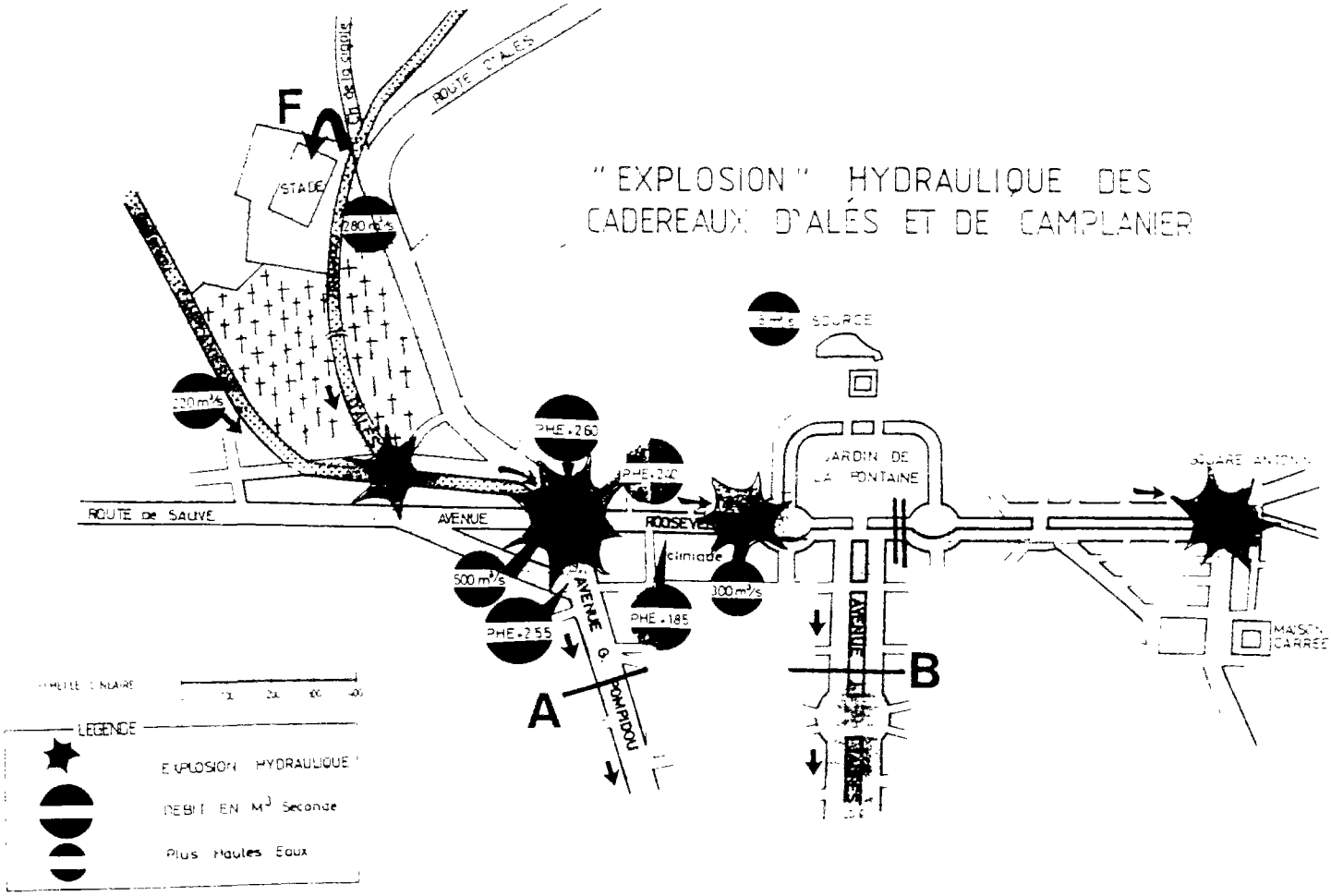
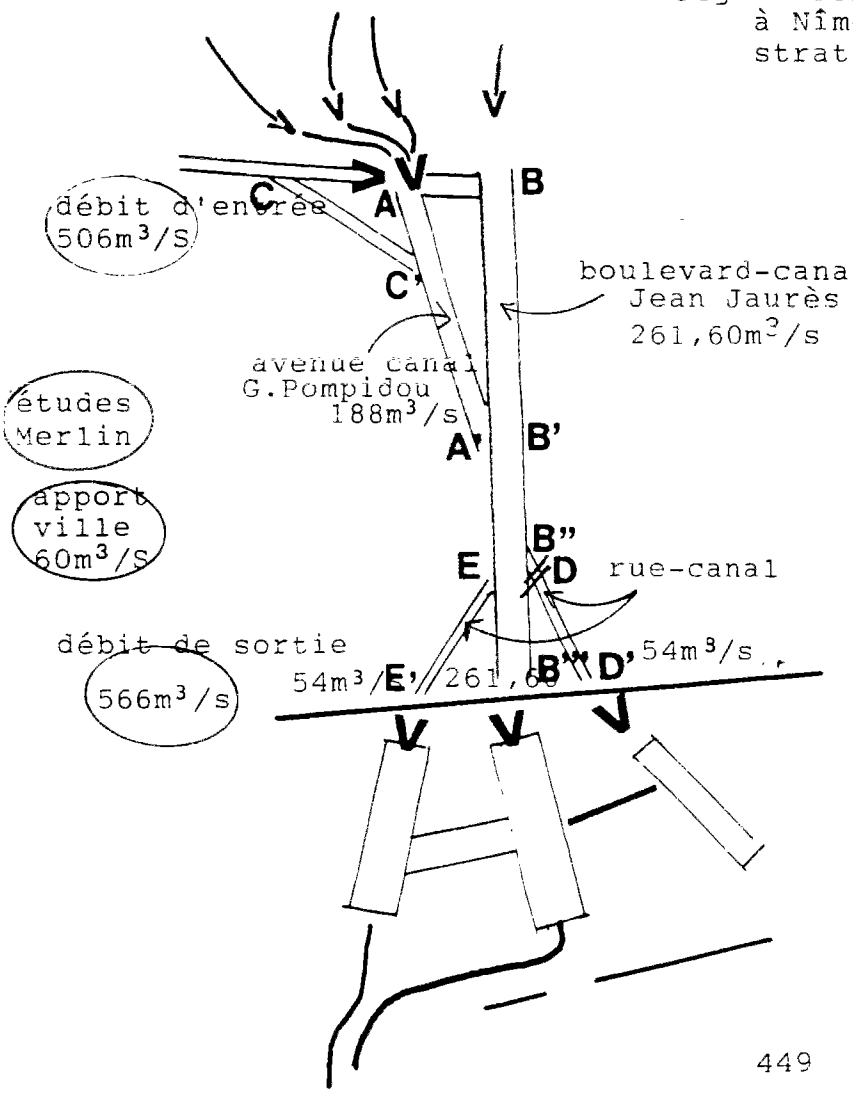


Figure 382 - les hauteurs de la crue à Nîmes le 3.10.1988 à des points stratégiques(extrait Ville de Nîmes,[46])



1- débit d'entrée proposé
188m³ +261,6 m³=449,6m³/S

2- débit de sortie proposé
54m³+261,6 m³+54m³=369m³/s

réduction -65%
on rejette 35%,ou on trouve une rétention à l'amont équivalente à 35%

Figure 384- Schéma récapitulatif

Implantation des différents aménagements pour un gain sur les débits.
Plan du Centre-Ville de Nîmes, ancien cadereau d'Alès.

4.2.3. Limites de l'étude

Nous estimons que les chiffres qui servent de base et qui sont liés au cas de Nîmes ne peuvent permettre à l'heure actuelle de faire une extrapolation directe à d'autres villes et que chaque cas nécessite de répartir des analyses visuelles d'observation et des simulations de terrain pour reconstruire un ensemble de solutions.

4.3. GESTION PRÉVENTIVE DU RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT. Étude sur le cas de Nîmes, des cadereaux d'Alès et du Camplanier

4.3.1. Généralités

Nous avons choisi de prendre comme exemple type la ville de Nîmes pour les motifs suivants :

- puissance de la crue, qui correspond à un évènement pluvial exceptionnel de 400 mm de pluie en 6 heures ;
- développement récent de l'urbanisme péri-urbain ;
- existence d'études hydrauliques.

4.3.2. L'existant

Nous partons d'une part des données chiffrées des débits de crue estimés par le Cabinet MERLIN dans son étude hydraulique sur Nîmes [24] et d'autre part des études de la ville de Nîmes sur la répartition des crues dans l'espace, avec le recensement des hauteurs de la crue laissées par les traces de laisses [47] (figure 382).

Nous pouvons utiliser ces données chiffrées :
- en pourcentage,
- en hauteur d'eau circonscrite.

4.3.3. Modifications des capacités d'écoulement et de stockage

Nous proposons l'application d'un certain nombre de techniques qui peuvent modifier les crues pour atteindre l'objectif que visent les responsables locaux et publics, qui est que les quantités d'eau arrivant dans la ville la traversent sans dommage.

4.3.3.1. Zone urbaine : - faciliter les écoulements
- rechercher une diminution du ruissellement formé

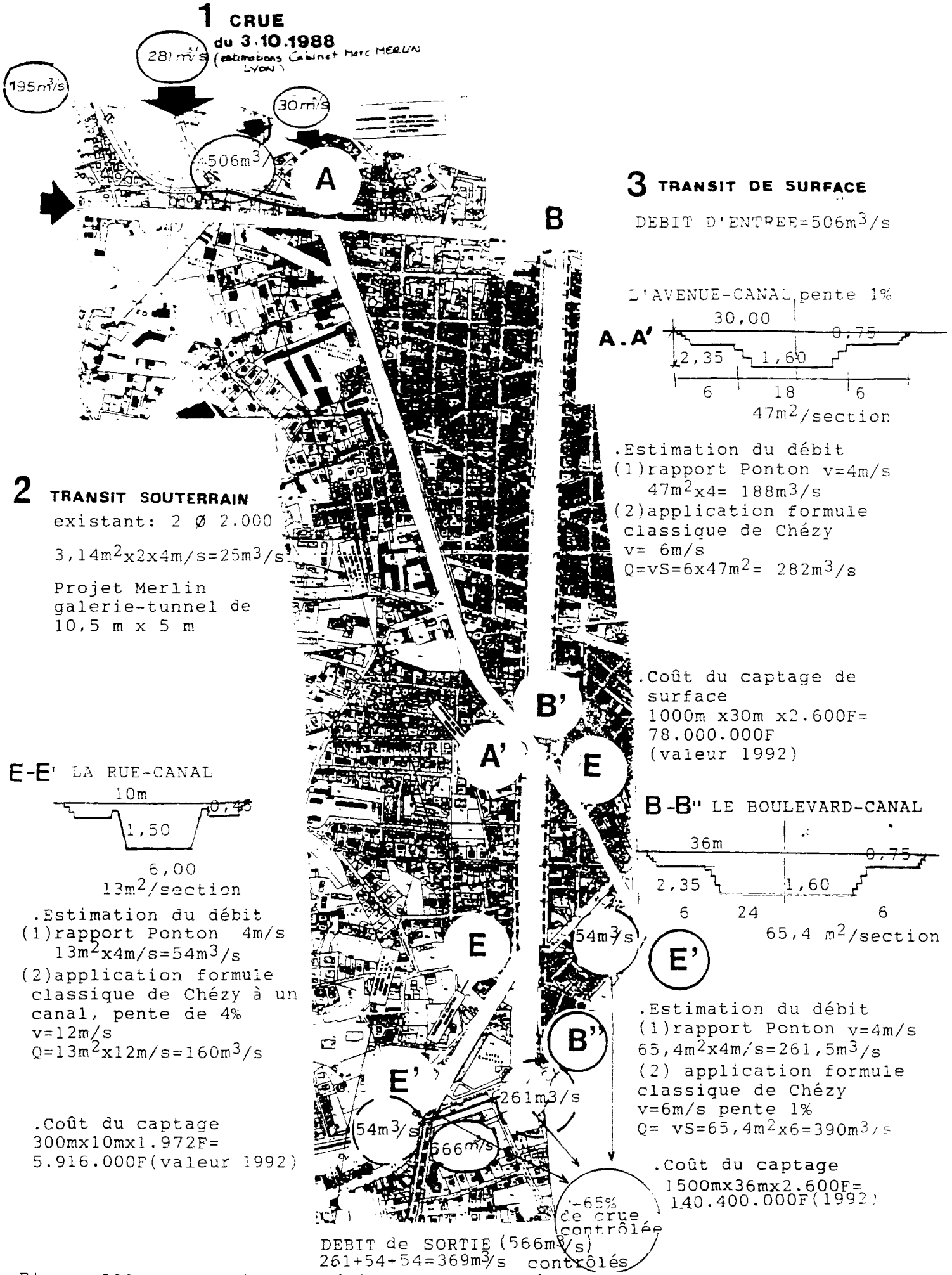


Figure 383 - Les gains de débits avec les aménagements urbains hydrologiques

a- Faciliter les écoulements

Pour faciliter les écoulements en zone urbaine, nous proposons d'encaisser les voies urbaines, avec un traitement architectural approprié, de façon à piéger les eaux de surface dans un écoulement préférentiel.

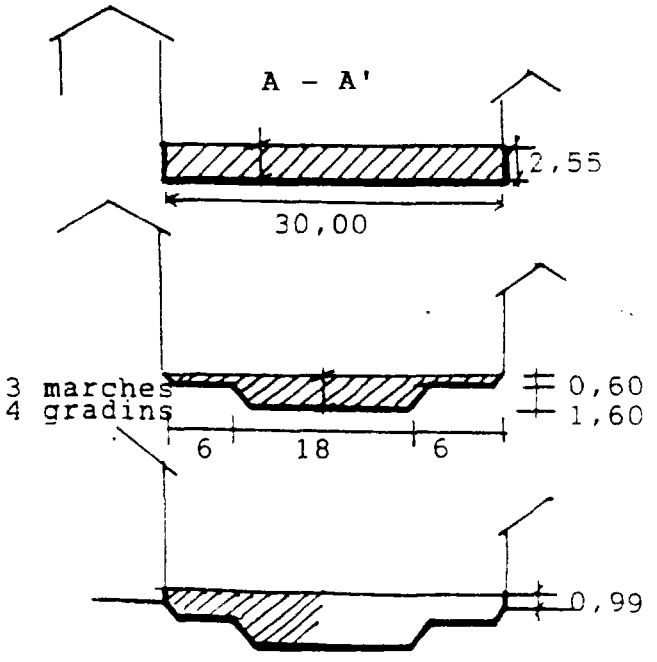
L'étude de ces encaissements au paragraphe 3.4.4.2.1. page 395, nous a conduit à trouver qu'il existait des approfondissements maxima à ne pas dépasser pour ne pas créer de cassure au niveau de la ville.

Profondeur maximale tolérée pour le franchissement de ce type de voie encaissée, variable en fonction des potentialités d'espace:

- 5 marches de 0,15 = 0,75 mètre,)
- et 4 gradins de 0,40 = 1,60 mètre) Total : 2,35 mètres

En appliquant l'étude Merlin, cette technique d'encaissement des écoulements nous permet de réaliser des gains de débits contrôlés que nous pouvons exprimer par des pourcentages de réduction (figure 383 et 384). De façon globale, nous obtenons au point de sortie un gain de débit potentiel de **- 65 %.**

En appliquant l'étude de la ville de Nîmes sur la répartition des crues dans l'espace, en partant de la figure 382 nous en arrivons à la figure 385 et 386 où nous obtenons dans le premier cas une réduction de hauteur de crue initiale de 2,55 m à 0,99 mètre (soit une réduction de 61 %) et dans le deuxième cas une réduction de hauteur de crue de 1,85 m d'initiale à 0,68 mètre (soit une réduction de 63 %).



Estimation réalisée avec les données de hauteur de laisses de crue.

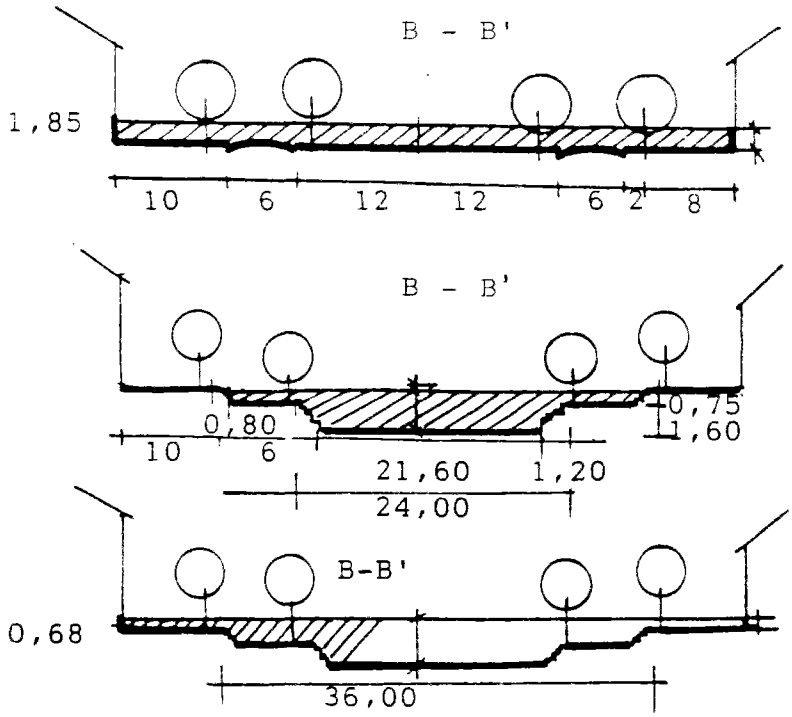
hauteur de l'inondation du 3.10.1988
cubage 30mx 2,55= 76,50m² / section

possibilité d'accueil de la crue avec les aménagements urbains

(30x0,60)+(18x1,60)=47m² /section

inondabilité restante
76,5m² -47m² =29,70m²/section mouillée
29,70m²:30m = 0,99 mètre

Figure 385- gain d'inondabilité par la réalisation d'ouvrages de surface:exemple d'une avenue-canal de 30 m de largeur(Nîmes, avenue G.Pompidou ,tronçon A-A').



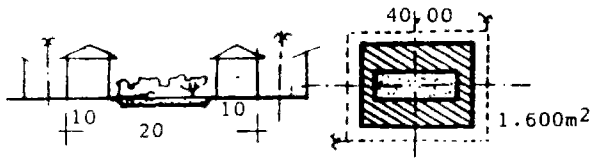
Estimation réalisée avec les données de hauteur de crues.

hauteur de l'inondation
cubage
56m x 1,85m = 103,60m²/section

Partie B-B'non saturée
possibilité d'accueil de la crue avec les aménagements urbains
24m x 1,60m = 38,40m²
36m x 0,75m = 27m² =65,40m²/section

Inondabilité restante B-B'
103,60m² - 65,40m² = 38,20m²/section
38,20m² : 56m = 0,68 m de crue

Figure 386- Gain d'inondabilité par la réalisation d'ouvrages de surface pour un Boulevard--canal de 56 m de largeur (Nîmes, Bl. Jean Jaurès ,tronçons B-B'.



RECHERCHE DE RETENTION SUR UN ILOT R+1 URBAIN

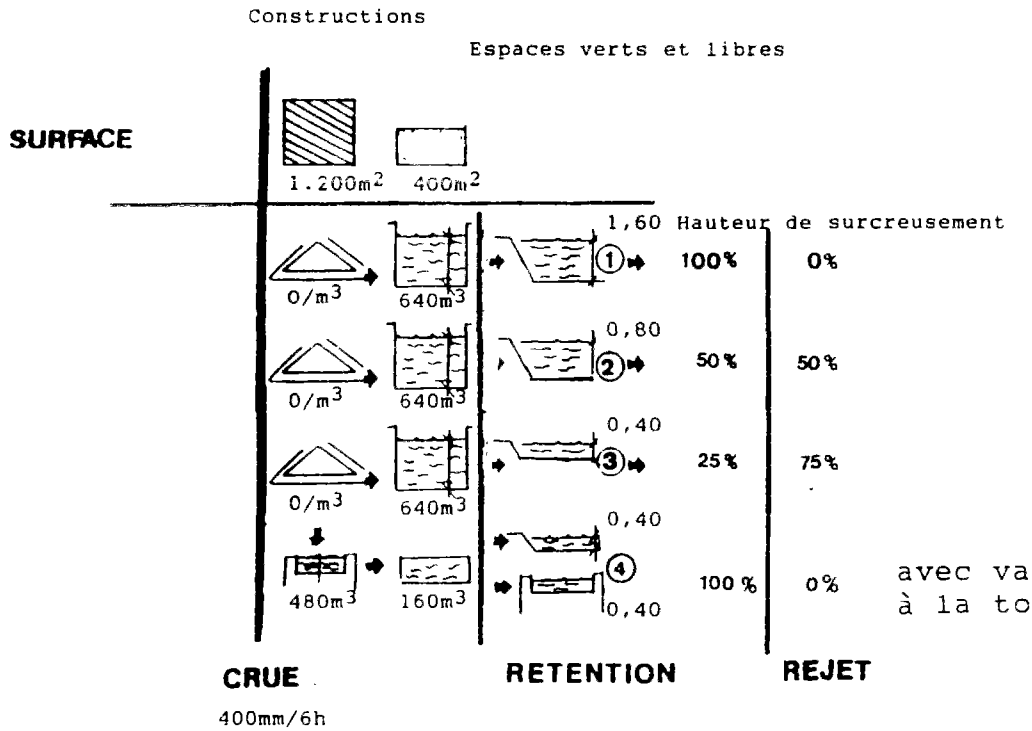


Figure 387- Recherche de rétention sur un ilôt R+1 urbain

b- Rechercher une diminution du ruissellement formé par les ilôts en centre ville qui produisent 60 m³/s d'après l'étude Merlin.

Nous avons calculé que bien que très difficile, une réduction du ruissellement formé par les ilôts en centre-ville est possible, mais qu'elle est variable en fonction de la densité des constructions de l'ilôt.

Nous avons pris deux types d'ilôts : le R+1 et le R+6 (R indique le rez-de-chaussée et le chiffre suivant le nombre d'étages). L'ilôt à R+1 est un ilôt de type maisons particulières accolées et l'ilôt à R+6 est un ilôt de type collectif.

Données générales de surface pour tous les exemples :
40 m x 40 m = 1600 m².
Pluies centennales de 400 mm = ruissellement à retenir à la source = 640 m³.

- Rétention dans un ilôt urbain R+1 existant (figure 387) :

La rétention est fonction des possibilités de surcreusement dans les espaces libres (cours, jardins, parking, ...).
Une rétention de 100 % est possible si l'on peut creuser de 1,60 mètre.
Une rétention de 50 % est possible si l'on peut creuser de 0,80 mètre.
Une rétention de 25 % est possible si l'on peut creuser que 0,40 mètre.
Pour l'estimation d'une faisabilité technique, nous retiendrons dans nos estimations, le cas le plus défavorable.

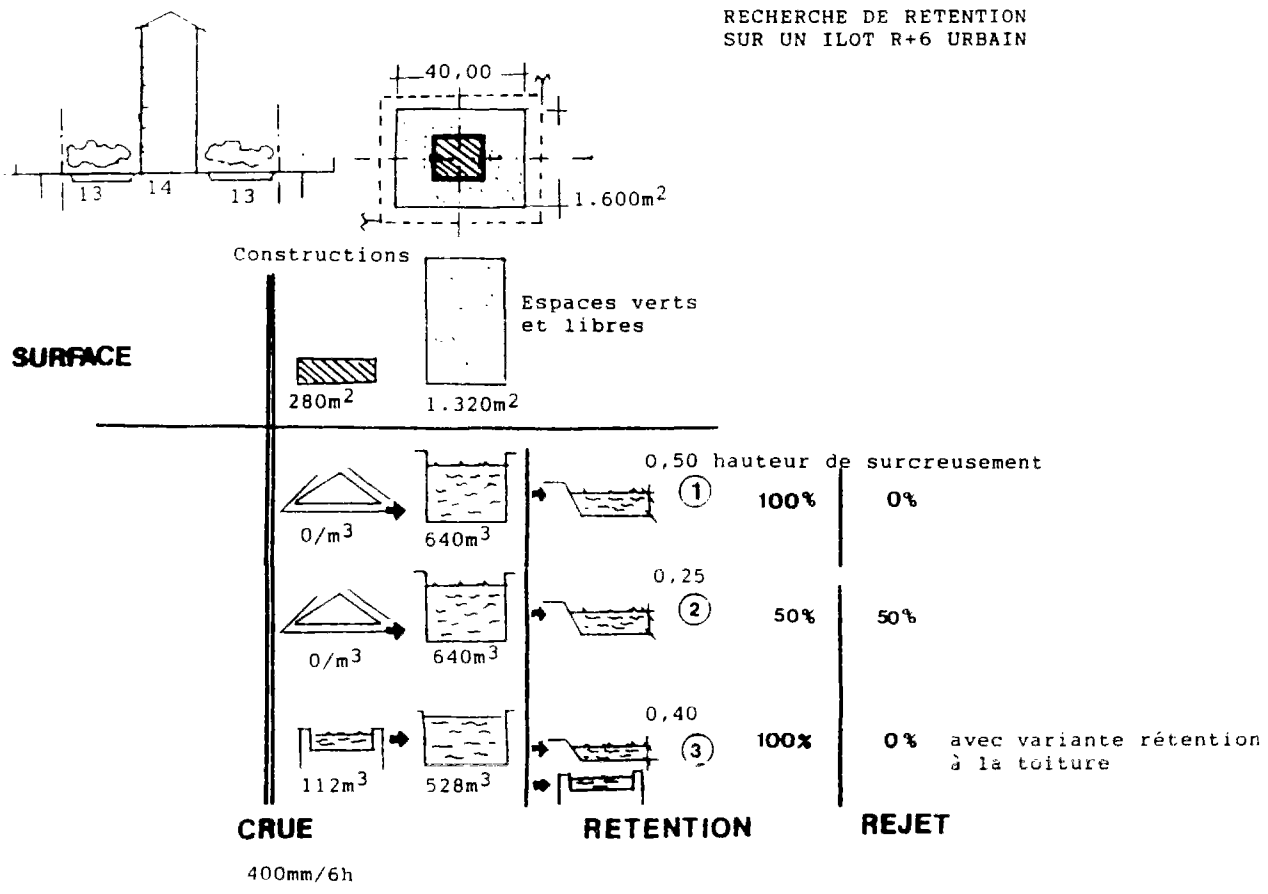
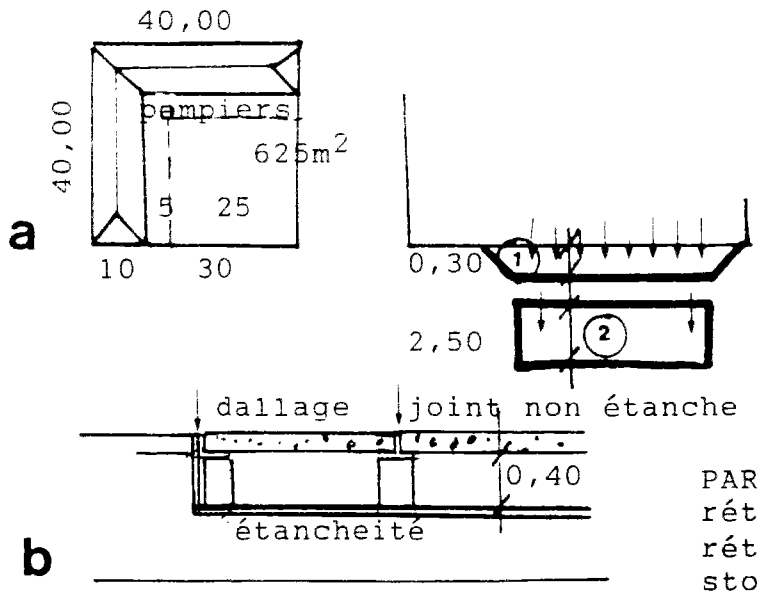


Figure 388 : Recherche de rétention sur un ilôt R+6 urbain



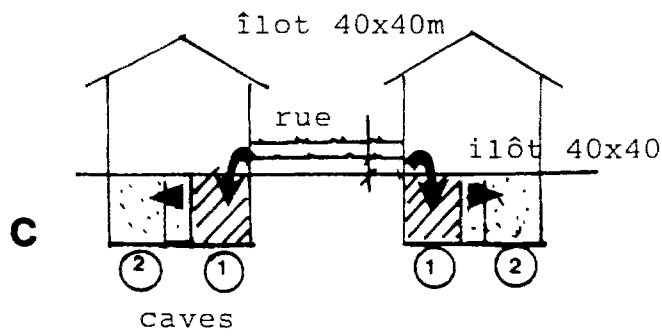
SIMULATIONS DE STOCKAGE URBAIN

COURS D'ECOLE

1.600m^2 x 400mm=640m^3(100%)

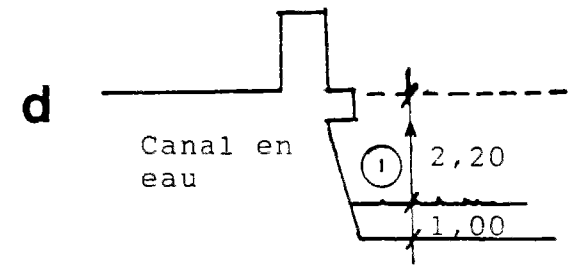
Capacité d'accueil
1-625m^{2}x0,30m=187,50m^3(29,22%)
2-625m^{2}x2,50m=1.562,50m^3(244%)
capacité supplémentaire
1.562,5m^3-187,5m^3=1.375m^3(+214%)
variante ouvrage souterrain
plus petit 640m^3-187,5m^3=452,5m^3
452,5m^3:2,50m=181m^2:20=9,05m

PARVIS URBAIN 1.600m^2,pluie 100ans:640m^3
rétention 0,40m= 640m^3(100%)
rétention 1,00m=1.600m^3
stockage supplémentaire:960m^3(+150%)



STOCKAGE CAVE INONDABLE ILOT R+1 et R+6

R+1-Surface des caves 600m^2
capacité de rétention 600m^{2}x2,50m=1500m^3
stockage supplémentaire pour la rue
1500m^3-640m^3= 860m^3 (+ 160%)
R+6-Surfaces de caves 140m^2
capacité de rétention 140m^{2}x2,50m=350m^3
soit 54% avec 46% de rejet

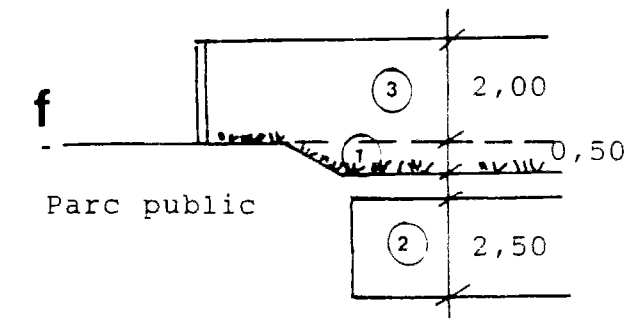


STOCKAGE CANAL EN EAU

40m. x40m=1600m^{2}x400mm=640m^3
marnage:2,20m x 1600m^2=3520m^3
stockage excédentaire à la crue de 100 ans
2880m^3 soit 450%

STOCKAGE SUR BOULINGRIN

Surface 1600m^2
crue centennale 1600m^{2}x400mm=640m^3
stockage 1600m^{2}x1,00m=1600m^3
stockage suppl. 1600m^3-640m^3=960m^3
soit 150%.



STOCKAGE PARC URBAIN

1-Stockage dans prairie centrale
20m x 20m=400m^{2}x 0,50=200m^3
eau stockée 32%
eau rejetée 640m^3-200m^3= 440m^{3}soit 68%

2-Stockage dans ouvrage souterrain
400m^{2}x2,50m=1000m^3-440m3 =560m^3
stockage suppl. +87%

3-Stockage par refoulement dans parc
1600m^{2}x 2,00=3200m^3 soit 500%.

Figure 389-a-b-c-d-e-f- Utilisation d'éléments ponctuels urbains de stockage pour la crue centennale(même surface, même pluie mais procédés différents).

Cette rétention à l'îlot ne prend pas en compte une possibilité d'accueil du ruissellement de la voirie, dont il faut se protéger (cf techniques de protection paragraphe 3.4.).

- Rétention dans un îlot urbain existant R+6 (figure 388)

La rétention d'une crue centennale dans un lot urbain de type collectif est un objectif beaucoup plus aisé.

Une rétention de 100 % est possible si l'on creuse de 0,50 mètre les espaces libres.
Une rétention de 50 % est possible si l'on creuse de 0,25 mètre.

On peut donc opter pour une rétention théorique de 100 % avec une submersion sur 0,50 mètre pour la crue centennale.

c- Utiliser des éléments ponctuels de stockage pour la crue centennale

- Simulation de stockage pour cours existantes d'école, de caserne, d'hôpital, etc. (figure 389a, tableau 390)

Une cour permet un stockage d'une pluie centennale par les procédés de submersion de cours encaissées et de stockage dans un ouvrage souterrain. L'ensemble des procédés permet un stockage global de 1 749 m^3 (187 m^3 + 1 562 m^3) sachant que les besoins de stockage de la crue centennale de l'ouvrage représente 640 m^3.

- Simulation de stockage sous parvis ou place urbaine (figure 389b)

Un réservoir sous dalles de 0,40 mètre de hauteur permet une rétention à 100 % d'une crue centennale type Nîmes. L'augmentation du réservoir sous dalle jusqu'à 1,00 mètre permet un stockage global de 1 600 m^3 pour un besoin de stockage de la crue centennale de 640 m^3.

- Simulation de stockage dans cave inondable d'îlot R+1 (figure 389c)

Une simulation de rétention permet d'accueillir 1 500 m^3, le ruissellement correspondant à la surface de l'îlot étant de 640 m^3.

- Simulation de stockage dans cave inondable d'îlot R+6

54 % du ruissellement de la parcelle peuvent être stockés à la cave (350 m^3), et 46 % sont refusés et rejetés sur la voie publique soit 290 m^3.

Tableau 390- Résultats des simulations de crues centennales sur des ouvrages de rétention urbaine.

	Lieux procédés	hauteur de rétention crue 100 ans	débit retenu	débit rejeté	stockage supplémentaire
a	Rétention dans cours d'école existante = 2,50 m	toiture	0%	0%	0%
		1 cour=0,70m	100%	0%	0%
		1 cour=0,30m	29,%	71%	0%
		2 ouvrage souterrain	100%	0%	214%
	Rétention dans nouvelle école	toiture=0,40m	25%	0%	0%
		cour = 0,70m	75%	0%	0%
		ouvrage souterrain=0	-	-	-
b	Stockage sous parvis	0,40 m	100%	0%	0%
		1,00 m	100%	0%	150%
c	Stockage en cave R+1	2,50m	100%	0%	160%
	cave R+6	2,50m	54%	46%	0%
d	Stockage canal urbain en eau	2,20m	100%	0%	450%
e	Stockage sur boulingrin	1,00m	100%	0%	150%
f	3-Stockage dans parc existant refoulement	2,00m	100%	0%	500%
	1-stockage dans prairie centrale	0,50m	32%	68%	0%
	2-stockage ouvrage souterrain	2,50m	-	0%	87%

18.000m3 /à 1'ha d'ouvrage	
6.000m3/à1'ha	
36.000m3/à 1'ha	

- Simulation de stockage dans un canal urbain en eau (figure 389d)

En fonction des possibilités de marnage du canal (nous avons repris les possibilités du canal de tête du Jardin de la Fontaine à Nîmes) un marnage de 2,20 mètres permet une rétention globale de 3 520 m^3, pour un besoin de stockage de la crue centennale de 640 m^3..

- Simulation de stockage sur boulingrin (figure 389e)

Le stockage sur boulingrin permet une rétention de 1 600 m^3, pour un besoin de stockage de la crue centennale de 640 m^3.

- Simulation de stockage dans parc urbain existant (figure 389f)

Le procédé de stockage par refoulement hors-sol (solution 3), avec la mise en place dans un parc existant d'une clôture métallique courbe, permet une rétention de 3 200 m^3 pour un besoin de stockage centennal de 640 m^3.

- Simulation de stockage dans parc urbain existant et nouveaux travaux (figure 389f)

Les deux procédés suivants qui se positionnent sous les espaces centraux des parcs représentent un stockage de 200 m^3 pour la submersion de l'encaissement sur 0,50 mètre (solution 1) et de 1 000 m^3 pour l'ouvrage souterrain avec infiltration des eaux pluviales sur place.

• Recherche de diminution de ruissellement par des techniques groupées de stockage en milieu urbain

Espaces libres Possibilités de stockage		Crue centennale Besoins de stockage	Total possibilités stockage
R+1 Encaissement de 0,40 m 160 m^3 (640 m^3 - 480 m^3)	Cours, jardins 1 500 m^3	640 m^3 (100 %)	1 660 m^3 soit 260 %
R+6 Encaissement de 0,50 m 528 m^3 (640 m^3 - 112 m^3)	Cave inondable 350 m^3	640 m^3 (100 %)	878 m^3 soit 137 %

Tableau 391

Le regroupement de techniques de rétention de ruissellement permet des résultats intéressants mais non prévus. L'ilôt urbain R+1 très dense a plus de possibilités de rétention excédentaire que l'ilôt R+6 (tableau 390 et 391).

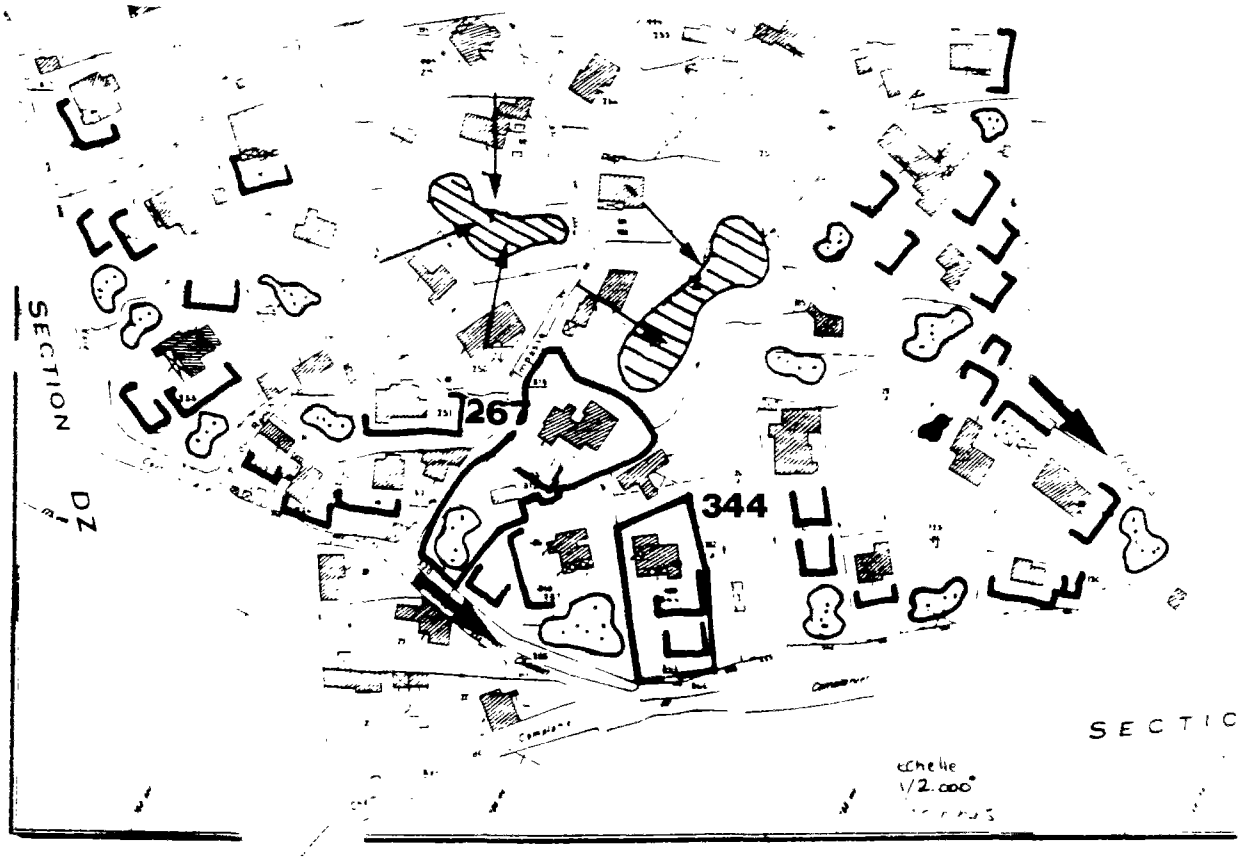
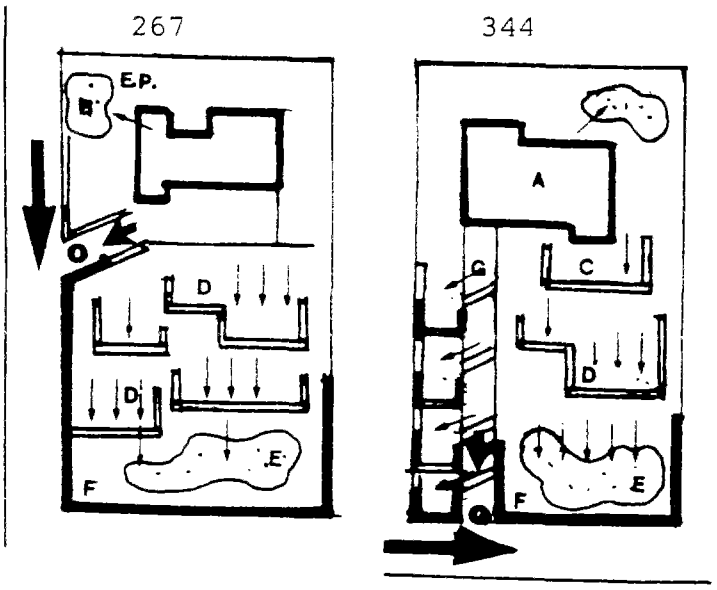


Figure 392-a Etude de cas :ancien parcellaire de zone pavillonnaire (parcelles 344 et 267)



parcelle 344

surface de la parcelle=1.250m²
surface habitat = 225m²
surface accés privé=90m² 365m²
terrasse d'agrément=50m²

pourcentage

surface imperméabilisée= 29,20%
surface plantée = 70,80%

pour une pluie de 400mm /6 heures
1.250m² x 400mm=500m³ à stocker sur 885m2 soit une obligation de rétentic mécanique de = 0,56 m de hauteur moyenne. le stockage sera à 100% de la crue de 100 ans.

Figure 392-b les moyens de stockage

A-rétention à la toiture
B-bassin de jardin pour stockage des eaux de toiture
C-submersion de la terrasse d'agrément
D-murets de jardin ou merlons de jardin
E-micro-bassin de rétention sec et planté(ou en eau)
F-murs de clôture de rétention
G-caniveaux d'arrêt
O-tranchée ouverte d'arrêt du ruissellement chaussée priv et dos d'âne de protection

4.3.3.2. Zone péri-urbaine d'amont

a- Recherche d'une diminution du ruissellement en parcelle privée

- documents : planches de cadastre,
- visites de sites,
- recensement de deux parcelles types,
- études de cas des parcelles 344, 267 et 13 (figures 392, 393).

Sur les planches cadastrales et après analyses de sites, nous avons retenu trois parcelles très typiques, à proximité du parcours de l'ancien cadereau de Camplanier recouvert, les parcelles 344 et 267 pour un exemple d'ancien lotissement et la parcelle 13 pour un exemple de lotissement récent.
En fonction des études de détails de rétention (figure 392), nous constatons que pour les grandes parcelles supérieures à 1250 m^2 (parcelle 344) les techniques paysagères permettent une rétention à la source de la crue centennale, à raison de 100 %.

Par contre,pour les nouveaux lotissements à très forte densité (figure 393) où la parcelle avoisine les 500 m2 (parcelle 13), la mise en place d'un système de rétention à postériori est difficile, les trois espaces étroits correspondant aux trois côtés de la maison étant inutilisables. Les techniques paysagères de rétention ne permettent qu'une rétention mécanique de 50 % sur le cas étudié pour une crue centennale de 400 mm en 6 heures.

Les procédés retenus : le stockage à la parcelle

- déplacement du portail pour mieux piéger les eaux de la parcelle,
- suppression des gouttières donnant sur le domaine public,
- micro-bassin de rétention,
- rétention par murs de clôture (stockage provisoire),
- rétention mécanique par murets de jardin ou merlons (stockage provisoire),
- rétention naturelle par plantation.

Les procédés les plus efficaces pour retenir le ruissellement centennal à la parcelle sont :
- le déplacement du portail toujours situés actuellement au point bas de la parcelle, vers une partie plus haute de la parcelle,
- l'utilisation des murs de clôture en pierres sèches ou maçonnées, ou bien la constitution de merlons en terre végétale pour piéger l'eau comme une nasse.

Moyen de contrôle du risque : proposition d'une taxe de ruissellement

Création d'une TAXE DE RUISSELLEMENT pour le domaine privé exigible jusqu'à la réalisation des travaux de stockage à la parcelle pavillonnaire, comprenant en particulier la suppression des rejets de gouttières sur le domaine public, et la suppression des rejets des eaux pluviales des accès privés sur la voie publique.

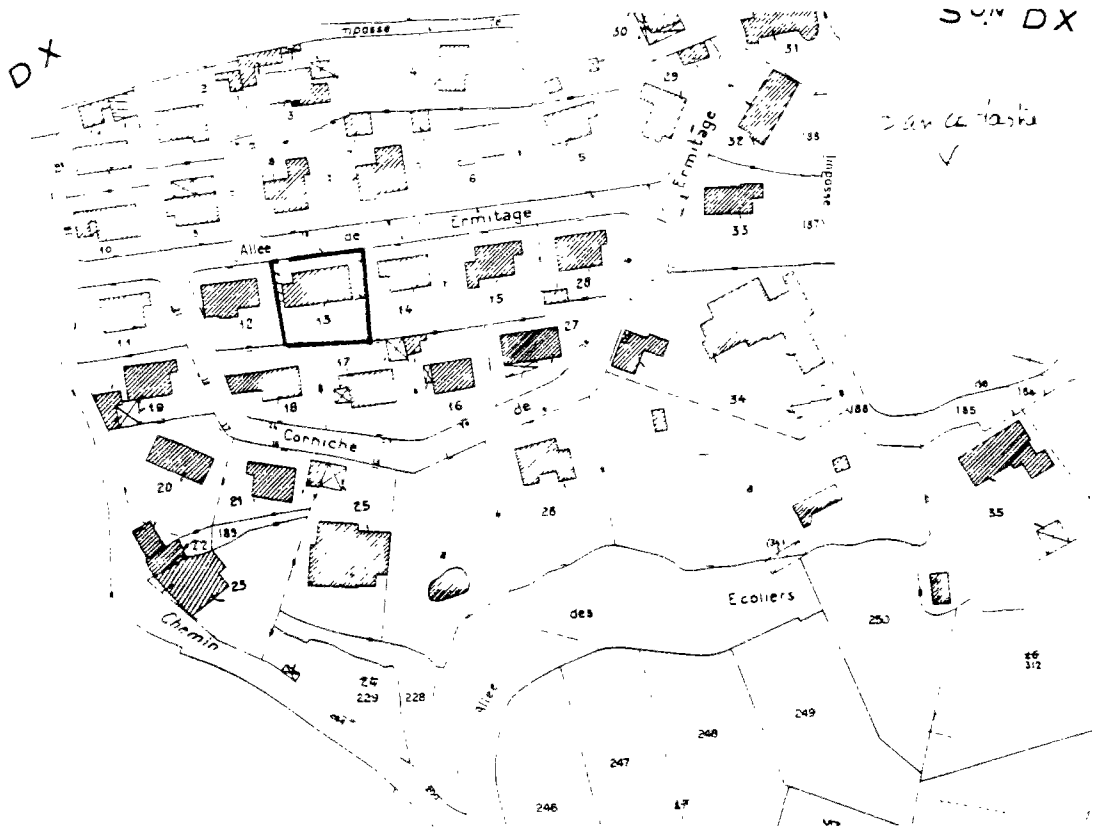


Figure 393-a Etude de cas d'un nouveau lotissement(Nîmes) parcelle 13.

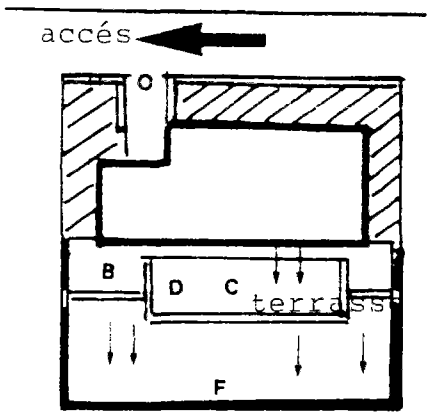


Figure 393-b Les moyens de stockage.

un stockage en toiture de 0,40m permetrait d'avoir une submersion de 0,70m au lieu del,00m

parcelle 13

surface de la parcelle=625m^2
surface de l'habitat = 180m^2
surface accès privé= 7m^2 | 205m2
surface terrasse d'agrément=18m^2

pourcentage surface imperméabilisée:32,80%

pourcentage de surface perméable inutile à la rétention,soit les 3 bandes de terrain trop étroites pour une technique de rétention sur les 3 côtés du pavillon 170m^2 soit 27%

pourcentage de surface restante perméable utile à la rétention:250m^2 soit 40%

il faut arriver à stocker un cubage de 250m^3(625x400mm) sur 250m^2 ce qui entraîne une obligation de submersion de 1,00m ce qui est très difficile surtout si le terrain est en pente (ici de 10%)

b- Recherche d'une diminution du ruissellement de l'infrastructure publique, des déssertes en particulier

- documents : planches cadastrales,
- visites de sites,
- étude théorique d'un lieu péri-urbain d'amont (l'étude n'est proposée qu'à titre de recherche sommaire).

Méthodologie : en travaillant à partir du cadastre, nous avons recensé :
- les voies à formation de ruissellement,
- le parcellaire sans habitation,
- les possibilités de rétention liées à l'espace avec les procédés de bassin de rétention en cascades et les rétentions maximales par les murs de clôture.

Constat : les routes s'étant installées dans les combes, et l'habitat près des routes, les parcelles libres d'habitat sont en général les parcelles hautes ; il faut donc que les prises du ruissellement public se fassent très en amont des parcelles à vocation de rétention par des fossés agricoles d'amenée, des dos d'âne directionnels sur chaussées, des renforcements de murs de clôtures pour la chenalisation des eaux, etc.

Moyens : acquisition à long terme des parcelles non construites par le droit de préemption urbain :
- concertation et échange du "droit à construire" contre des servitudes de passage hydrologique,
- création de nouvelles dessertes parallèles aux courbes de niveaux avec la création des aires de stockage de ruissellement,
- aménagements de lieux de promenade publique, etc.

Figure 394- Disposition de l'espace d'amont d'une ville (dessertes,parcelles construites,parcelles non-construites).

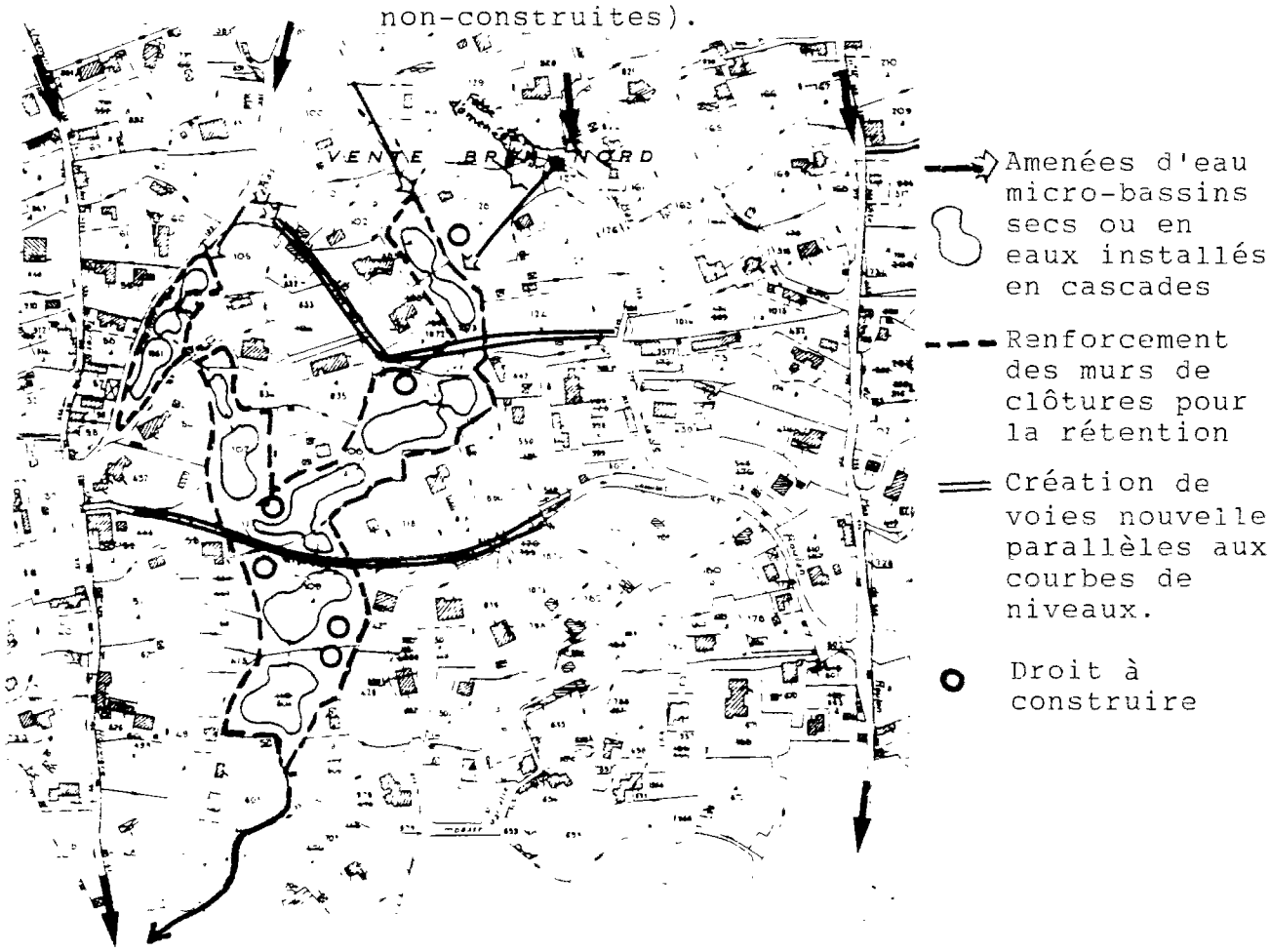


Figure 395- La rétention communale d'amont.
Des propositions d'aménagements hydrologiques (Nîmes).
Le renforcement des murs de clôtures pour la rétention se fait à l'aide d'un contreventement avec remblais de terre cf p. 309).

Cas d'application théorique : la rétention communale (figures 395 et 396)

Les objectifs de dérivation du ruissellement routier des dessertes sont :
- de briser la vitesse du ruissellement tronçon par tronçon,
- de capter les volumes d'eau à un point donné par les techniques de caniveau et dos d'âne directionnel,
- de créer deux types d'aires de stockage : des micro-bassins secs ou en eau et des zones de submersion inter-clôtures, avec renforcement des clôtures s'il le faut,
- de prévoir des surverses de secours vers la voie publique pour les débordements des lieux de rétention.

Prévision de rétention

En fonction de huit cas étudiés comme ceux des figures 394, 395 et 396, nous estimons à 20 % le volume du ruissellement communal que nous pourrions piéger, sachant que ces volumes doivent diminuer au fur et à mesure de la diminution des apports du ruissellement privé des parcelles.

Cumul des rétentions en zone péri-urbaine

Sachant qu'en zone péri-urbaine d'amont, dans les cas étudiés de Nîmes, la surface de l'infrastructure avec les déssertes publiques correspond à 10 % environ de la surface globale, et la surface du parcellaire privée à 90 %, on obtient avec les cas les plus défavorables (50 % de rétention à la parcelle et 20 % de rétention sur l'infrastructure) le pourcentage suivant :
- 47 % pourrait être stockés en zone péri-urbaine zone II,
- 53 % serait rejetés sur la voie publique, regroupant les eaux privées et publiques, et dirigés vers la zone I (figure 397).

acquisitions communales

nouvelles voies

création de bassins de rétention sec ou en eau (lieux de promenades)

renforcement des clôtures de rétention avec des remblais

Figure 396- Cas d'application pour les voies publiques . Actions sur le ruissellement centennal des infrastructures d'amont (Nîmes).

Infrastructure		parcellaire
10%	90%	surface
20%	50%	rétention

SOLUTION GLOBALE

S x h { h S/10 ---- 0,025 x hauteur d'eau ; h 0,9 S --- 0,45 x hauteur d'eau } 0,47 S x hauteur d'eau

STOCKAGE 47% peuvent être stockés
53% ruissellement restant issu de la zone peri-urbaine

Figure 397- Poucentage de stockage possible en zone peri-urbaine II.

4.3.3.3. Possibilités de cumul des capacités d'écoulement et de stockage pour les zones I et II

Nous avons constaté que, pour la zone urbaine I, il était possible de contrôler 65 % de la crue de ruissellement en débit de sortie et qu'il restait 35 % en débit d'entrée à gérer soit 198 m^3/s.

Nous avons dit qu'il était relativement possible de stocker les 60 m^3/s émis par la ville, par les techniques de rétention urbaine (soit 10,6 % du débit de sortie) (paragraphe 4.3.3.1.b).

Nous avons émis l'hypothèse pour la zone II péri-urbaine de pouvoir stocker en amont de la ville 47 %, dans le cas le plus défavorable, mais qu'il restait donc encore 53 % à atteindre l'entrée de la ville.

Nous en concluons donc que, s'il reste à gérer 35 % des débits au point (A), après les travaux d'écoulements urbains réalisés, et que s'il est possible de stocker 47 % du ruissellement en zone urbaine, on devrait pouvoir tendre à une limitation des hauteurs de crue en ville (figure 398).

Résultats globaux d'amélioration au niveau de la ville (figure 398)

En prenant les données de hauteur de crue et de débit en m^3/s au lieu correspondant, nous obtenons des résultats similaires pour le point (A), jonction de la zone urbaine I et de la zone péri-urbaine II.

- Calcul par la répartition des crues dans l'espace au point A, comme ordre de grandeur (figure 399) :

Sans équipement 76,5 m^2/section = 500 m^3/s (crue de 2,55 m)
Avec équipement 29,7 m^2/section = 194 m^3/s (crue de 0,99 m)

- Calcul avec les données de débit :

Sans équipement 566 m^3/s (débit de sortie)
Avec équipement -65 % de gain soit 360 m^3/s débit de sortie programmable sans inondation

Il reste à gérer au point (A) 35 % soit 198 m^3/s de nouveau débit d'entrée qu'il faut gérer à l'amont du point (A) en zone péri-urbaine II.

- Les possibilités de stockage à réaliser en zone II : Stockage minimal

Nous avons vu que nous pouvons espérer les probabilités de diminution suivantes :

- 47 % de stockage minimal de 198 m^3/s = 93 m^3/s,
- rejet de la zone II vers la zone I = 198 m^3/s - 93 m^3/s = 105 m^3/s excédentaire au point (A).

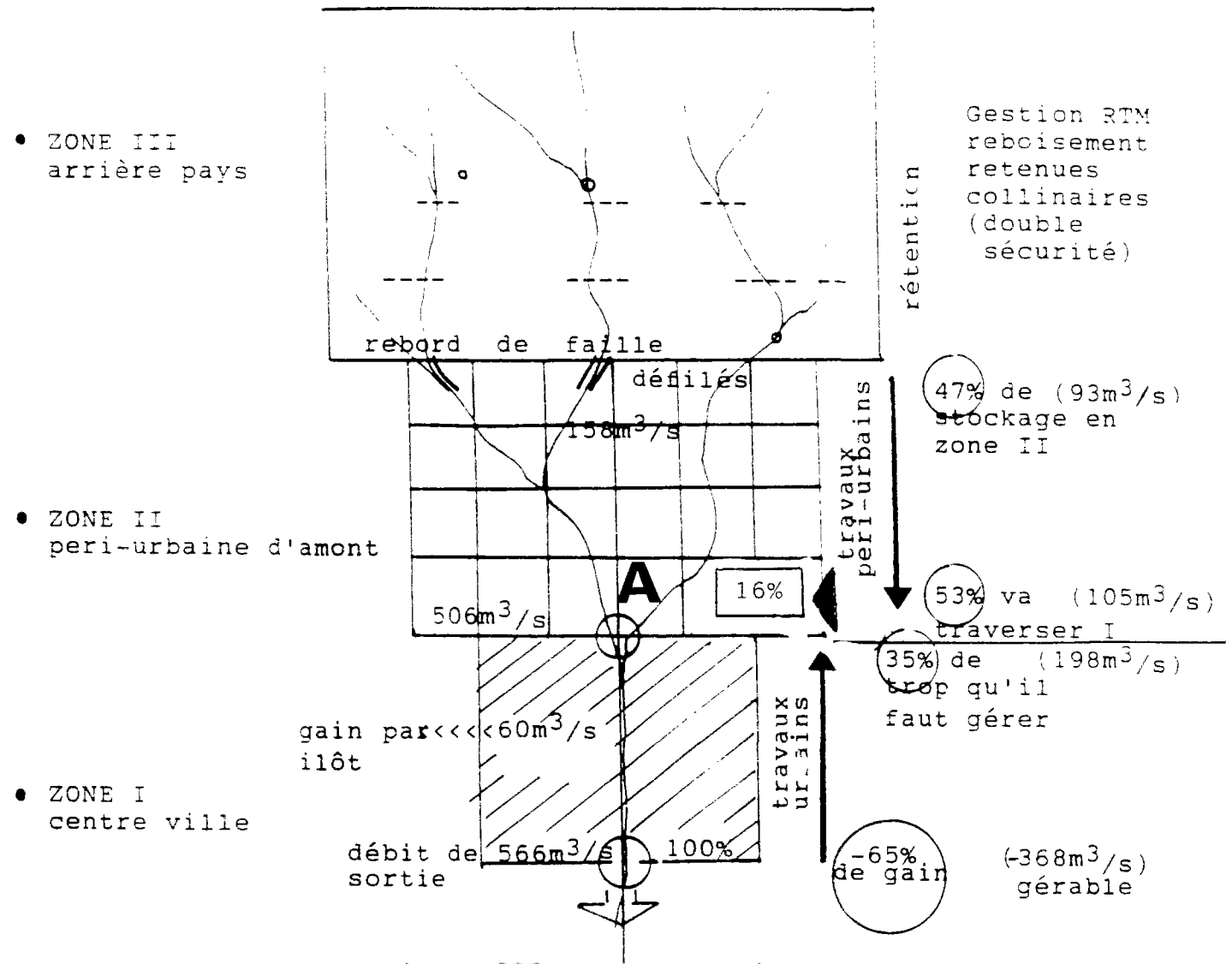
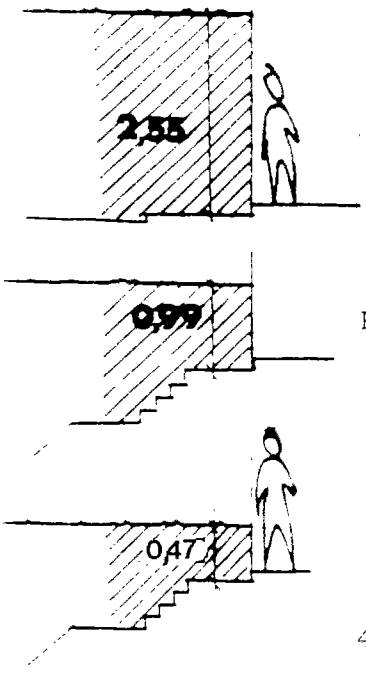


Figure 398- Possibilités de cumul des capacités de stockage et d'écoulement pour la zone I et la zone II (hypothèse 35% x 47% = 16% du débit de sortie 566m3/s restant à gérer).



Hauteur de la crue du 3.10.1988, définie par les traces de laisses.

Prévision après travaux en zone I (capacité d'accueil de la rue-canal) figure 385

Prévision hauteur de crue après travaux en zone II.(hypothèse 47% de 0,99 = 0,47m)*

Figure 399-

Evolution des répartitions des crues dans l'espace au points A .
Prévisions de gain d'inon-dabilité après les travaux urbains en zone 1 et les travaux de rétention en zone zone 2.

*Les chiffres sont donnés à titre d'indication .Ces hypothèses devront être vérifiées par une modélisation mathématique.

- Impact de cet excédent sur l'exemple retenu (avenue G. Pompidou)

Nous avons estimé à 0,99 mètre la hauteur de crue restante après aménagements urbains de la zone I. Par les prévisions minimales de stockage à réaliser sur la zone II, nous pouvons escompter, comme ordre de grandeur, au point A une diminution de la crue à 0,47 mètre de hauteur restante, contre les 2,55 mètres de crue du départ (rétention de 47 % sur la hauteur de 0,99 mètre) (figure 399).

4.3.3.4. Capacité de stockage du bassin-versant naturel zone III

La zone III se différencie par un relief plus plat (5 %) avec des collines isolées, très différent du relief de failles avec les pentes beaucoup plus abruptes (15 % à 20 %) de la zone II étudiée.

Nous préconisons une série d'ouvrages de stockage, le long des voies départementales et sur les torrents :
- retenues collinaires sur terrain quasi plat (2 % et 5 %) le long des voies pour stocker le ruissellement,
- travaux de restauration en montage (R.T.M.) dans les ravins avec la création de multi-ouvrages micro-hydrologiques (pertuis, etc.).

Nous n'avons pas fait les études détaillées de la zone III, mais ces travaux de stockage sont aussi indispensables que ceux de la rétention à la parcelle de la zone II.

4.3.4. Les éléments de l'analyse économique -

Analyse coût-avantage : le coût de l'investissement des travaux proposés et l'efficacité des solutions.

Le choix d'une solution ou de solutions groupées dépend du coût d'investissement des travaux proposés et de l'efficacité des solutions.

Nous proposons une liste de coûts pour les catégories suivantes:
- solutions pour le domaine public,
- solutions pour le domaine privé,
- solutions à court terme et à faible coût d'investissement,
- solutions à long terme et à coût d'investissement élevé,
- solutions pour une urbanisation existante,
- solutions pour des travaux neufs.

Ces solutions touchent les procédés de :
- prévention,
- rétention mécanique,
- protection mécanique,
- écoulements préférentiels,
- anti-embâcles.

Ces solutions concernent :
- la planification,
- la gestion communale,
- les comportements de sauvegarde.

La difficulté réside dans la fait que nous avons toutes les unités pour les aménagements de surface (unité, mètre, mètre carré et mètre cube), et que l'avantage d'un débit infiltré sur un débit différé n'est pas chiffré.

4.3.4.1. Domaine public

a- Propositions à court terme avec mesures à demeure

• Prévention

Amélioration de l'existant	Coût	Avantages
- "plans d'évacuation" Ecoles, campings, stades, etc. installation de sirène autonome	10000 F/u	Sensibilisation au risque
- mise en place de fax	2500 F/u	Accélération de la gestion préventive
- modification de la circulation en fonction des écoulements préférentiels (panneaux de circulation)	1000 F/u	Sensibilisation au risque
- modification du stationnement :		Sensibilisation
- rues refuges : • panneaux	1000 F/u	au risque
• murets d'arrêt d'eau	1000 F/m	
- lutte contre les embâcles modernes de voitures (grilles urbaines)	3000 F/m	Accélération de la gestion préventive
- création de refuges-urbains :		
• abri-bus refuge (surcoût)	5000 F/u	Augmentation
• lampadaire avec échellons (surcoût)	3000 F/u	des refuges
• plantation d'arbres d'alignement formant refuge,	2000 F/u	
• déplacement petit mobilier urbain pour former des relais aux refuges (surcoût de l'ancrage),	500 F/u	
- interdiction de dormir en rez-de-chaussées et caves (contrôle par permis de construire, permis de rénovation, certificat de conformité)		Préservation des personnes
- plaques commémoratives	300 F/u	Sensibilisation au risque
- évènement gravé sur appareillage en pierres (monuments historiques)	2000 F/u	Sensibilisation au risque
- renforcement des édicules publiques	1000 F/u	Augmentation des refuges
- apprentissage scolaire du risque (1 salaire par ville)	15000 F/mois	Sensibilisation au risque

- exercice annuel d'évacuation (pompiers)		Sensibilisation au risque
- mise en place de gardien de nuit pour tous les lieux publics (campings)	15000 F/mois	Accélération de la gestion préventive
- délibération municipale sur le risque		
- création de la commission des sages (honoraires de délibération)	10000 F/an	
- création de syndicat de propriétaires à risque (établissement des règlement des co-propriétaires)	10000 F	

• Rétention mécanique à court terme

	Coût	Avantages Rétention obtenue par m^2	Prix du m^3 retenu
- amélioration du stationnement existant par piégeage de l'eau sur place avec :			
• surélévation des bordures,) • diminution des avaloirs existants)	233 F/m^2	0,40 m^3/m^2 (1)	583 F/m^3
- création de boulingrin sur pelouses engazonnées pour public	150 F/m^2	1 m^3/m^2 (2)	105 F/m^3
- création d'un encaissement de 0,50 sur cours d'école, de caserne, d'hôpital	300 F/m^2	0,50 m^3/m^2 (1)	600 F/m^3

• Protection à court terme

	Coût	Protection maximale P.H.E. Hauteur de crue
- construction de merlon végétalisé de protection (hauteur 1,50 m)	500 F/m^2	1,50 m (2)(3)
- construction de dos d'âne sur chaussée avec caniveau d'arrêt pour cloisonnement des secteurs protègés (hauteur 0,30)	500 F/m^2	0,30 m (1)
- construction de murs urbains pour les "rues protégées" avec escaliers de franchissement (hauteur variable 1,05 m de préférence pour un franchissement de 7 marches maximum)	5000 F/m	1,05 m (3)

---

(1) Débit différé rejeté
(2) Débit infiltré
(3) Protection

b- Propositions à long terme et travaux neufs

• Prévention

* Rétention mécanique de surface à long terme

	Coût	Rétention obtenue par m^2	Prix du m^3 retenu
- construction de stationnement :			
• par encaissement aérien,	560 F/m^2	0,50 m^3/m^2 (1)	1120 F/m^3
• par structure-réservoir.	3000 F/m^2	100 m^3/m^2 (2)	3000 F/m^3
- modification sur parking existant :			
• parkings à 2 pentes,	100 F/m^2	0,40 m^3/m^2 (1)	250 F/m^3
• parkings à 4 pentes,	105 F/m^2	0,40 m^3/m^2 (1)	260 F/m^3
• grand parking à 1 pente (5 %)	70 F/m^2	0,40 m^3/m^2 (1)	175 F/m^3
- modification de tracé de voies secondaires (avec acquisition) dans le sens des courbes de niveaux	1000 F/m^2	ralentissement vitesse	
- modification du revêtement voirie existante	500 F/m^2	obstacle à obstruction d'entonnement	

* Modification des écoulements préférentiels à long terme

	Coût	Avantages	
		Volume de transit obtenu par m^2	Coût du m^3 transité
- création de rue-canal	1972 F/m^2	1,50 m^3/m^2 (1)	1314 F/m^3
- création de boulevard-canal	2600 F/m^2	1,60 m^3/m^2 (1)	1625 F/m^3
- création de rue de dérivation (dos d'âne et caniveau de dérivation)	1000 F/m^2	0,40 m^3/m^2 (1)	2500 F/m^3
- création de canal urbain en eau	2138 F/m^2	2,00 m^3/m^2 (1)	1069 F/m^3

---

(1) Débit différé rejeté

(2) Débit infiltré

(3) Protection

• Protection mécanique à long terme

	Coût	Avantages	
		Protection maximale hauteur de crue	Prix du m^2 de protection verticale
- création de mur-parapet avec soutènement (hauteur 2,50 m comme base de calcul)	10000 F/m	2,50 m P.H.E.(3)	4000 F/m^2
- entretien des murs existants en pierres sèches et filtrants (hauteur variable 2,50 m)	2000 F/m	2,50 m P.H.E. (3)	800 F/m^2

• Transformation des parcs et jardins en zone de rétention

	Coût	Rétention obtenue par m^2	Prix du m^3 retenu
- rétention par ouvrage souterrain (profondeur 2,50 m comme base de calcul)	4000 F/m^2	2,50 m^3/m^2 (1)(2)	1600 F/m^3
- rétention hors-sol par refoulement :			
• mur d'enceinte métallique sur 2,00 mètres de hauteur,	5000 F/m	2,00 m^3/m^2 (1)	2500 F/m^3
• mur d'enceinte en pierres sur 2,00 mètres de hauteur.	8000 F/m	2,00 m^3/m^2 (1)	4000 F/m^3

• Rétention à long terme par bassin paysager

	Coût	Rétention obtenue par m^2	Prix du m^3 retenu
- bassin de rétention sec engazonné perméable (sur la base de 2,50 m de marnage)	1932 F/m^2	2,50 m^3/m^2 (2)	772 F/m^3
- bassin de rétention en eau imperméable avec berges plantées	2132 F/m^2	2,50 m^3/m^2 (1)	852 F/m^3

• Travaux R.T.M. sur ravins et Talwegs

	Coût	Rétention obtenue par m^2	Prix du m^3 retenu
- réaménagement des ravins avec acquisitions (largeur variable 25 mètres)	250 F/m^2		

---

(1) Débit différé rejeté
(2) Débit infiltré
(3) Protection

- travaux R.T.M. (largeur du lit mineur 5,00 m) :			
• pertuis sur pente de 5 %,	5000 F/m^2	2,50 m^3/m^2 (1) (2)	200 F/m^3
• pertuis sur pente de 20 %.	15000 F/m^2	2,50 m^3/m^2 (1) (2)	3000 F/m^3
- création de retenue collinaire végétalisée ; micro-barrage de terre sur la base de 25 m de section - 200 000 F pour 20 m de digue pour une retenue de 3000 m^3	10000F/m d'ouvrage	2,50 m^3/m^2 (2)	66 F/m^3

4.3.4.2. Domaine privé

a- Propositions à court terme à la parcelle

• Prévention

	Coût	Avantages
- interdiction de dormir au rez-de-chaussée	permis de construire ou délibération municipale(3)	Préservation des personnes
- interdiction de logements en rez-de-chaussée	permis de construire	Préservation des personnes
- interdiction de construire en lit majeur urbain et péri-urbain	- réglement d'urbanisme - non Aedificandi(3)	Préservation des personnes
- "plan d'évacuation" (avec étude)	3000 F/u (3)	Sensibilisation au risque
- ouverture sur toiture pour refuge	5000 F/u (3)	Augmentation des refuges
- mise en place d'échellons extérieur sur bâtiment (1 étage)	5000 F/ l'étage(3)	Augmentation des refuges

• Rétention mécanique à court terme

* Techniques paysagères

	Coût	Avantages	
	Prix/m^2	Rétention obtenue par m^2	Prix du m^3 de crue retenue
- technique de submersion avec boulingrin (encaissement maximum 1,00 mètre)	110 F/m^2	1,00 m^3/m^2 (2)	110 F/m^3

---

(1) Débit différé rejeté
(2) Débit infiltré
(3) Protection

- construction de murets de jardin sur jardin existant (hauteur muret : 0,60 mètre)	1000 F/m	Variable suivant pente 0,40 m^3/m^2 (2)	2500 F/m^3
- merlon de rétention en terre sur jardin existant (hauteur 1,00 mètre)	200 F/m d'ouvrage	0,60 m^3/m^2 (2)	333 F/m^3
- fossé agricole végétalisé et cloisonné (1,50 x 1,00)	100 F/m d'ouvrage	0,60 m^3/m^2 (1)(2)	166 F/m^3
- bassin de jardin type mare	100 F/m^2	1,00 m^3/m^2 (2)	100 F/m^3

* Techniques architecturales

	Coût	Avantages	
	Prix/m^2	Rétention obtenue par m^2	Prix du m^3 de crue retenue
- modification de gouttières avec rejet sur le domaine privé (pavillon 50 m^2=20 m^3 E.P)	10000 F/u		500 F/m^3
- terrasse d'agrément ennoyée sur 0,60 mètre de profondeur	500 F/m^2	0,60 m^3/m^2 (1)(2)	833 F/m^3
- stationnement privé ennoyé sur 0,40 mètre d'encaissement	500 F/m^2	0,40 m^3/m^2 (1)(2)	1250 F/m^3
- accès avec rigoles de dérivation	100 F/m d'ouvrage	0,20 m^3/m^2 (2)	500 F/m^3
- stationnement privé ennoyée avec bordure de surélévation (h = 0,30)	100 F/m	0,30 m^3/m^2 (1)(2)	333 F/m^3

• Protection à court terme

	Coût	Avantages	
	Prix/m	Protection P.H.E. hauteur de crue	Coût de protection par mètre d'ouvrage pour 1 m de crue théorique
- dos d'âne de protection (au portail) :			
• hauteur 0,30,	500 F/m	0,30 m (3)	1666 F/m/h
• hauteur 0,60.	500 F/m	0,60 m (3)	833 F/m/h

---

(1) Débit différé rejeté
(2) Débit infiltré
(3) Protection

- porte palière d'entrée étanche	5000 F/u	2,50 m (3)	2000 F/m de crue
- fermeture de fenêtre vulnérable en maçonnerie	500 F/m^2	2,50 m (3)	200 F/m de crue
- construction de mur bahut de première défense, hauteur 0,60	1000 F/m d'ouvrage	0,60 m P.H.E.(3)	1666 F/m/h
- construction de merlon de défense (aval : hauteur variable : 1,00 m)	200 F/m d'ouvrage	1,00 m P.H.E.(3)	200 F/m/h
- palplanches amovibles de défense (3 éléments x 0,20 x 1,20) installées sur un mur existant de 10 mètre de longueur	2000 F/ l'ensemble	0,60 m P.H.E.(3)	333 F/m/h

	Prix/m^2	Rétention obtenue par m^2	Prix du m^3 retenu
- inondabilité programmée des caves avec cuvelage, porte étanche et pompage ultérieur	200 F/m^2	2,50 m^3/m^2 (1)	80 F/m^3

b- Propositions à long terme à la parcelle

• Rétention mécanique à long terme

* Techniques paysagères

	Coût	Avantages	
	Prix/unité	Rétention obtenue par m^2	Coût du m^3 de crue retenue
- bassin-réservoir de jardin en maçonnerie (multifonctionnel) 5 m x 2,5 m x 2,00 m à 2000 F/m^2 de mur	86000 F/u	2 m^3/m^2 (1)(2)	3440 F/m^3

* Techniques architecturales

	Coût	Avantages	
	Prix/unité	Rétention obtenue par m^2	Coût du m^3 de crue retenue
- toiture-terrasse de rétention pour crue 100 ans (surcoût surcharge grand public 400 kg/m^2 au lieu de 200 kg/m^2)	1000 F/m^2	0,40 m^3/m^2 (1)	2500 F/m^3

---

(1) Débit différé rejeté
(2) Débit infiltré
(3) Protection

• **Protection à long terme**

	Coût par équipement	Protection maximale P.H.E.	Coût protection par mètre d'ouvrage pour 1 m de crue théorique
- vide sanitaire au dessus du sol surcoût (pavillon 50 m^2 ou 30 m de semelles) hauteur 0,50 m/coût 3 % de la construction	30000 F/u	0,50 m (3)	1000 F/m/h
- décaissement circulaire murs existants 0,50 m de hauteur (30 m de murs)	10000 F/u	0,50 m (3)	333 F/m/h
- construction d'emmarchements (3 marches l'ensemble pour 30 m de murs de vide sanitaire ou cave)	2500 F/u	0,45 m (3)	185 F/m/h
- construction d'un perron classique 5 à 7 marches de 0,15 m (double volée, hauteur de protection : 1,05 m) l'ensemble pour 30 m de murs de vide sanitaire ou de cave surélevée	10000 F/u	1,05 m (3)	349 F/m/h

	Coût	Protection maximale P.H.E.	Coût protection pour 1 m de crue
- construction de mur-parapet avec soutènement (hauteur 2,50 m comme base de calcul)	10000 F/m d'ouvrage	2,50 P.H.E.(3)	4000 F/m^2 vertical

4.3.4.3. Conclusion

Nous avons indiqué soit le coût du mètre cube de crue de ruissellement retenu avec la capacité de rétention obtenue par mètre carré d'équipement, soit la protection maximale de hauteur de crue , et le coût de la protection par mètre d'ouvrage ramenée à 1 mètre de crue théorique, de façon à pouvoir comparer financièrement les avantages des différentes techniques.

Nous avons indiqué pour chaque technique de rétention si le débit piégé de la crue était un débit différé, rejeté ou un débit infiltré, ce qui modifie les calculs de l'accueil de base de la crue de 10 ans des eaux de ruissellement au réseau d'assainissement urbain.

---

(3) Protection

Enfin nous indiquons que certains équipements peuvent être multifonctionnels :

- un mur de protection peut être en même un mur de rétention, à condition de vérifier la non-inondabilité de l'habitat protégé et de ne pas se retrouver dans le cas d'Anduze (1956) où les maisons protégées par la digue se sont retrouvées ennoyées par le ruissellement. Le mur de protection construit, le mur de rétention est donc gratuit, excepté le coût des aménagements spécifiques supplémentaires à rajouter (évacuateurs, barbacanes) ;
- un merlon de protection peut aussi être un merlon de rétention, en prenant les mêmes précautions citées dans le paragraphe précédent. La fonction de rétention de la crue de 100 ans est gratuite, puisque les coûts sont d'habitude imputés d'abord à la fonction de protection ;
- le coût d'un arrosage automatique enterré de jardin peut être remplacé par un arrosage de surface par ruissellement contrôlé qui permet de mettre en place le piégeage de fortes crues.

4.4. DÉMARCHE GÉNÉRALE DE GESTION PRÉVENTIVE DU RISQUE DE RUISSELLEMENT DANS LES CENTRES URBAINS

4.4.1. Introduction

En fonction des possibilités de rétention (car les capacités d'accueil urbain de ruissellement ne sont pas extensibles), en fonction du coût et en fonction des opportunités, nous pouvons proposer une démarche générale de gestion préventive du risque de ruissellement dans les centres urbains.

4.4.2. Caractérisation du risque

En reprenant les trois zones du paragraphe 4.2.1., il faut évaluer les composantes quantitatives chiffrées du ruissellement et des débits de transit de la ville en s'appuyant suivant l'urgence et le degré de précision souhaité :

- soit sur une analyse forfaitaire sommaire reprenant les chiffres estimés lors des catastrophes passées dans d'autres villes,
- soit sur une analyse quantitative détaillée (modèle hydrologique) comportant une analyse de l'existant et des études de l'effet des différentes solutions de traitement.

4.4.3. Choix d'une solution

- Éléments économiques
- Contraintes juridiques

4.4.3.1. Les éléments économiques

Nous avons chiffré les techniques de lutte pour convaincre de la modicité de certains moyens très opérationnels. Des solutions économiques et à court terme sont proposées pour débloquer la situation actuelle d'incitation à des techniques lourdes et très onéreuses dont l'efficacité n'est pas prouvée, comme la proposition des "tunnels" de Nîmes.

4.4.3.2. Les contraintes juridiques

Les contraintes juridiques sont de deux ordres : national et local.

- **au niveau national :**

• le privé doit retenir son propre ruissellement,
• le public doit protéger les riverains de son impact.

Ces deux termes impliquent les conditions suivantes :
- ne pas construire en zone à risque,
- respecter les écoulements en zone urbaine naturels ou artificiels comme les aménagements proposés,
- traiter les bassins-versants naturels avec les techniques R.T.M.

- **au niveau local :**

• établir des réglements tenant compte du consensus local sur le choix du degré de protection,
• établir une taxe sur le ruissellement,
• établir des aides, subventions financières pour la réalisation des travaux de rétention privés.

4.4.4. Utilisation d'une aide logistique existante : les services municipaux

A l'heure actuelle, nous remarquons que seul le service municipal de l'assainissement est concerné par le risque hydrologique majeur.

Suite à la liste des techniques de lutte, en fait tous les services municipaux devraient être impliqués :

- les Service de l'Urbanisme,
- le Service de l'Architecture,
- le Service des Espaces Verts,
- le Service de la Voirie,
- le Service du Cadastre,
- les sapeurs-pompiers,
- les gardiens municipaux d'établissements, les surveillants scolaires, les maîtres-nageurs, etc.

La liste n'est pas exhaustive.
A titre d'exemple, nous allons citer quelques Services et décrire leur mission.

4.4.4.1. Le Service de l'Architecture

Le Service de l'Architecture pourrait réaliser immédiatement :

- les plans d'évacuation pour le risque hydrologique, affichés dans les entrées de tous les établissements publics (écoles, cantines, bibliothèques, campings, etc.) et vérifier ceux des établissements privés (cinémas, grandes surfaces, industries, logements collectifs H.L.M., etc.) avec les contraintes des issues de secours vers les toits ;
- la pose de plaques commémoratives ou de gravures sur les Monuments Historiques (indestructibles) du niveau des crues centennales ;
- le contrôle des permis de construire avec l'obligation d'une hauteur du seuil des constructions (vide sanitaire, pilotis, etc.) en fonction du risque maximal historique connu.

Le Service de l'Architecture pourrait engager dès maintenant des études de travaux à long terme tels que :

- la définition des travaux de rue-canal, du boulevard-canal en liaison avec le service de la Voirie et des Espaces Verts,
- la définition des protections des écoles et autres édifices publiques existants,
- le contrôle des aménagements du parcellaire privé (modification des gouttières, de l'emplacement du portail, etc.) remise en état des murs de clôtures, etc.).

4.4.4.2. Le Service des Espaces Verts

Le Service des Espaces Verts pourrait programmer à court terme les travaux suivants :

- la modification progressive des emplacements du mobilier urbain pour mieux accèder à des refuges (arbres, grilles, etc.),
- la vérification des ancrages du mobilier urbain,
- la transformation des aires engazonnées urbaines en boulingrin de rétention hydrologique,
- le remplacement progressif des zones piétonnes imperméabilisées (bitume, béton, sol stabilisé par chaulage, etc.) en zones perméables (engazonnement, gravillonnage sans fond-de-forme chaulé, etc.),
- de nouvelles plantations d'alignement avec des branches maîtresses basses, côté trottoir, conduites pour servir de "refuge".

Le Service des Espaces Verts pourrait aussi engager dès maintenant les travaux à long terme de transformation des espaces verts et sportifs en espaces de rétention pour les crues centennales et plus.

4.4.4.3. Le Service de la Voirie

Le Service de la Voirie pourrait à court terme engager :
- la modification des plans de circulation et des plans de stationnement avec rues préférentielles en fonction du risque hydrologique,
- le renforcement du nombre des avaloirs, l'élargissement des grilles-avaloirs pour arrêter le ruissellement mineur, etc.

Et à long terme, le Service pourrait commencer :
- la réfection de revêtement de certaines voies en matériau plus résistant au ruissellement que le bitume,
- la transformation progressive des parkings publics existants avec le piégeage de l'eau et des voitures.

4.4.4.4. La création d'une cellule municipale opérationnelle inter-services techniques

La description des mission des Services et leurs interactions nous conduit à proposer la création d'une cellule municipale opérationnelle regroupant au moins un technicien des quatre services : Architecture, Espaces Verts, Voirie, Assainissement avec les services de gestion de crise sapeurs-pompiers, etc. La liste n'est pas exhaustive.

Les précautions minimales demeurent pour tous les services et établissements :
- la mise en place de sirène autonome,
- la mise en place d'objets de sauvetage à demeure,
- l'exercie annuel d'évacuation hydrologique,
- l'étanchéification des équipements souterrains (cantine scolaire, etc.),
- la possibilité d'évacuation des effectifs sur les toits,
- l'apprentissage de comportements de survie (films, etc.).

4.5. CONCLUSION

En raisonnant sur le scénario catastrophe avec les techniques de luttes à trois dimensions et multidisciplinaires, nous sommes arrivés à proposer une réduction notable du risque majeur de ruissellement en passant d'une crue de 2,55 mètres de hauteur dans une rue à une crue de 0,47 mètre au-dessus du niveau du trottoir, comme ordre de grandeur.
Une crue de 0,47 mètre est encore trop haute au niveau des dommages sur les biens, et nous pouvons améliorer encore cette hauteur de crue en étudiant la rétention en zone II et en zone III, le bassin-versant naturel non chiffré dans ce mémoire, par manque de données hydrologiques !
Mais, bien que nous proposions des équipements à court terme et peu onéreux, les équipements lourds sont incontournables vu le développement de notre urbanisation qui a conduit au recouvrement des ravins et rivières urbaines. Nous proposons donc systématiquement la création d'une rue-canal ou d'une avenue-canal pour tout recouvrement de rivières.
La chance de réussite du plan hydrologique réside dans le choix d'équipements à très grande contenance hydrologique (parcs urbains, terrains de sports, cours de caserne, d'hôpital, parkings de grandes surfaces, etc.) ou à très grande protection (la rue-canal, murs-parapets, etc.).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Généralités

En conclusion, la lutte contre le ruissellement fait partie du domaine de l'aménagement du territoire, et c'est beaucoup plus qu'un problème hydraulique.
Bien que le paroxysme du risque se trouve en priorité dans l'arc méditerranéen, toutes les villes de plaine comme de montagne sont concernées et sur tout le territoire ; il n'est qu'à lire la liste des villes et villages sinistrés que publie le Journal Officiel chaque année sous le terme "inondations et coulées de boue" : presque tous les départements sont touchés (annexe 3.3.).
"Ruissellement et Risque Majeur" sont devenus un sujet difficile depuis 1986, d'une part, techniquement car chaque catastrophe a une origine différente et, d'autre part, émotionnellement car ces évènements sont responsables aujourd'hui de beaucoup de drames.
Les propositions que nous soumettons ne sont qu'une avancée et des évolutions seront sans doute nécessaires. Pour commencer cette recherche globale, nous nous sommes donc fixés au terrain, à la recherche de solutions existantes ayant fait leur preuve pour les crues centennales, et nous avons proposé des solutions complémentaires comme la gestion communale du ruissellement.
Nous avons retenu la ville de Nîmes comme cas d'étude plus approfondi, car c'est là que nous avons trouvé le plus d'exemples favorables à la lutte mais aussi défavorables et aggravant le risque.

Origine de la recherche

Cette recherche trouve son origine dans les grands chantiers que nous avons eu à gérer à l'Électricité de France, au niveau des aménagements de terrains pendant et après chantier.
Nous y avons pris connaissance du risque de ruissellement à nos dépens, grâce à l'implantation d'un équipement de 15 hectares en milieu agricole[1], où l'imperméabilisation d'une partie du terrain par chaulage des plates-formes, terrassements généraux et décaissement jusqu'à la roche-mère ont conduit à la formation d'un ruissellement d'un débit de 10 000 m^3 pour une pluie moyenne décennale vécue sur le terrain, et d'importants frais financiers pour éviter de nouveaux dommages.
En abordant cette recherche d'explication du phénomène à risque mais à mini-échelle que nous avions vécu, nous ne pensions pas retrouver le même phénomène, mais à grande échelle cette fois, à l'échelle de la ville, avec l'apparition d'un nouveau type de crue moderne, la crue rapide de ruissellement en milieu urbanisé.
Cette sensibilisation au risque a été renforcée par la décision de l'ONU en 1987 de lancer une décennie (1990-2000) contre les inondations au niveau mondial.

---

[1] Site de l'interconnexion France-Angleterre à Bonningues (Calais)

L'inscription de ce sujet pour notre stage de D.E.A. (Diplôme d'Études Approfondies) s'est faite en avril 1987, soit trois mois avant la catastrophe du Grand-Bornand et, à chaque étape de la recherche, le sujet a été conforté malheureusement par de nouvelles catastrophes (le mémoire du D.E.A. a été présenté 15 jours avant la catastrophe de Nîmes).

Les réticences

Deux services ont soutenu ce travail :
- le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées sous l'angle des Risques Majeurs,
- la Délégation aux Risques Majeurs (D.R.M.) du Ministère de l'Environnement.

Dans les autres services, nous avons rencontré beaucoup de réticences s'appuyant sur les arguments suivants :
- qu'un ouvrage public (type EDF, SNCF, aéroports, etc.) ne pouvait pas générer un tel risque (université) ;
- qu'il fallait aborder le problème sous l'angle du débit, de la vitesse, du volume (hydrauliciens) ;
- que seuls les ingénieurs hydrauliciens et hydrologistes pouvaient apporter des solutions (hydrologues) ;
- qu'il fallait s'installer sur un site naturel, non urbanisé, avec des appareils pour mesurer la pluie et son débit pendant au moins trois ans (Ministère de l'Agriculture) ;
- que cette recherche urbaine était sans fondement (R.T.M.).

Nous savons que, sans nos expériences d'inondation artificielle vécues de terrain, nous aurions pû abandonner ce sujet de recherche.

Les certitudes :

Nous avons été aidée dans ce travail par plusieurs antécédents personnels :
- une activité d'Architecte en Algérie, avec l'obligation de construire suivant les normes parasismiques, et le vécu ensuite du tremblement de terre d'EL ASNAM (1982) ;
- une activité de Paysagiste, avec l'apprentissage de la lecture du terrain et les connaissances des protections mécaniques du monde agricole avec modelés du sol et plantation ;
- une activité d'Ingénieur-Divisionnaire de parcs en jardins, avec une inondation fluviale de type Brives-Charensac, et des chutes de neige entraînant la mise sur pied de plans de déneigement (avec appels téléphoniques en cascade, etc.) ;
- une activité à l'EDF sur les grands chantiers, avec la constatation de ces mini-inondations rapides déjà mentionnées, qui ont servi de références à notre travail.

Nos propositions

Nous proposons une méthode d'étude pluridisciplinaire conduisant à des solutions comportant des variantes permettant des choix en fonction des coûts et des délais de réalisation.

A l'encontre des propositions qui nous ont été présentées (le creusement de tunnels pour Nîmes, etc.), nous pensons qu'il existe des procédés à faible coût, et même à coût nul (étant pris en charge par d'autres budgets) que l'on peut réaliser immédiatement pour la lutte contre le ruissellement.
Nous avons donc essayé de briser la spirale des travaux onéreux qui étaient offerts comme pour prouver l'insurmontabilité du problème. Nous avons proposé une série de procédés de lutte pour inverser la tendance actuelle de la stratégie lourde comme unique solution, et ceci dans tous les domaines. Nous avons paré au plus pressé, en simulant le pire.
Enfin, nous avons trouvé un potentiel de très grande possibilité de rétention dans les espaces verts de toutes tailles, privés et publics, qui n'était pas encore développé.

L'aggravation du risque

Nous avons découvert que le risque majeur de ruissellement dans un centre urbain est un risque nouveau, un risque moderne et artificiel, même s'il a comme base le risque naturel millénaire. C'est aussi un risque qui va aller en s'accroissant, dans un pays "industrialisé" comme le nôtre. L'aggravation du risque est due aux facteurs suivants, qui sont eux-mêmes à tendance croissante :

• Facteurs anthropiques :
- augmentation de la population,
- regroupement de la population en certains points du territoire,
- imperméabilisation des sols par tous les corps d'état et minéralisation des lieux habités,
- gestion des "erreurs" antérieures depuis 1945 (assainissement, urbanisme),
- modification des techniques agricoles et déprise agricole.

• Facteurs climatiques :
- hypothèses de dérive climatique d'ici un siècle, se traduisant en France par :
  - l'augmentation des orages de cumulo-nimbus.
  - le réhaussement du niveau des mers entraînant, pour toutes nos villes côtières, le blocage du ruissellement et les risques d'inondation par mascaret.

Destinataires de la thèse

Cette thèse est destinée aux décideurs, aux élus, aux aménageurs (urbaniste, paysagiste, architecte, ingénieur de voirie). Elle n'est pas destinée aux hydrauliciens, aux hydrologues, qui ont déjà leurs méthodes et leur savoir-faire de très haut niveau, mais souvent intransmissible aux décideurs, maîtres d'Ouvrage et élus, qui n'ont eux qu'un bagage mathématique réduit.

Termes-clés, multi-sens et contre-sens :

Nous avons relevé une série de multi-sens dans les termes-clés du ruissellement-risque naturel, et même de contre-sens.

• Le terme de rétention

Pour les hydrauliciens, la rétention est la rétention NATURELLE, celle appliquée de façon simplifiée dans la plupart des formules mathématiques des modèles pluies-débits, où la rétention naturelle est estimée forfaitairement à un abattement de 30 %, quel que soit le couvert végétal. Cette rétention comprend les impacts du couvert végétal (sans précision), de l'évapotranspiration du sol, de la pente et de la rugosité des éléments naturels.
Pour les aménageurs, la rétention est mécanique et ARTIFICIELLE, afin de piéger l'eau de ruissellement à la source par des aménagements de surface.

• Le terme de couvert végétal

Pour les hydrauliciens, le terme de couvert végétal de base est exclusivement l'engazonnement (site expérimental d'Orgeval, formé d'un gazon court, clairsemé, à tonte hebdomadaire, non mélangé et à très faible pouvoir d'absorption).
Pour les aménageurs, le couvert végétal se compose de trois strates superposées (engazonnante, arbustive et arborescente), avec en plus la notion de persistance du feuillage ou de feuillage caduque.

• Le terme de coefficient de ruissellement (C_r ou K)

Le "coefficient de ruissellement" (C_r) dans les calculs mathématiques ne comprend que la notion de rétention naturelle (en particulier, l'évapotranspiration), mais jamais celle de la rétention mécanique doublée d'une rétention naturelle à trois strates et à dominante de persistants.
De plus, le coefficient de ruissellement est passé dans les calculs de la dernière décennie d'un C_r de 0,3 à un C_r de 0,2 (annexe 1 paragraphe 1.5.5.) et ceci malgré l'augmentation des volumes d'eau urbaine ruisselée depuis 1960, c'est-à-dire que le coefficient de ruissellement diminuait au fur et à mesure que le ruissellement augmentait.

Notre mémoire s'est donc appuyé sur une formule de hauteur d'eau tombée sur la surface concernée, pour formuler des volumes, ce qui nous a conduit à dire que le risque urbain de ruissellement est égal à :
400 mm en 6 heures soit 400 litres/m^2, en nous appuyant sur les données de la catastrophe de Nîmes, la plus grave en métropole.

Les interrogations du risque

Contre quelle crue se protéger : la crue de 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans ou plus ?

Le choix du risque dont on veut se protéger est encore un sujet de discorde. Certaines communes proposent une protection entre 10 ans et 100 ans (fifty-fifty, moitié-moitié), ce qui ne donne d'ailleurs pas une protection contre la crue de 50 ans mais plutôt contre une crue de 20 ans.

Chaque ville choisit donc actuellement son degré de protection (certaines préfèrent une protection d'une crue d'occurrence 20 ans, d'autres 30 ans, d'autres 50 ans) en fonction de leurs possibilités financières, et non plus en fonction du risque.
Nous allons donc vers une disparité du degré de protection en France. Certaines villes seront mieux protégées que d'autres, celles qui auront le plus de moyens.
Il se peut qu'un nouveau danger du risque du ruissellement réside dans cette disparité de protection, en fonction de l'oubli qu'auront nos descendants dans un siècle de ce degré spécifique de protection qui aura été choisi pour leur lieu d'habitation.

Des principes différents pour le même risque en fonction des pays : les contradictions

a- Faut-il déboisser les ravins comme préconisent les hydrauliciens pour éviter les embâcles forestières ?

- La France le préconise, bien qu'aucun moyen ne soit débloqué à cet effet et que plus personne ne veuille faire ce travail.
- La Suisse crée au contraire des obstacles de troncs dans les ravins et boise même les seuils, les ouvrages de laminage.

L'avis du Service des R.T.M. serait un précieux apport au cas par cas ; mais il suffirait peut-être de mettre des filets métalliques en bas des ravins pour piéger les végétaux flottants, en laissant la végétation naturelle se développer en dessus pour bloquer l'érosion et retenir l'eau.

b- Faut-il remplacer les murs de clôture par des grillages ?

Nous avons étudié en détail l'apport de la présence des murs de clôture dans la lutte contre le ruissellement sous le double aspect rétention-protection.
Nous pensons que le maintien des murs de clôture est une donnée de base de non-amplification du risque, ainsi que le maintien des terrasses de culture.
Par contre, les grillages, très vulnérables à l'arrachement, sont particulièrement propices à l'obstruction des entonnements de rivières urbaines.

Prises de position : le déclic

Nos objectifs ont commencé à se préciser lorsque nous avons entendu dire par des hydrauliciens que la rétention centennale sur les toitures des bâtiments n'était pas possible !
Devant l'inexactitude de cette affirmation (par d'autres corps d'État) et puisque c'est notre profession, nous pouvons affirmer qu'une rétention d'une pluie centennale sur la toiture des constructions est possible et qu'elle est même indispensable à la lutte contre ce nouveau risque moderne qui est le risque de ruissellement urbain.

Tant que l'architecture et les jardins ne pendront pas en compte la formation de ce risque, il est bien peu probable que les hydrauliciens et hydrologues arrivent à résoudre SEULS le problème de la crue centennale, qui est un problème de surface.

L'après-Nîmes

Il y a eu pour Nîmes des travaux importants réalisés après la catastrophe, mais :
- ce sont des travaux de RÉFECTION de l'EXISTANT, avec quelques améliorations de busage au passage des routes, d'entonnement, de curage de fossés ;
- d'autre part, d'importants travaux architecturaux et routiers ont été réalisés, mais ils n'avaient rien à voir avec la catastrophe alors qu'ils se trouvaient sur les lieux préférentiels des anciens écoulements busés :

• "La Ville Active" a été réalisée avec une nouvelle capacité d'accueil du transit de surface pour au maximum la crue décennale, alors qu'il y avait l'espace pour réaliser le transit d'une crue centennale ;
• les carrefours urbains routiers ont été traités en immenses buttes, au lieu de bassins de rétention de même profondeur que la hauteur des buttes ;
• "Le Colisée" (ensemble nouveau de bureaux) a été construit sans précaution spécifique contre les inondations. Il y a même des activités en sous-sol avec accès de jardin.

Les éléments de la thèse

Nous avons résumé ci-après les éléments qui nous ont le plus marqué.

Chapitre 1 : Nous avons été impressionnée par les études de M. RIOU (définition du ruissellement), de Madame V. AUZET (la nouveauté de ce risque au niveau agricole et sa généralisation), de l'équipe américaine du Parc National de Woodpark, analysant par des méthodes naturalistes d'observation l'évolution de l'impact du ruissellement en milieu forestier après la création des chemins de débardage moderne, enfin par les études de M. LEMIEUX (Canada, Québec) qui a mis au point un modèle simplifié pour le risque urbain de ruissellement.

Chapitre 2 : La description de quatre catastrophes nous a montré que le risque est très différent d'un cas à un autre. A la question de savoir d'où est venue l'eau, les réponses sont multiples, mais il existe des similitudes :

• une grande masse d'eau issue des montagnes, comme pour le Grand-Bornand, Vaison-la-Romaine ou plus récemment pour Sainte-Lucie-Porto-Vecchio (2 novembre 1993) ;
• ou bien le recouvrement de rivières sèches avec des buses minuscules, qui fait que l'eau prend la route qui a été construite sur l'ancienne rivière sèche (Nîmes, Vaison-la-Romaine partie haute, Givors-novembre 1993, etc.) ;

• ou bien des modifications importantes du paysage de l'arrière pays, comme les vignobles de Vaison-la-Romaine, la garrigue de Nîmes, etc. ;
• ou bien des ouvrages vitaux souterrains ennoyés, paralysant la ville (Paris, Nîmes, Vaison-la-Romaine, etc.).

Pour toutes les catastrophes de ruissellement, nous avons trouvé comme caractéristiques la rapidité de l'évènement (crue-décrue en quelques heures), la vitesse de courant, un effet tampon des zones d'amont variable, des signes avant-coureurs proches (bruit, charriage, refoulement des égouts). Nous avons aussi trouvé des comportements individuels et collectifs à risques, des refus d'évacuation, mais aussi des comportements de survie, ou l'arbre urbain est devenu un refuge important (100 personnes sauvées entre Nîmes et Vaison-la-Romaine).

L'étude de ces quatre catastrophes nous a conduit à formuler un certain nombre de catastrophes prévisibles pour les villes de Grenoble, Nice, Clermont-Ferrand, Lanslebourg, Morlaix et pour divers campings de l'Ariège, de la Roya, etc. Toutes ces villes présentent des conditions similaires aux quatre catastrophes analysées ; le choix des catastrophes prévisibles n'est que la conséquence des visites de villes que nous avons effectuées au cours de notre thèse et n'a donc rien de systématique.

Chapitre 3 : Devant l'ampleur et la multiplicité des situations à risque trouvées, nous avons essayé de définir une classification de facteurs aggravants et de facteurs limitants du risque.
Ces facteurs négatifs et positifs touchent tous les domaines, urbanisme, architecture, paysage, voirie et même la législation. Car à la question de savoir si la législation a aggravé le risque en France, nous nous sommes appuyés sur l'avis des ingénieurs de la Confédération Helvétique qui nous ont affirmé que la législation avait aggravé le risque en Suisse. Et nous avons découvert que nos lois comprenaient dans le même texte des paragraphes aggravants et limitants.
Les facteurs aggravants sont bien plus nombreux que les facteurs limitants, en particulier pour l'urbanisme où des autorisations de construire désastreuses ont été accordées depuis 1945 en zone inondable, en particulier pour les écoles (maternelles, élémentaires, lycées et universités).
Une solution rapide serait de faire des échanges d'établissements publics, pour éloigner toutes les écoles des zones inondables et il nous paraît inconcevable que l'école maternelle détruite à Vaison-la-Romaine, au pied d'un ravin, soit reconstruite en zone inondable.

• En voirie, nous avons noté la répétition du problème de la sous-estimation des crues des rivières sèches et leur recouvrement récent en milieu urbain, ou bien la réalisation de routes dans les lits mineurs de ces rivières.

• En architecture, après analyses de parcelles, nous avons noté une prolifération de rejets de gouttières et de ruissellement privé sur la voie publique.

Pour les techniques de lutte, nous avons opté de retenir les techniques trouvées sur les sites étudiés, ou celles dont nous avions eu connaissance dans d'autres pays : la rue ruisselée de New-Delhi pour les pluies de moussons, le parc urbain submersible d'Osaka, le canal de Vienne, les retenues collinaires d'Angleterre.
Nous avons étudié plus spécifiquement l'impact des protections démontables, de la rue-canal et de ses possibilités de transit, de la réorganisation du ruissellement à la parcelle avec le déplacement des portails, de la gestion communale du ruissellement des déssertes, des plans de circulation et de stationnement en fonction des crues pour éviter les embâcles modernes de voitures et caravanes dérivantes, des rues cloisonnées, des techniques en construction de vide sanitaire avec perron ou bien de pilotis, etc.

Chapitre 4 : Il nous fallait vérifier nos propositions. Nous sommes partis du cadastre, des données hydrauliques des ingénieurs et bureaux d'études, pour trouver des gains de débit avec l'application de nos techniques multidisciplinaires, en nous appuyant sur la formule classique de Chézy pour le calcul de débit d'un canal, notre proposition de rue-canal pouvant être assimilé à un canal. Puis nous sommes arrivée à un calcul très simplifié d'estimation de débit de nos ouvrages de surface, de la section par la vitesse de 4 m/s du Rapport Ponton que nous avons généralisé, afin que les calculs soient accessibles à tous les élus pour l'aide à la décision des travaux.

Nous avons obtenu un certain gain en milieu urbain, correspondant à - 65 %, mais avec encore 35 % de débordement. Nous avons alors travaillé en hauteur de crues, avec le relevé des traces de laisses, et les possibilités urbanistiques de transit. En encaissant les voiries, nous avons pu démontrer qu'une crue de 2,55 mètres dans une rue pouvait être ramenée à 0,99 mètre à condition que le débit d'amont ne s'accroisse plus par l'urbanisme et soit bloqué au niveau actuel.
Nous avons vu que la hauteur de 0,99 mètre pouvait encore diminuer par les travaux de rétention en zone d'amont sur les parcelles privées et les dessertes publiques jusqu'au bord de faille. Et que ces techniques de lutte en zone II permettraient d'atteindre une hauteur de crue de 0,47 mètre (comme ordre de grandeur) en centre urbain au lieu de 2,55 mètres. Et que, plus haut encore[1], il fallait mettre en oeuvre les techniques de retenues collinaires et les techniques R.T.M. pour assurer des doubles sécurités.

Nous sommes aussi arrivée à la conclusion que les petites parcelles (500 m^2) sont très favorables à la formation du ruissellement, non seulement à cause du pourcentage d'imperméabilisation des sols, mais surtout parce qu'il n'y a pas la place physique de faire de la rétention, ce qui est possible sur une parcelle de 1 250 m^2.
Le cas de Nîmes nous a servi à étayer nos propositions par la richesse des données hydrauliques, des rapports officiels et des nombreux exemples de terrains.

---

[1] En zone III

Il nous semble que nous avons trouvé les réponses sur l'automatisme de la formation de mini-crues suite à l'implantation de nouvelles activités, ou à des modifications de paysage. C'est le cumul de ces mini-crues avec les imprudences d'implantation qui forme la crue pluviale de risque majeur.

Une solution nous semble être l'implication de l'ensemble des services techniques municipaux dans la résolution de ces inondations, et dans la maintenance des travaux réalisés (surveillance annuelle, décennale et centennale).

Notre apport à l'hydraulique

Cette thèse est donc un travail "de surface" pour le risque centennal, complémentaire aux travaux des hydrauliciens, mais sans doute préliminaire aux travaux souterrains d'assainissement.
La définition du partage du risque pourrait être que la crue décennale soit gérée par les ouvrages souterrains et que pour les crues supérieures jusqu'à la crue centennale et plus, on recourt à des aménagements de surface de type protection-rétention, accompagnés de bassins de rétention souterrains pour les agglomérations à très forte densité.
La méthode de travail basée sur l'observation des sites (morphologie et activités humaines), puis sur la simulation du risque centennal "in situ", nous a conduit vers une réorganisation spatiale de l'espace urbain et péri-urbain.
Notre premier objectif a été d'abord de trouver des solutions immédiates, puis de proposer des solutions qui résorbent progressivement le risque de ruissellement, sachant que c'est un travail de longue haleine de reprise de l'aménagement de la parcelle à l'aménagement du territoire.

Il convient de dire que notre travail n'est qu'une étape pour la lutte contre les crues de ruissellement en milieu urbanisé, et qu'il faudra poursuivre les recherches par une modélisation mathématique[1] pour avoir les surfaces exactes concernées par le risque centennal voire millénnal.
Mais notre étude tente aussi d'apporter une approche complémentaire de solutions de lutte multidisciplinaires qui, si elles sont appliquées, pourraient prouver l'utilité réelle de ce travail.

---

[1] Modèle digital de terrain, par exemple, représentant une perspective du site à trois dimensions.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A - PUBLICATIONS RELATIVES AU RUISSELLEMENT RISQUE MAJEUR

[1] "Aménagement et Nature", n°95, Automne 1989, Revue de Beckmann R. "Nîmes, les leçons d'une catastrophe" pp.1 à 24.

[2] BESSON H., "Douce Loire, la crue du 21 septembre 1980 à Brives - Charensac". Imprimerie commerciale de l'éveil de la Haute Loire, 1981, 34 pages.

[3] BLIN P., Direction de l'Eau et de la Prévention des pollutions et des Risques, "Un nouveau Nîmes est-il possible ailleurs, en France", Aménagement et Nature n°95, pp. 8 à 9.

[4] BOURGES M., PEZIN G., LAINE E., CHABROL Y., REVEST G., SAILLET B., CROUSLE T., ARMENGAUD J., VILLEVIELLE A., Rapport du Conseil Général des Ponts et Chaussées sur les crues et Inondations du 22 septembre 1992, dans les départements Vaucluse-Drôme-Ardèche, à la demande de Monsieur BIANCO, Ministre du MELT et de Madame S. ROYAL, Ministre de l'Environnement - 1992, 91 pages.

[5] Revue Chantiers, "Le Canton d'Uri aux prises avec les crues de la Reuss", Confédération Helvétique, n°4, 1989, pp.285 à 296. Institut DITTES, Bâle, 5 pages. (confédération helvétique).

[6] CHOCAT B., INSA, "Urbanisation et Inondation, phénomènes de ruissellement, causes naturelles et facteurs d'aggravation", Aménagement et Nature n°95, pp.13 à 15, 1989.

[7] COLAS G., "La crue torrentielle du Verdarel. 9 Juillet 1981", Bulletin de Liaison LPC, n°150-151, 1987, pp. 78 à 83.

[8] CONCHON O., GAUTHIER A., "Phénomènes naturels exceptionnels en Corse", Bulletin de la Société des Sciences Historiques et Naturelles de la Corse, 1er et 2ème trimestre 1985. Fascicule n°648, pp. 141 à 161.

[9] DELPONT B., "L'éboulement de l'Avellanosa. L'Aiguat". Mémoire d'EI-ENPC, Département des Pyrénées Orientales, Département de l'Equipement, Septembre 1984, 107 pages.

[10] DESBORDES N., DUREPAIRE P., GILLY J.C.L., MASSON J.M., MAURINY, "30 Octobre 1988, Inondations sur Nîmes et sa région. Manifestation, causes et conséquences", Edition C.Lacour, Nîmes, 1989.

[11] DOURLENS C., "La domestication d'une catastrophe", Aménagement et Nature, n°95, pp.10 à 12, 1989.

[12] FABRE G., MACORPS M., "une inondation éclair", Aménagement et Nature, n°95, pp. 1 à 3, 1989.

[13] GILBERT C., ZUANON J.P., "La crise de Nîmes. La force des choses", Aménagement et Nature n°95, pp. 4 à 6, 1989.

[14] GUITON M., "V.R.D. ESPACES VERTS", ouvrage collectif, Editions WEKA - 1992, Chapitre 2 : le cycle de l'eau, 112 pages, la pollution, 56 pages.

[15] HEMAIN J.C., DOURLENS C., Hydrologie Urbaine - Nîmes, S.H.F., Journées Nov.1988.

[16] HEMAIN J.C., DOURLENS C., "A propos des inondations catastrophiques de Nîmes", Revue La Jouille Blanche, n°6, 1989, pp. 421 à 433.

[17] "Inventaire des zones inondables" BCEOM, Ministère de l'Equipement et du Logement, Direction des Ports Maritimes et des Voies Naviguables pour les six grands bassins hydrologiques (Agences Financières de Bassins) 6 tomes avec cartes, 1967.

[18] JENSEN A., Mme LANTHEAUME S., "Le Barrage des Olivettes, Hérault", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées - LCPC, n° 162, Juillet-Août 1989, pp.

[19] Mme JEZ P., "Nîmes, l'indemnisation des sinistres". Aménagement et Nature, n°95, pp. 20-21, 1989.

[20] LALANNE-BER DOUTICQ G., "La crue des 7 et 8 Novembre 1982 sur les Bassins de la Neste", Revue Côteaux de Gascogne, Février 1984, pp.61 à 68.

[21] LARGILLIER J.F., VIGNES J., "Enquêtes sur les ruptures de digues de Décembre 1981 entre Meilhan et Port Sainte-Marie, Vallée de la Garonne", Laboratoire Régional de Bordeaux, CETE Sud-Ouest, Mars 1983, 18 cas, 50 pages

[22] LONGERE et REBOUT, "Evaluation de l'Etat des Digues de protection contre les inondations", Rapport, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Autun - CETE Lyon - Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement - CETE Bordeaux.

[23] MERILLON Y., "Sécheresse 1989. Bilan" Direction de l'Eau et de la Prévention des Pollutions et des Risques) Service de l'Eau, 30 Janvier 1990, 70 pages.

[24] MERLIN M.,"Assainissement des Eaux pluviales", Interprétation de l'Evènement du 3 Octobre 1988, Schéma de restructuration des Cadereaux, Ville de Nîmes Dossier Technique, 15 Décembre 1988, Cabinet d'Etudes - Ingénieurs Conseils - 6,rue Grôlée - 69002 LYON, 20 plans et 2 mémoires.

[25] Météorologie Nationale, "Orages du 22 septembre 1992 sur le Vaucluse", Rapport - 25 septembre 1992, 14 pages.

[26] MEUNIER M. "Rapport du CEMAGREF sur la Catastrophe du Grand Bornand. Crue torrentielle du Borne le 14 Juillet 1987", Internationales Symposium, 1988, GRAZ, V.H.B., pp.101 à 112.

[27] Le Moniteur, "Les risques majeurs et la protection des populations", Prévenir, planifier, protéger, secourir - Editions du Moniteur, 1989, 272 pages.

[28] MODANE, Bulletin Municipal. "Inondations du St Antoine du 24 Août 1987, 30 pages.

[29] MOUGIN M. "Les torrents de Savoie", 1914.

[30] MOUNIS J., MACORPS M. "Rapport de synthèse de la Commission hydraulique, Ville de Nîmes, 15 décembre 1988, 60 pages.

[31] NOYELLE J., Délégation aux Risques Majeurs, "Les enseignements de la Catastrophe de Nîmes", Aménagement et Nature, n°95, p.7.

[32] OMS (Organisation Mondiale de la Santé), Décennie Internationale de la Prévention des Catastrophes Naturelles. 39ème session. Paris 12-16 Septembre 1989. Unesco, point 19.2 de l'ordre du Jour Résolution A/42/169 de l'Assemblée Générale des Nations Unies, Les Années 90 désignées comme Décennie internationale de la prévention des catastrophes, 10 pages.

[33] OSAKA Municipal Government review "Storage and Infiltration measures" n° 12, 1987, pp.1 à 11, revue municipale.

[34] P.E.R. Plan d'Exposition aux Risques Naturels Prévisibles (P.E.R.) Commune de Carros. Direction départementale de l'Equipement des Alpes Maritimes, Rapport de présentation, Plans d'exposition aux risques (sismique, ruissellement inondation, glissement de terrain) règlement, Juin 1986.

[35] "P.E.R.I. du moyen Gardon d'ANDUZE", Plan d'exposition aux risques d'inondation. Direction Départementale de l'Equipement du Gard, Juin 1988, 30 pages.

[36] "Plan d'exposition aux Risques Naturels Prévisibles (P.E.R.) - Département des Alpes-Maritimes - Direction Départementale de l'Equipement (inondations commune de Nice), Novembre 1985, 30 pages.

[37] "P.E.R., la cartographie des Plans d'Expositions au Risque Inondation", Ministère de l'Equipement , du Logement, de l'Aménagement et des Transports" - La Documentation Française, 1988, 115 pages.

[38] "P.E.R. de Saint Bernard du Touvet" Département de l'Isère, 1987 - approuvé - Service Départemental R.T.M. Direction Départementale de l'Agriculture et des Forêts. Rapport de présentation (Plan d'exposition aux risques naturels prévisibles), 80 pages.

[39] PONTON A., DENIEL j., ESTIENNE J., VILLEVIEILLE A., BOSC R., rapport pour le Secrétariat d'Etat chargé de la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs, Mission technique chargée de tirer les enseignements de la catastrophe de Nîmes du 3 Octobre 1988. 69 pages.

[40] Rapport Général d'activité 1986, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - 1986, 134 pages.

[41] de SAINT-SEINE Jacques "Aspects hydrauliques de la crue de l'Ouvèze du 22 septembre 1992" CETE Méditerranée 1993, 25 pages.

[42] SOULIMAN M., ESTIENNE J., FLORENT J., "Rapport de la Mission d'enquête sur la catastrophe du Grand-Bornand survenue le 14 Juillet 1987", Août 1987, 23 pages.

[43] SPECIALE VAPTELLINA 87, Banca popolare di Sondrio n°45, Décembre 1987, 227 pages.

[44] de VANSSAY B. "L'inondation du Vaucluse du 22 septembre 1992" CREDA - Décembre 1992, 50 pages.

[45] VIE LE SAGE. Renaud, "La terre en Otage", Gérer les risques naturels majeurs, Edition du Seuil, 27 rue Jacob Paris VIème, 1989, 246 pages.

[46] Ville de Nîmes, Rapport de synthèse des Travaux de la Commission hydraulique, "Catastrophe du 3 Octobre 1988" Version du 10.01.1988, 52 pages.

[47] Ville de Nîmes, "Nîmes le 3 Octobre 1988", Editions Notre-Dame Nîmes 1989, 108 pages.

B - PUBLICATIONS RELATIVES A LA RECHERCHE SUR LE RUISSELLEMENT

[48] ABELE J., DEGARDIN F., ZUMSTEIN J.F., "Définition statistique du risque d'inondations en Hydrologie" Journées d'Hydrologie de Strasbourg, 16-17-18 Octobre 1986, pp. 175 à 186.

[49] ALFAKIH E. Thèse sur "L'approche Globale pour la conception des technologies alternatives en assainissement pluvial intégrées à l'aménagement", Université Claude BERNARD, LYON 1, 1991, 263 pages.

[50] AMBROISE R., FRAPA P., GIORGIS S., "PAYSAGES DE Terrasses", Edisud - Aix-en-Provence, 1989, 176 pages.

[51] "Les risques Naturels et le facteur humain", Aménagement et Nature, n°91, Automne 1988, pp.1 à 22.

[52] ASHEW A. (O.M.M. Genève) Revue Nature et Ressources, UNVESCO, Volume 27 n° 1 - 1991.

[53] AUZET Véronique, "L'érosion des sols cultivés en France sous l'action du ruissellement", Analyses de géographie n°537, Septembre-Octobre 1987, p.529 à 556.

[54] BARD P.Y., MENEROUD J.P., DURVILLE J.L., MOUROUX P., "Microzonage sismique ; application aux plans d'exposition aux risques (P.E.R.), Bulletin de Liaison LPC n°150-151 1987, pp.130 à 139.

[55] CEMAGREF "Les Bassins vasants expérimentaux de Draix, étude et mesure de l'érosion", Division hydraulique Générale - Aix-en-Provence - Service R.T.M. des Ales de Haute-Provence, Mai 1988, 38 pages.

[56] BOIFFIN J., "La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies", Thèse de Docteur-Ingénieur, INRA, Paris-Grignon, 1984.

[57] BONVALLOT J., "Comportement des Ouvrages de petite hydraulique dans la région de MEDENINE (Tunisie du Sud), Cahier de l'ORSTOM, Ser.Sci.Hum., volume XVI, n°3,1979, p.233 à 249.

[58] BOYER P., LORFEUVRE F., POITEVIN J., DELAVIGNE R., "Le cycle de l'eau dans les P.O.S., IAURIF, 1979, 75 pages.

[59] BRETEVILLE A., "De l'importance du facteur humain dans les risques naturels", Aménagement et Nature n°91, pp.8-9.

[60] "Les Risques Naturels", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°150-151, Juillet-Octobre 1987, 204 pages.

[61] CALVINO A., FOLLACI J.P., "Recherche méthodologique sur l'application de la photographie oblique à l'étude d'un phénomène d'EROSION de versant montagneux", rapport Laboratoire de Nice - CETE Aix-en-Provence - Ministère de l'Urbanisme et du Logement. Ministère des Transports, 1984, 23 pages.

[62] CHEVALLIER C. (INRA, St Laurent-de-la-Prée), MASSON D. (IFREMER, La Tremblade), "Agriculture, conchyculture et circulation des eaux de surface en Charente-Maritime, Revue Aqua revue, n°21, Oct.Nov.1988, pp.27 à 33.

[63] Mme CHEVANNE F. PALISSE J.P., POITEVIN J. BOYER P., DELAVIGNE R., "Des fossés dans la Ville", IAURIF, DDE de Seine et Marne, Février 1983, 67 pages.

[64] CNRS-INRA "Les bocages, histoire, écologie, économie" Colloque du 5,6 et 7 juillet 1976 à l'Université de Rennes. 70 interventions dont A. RUELLAN, C.M. COSANDEY, Ph. MEROT, J. MONTEGUT - 586 pages.

[65] COGEZ C., "Les eaux pluviales urbaines : l'état de crise", Caractéristiques et implications, S.H.F., Décembre 1987, 6 pages.

[66] COGEZ C., "Les P.O.S. et l'assainissement", Intervention au Colloque de Montpellier, L'eau dans la Ville, Janvier 1988, 8 pages.

[67] CONCARET J., "Le drainage agricole, Théorie et pratique", Chambre Régionale d'Agriculture de Bourgogne, 1981, 460 pages.

[68] CONSUEGRA M., "La gestion du ruissellement, calcul pratique des retenues - dimensionnement" Contrôle des crues sur les petits bassins ruraux. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - Institut de Génie Rural, Journées d'étude en Hydrologie de surface du 25 Juin 1987, pp.43 à 54 et pp.99 à 112.

[69] Contrat Etat-Région Rhône-Alpes Xème plan. Programme sur les risques naturels en Montagne, "Crues en rivières, inondations en Vallées", 6 Laboratoires PELDES, CEMAGREF, EDF/DTG, CNRS, IMG, LAMA, LHF, Météorologie, Septembre 1989.

[70] COOKE J.B., DONS T., "Ecoulement d'orage sur un pâturage en Nouvelle-Zélande - Ecoulement de surface, écoulement retardés", Hydrogeological Processes, Grande-Bretagne, 1988, n°2, pp.109 à 149.

[71] LE COURRIER de l'Unesco, "L'érosion maladie de la ture", Janvier 1985.

[72] COURTAUD R.J., "Choix et conceptions de petits barrages pour le Burkina Faso", Bulletin de Liaison du C.I.E.H., n°72, Avril 1988, p.20 à 33.

[73] COUTURIER B. "Géologie des barrages collinaires, geology of Hill Dams", CNARBRL Nîmes, Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, Paris, 1985, n°31, pp.51 à 57.

[74] COSANDEY C., GRIL J.J., JARRY F., MUXART T., NORMAND M., "Contribution à l'étude expérimentale de la Génèse du ruissellement sur sol nu non cultivé" Montagne du Lingas - Sud Cévennes, Journées d'Hydrologie de Strasbourg, Crues et Inondations, 16-17-18 Octobre 1986, pp. 29 à 37.

[75] COSTE C., LOUDET M., "Guide de l'assainissement en milieu urbain et rural", Collection Moniteur Technique, 1980.

[76] "Crues et inondations", Actes du Colloque de Strasbourg, CEREG (Centre d'Etudes et de Recherches Eco-géographiques), Octobre 1986, 363 pages.

[77] DAJOZ R., "Précis d'écologie", Gauthier-Villars, 1983, 549 pages.

[78] DE COOK J.K., FOSTER K.E., "Systems for rainfall and run-off use, Tucson, Arizona", Water resources Bulletin, Décembre 1984, Volume 20,n°6, pp.883 à 888.

[79] CRECY L. R.T.M., "Le risque naturel en montagne, une notion ambiguë", Aménagement et Nature, n°91, pp.10 à 14.

[80] DESBORDES M., "Hydrologie urbaine", Revue Techniques Sciences et Méthodes (T.S.M.) 1984, n°7, pp.381 à 385.

[81] DESBORDES M., "Bilan des études et Recherches sur la pollution du ruissellement pluvial urbain dans les pays de l'Europe de l'Ouest et de l'Amérique du Nord", Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de Montpellier, Secrétariat permanent du Plan Urbain, Paris, Nov.1985.

[82] DESBORDES M. DEUTSCH J.C., FREROT A., revue La Recherche, Numéro spécial L'EAU, Mai 1990, pp.582 à 589.

[83] DESBORDES M., "Principales causes d'aggravation des dommages d'inondations par ruissellement superficiel en milieu urbanisé", Bulletin Hydrologie Urbaine de la SHF, n°4, pp.2 à 10.

[84] DEUTSCH J.C., Memento sur l'évacuation des Eaux pluviales, Ministère de l'Equipement, du Logement, des Transports et de la :Mer, Direction de l'Architecture et de l'Urbanisme, Service Technique de l'Urbanisme (S.T.U.), Documentation française, 1989, 349 pages.

[85] "Drainage agricole", répertoire national des expérimentations, CEMAGREF et Réseau National Expérimentation Démonstration Secteur Hydraulique Agricole (RNEDHA), 1989, 41 pages.

[86] DRUET Y., "Les méthodes de l'étude physico-climatique des bassins-versants orientés vers l'hydrologie appliquée", Ministère de l'Agriculture, 1975, 40 pages.

[87] DUPUY G. KNAEBEL G., "Assainir la ville hier et aujourd'hui", DUNOD, 1982, 416 pages.

[88] DURVILLE J.L., MENEROUD J.P., "Vulnérabilité aux séismes des itinéraires routiers. Mise au point d'une méthodologie d'analyse de vulnérabilité", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°150-151, Juillet-Octobre 1987, pp.185 à 193.

[89] DUVOUX B., GRIL J.J., LILIN C., PAULET B., "Maîtrise de l'érosion des Terres Agricoles en Bavière (R.F.A.)", rapport de mission, 1986, 19 pages.

[90] FAUGERES L., VASARHELYI P., "Aménagement et Risques", (érosion marine à Ault), Aménagement et Nature n°91, pp.17 à 22, 1988.

[91] FISCHESSER B., DINGER F., DUPUIS M.F., "Zones humides, boisements", tome 1, n°512, Ministère de l'Agriculture, Juin 1984, 73 pages.

[92] FLAGEOLLET J.C., Communications du Colloque de Caen, Mars 1984, "Mouvements de Terrains", Série Documents du BRGM n°83, 1984, 670 pages, article de AVIAS J. "sur la méthodologie de Prévision et de Prévention des risques liés aux mouvements de terrain d'origine principalement hydrique", Université des Sciences et Techniques du Languedoc - Géologie - Montpellier, pp.299 à 307.

[93] FOLACCI J.P., "Les mouvements du Versant de la Clapière à Saint Etienne de Tinée - Alpes-Maritimes", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°150-151, Juillet 1987, pp.39 à 54.

[94] "Relance des techniques d'exploitation par câble dans les Pyrenées", Revue Forestière Française, n°6, 1989, pp.513 à 523.

[95] FRANC A., VALADAS B., "Stations Forestières et Paysages: les granites du Massif Central" - cadres morphologiques et aspects anthropiques, Revue Forestière Française, n°4, 1990, pp.403 à 414.

[96] GARNIER C.,"Politique de l'eau, écologie à long terme", Revue "2000" un monde dépollué- la documentation française, 4ème trimestre 1977.

[97] GARRY G., LE MOIGNE M, "Photo-Interprétation et Cartographie des zones inondables", Editions STU. Service Technique de l'Urbanisme, 1985, 79 pages.

[98] GARRY M., "Cartographie des Plans d'exposition au risque inondation". Ministère de l'Equipement, du Logement, de l'Aménagement et des Transports - DRM - STU - Documentation française, 1988, 115 pages.

[99] GAZZANIGA J.L., DURLIAC J.P., "Le droit de l'eau", LITEC - Librairie de la Cour de Cassation, 1987, 150 pages.

[100]"Géomorphologie et Risques naturels", Travaux de l'Institut de Géographie de Reims, n°69-72, 1987, 200 pages.

[101]GREBET P., "Evaporation, mesure et calcul", INRA, Grignon, 1982, 271 pages.

[102]GRIL J.J., LEYNAUD G., "L'érosion des sols", CEMAGREF, BTMEA, groupe d'Antony "Ressources en eaux",n°15-16, mars-avril 1987.

[103]GRIL J.J., LAVABRE J., "Maîtrise du ruissellement et de l'érosion aux USA", Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural des Eaux et Forêts, Groupement d'Antony et Aix-en-Provence, Rapport de mission, Septembre 1987, 34 pages.

[104]GRIOLET C., "Altération du régime hydrologique de sources karstiques à la suite de coupes à blanc étoc", La Tribune du CEBEDEAU, Liège Belgique, n°502, 1985, pp.19 à 30.

[105]GUILLERME A., "Les Temps de l'eau, la cité, l'eau et les techniques", Collection Champ Vallon Diffusion la Découverte, 1983, 264 pages.

[106]GUITON Martine "Ruissellement, sol et végétation dans les travaux d'infrastructure", mémoire de D.E.A. ENPC-UAM - ENGREF, Bibliothèque ENPC, Septembre 1988, 120 pages.

[107]GUITON Martine, Revue "Naturellement" Prévention des risques naturels "A Nîmes, la pluie était hors mesure", n°35, Octobre-Novembre-Décembre 1989, pp.15 et 16.

[108]GUITON Martine, Revue "Naturellement" "Une Station d'Epuration Ecologique à Oppède", n°37.38, Août-Septembre-Octobre 1990, pp.30 à 33.

[109]GUTELMAN M., "L'agriculture itinérante sur brûlis", Revue La Recherche n°216, Décembre 1989, pp.1464 à 1474.

[110]HAGANS D., WEAVER N., MADEJ M., "Long term on-site effects of logging and erosion in the redwood national park", Technical Bulletin NCASI, n°490, mai 1986, pp.38 à 66.

[111]Mc HARG Ian l., "Composer avec la Nature", Cahiers de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Ile de France, n°58-59, 1er semestre 1980, 184 pages.

[112]HARREMOES P., BRUMMER J., "Rainfall as the basis for urban run-off design and analysis", Departement of Sanitary Engineering, Technical University of Denmark. Séminaire à Copenhague, Pergamon Press, 24-26 Août 1983, 368 pages.

[113]HENENSAL P."Météorologie et Terrassements", Rapport de Recherche LPC, n°99, 1981, 170 pages.

[114]HENENSAL P., "L'érosion externe des sols par l'eau", Rapport de Recherche LPC, n°138, 1986, 75 pages.

[115]HENENSAL P., "Le risque d'érosion hydrique des sols", Bulletin de Liaison LPC, n° 150-151, 1987, pp. 117 à 129.

[116]HOFER G., "Contribution à l'Amélioration de la Prévision des crues ... Du Bassin Versant du Gardon d'Anouze", Thèse à l'Université de Paris VI, 1975.

[117]Revue la Houille Blanche, numéro 5/6, 1988, ROCHE P.A. (Prévision des crues), Mme COSANDEY C. (Formation rapide de crue dans un petit bassin versant forestier breton), ANDRIEU H. (hydrologie RADAR).

[118]Revue La Houille Blanche, numéro spécial 7-8 1989, "Les sécheresses", comptes-rendus des Journées de la Société Hydrotechnique de France, 14-15 Juin 1989, 200 pages.

[119]HUBERT G., "L'aménagement des rivières non domaniales en milieu urbain", C.E.R.G.R.E.N.E. - E.N.P.C. I.N.S.A. Lyon, 1988, 19 pages.

[120]HUDSON N., "Soil conservation", Edition Batsford. Academic and Educational, LTd. LONDON, 1981.

[121]HUMBERT J., CLOOTS A.R., MAIRE G., "Crues et inondations" (genèse, méthodes d'étude, impacts et prévention), Actes du Colloque de Strasbourg, 16-18 Octobre 1986 - Université Louis Pasteur - Centre d'études et de Recherches Eco-géographiques, (Unité associée 95 du CNRS) Comité National Français de Géographie - Commission d'Hydrologie Continentale, publié avec le Concours du Conseil Général du Bas-Rhin, Juin 1987, 365 pages.

[122]IMHOFF K.R., "Manuel de l'assainissement urbain", 1970, 5ème édition - Editions Dunod, traduit et commenté par Pierre KOCH.

[123]Instruction technique relative aux réseaux d'assainissement des agglomérations , Commission LORIFERNE - 22 juin 1977 - textes, annexes, abaques - 100 pages.

[124]ISRAELEN C.E. et al., "Erosion control during highway construction", National Coop. Highway Res. Programm - Transportation Research Board, Washington D.C., 1980, 23 pages.

[125]JACOBSEN E., "La régularisation des écoulements de pluie", Le Génie Rural n°1, Janvier 1973, pp. 27 à 31.

[126]JACQ A., "Inondations, une politique de Protection et de Prévention", de l'Environnement, sous-Direction de l'Aménagement des Eaux, Metropolis n°78-79, 1987, pp.18 à 21.

[127]JATON J.F., "Contribution à l'étude des relations pluies-débits dans les petits bassins versants ruraux", Thèse de Docteur ès Sciences Techniques de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, n°453, Département du Génie Rural, 1983.

[128]JATON J.F., "Contrôle des crues sur les petits besoins ruraux", Journées d'étude en Hydrologie de surface, 25 et 26 Juin 1987, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - Institut du Génie Rural (Confédération helvétique), 162 pages.

[129]JOST C., "Aménagement et Torrentialité en montagne tropicale" (RWANDA) CEREG, Centre d'Etudes et de Recherches Eco-géographiques - Strasbourg, Revue de Géomorphologie dynamique n°3, 1989, pp.99 à 120.

[130]LACOMBE R., F.N.S.E.A. "Le paysan, rempart contre le risque naturel", Aménagement et Nature, n°91, pp.2-3.

[131]LAGADEC P., "Risques technologiques majeurs", Metropolis, n°78/79, 1987, pp.11 à 13.

[132]LANDON P., CREATE, "La lutte contre l'érosion dans le bassin - versan", Agence Financière de Bassin Seine-Normandie, Février 1988, 110 pages.

[133]LARGILLIER J.F., TEILHAUD S., VIGNES J., "Etat des digues de Garonne et de Dordogne sur le territoire de la Communauté Urbaine de Bordeaux", Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement, Laboratoire des Ponts et Chaussées de Bordeaux, Juin 1987, 200 pages.

[134]LAWRENCE S.J., WIGINGTON P.J. U.S.A., "Ruissellement en milieu forestier, influence du couvert forestier et de la taille des arbres", Water Resources Bulletin 1987, n°6, pp. 1069 à 1076.

[135]LEMEE G., "Précis d'écologie végétale", MASSON, Paris, 1978, 285 pages.

[136]LEMIEUX P. "Considérations sur l'utilisation d'un modèle de ruissellement urbain pour la gestion des eaux pluviales, revue "Sciences et Techniques de l'eau", Université de Sherbrooke, Québec, Montréal, vol.18 n°2, mai 1985.

[137]LEVILLAIN J.P. "Les risques hydrauliques, inondations (par débordement), érosions, affouillements", Bulletin de Liaison des LPC, n°150-151, pp. 158 à 168.

[138]MARGAT J., TRUCHOT C., "L'eau en France : nature et ressources", Annales des Mines, Juillet-Août 1988, pp.11 à 20.

[139]MASSARDIER J.F. "Petites rivières urbaines, pollution et hydraulique urbaines - L'assainissement à Clermont-Ferrand", Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes CNAM, 1979, 103 pages.

[140]MASSON M., Mme SEGUIER J., "Environnement et Aménagement d'un cours d'eau méditerranéen" Etude de cas "Les Gardons", Ministère de l'Environnement, Direction de la Prévention des Pollutions, Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement Méditerranée - Département Aménagement, Construction, Environnement, 1987, 89 pages.

[141]MASSON M., "Apports de la Cartographie géomorphologique et de la photo-interprétation pour les études de risques d'inondation". CETE Méditerranée, Département Aménagement, Construction, Environnement - Département Chaussées, Ponts, hydraulique, Juin 1988, 47 pages.

[142]MBENGUE I., "Problèmes particuliers des petits barrages en terre en Afrique sahelienne", mémoire de 3ème année. Centre National du Machinisme Agricole, du Génie rural des eaux et des Forêts d'Aix-en-Provence - Division Hydraulique Générale, Juin 1986, 112 pages.

[143]MEDALS M., "Analyse des méthodes de réduction de débit des eaux pluviales en zone urbaine", Thèse, 1984.

[144]MEHER-HOMJL V.M., "Disasters of Deforestation : Disertification or deluge", French Institute P.B.33, Pondicherry, International J.Ecology environnement Sci.n°10 : 37-73, 1984, pp.41 à 73.

[145]MEUNIER M., MURA R., Rapport - Contrat Etat-Région - Erosion Torrentielle - CEMAGREF, Division Protection contre les érosions - Grenoble, mars 1986, programme régional 1986-1988, 19 pages.

[146]MEUNIER M., "Bassins versants expérimentaux de Draix" "Effets des travaux RTM sur les crues torrentielles", CEMAGREF, ONF (délégation nationale aux actions R.T.M.), Février 1988, 28 pages.

[147]MEUNIER M., MATHYS N., "Etude comparative sommaire des débits de crue des zones urbanisées et des bassins versants naturels en montagne", CEMAGREF - Grenoble - Division Protection contre les érosions, Janvier 1989, 15 pages.

[148]MEUNIER M., MURA R., "Estimation de l'effet de l'urbanisation sur les risques torrentiels", CEMAGREF - Division Protection contre les érosions,Contrat Etat-Région - programme 1989-1990,

[149]MIOUZE C., "Analyse des écoulements sur les petits bassins versants ruraux en vue d'amélioration de l'assainissement urbain et péri-urbain". Thèse de Doctorat de Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil, Hydrologie, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 1989, 203 pages et annexes.

[150]MORIZE J., POITEVIN J., DELAVIGNE R., "Analyse des bassins versants des principaux affluents de la Seine dans les Yvelines, en relation avec les objectifs Seine propre" Epuration des eaux usées en Ile de France, IAURIF, Juillet 1984, 84 pages.

[151]NAPOLI R. "Techniche Depurative irrigue" T.D.I., Dipartimento di difesa del suolo, Universita della Calabria, revue Ingegneria Sanataria, 1983, 31, n°3, pp.43 à 52, n°4, pages 36 à 43.

[152]NOYELLE J., DARDENNES C., "Urbanisation, inondation", Délégation aux Risques Majeurs, DEPPR - Documentation Française, 1990, 199 pages.

[153]OBERLIN G., "Modification naturelle ou artificielle des bassins versants - Conséquences hydrologiques et économiques", Journées de la Société Hydrotechnique de France (SHF), 1986, 100 pages.

[154]"Rapport sur le ruissellement urbain, les sources et les mécanismes de pollution, les volumes des écoulements" OCDE, Paris, Monogr. Environ.n°3, 1986, 108 pages.

[155]OLIVRY J.C., "Méthode simplifiée de prédétermination des crues sur petits bassins versants", Cameroun, Journées d'Hydrologie de Strasbourg, "Crues et inondations", 16-17-18 Octobre 1986, pp. 77 à 91.

[156]"OPPÈDE" - Station d'épuration - Canal de Provence - CADILLON M., MATHIEU M. TREMEA L., T.S.M. L'eau Juillet-Août 1989, 84ème année n° 7, 8 - 5 pages.

[157]OZENDA P., "Biogéographie végétale", Editions DOIN, Paris, 1964, 374 pages.

[158]PAULET B., "Quand la pluie emporte nos sols", Revue du Génie Rural, Octobre 1986, pp.9 à 14.

[159]Le Plan Urbain, CAILLE N., DESBORDES, GARNIER, SANNEJOUAND, TRICARD, VIGNOLES, "L'eau dans la ville : le défi de l'innovation", 26-27 Novembre 1987.

[160]POESEN J., "The influence of slope angle on infiltration rate and Hortoni overland flow volume", Z. Geomorph. suppl. Bd 49, 1984, pp.117 à 131.

[161]POILANE J.P., "Les eaux pluviales sur les routes et les autoroutes", Bulletin de Liaison du LCPC, 1988, n°155, pp. 9 à 22.

[162]POITEVIN J., DELAVIGNE R., "Un fleuve propre dans une grande agglomération : la Tamise à Londres" IAURIF, mars 1982, 60 pages.

[163]PONCET A., "Les eaux de ruissellement et la forêt", Revue Regards sur la France, CTGREF, Grenoble, Janvier 1978, pp.311 à 321.

[164]QUESNEL B., "Traité d'hydraulique fluviale appliquée", Tome 1, Pratique des travaux, 1963, 300 pages.

[165]QUINCY D., "Aquaculture et Retenues collinaires", Aqua Revue n°6, Avril-Mai 1986.

[166]RACAULT Y.(CEMAGREF), CHEVALLIER C. (INRA), COLLAS P. (CEMAGREF), "Drainage et qualité des eaux dans les Marais du Littoral Atlantique Français", 14ème Congrès International Commission on Irrigation and drainage de Rio-de-Janeiro 1990,Volume I.A.Question 42, Communication pp.382 à 394.

[167]RAIMBAULT G., "Guide de conception des structures - réservoirs et solutions types", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - Centre de Nantes. Division Eau. Avril 1987, 66 pages.

[168]RAIMBAULT G., BALADES J.D., FAURE-SOULETA, "Quatre expérimentations françaises de chaussée poreuse", Bulletin de Liaison du Laboraotire des Ponts et Chaussées, n°137, Mai-Juin 1985, pp.43-55.

[169]RAIMBAULT G., "Mission en Suède", L.C.P.C., Centre de Nantes, Division Eau, 26-30 Octobre 1987, 24 pages.

[170]LA RECHERCHE, "L'eau", Périodique spécial mensuel n°221, Mai 1990.

[171]RENON G., Prévention des risques technologiques et naturels majeurs, "Une stratégie du risque", Aménagement et Nature, n°91, p.1.

[172]RIOU G. "L'eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux", Confédération helvétique, Masson, Collection géographie, Septembre 1989, 221 pages.

[173]ROUGERIE G., "Géographie de la Biosphère", Paris, Collin, 1988.

[174]SHARMA K.D., VANGANI N.S., CHOUDHARI J.S., "Sediment transport characteristics of the desert streams in India", Basics resources studies Division Central Arid Zone, Research Institute DHPUR (INDIA), Journal of Hydrology 67, 1984, pp.261 à 272.

[175]Site expérimental de Sallèdes. "Comptes-rendus des mesures". Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand, 1981, 49 pages.

[176]SORIAL M. LACHARITE M., "Les projets d'infrastructures Routières et l'érosion des sols", Canada, Gouvernement du Québec, Ministère des Transports, 1989, 247 pages.

[177]SOURCES, Unesco, "Elle coule, l'eau précieuse", Hydrologie et Maîtrise de l'eau, n°13, Mars 1990, pp.3 à 16.

[178]S.T.U.,"Les eaux pluviales en milieu urbain". Synthèse bibliographique. Ministère de l'urbanisme et du Logement, 1982.

[179]S.T.U.,"Memento sur l'évacuation des eaux pluviales urbaines", Documentation française, 1989.

[180]SUNADA KENGO, HUNG TIN FUN, "Effects of slope conditions on direct runoff", Yamanashi University KOFU 400, JAPON, Journal of Hydrology 102, 1988, n°1/4, pp. 323 à 334.

[181]TA THU THUY Mme, MALET M., "Techniques alternatives en assainissement pluvial". Impact sur le milieu social et sur l'environnement. Rapport de synthèse et Etudes de Cas. Plan Urbain, BETURE SETAME, Décembre 1985, 56 pages.

[182]TAZIEFF H. "Etude et prévention des risques naturels majeurs", Rapport au Président de la République, Journal officiel, 1983, 58 pages.

[183]TAZIEFF H., "La désertification, facteurs de risques", Aménagement et Nature, n°91, 1988, pp.4 à 8.

[184]TEILHARD de CHARDIN B., VERON J., INRA, "Maîtrise de l'excès d'eau" protection périphérique des parcelles par captage et fossés de ceinture.Etudes et Recherches Groupe Lorraine, 1984, 28 pages.

[185]TOURBIER J. Toby, WESTMACOTT R., "A Handbook of Measures to Protect Water Resources in land Development" ULI - The urban Land Institute, Washington D.C., 1981 - 178 pages.

[186]TRICART J., "Précis de Géomorphologie", Ed. SEDES, Paris, 1977, 345 pages.

[187]TRICART J., "Géomorphologie applicable", Ed. Masson, Paris, 1978, 204 pages.

[188]UNESCO, "Research on urban Hydrology", A contribution to the international Hydrological Programme, Volume 1,2,3. The Unesco Press, 1978.

[189]VEN TE CHOW, Ph.D., Editor in chief, "Handbook of applied hydrology". The Graw Hill Book Company, New-York, 1964, 1400 pages.

[190]VIE LESAGE R., "La mise en oeuvre des P.E.R." Rapport au Président de la République, Journal officiel, 1985, 45 pages.

[191]VIOLLET-LE-DUC E., "Le massif du Mont-Blanc 1868-1879", Editions Payot-Lausanne, 1988, 159 pages.

[192]VIVIAN R., "Les glaciers sont vivants", Editions Denoël, 1979, 240 pages.

[193]WART W.E. et son équipe, "Conception et fonctionnement des systèmes d'irrigation de surface ou d'irrigation gravitaire", Traduction de P.BERTHOME, 1984, CEMAGREF. Chapitre XIII de "Design and Operation of Farm irrigation systems" (ASAE 1983).

[194]WHITE D., "Utilisation de photographies par satellites pour définir le mode d'occupation des sols et les surfaces inondées" Journal of Water Resources Planning and Management U.S.A., 1988, n°6, pp. 601 à 612.

[195]WISHMEIER W.H., "A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation", Soil Sci. Soc. Amer. Proc.23(3), 1959, pp.246 à 249.

[196]NISHMEIER W.H., SMITH D.D., "Predicting rainfall erosion losses" Agricultural Handbook - 537 - U.S. Departement of Agriculture, 1978.

C - PUBLICATIONS RELATIVES A LA GESTION DU RUISSELLEMENT RISQUE MAJEUR

[198]Carte géologique au 1/50 000°. Bureau de Recherches géologiques et minières BRGM - Service géologique National - Formations superficielles - Coupes de sondages, Notice explicative.

[199]Carte géomorphologique détaillée de la France - Echelle 1/50 000° - Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS - Notice explicative - Carte des pentes, 1976.

[200]Carte départementale des Terres agricoles - Echelle 1/50 000° - Ministère de l'Agriculture - Degré d'engorgement des sols - sols perméables, imperméables, zones inondables, parcelles chainées, parcelles

[201]Mme COGEZ C., "L'assainissement dans la ville", Département de la Seine-Saint-Denis - Service Départemental d'assainissement, 1985, 18 pages.

[202]DELAVIGNE R., POITEVIN J., ANTIER G., GODARD P., MME DEPRET N., "Les grandes eaux de Saint-Cloud, Etude de réhabilitation des étangs de Ville d'Avray et de Villeneuve-la-Marche (Hauts de Seine)" IAURIF, Délégation Régionale à l'Architecture et à l'Environnement, 1982, 52 pages.

[203]Mme FORDHAM M., TUNSTALL S., "The trade-off between flood alleviation and the environment" Middlesex polytechnic, Enfield, G.B., 1990, 15 pages.

[204]GRAU A., HARMS W., "Die dezentrale versickerung von niederschlagsabflüssen" - Techniques de dispersion du ruissellement, Revue GWF Waser Abwasser, n°127, 1986, p.310.

[205]GROENE D., "Action concertée de lutte contre l'érosion des sols agricoles à la Réunion", Centre technique forestier tropical, mission du 20 Juin au 9 Juillet 1988, C.T.F.T., 1989, 30 pages.

[206]"Guide pratique - Inondation", Direction de l'eau et de la Prévention des Pollutions et des risques, Avril 1988.

[207]"Le projet HADES", Le Service Départemental d'Assainissement. Conseil Général de la Seine-Saint-Denis. Les bassins de retenue - Brochure 20 pages.

[208]JATON J.F., "Les petites retenues : moyen de lutte contre les inondations des petits périmètres agricoles" Journées d'Hydrologie de Strasbourg, Octobre 1983, Crues et Inondations, pp. 333 à 341 (confédération helvétique).

[209]JATON J.F., "Effets du règlement 1980-82 de Régulation des lacs en matière hydroagricole", 3 pages, 1987, Service Cantonnal des Améliorations Foncières du Canton de Vaud (confédération helvétique).

[210]KNAEBEL G., LEME M.J., "Les escaliers drainants du Salvador", Les Annales de la Recherche Urbaine n°25, MULT, 1988, pp.61 à 80.

[211]"Risques majeurs, gestion des crises post accidentelles", Metropolis revue, n°78/79, 1987, 101 pages.

[212]Le Moniteur, "Médecins de la Montagne", Le Travail des R.T.M., L.de CRECY, 19.12.1986.

[213]MULT - STU, "La maîtrise du ruissellement des eaux pluviales, quelques solutions pour l'amélioration du cadre de vie", 1982.

[214]OSAKA Municipal GOVERNMENT - Review "Storage and infiltration measures", n° 12, 1987, pp 1 à 11.

[215]"Plans d'expositions aux risques" P.E.R., Mesures de prévention, mouvements de terrain, Ministère de l'Environnement. Direction de l'Eau et de la Prévention des Pollutions et des Risques. Délégation aux Risques Majeurs, La Documentation Française, 1987, 529 pages.

[216]PYTHON J., "Régularisation des lacs et rivières", Service des Eaux et de la Protection de l'Environnement. Lausanne, 1989-90. (confédération helvétique).

[217]"Recommandations pour l'entretien des Berges du Rhône", Service des Forêts et du Paysage, Office des Cours d'eau, Extraits, 3 pages. (confédération helvétique).

[218]Risques Majeurs en Isère, Naturels, Technologies - Brochure éditée par l'Association d'Information pour la Prévention des Risques Majeurs - Messageries Lyonnaises de Presse SAP Grenoble, 1991, 80 pages.

[219]RTM "La Restauration des Terrains en Montagnes dans les Alpes du Sud", Conseil Régional Provence - Alpes - Côte d'Azur, "La protection contre les risques naturels", Brochure du Ministère de l'Agriculture, Service RTM de l'Office National des Forêts, 1989 (brochure annuelle).

[220]Service Technique de l'Urbanisme (S.T.U.) "Contraintes d'assainissement individuel au niveau de la parcelle", Ministère de l'Environnement, Ministère de l'Urbanisme, du Logement et des Transports, Agences Financières de Bassin, 1985, 59 pages.

[221]SUISSE, Directives 1982, "Protection contre les crues des cours d'eau", Office Fédéral de l'économie des eaux. CH 3000 Berne, 78 pages.

[222]TOULOUSE "Service d'Assainissement de la Ville", Direction des Services Techniques, Bilan d'exploitation, 1986, 317 pages, M.VIGNOLES, Ingénieur en Chef.

[223]VARLET H. "Barrages - Réservoirs", Eyrolles, Paris, 1966.

[224]VILLOCEL A., "Aquaculture et irrigation en Gascogne" Revue Les Coteaux de Gascogne, Déc.1985, pp.17 à 25.

D - PUBLICATIONS RELATIVES A LA METEOROLOGIE ET PHOTOGRAPHIE AERIENNE

[225]DE VUYST P., "Météorologie et Prévision du Temps", Eyrolles, 1978, 95 pages.

[226]DORIDOT M., "Apport de la télédétection pour l'analyse des risques hydrauliques", Laboratoire Régional de l'Est Parisien, Ministère de l'Urbanisme, du Logement et des Transports, Mai 1986, 115 pages.

[227]DORIDOT M., GARRY G., "Application de la télédétection à l'évaluation du risque d'inondation", Bulletin de Liaison LPC n°150-151, 1987, pp.169 à 184.

[228]DUPOUYET J.P., "Le radar et la pluie - Application à l'annonce et à la prévision des crues dans les bassins critiques de la Vézère et de la Corrèze", Revue La Houille Blanche, n°5/6, 1983.

[229]ESTIENNE P., GODARD A., "Climatologie", Librairie Armand Colin, Nuages et précipitations, 1988, 365 pages.

[230]GARRY G., DECAILLOT P.H. "la représentation cartographique des risques naturels", Bulletin de Liaison LPC, n°150-151, 1987, pp. 20 à 28.

[231]GERVAIS R., LEDUC R., "La météo en photo", Presses de l'Université de Québec, 1986, 96 pages.

[232]Revue "La Jaune et la Rouge", La Météorologie, Juin-Juillet 1989, n°446.

[233]MONTANT H., "Beau Temps pour la Météorologie Nationale" Magazine Equipement, n°30, Janvier 1990, pp.25 à 32.

[234]"Méthodes de prévision", Que sais-je, n°2157.

[235]RONAN COLIN A., "Le Guide du Ciel", "Découvrir et comprendre le ciel de jour et de nuit", collection SOLAR, 1988, 224 pages.

[236]ROTH G.D., GILLOT-PETRE A., "Guide de la météo", De la Chaux et Niestlé, 1984, 248 pages.

E - PUBLICATIONS RELATIVES A LA POLLUTION ET DEPOLLUTION DU RUISSELLEMENT

[237]BALADES J.D., CATHELAIN M., MARCHANDISE P., PEY BERNARD J., PILLOY J.C., "Pollution chronique des eaux de ruissellement d'autoroutes interurbains", Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, n°140, Nov-Décembre 1985. pp.93 à 100.

[238]CATHELAIN M., MARCHANDISE P., "De la pollution des eaux", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Centre de Nantes, Division Eau, Février 1986, pp.97 à 103.

[239]CEMAGREF, Groupement de Lyon, Division qualité des eaux, pêche et pisciculture, "L'exploitation des lagunages naturels", Documentation technique F.N.D.A.E., n°1, 1985, 68 pages.

[240]CENTRE DE RECHERCHE DE MEZE, "Station de lagunage de Mèze", Syndicat Intercommunal de la station de lagunage, 1982, 10 pages.

[241]Commune d'OPPEDE, "Station de Traitement et de Valorisation des eaux usées", Rapport de synthèse et annexes, Société du Canal de Provence, Mars 1988, 60 pages.

[242]"Contraintes d'assainissement individuel au niveau de la parcelle", Service Technique de l'Urbanisme, Division des Equipements Urbains, Ministère de l'Environnement et Agences Financières de Bassin, 1985, 66 pages.

[243]GARANCHER J., "L'assainissement autonome individuel et collectif", Editions du Moniteur, 1986, 138 pages.

[244]IAURIF "Les pollutions de rivières constatées en Région Parisienne au cours de l'automne 1988", Division Environnement Urbain et Rural, Janvier 1990, 36 pages.

[245]MEXICO, "Impermeabilizacion de Lagunas artificiales", Sociedad mexicana de mecanica de Suelos, 1986, 41 pages.

[246]Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie. Agence de Bassin Loire-Bretagne et Ministère de l'Agriculture. Centre Technique du Génie Rural des Eaux et Forêts. Groupement d'Aix-en-Provence, "Lagunage naturel et lagunage aéré, procédés d'épuration des petites collectivités", 1983, 74 pages.

[247]PONS Y., "Besoins en azote et pratiques agricoles dans les Marais de l'Ouest", INRA de Saint Laurent de la Prée, Intervention Journées de La Rochelle, 21-22 Juin 1990.

[248]RINGUELET R. "Le lagunage naturel", Ministère de l'Environnement, Mission Etangs Littoraux Languedociens, 1985, 88 pages.

F - THÈSES SUR LE RUISSELLEMENT (1993)

[249] GARRY Gérald, "Le risque d'inondation en France - Recherche d'une approche globale du risque d'inondation et sa traduction cartographique dans une perspective de prévention", janvier 1993 - Docteur de l'Université de Paris I, Directeur de thèse Mme Jacqueline BEAUJEU-GARNIER

[250] TORTEROTOT Jean-Philippe, "Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyses des incertitudes, octobre 1993 - Docteur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement, Directeur de thèse M. Pierre-Alain ROCHE.

TABLE DES FIGURES

1- Impact du ruissellement dans le désert de Platé, Alpes..... 9
2- Les différents éléments d'un bassin-versant..... 10
3- L'écrêtement des crues du Rhin,immersion des végétaux, d'après CARBIENER, DILLMANN et DISTER,1986..... 13
CHAPITRE 1
4- Deux méthodes de prévision:Suisse, France..... 20
5- Classification des références bibliographiques par thèmes.. 24
6- Différentes rubriques ayant trait au ruissellement..... 26
7- La part du ruissellement dans le bilan hydrologique hors situation de crise,d'après G.RIOU, 1989..... 28
8- Ruissellement diffus, ruissellement concentré,d'après J.TRICART, 1977..... 30
9- Transcription graphique de divers types de ruissellement, d'après G.RIOU,1989..... 31
10- Schématisation de deux types de drainage naturel,rigoles parallèles, réseaux anastomosés,d'après B.MAXEY,189,1964... 32
11- Types de ravins en milieux de savane humide et savane sèche,d'après G.RIOU, 1989..... 33
12- Représentation schématique d'un ruissellement en nappe, d'après G.RIOU,1989..... 34
13- Surface du sol après une phase de très forte battance, d'après G.RIOU,1989..... 35
14- Enchaînement des processus de l'érosion en nappe,d'après G. RIOU,1989..... 36
15- Pourcentage des bifurcations des confluents et débits de pointe,d'après N.STRAHLER,189, 1964..... 38
16- Répertoire des écoulements d'un bassin-versant hydrologique d'après N.STRAHLER,1964..... 39
17- Impact des surfaces inter-bassins sur le ruissellement, d'après N.STRAHLER,1964..... 39
18- Diversification du réseau hydrographique de différents bassins-versants,d'après N.STRAHLER,1964..... 40
19- Répartition spatiale du drainage naturel,d'après N.STRAHLER,1964..... 41
20- Evolution d'un réseau hydrologique en fonction d'un déboisement et de l'action du ruissellement,N.STRAHLER,1964 42
21- Le cumulo-nimbus..... 44
22- Répartition des précipitations entre le ruissellement, l'évapotranspiration et l'infiltration,d'après R.DAJOZ,1983 46
23- Recherche sur la répartition d'une pluie de mousson en forêt,d'après MEHER-HOMJI,1984..... 48
24- Le cycle de l'évapotranspiration suivant les saisons, d'après G. LEMEE,1978..... 50
25- Le rôle ralentisseur de la végétation,d'après M.GUITON,1986 52
26- Ruissellement en montagne et déprise agricole, d'après M.GUITON,1986..... 52

27- Ecrêtement des crues du Rhin:les polders fluviaux, d'après CARBIENER, DILLMANN et DISTER,1986..... 55
28- Définition des mécanismes de ruissellement sur les terres cultivées,d'après J.J. GRIL, G.LEYNAUD,1987..... 59
29- Terminologie pour l'érosion hydraulique,d'après le Courrier de l'UNESCO,1985..... 60
30- L'érosion des sols cultivés en France,d'après V.AUZET, 1987..... 62
31- L'action du ruissellement,d'après V.AUZET,1987..... 62
32- Apports d'eaux et écoulements annuels en France,d'après J.MARGAT,et C.TRUCHOT,1988..... 64
33- Définition des différents types de pluies,d'après P.HARREMOES,J.BRUMMER,1983..... 66
34- Répartition des coupes à blanc et des reboisements de jeunes plants,d'après C.GRIOLET,1985..... 66
35- Evolution de l'infiltration et du ruissellement entre une parcelle plantée et une parcelle avec coupe à blanc d'après C.GRIOLET,1985..... 67
36- La pollution du ruissellement urbain,d'après M.DESBORDES, J.C. DEUTCH,A.FREROT,1990..... 69
37- Analyse du ruissellement sur un bassin-versant évolutif, d'après P.LEMIEUX,1985..... 70
38- Hyétogramme d'une averse,d'après P.LEMIEUX,1985..... 71
39- Trois hydrogrammes de ruissellement,d'après P.LEMIEUX,1985 73
40- Variation du ruissellement en fonction de l'imperméabili--sation des sols,d'après P.LEMIEUX,1985..... 73
41- Effet d'un bassin de rétention,d'après P.LEMIEUX,1985..... 78
42- Les effets du ruissellement suite à la construction d'une route forestière,d'après D.HAGANS,N.WEAVER,M.MADEJ,1986... 80
43- Effets du ruissellement et travaux correctifs,d'après D.HAGANS,n;weaver,M.MADEJ,1986..... 82
44- Une thèorie au service de l'observation,d'après VIOLLET-LE-DUC,1988..... 84
45- Pluie nette,pluie efficace et capacité d'absorption, d'après J.F.JATON,1983..... 87
46- Bilan hydrologique d'un élément de bassin-versant, d'après J.F. JATON,1983..... 89
47- Les sites de simulation de pluie: Massif de Lingas, Cévennes,d'après C.COSANDEY,J.J. GRIL,F.JARRY,T.MUXART et M.NORMAND,1986..... 91
48- Augmentation du cefficient de ruissellement,idem..... 92
49- Variabilité du coefficient de ruissellement,idem..... 92
50- Tableau des différents modèles,d'après M.CONSUEGRA,1987... 94
51- Définition des modèles de base,d'après J.F.JATON,1987..... 95
52- Différentes sections de terrasses en terres ou banquettes aux U.S.A.,d'après J.J.GRIL,J.LAVABRE,1987..... 98
53- Correction de ravine permanente par endiguement,d'après J.J.GRIL et J.LAVABRE,1987..... 98
54- Coefficient de ruissellement sur terrasses,idem.....100
55- Les techniques de diversion à l'amont,d'après HOWARD et W.LULL,1964.....100

56- Aménagements de diversions et chenaux enherbés,d'après J.J.GRIL, J.LAVABRE,1987..... 102
57- Mise en place de bandes de cultures intercalaires anti-ruissellement et anti-érosion,d'après B.DUVOUX,J.J.GRIL, C.LILIN, et B.PAULET,1986..... 105
58- Rétention du ruissellement d'amont,d'après B.TEILHARD de CHARDIN,J.VERON,1984..... 106
59- Avaloirs,idem..... 106
60- Méthode agricole pour l'estimation du diamètre d'un collecteur,d'après B.TEILHARD de CHARDIN,J.VERON,1984.... 109
61- Mise en charge d'un collecteur perforé pour protéger le réseau,d'après B.TEILHARD de CHARDIN,J.VERON,1984..... 109
62- Ruissellement direct et écoulement piégé,d'après R.NAPOLI,1983..... 110
63- Ruissellement et infiltration,d'après R.NAPOLI,1983..... 110
64- Coefficient de ruissellement,d'après MBENGUE,1988..... 112
65- Barrage voile en béton armé,d'après R.J.COURTAUD,1988.... 113
66- Barrage en gabions,d'après R.J. COURTAUD,1988..... 113
67- Barrage en terre armée avec géotextile,d'après R.J. COURTAUD,1988..... 114
68- Barrage en terre armée avec parement,d'après R.J. COURTAUD,1988..... 114
69- Barrage en enrochement,d'après R.J.COURTAUD,1988..... 115
70- Barrage en terre,d'après R.J.COURTAUD,1988..... 115
71- Ouvrages de petite hydraulique en Tunisie du sud, d'après J.BONVALLOT,1979..... 116
72- Profil d'une digue ancienne,d'après J.BONVALLOT,1979..... 116
73- Onde de crue,problème,d'après J.BONVALLOT,1979..... 118
74- La pluri-fonction des barrages,d'après C.GOTTSCHALK,1964 118
75- Principes de retenues collinaires,d'après D.QUINCY,1986.. 121
76- Carte indicative des hauteurs d'eau,P.E.R.,d'après le Ministère de l'Equipement,1988..... 128
77- Carte indicative des vitesses,P.E.R.,d'après le Ministère de l'Equipement, 1988..... 131
78- Carte d'aléa,P.E.R.,d'après le Ministère de l'Equipement 132
CHAPITRE 2
79- Carte des risques du Ministère de l'Environnement..... 136
80- Plan du camping du Grand-Bornand,d'après M.MEUNIER,1987.. 140
81- Les remontées mécaniques de sports d'hiver du Grand-Bornand,d'après carte I.G.N..... 142
82- Nîmes,contexte naturel et urbanisation,d'après la ville de Nîmes,1989..... 144
83- Répercussions des coupures E.D.F. sur les autres activités..... 146
84- Catastrophe de Paris;estimation de la période de retour 1990..... 148
85- Inondation de la voie express à Paris,coupe..... 152
86- Positionnement des bassins de rétention étudiés en Seine-Saint-Denis,d'après le Service Départemental de l'Assainissement..... 152

87- B.M.S. de la catastrophe de Paris,1990..... 154
88- Plan de Vaison-La-Romaine,zone d'inondation pluviale, catastrophe de 1992..... 156
89- Courbes des isohyètes,d'après J.de SAINT-SEINE,1993..... 158
90- Lit majeur de l'Ouvèze,photo..... 160
91- Lotissement Thèos,photo..... 160
92- La zone inondable des écoles à Vaison-La-Romaine..... 160
93- Impact d'un ruissellement d'un bassin-versant très éloigné sur Brives-Charensac..... 162
94- Déplacement des pluies cévenoles,d'après le concours pour la Fondation de France de Brives-Charensac,1989..... 164
95- Brives-Charensac,limite de la crue centennale et urbanisation..... 164
96- Inondation pluviale de Carros-Gattières,avec les endiguements pris à revers..... 166
97- Récapitulatif de grandes catastrophes et effet retard.... 168
98- Liaisons météorologiques France-Suisse-Angleterre,d'après la Météorologie Nationale,Station de Trappes,1989..... 174
99- Refuge sur toiture,photo..... 180
100- Ripisylve du camping de Vaison-La-Romaine,pas de dégâts sur la végétation, photo 1993..... 180
101- Université de Grenoble,disparition des "conditions spéciales"..... 182
102- Des propositions de corrections pour Grenoble..... 182
103- La rivière le Paillon et le lycée d'Etat,Nice..... 184
104- Catastrophe prévisible à Clermont-Ferrand..... 186
105- Lanslebourg, ruissellement et urbanisation.....190
106- Le ravin de Lanslebourg.....190
107- Morlaix et risque majeur de ruissellement..... 192
CHAPITRE 3
108- Retenue d'un ruissellement centennal dans un maillage de bocage,d'après M.NICKL,1987..... 214
109- Coupe sur un bassin de rétention agricole multifonctionnel,idem..... 214
110- Schéma d'une ville en situation de risque..... 217
111- Nîmes et le drainage des anciens marais..... 217
112- Construction de routes dans les lits des rivières..... 219
113- Implantation de maisons dans les mini-talwegs..... 219
114- Définition des zones de talweg..... 221
115- Les zones sensibles au ruissellement,les ruptures de pente221
116- Ilôts-refuges à risques..... 223
117- La rectification à risque d'un tracé naturel de rivière.. 223
118- Clermont-Ferrand,évolution du parcellaire 1930-1990..... 225
119- Idem, un urbanisme à risque hydrologique..... 225
120- Plan de débits par les hydrauliciens,Nîmes..... 227
121- Les constructions en lit majeur,Vaison-la-Romaine..... 228
122- Photo du même site..... 228
123- Construction à cheval sur lit mineur, l'OPAC de Clermont-Ferrand..... 229

124- Clermont-Ferrand,l'autre façade de l'OPAC,côté sortie..... 229
125- Idem, plan 229
126a Gabarit aérien de la rivière d'Alès,Nîmes 231
126b Plan d'assainissement,même secteur,Nîmes 232
127- Gabarit ancien de la rivière d'Alès,Nîmes..... 231
128- Gabarit moderne,entonnement de la rivière d'Alès..... 231
129- Obstruction des arches de la SNCF,Nîmes 232
130- Libération de quelques arches après 1988 232
131a Aggravation du risque hydrologique par remblaiement d'un lit majeur 233
131b Les risques des endiguements latéraux 233
132- La vulnérabilité des matériaux de construction,Vaison..... 234
133- Idem pour Vaison-la-Romaine..... 234
134- Emplacement vulnérable,Nîmes.....234
135- Emplacement vulnérable,Rennes-les-Bains..... 234
136- Importance de l'orientation d'une construction face à un écoulement,l'Artière,Clermont-Ferrand..... 235
137- Plan,idem 235
138- Vulnérabilité des constructions sans étages,sans raidisseurs ni chaînage 235
139- L'inaccessibilité des toitures,Vaison-la-Romaine..... 237
140- Idem,Nîmes..... 237
141- Vulnérabilité des ouvrages souterrains,Paris..... 237
142- Chenalisation des rivières urbaines ramenées au lit mineur,Aubrière,Clermont-Ferrand 239
143- Vulnérabilité des parkings donnant sur lit mineur,idem.... 239
144- Problème des soupiraux et vulnérabilité des caves,Nîmes... 239
145- Destructions des précautions hydrologiques d'origine..... 241
146- Effet aggravant:modification d'un bassin de rétention lotissement du "Château d'eau",Seine-Saint-Denis..... 243
147- Ouvrage clandestin pour empêcher le fonctionnement hydaulique du bassin, même lieu..... 243
148- Fragilité du réseau filiaire..... 243
150- La vulnérabilité du mobilier urbain,Nîmes..... 245
151- Idem ,une heure après..... 245
152a Croquis d'observation in situ,Vaison-la-Romaine..... 247
152b L'aggravation du danger liée à l'oubli du risque,idem..... 247
153- L'aggravation du risque liée au mode de vie..... 248
154- L'après-Nîmes,création de la Ville Active, crue décennale. 249
155- Idem, coupe..... 249
156- Le Jardin-Canal: contre-proposition d'aménagement..... 249
157- Les buttes-carrefours de Nîmes..... 251
158- Les bassins-carrefours de Nîmes..... 251
159- Le ruissellement naturel en fonction des courbes de niveaux..... 253
160- Le réseau de dessertes à Nîmes..... 253
161- Modification progressive des revêtements des voies,Nîmes.. 253

162- Les rues en forte pente..... 255
163- Aggravation du ruissellement par l'élargissement des voies..... 257
164- Les insuffisances d'accueil des eaux pluviales..... 257
165- Les infrastructures publiques dans les lits des rivières 257
166a Plan de situation des photos du cadereau d'Alès..... 259
166b Plan de situation des photos du cadereau d'Uzès,Nîmes....263
167- Nîmes, les écoulements préférentiels 267
168- Le dossier des sinistres,Nîmes..... 267
169- La violence des événements:le charriage des véhicules... 269
170- Les voitures dérivantes..... 269
171- Les phénomènes d'embâcles par les voitures.....269
172- La force du courant.....271
173- Mortes-eaux dans les rues transversales..... 271
174- Un barrage de voitures..... 271
175- Le résultat de la crue,Nîmes..... 271
176- Les détériorations des chaussées..... 273
177- Enchaînements des processus de l'érosion en nappe..... 274
178- Le Grand-Bornand..... 273
179- Utilité de la végétation urbaine,Nîmes..... 273
180- Rejet du ruissellement privé sur la voie publique route d'Uzès,Nîmes..... 275
181- Idem,route de Sauve,Nîmes..... 275
182- L'apport du parcellaire privé au ruissellement urbain et contre-proposition d'aménagement à la parcelle..... 275
183- Vaison-la-Romaine,d'où est venue l'eau de la crue de ruissellement?..... 277
184- Analyse de site,Vaison-la-Romaine..... 277
185- Analyse de paysage, croquis, Vaison-la-Romaine..... 279
186- Analyse de détail du paysage,idem..... 279
187- Les vignobles peri-urbains de Vaison:propositions..... 281
188- Propositions de techniques de lutte pour les vignobles...281
189- Evolution probable de la population mondiale..... 285
190- Evolution de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère.. 285
191- Evolution de la température moyenne de la terre..... 286
192- Evolution du niveau moyen des océans..... 286
193- Les "éléments-refuges" improvisés..... 287
194- Occupation actuelle de l'espace, planification hydrologique, Canton de Vaud (C.H.)..... 291
195- Les prévisions de remembrement..... 291
196- Conclusions,plans directeurs informatisés,EPFL(C.H.).... 291
197- Projet d'aménagement d'une petite rivière urbaine avec simulation de crues de 100 ans,(C.H.)..... 293
198- Idem,débit de projet 100 ans avec retenues..... 293
199- Idem, Scénario ancienne rivière,la Maladaire..... 293
200- Idem, scénario avec petits bassins..... 293
201- Défenses hydrologiques centennales d'amont,infrastructure295
202- Autoroute avec piles pour le ruissellement de 1000 ans Canton de Vaud (C.H.).....295
203- Tableau des objectifs de protection (C.H.)..... 295
204- Autoroutes sur pilotis ou remblais et impact du ruissellement..... 295

205- Bassin d'orage de l'autoroute d'Orbe (C.H.) et les trois bassins inspirés des théories du lagunage de Mèze(France) 297
206- Rétention du ruissellement agricole,Canton de Vaud(C.H.). 299
207- Le compartimentage de la zone peri-urbaine de Nîmes..... 299
208- Détail d'un mur filtrant,Nîmes..... 299
209- Photographie aérienne de Nîmes,murs de pierres sèches.... 300
210- Carte IGN 1/25.000°, les murs de pierres sèches..... 300
211- Les secteurs à l'amont de Nîmes,les différentes garrigues 301
212- Le bassin de rétention enherbé de la Fosse Maussoin(94).. 303
213- Le bassin du Château d'eau..... 303
214- Le bassin planté de Mousseaux(94)..... 303
215- Le bassin de rétention en eau de Sévigné(94)..... 303
216- Le bassin de rétention du Loup(bassin sec)(94)..... 304
217- Le bassin Maurice Audin (94)..... 304
218- Le bassin de rétention de Savigny,plan d'eau(94)..... 304
219- Le bassin de rétention du Blanc-Mesnil,bassin sec..... 304
220- Description et fonctionnement de dix bassins de rétention pendant la crue du 27 juin 1990 (94)..... 305
221- Plan de situation des murs-parapets de Nîmes..... 307
222- Mur détruit pendant la crue du 3 octobre 1988,Nîmes..... 307
223- Mur-parapet ancien avec soutènement,Nîmes..... 307
224- Etude des parcelles du Chemin Vieux de Sauve,Nîmes..... 309
225- Idem,plan..... 309
226- Variation des hauteurs de protection des murs-parapets... 310
227- Ouvrage de croisement entre rivière et route,Nîmes..... 310
228- Mur ancien et mur moderne,Nîmes..... 310
229- Le comportement des arbres urbains pendant la crue,Vaison 311
230- Les peupliers-refuges de la ripisylve à Vaison..... 311
231- Les platanes-refuges à Nîmes..... 313
233- Traces de la crue de ruissellement sur les murs de clôture315
234- Traces de la crue fluviale à Vaison sur les bâtiments.... 315
235- Traces de la crue de ruissellement à l'aval de Nîmes..... 315
236- Trace de la crue de ruissellement sur la végétation,Vaison317
237- Trace de la crue de la rivière sur la végétation..... 317
238- Zone de Non Aedificandi..... 319
239- Surélévation du Non Altius Tollendi pour le risque hydrologique..... 319
240- Aggravation du risque par le rejet des gouttières..... 321
241- Idem,Nîmes,zone peri-urbaine..... 321
242- Rejet des gouttières privées en Centre-Ville..... 321
243- Rejet des gouttières privées en Centre-Ville,Nîmes..... 321
244- Schéma de reprises des gouttières,et stockage à la parcelle..... 321
245- Rétention à la toiture sur collectifs..... 323
246- Rétention à la toiture sur descentes existantes(USA)..... 323
247- Rétention centennale à la toiture-terrasse réservoir..... 323
248- Détail d'acrotère..... 323
249- Les cours-réservoirs et cours d'immeubles..... 325
250- Idem,Paris..... 325
251- Proposition de rénovation des cours en fonction du risque hydrologique majeur..... 325
252- Création de cave-réservoir..... 325

253- Emmarchements de jardin de protection,Nîmes..... 327
254- Idem,Nîmes..... 327
255- Coupe sur le jardin 254,protection de 3,75m..... 327
256- Habitation à risque,cadereau d'Uzès recouvert,Nîmes..... 327
257- Proposition de défense: reconstruction du mur de clôture 327
258a Des protections groupées en paine,Nîmes..... 328
258b Détail des protections,Mas Fléchier,Nîmes..... 328
259a Emmarchements saillants de 3 marches,protection de 0,45m 329
260- Perron droit ,Nîmes,protection de 2,10m..... 329
261- Escalier extérieur,une volée ,Aubrière,Clermont-Ferrand. 329
262- Perron d'une demi-volée,Royat,Clermont-Ferrand..... 329
263- Plan de différents perrons..... 329
264- Construction sur pilotis,Nîmes..... 331
265- Proposition de lotissement sur pilotis en plaine..... 331
266- Fermeture de portail de jardin avec palplanches,plan.... 331
267- Idem, photo,Nîmes..... 331
268- Proposition de protections temporaires sur porte d'entrée331
269- Les contraintes du risque hydrologique sur les constructions en lit majeur..... 333
270- Travaux de reprises sur les habitations existantes..... 335
271- La vulnérabilité des devantures tout vitrage..... 335
272- Adaptation des devantures au risque pluvial à chaque nouveau permis de rénovation délivré..... 335
273- Principe de l'évacuation du ruissellement de la parcelle en 1985..... 337
274- Limitation par tous les moyens du ruissellement privé... 337
275- La fonction des jardins dans la rétention centennale le boulingrin encaissé ou surhaussé..... 339
276- Le muret de jardin:ouvrage hydrologique de rétention.... 339
277- Ecrêtement de la crue centennale par les murets et murs. 339
278- Adaptation d'un muret existant à une fonction de rétention..... 339
279- Rétention avec merlons dans un jardin existant..... 339
280- La contrainte des végétaux existants dans la rétention.. 339
281- Influence de la pente pour la rétention..... 341
282- La décomposition des surfaces d'une parcelle: organigramme..... 341
283- Utilisation des surfaces privées imperméables comme zone de submersion..... 341
284- Structures-réservoirs dans les jardins..... 341
285- Clôture en grillage avec muret de soubassement..... 341
286- Adaptation de murs anciens à la rétention..... 341
287- Mur de clôture surélevé après la crue,Vaison..... 341
288- Aggravation du risque par le ruissellement des accès privés des collectifs..... 343
289- Application de rétention centennale à la parcelle..... 343
290- Nouvelles infrastructures à pente et ruissellement..... 343
291- Idem,croquis du lieu,Nîmes..... 343
292- Application pour une pluie de 400mm en 6 heures..... 343

293- Le regroupement de différentes techniques de lutte
au niveau de la parcelle : le jardin-réservoir..... 345
294- Le fossé agricole en "V" en plaine inondable,Nîmes..... 345
295- Le cadereau d'Alès à l'aval de Nîmes et les plantes
aquatiques de dépollution..... 345
296- Défense passive ,fossé plat et merlon de protection,Nîmes348
297- Idem,ponceau d'accès..... 348
298- Coupe sur le dispositif de lutte..... 348
299- Les refuges urbains hydrologiques dans le mobilier urbain348
300- Les refuges hydrologiques dans les arbres d'alignement.. 348
301- Bassin de rétention sec et parc urbain : le parc-réservoir
d'Osaka (Japon)..... 349
302- Idem,coupe..... 349
303- Bassin de rétention paysager de Melun-Senart..... 351
304- Bassin de rétention architecturé,Melun-Senart..... 351
305- Coupe sur le bassin 303..... 351
306- Possibilité d'adaptation théorique d'un canal
peri-urbain à Nîmes, en zone aval..... 353
307- Canal péri-urbain réalisé à Vienne (Autriche)
plan de situation, coupe de détail, vu d'ensemble..... 354
308- Retenues collinaires à Westmere,Cambridge(G.B.)..... 355
309- La fonction de dépollution de bassins de
rétention paysagers..... 357
310- Ouvrage maçonné de laminage de crue ,service R.T.M..... 359
311- Ouvrage en terre renforcée de nappes géotextiles..... 359
312- Ouvrage de laminage avec écailles en béton armé..... 359
313- Stabilisation des pentes par le reboisement(C.H.)..... 359
314- Plantation des ravins ou dépôt d'arbre entier
comme ouvrage de laminage (C.H.)..... 360
315- Les banquettes et terrasses de cultures..... 361
316- Profils types de banquettes..... 361
317- Effets d'un rebocagement sur le ruissellement..... 363
318- Effet d'un rebocagement permettant la gestion
du ruissellement..... 363
319- Etat des lieux d'un camping municipal type..... 365
320- Propositions,endiguements perpendiculaires pour la fuite 365
321- Les propositions à court terme pour la voirie publique.. 369
322- Les voies-refuges, les voies de stockage..... 369
323- Signalisation routière..... 369
324- Cas d'application , Nîmes,refonte de la circulation
et du stationnement..... 371
325- Idem, le cadereau d'Uzès intra-muros..... 372
326- Réaménagement du boulevard Jean Jaurès,Nîmes..... 373
Balustrades urbaines de retenue de voitures..... 374
327- Réaménagement de parkings publics existants,
à faible pente et sur 2 pentes..... 375
328- Simulation de l'ennoiement du parking cas n°1... 376
329- Réaménagement de parkings publics existants ,cas n°2.... 377
Simulation de l'ennoiement..... 378

330- Réaménagement de parkings publics existants,cas n°3..... 379
331- Réaménagement de parkings publics existants,cas n°4..... 381
332- La rue-canal, domaine des infrastructures..... 383
333- La maîtrise du ruissellement à New-Delhi..... 385
334- New-Delhi, maîtrise des pluies de moussons par les voies 387
335- Encaissement d'une voie peri-urbaine, Dacca,Bangladesh.. 389
336- Encaissement d'une voie urbaine, idem..... 389
337- Les protections des hauts-côtés, idem..... 389
338- Rosny-sous-Bois,les parkings du centre commercial..... 391
339- Nîmes, le canal urbain du quai de la Fontaine..... 391
340- Paris, les voies encaissées pour non-stationnement..... 391
341- Paris, les voies encaissées,quai de la Tournelle..... 392
342- Le risque hydrologique,construction d'une rue-canal
sur large artère,Bl. Jean Jaurès,Nîmes..... 393
343- Aménagements d'une rue-canal,emmarchements et gradins... 395
344- Solution maximale,décaissement de la voie
et des trottoirs..... 399
345- Les choix entre les différentes protections..... 401
346- Quartier Richelieu-Nîmes,le taux des sinistres..... 405
347- La rue-canal sur voie étroite..... 407
348- La rue-canal avec parapets..... 409
349- Principe de la place urbaine décaissée..... 411
350- Différentes possibilités d'aménagements hydrologiques
de voies..... 413
351- La voie de délestage hydrologique..... 415
352- La voie préservée..... 417
353- Les canaux de dérivation..... 419
354- Les voies de dérivation,canal et infrastructure..... 421
355- Idem, les canaux en eaux, détails..... 423
356- Catastrophe de Nîmes,détérioration des chaussées..... 425
357- Nîmes, entonnement du cadereau d'Alès..... 425
358- Petits ouvrages hydrologiques,Canton de Vaud(C.H.)..... 425
359- Elimination de la chaussée souple pour le risque
hydrologique..... 427
360- Recommandation du pavage autobloquant..... 427
361- Mode de pose d'un pavage autobloquant..... 429
362- Circulation,classes de trafic..... 429
363- Différents types de pavés autobloquants,blocage
sur 2 faces..... 431
364- Idem, blocage sur 4 faces..... 431
365- Pavage autobloquant et calpinage..... 431
366- Utilisation de la chaussée bétonnée pour le
risque hydrologique..... 433
367- Chaussée bétonnée,structure et ferraillage.....433
368- Schéma de fonctionnement d'une structure-réservoir..... 435
369- Rétention sous chaussée en pente..... 435
370- Structure-réservoir sous parkings,avec zone
d'immersion..... 437
371- Structure-réservoir à structure artificielle..... 437

372- Structure-réservoir à structure naturelle (Suède)..... 439
373- Avaloir de sécurité, bouche d'engouffrement..... 439
374- L'encombrement du sous-sol des trottoirs..... 441
375- Mise en place d'une structure-réservoir..... 441
376- Les tranchées d'engouffrement sur chaussées..... 443
377- La protection des arbres d'alignement existants..... 443
378- Rétention sous chaussée, risque de pollution et rabattement de nappe phréatique..... 443
379- Rétention et dépollution sous chaussée..... 445
380- Pollution chronique urbaine..... 445
381- Démarche pour contrôler le risque de ruissellement..... 447
382- Les hauteurs de la crue à Nîmes du 3.10.1988..... 449
383- Les gains de débits avec des aménagements urbains hydrologiques..... 451
384- Schéma récapitulatif des différents aménagements en Centre-Ville de Nîmes,ancien cadereau d'Alès..... 449
385- Gain d'inondabilité à Nîmes,avenue-canal G.Pompidou..... 452
386- Gain d'inondabilité à Nîmes,boulevard-canal J.Jaurès.... 453
387- Recherche de rétention sur un ilôt R+1 urbain..... 453
388- Recherche de rétention sur un ilôt R+6 urbain..... 454
389- Utilisation d'éléments ponctuels urbains de stockage pour la crue centennale..... 455
390- Résultats des simulations de crues centennales sur des ouvrages de rétention urbaine..... 457
391- Recherche de diminution du ruissellement par des techniques groupées de stockage en milieu urbain..... 458
392a Etude de cas,ancien parcellaire de zone pavillonnaire... 459
392b Idem,les moyens de stockage..... 459
393a Etude de cas d'un nouveau lotissement..... 461
393b Idem, les moyens de stockage..... 461
394- Disposition de l'espace d'amont d'une ville..... 463
395- La rétention communale d'amont..... 463
396- Cas d'application pour les voies publiques..... 465
397- Pourcentage de stockage possible en zone peri-urbaine II 465
398- Possibilités de cumul des capacités de stockage et d'écoulement pour la zone I et la zone II..... 467
399- Prévisions de gain d'inondabilité,comme ordre de grandeur,après les travaux urbains en zone I et les travaux de rétention en zone II 467