

Journées bilan X° Plan / Phase I / 1989-1992  
Lyon / 3-4 février 1994.

**THEME CRUES EN RIVIERE.  
PROJET CR 34 : INONDABILITE**

**DE NOUVEAUX CONCEPTS ET DES OUTILS  
POUR GERER RATIONNELLEMENT  
L'OCCUPATION DES SOLS EN LIT  
MAJEUR.**

**O. GILARD, P. GIVONE, G. OBERLIN, B. CHASTAN  
CEMAGREF LYON, DIVISION HYDROLOGIE - HYDRAULIQUE.**

**RESUME.**

L'aménagement des bassins versants se doit de prendre en compte le plus objectivement possible le risque d'inondation. Pour ce faire la méthode INONDABILITE propose un procédé original de quantification objective du risque par une confrontation entre la mesure de la vulnérabilité de chaque parcelle et de son aléa d'inondation. Des outils hydrologiques et hydrauliques sont développés à cette fin. Une restitution cartographique des résultats permet un affichage clair et lisible, destiné aux aménageurs comme aux riverains. Le tout apporte des éléments objectifs aux indispensables négociations inter-collectivités.

**ABSTRACT.**

The flood plain management must deal with the flood risk. So the INONDABILITE method allows the objective measurement of this risk by fitting land vulnerability to flood hazard, both of them measured in the same unit. Hydrological and hydraulic models have been developed for that. Synthetic maps of the results in a suitable way make them understandable by the managers as well as the inhabitants. The objective elements furnished by this method facilitate the essential negotiations between local communities.

## 1. INTRODUCTION.

La pression foncière sur les fonds de vallées a toujours été forte dans la mesure où ces zones sont généralement facilement accessibles et aménageables. Cependant, le risque d'inondation lié au débordement des cours d'eau y est beaucoup plus difficile à gérer et les déconvenues (voire les catastrophes) en cas de crue forte (mais pas toujours exceptionnelle) sont nombreuses.

Pour mieux prendre en compte cette contrainte lors de l'aménagement du territoire, le CEMAGREF a développé de nouveaux concepts qui permettent une description synthétique du fonctionnement hydrologique et hydraulique des bassins versants et une traduction de la demande sociale de protection en une variable consistante et signifiante pour l'hydrologie. Intégrés dans le modèle INONDABILITE, ces concepts et ces méthodes ont pour objectif d'établir des cartes synthétiques du risque d'inondation qui sont des outils précieux pour les aménageurs autant que pour les riverains.

## 2. DEFINITIONS PREALABLES.

Pour être capable de gérer une situation de **risque**, il est nécessaire de la définir précisément au préalable. Nous considérons donc qu'une situation de risque est liée à **deux facteurs indépendants** que sont la **vulnérabilité**, dépendant exclusivement de l'occupation du sol, et l'**aléa**, associé à la probabilité d'occurrence d'une inondation.

On conçoit que la vulnérabilité d'une parcelle est indépendante de l'occurrence de l'inondation : seul compte le type d'occupation du sol et éventuellement le contexte local ; dans certaines zones, on est accoutumé à subir des inondations et leurs conséquences sont minimisées par des dispositions constructives spécifiques par exemple, ou par une occupation du sol ad hoc. De même, l'aléa, défini à partir des probabilités d'occurrence d'une inondation, est lié aux fonctionnements hydrologique du bassin versant et hydraulique de la rivière, sous certaines contraintes parfois liées aux aménagements existants.

La mesure du risque sera donc le résultat du croisement de l'information concernant la vulnérabilité et de l'information concernant l'aléa d'inondation.

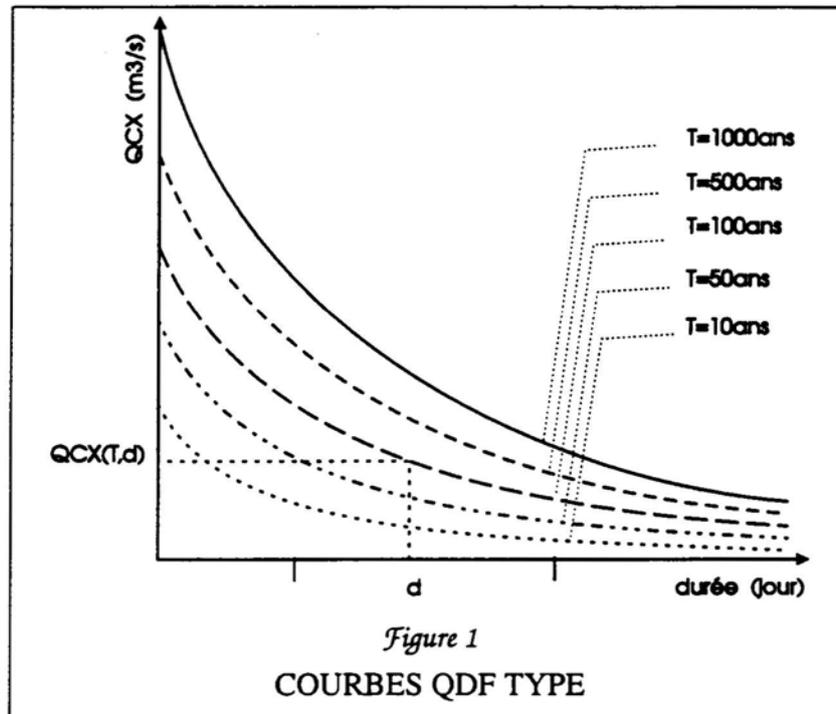
## 3. OUTILS THEORIQUES.

Pour analyser objectivement la vulnérabilité et l'aléa, il est nécessaire de décrire le plus précisément possible le fonctionnement du cours d'eau. Pour cela on doit faire appel aux sciences de l'hydrologie, de l'hydraulique et de la cartographie.

### 3.1. Hydrologie.

Le régime hydrologique du bassin versant est décrit par des courbes Débit-durée-Fréquence (QdF) normalisées sous forme de modèles transférables, dont on trouvera un exemple type sur la figure 1. Ces modèles, qui sont établis à la suite d'une analyse statistique détaillée des données hydrologiques disponibles (observations ou simulations validées),

permettent une description synthétique du fonctionnement hydrologique du bassin versant pour toute durée et pour toute période de retour (de 0 à 30 jours et de 0.1 à 1 000 ans).



Ces modèles QdF présentent de nombreux avantages : stabilité, représentativité, intégration de l'information régionale et locale, prise en compte de l'information historique, description de l'évolution le long du cours d'eau du régime hydrologique, etc .... Deux paramètres locaux sont essentiels pour passer des modèles aux courbes QdF : le débit instantané maximal décennal ( $QIXA_{10}$ , correspondant au débit maximal de période de retour 10 ans) et la durée caractéristique de crue (D, médiane conditionnelle des durées caractéristiques de crue obtenue pour la crue décennale).

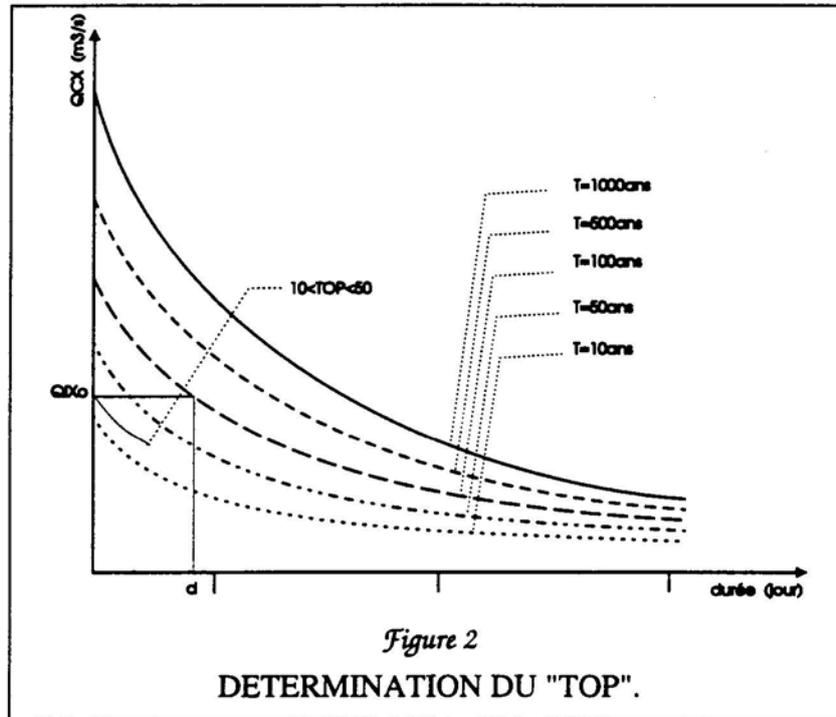
Les fondements théoriques à l'origine de ces définitions et de ces choix sont hors de propos ici. Ces modèles sont toujours en cours de développement et ces paramètres sont susceptibles d'évoluer à l'avenir. On se reportera aux publications du CEMAGREF pour toute précision complémentaire.

Ces modèles QdF permettent, dans le cadre d'INONDABILITE, deux opérations importantes :

- primo, quantifier la vulnérabilité d'une parcelle ;
- secundo, fournir les entrées au modèle hydraulique qui quantifie les aléas.

Il est en général possible d'exprimer le besoin de protection d'une parcelle donnée de terrain par un couple (fréquence maximale ou période de retour minimale T, durée d'inondation tolérable d). Dans certains cas, des facteurs complémentaires comme la vitesse V de l'écoulement ou la profondeur P de l'eau doivent aussi être pris en compte. La description en QdF de l'hydrologie du cours d'eau permet alors, après une transformation simple et

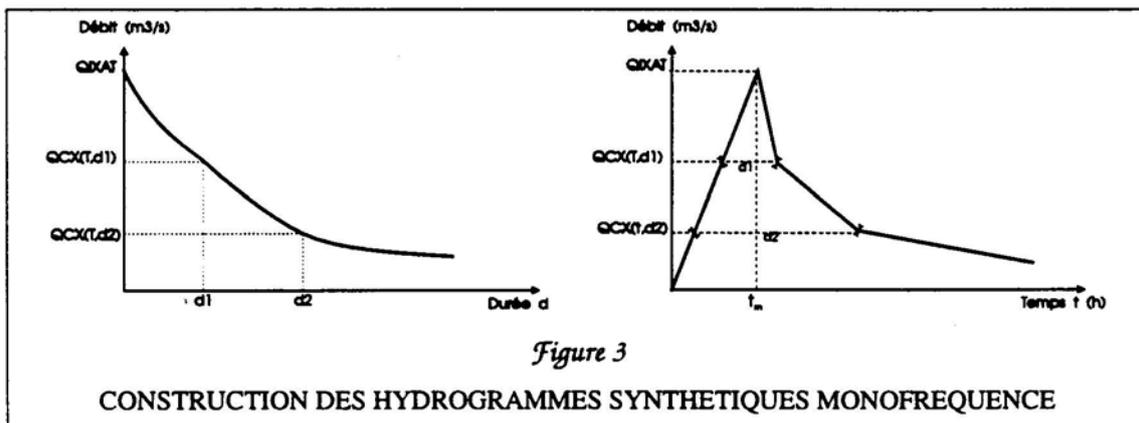
originale, de convertir ce couple en une variable unique assimilable à une période de retour, comme l'illustre la figure 2. Cette nouvelle variable représentative de l'objectif de protection, donc qui mesure la vulnérabilité du sol, est dénommée TOP, ou période de retour équivalente à l'objectif de protection.



Pour prendre en compte d'autres paramètres tels que la profondeur ou la vitesse il est nécessaire de disposer des résultats hydrauliques et, en particulier, des courbes de tarage locales qu'ils permettent d'obtenir.

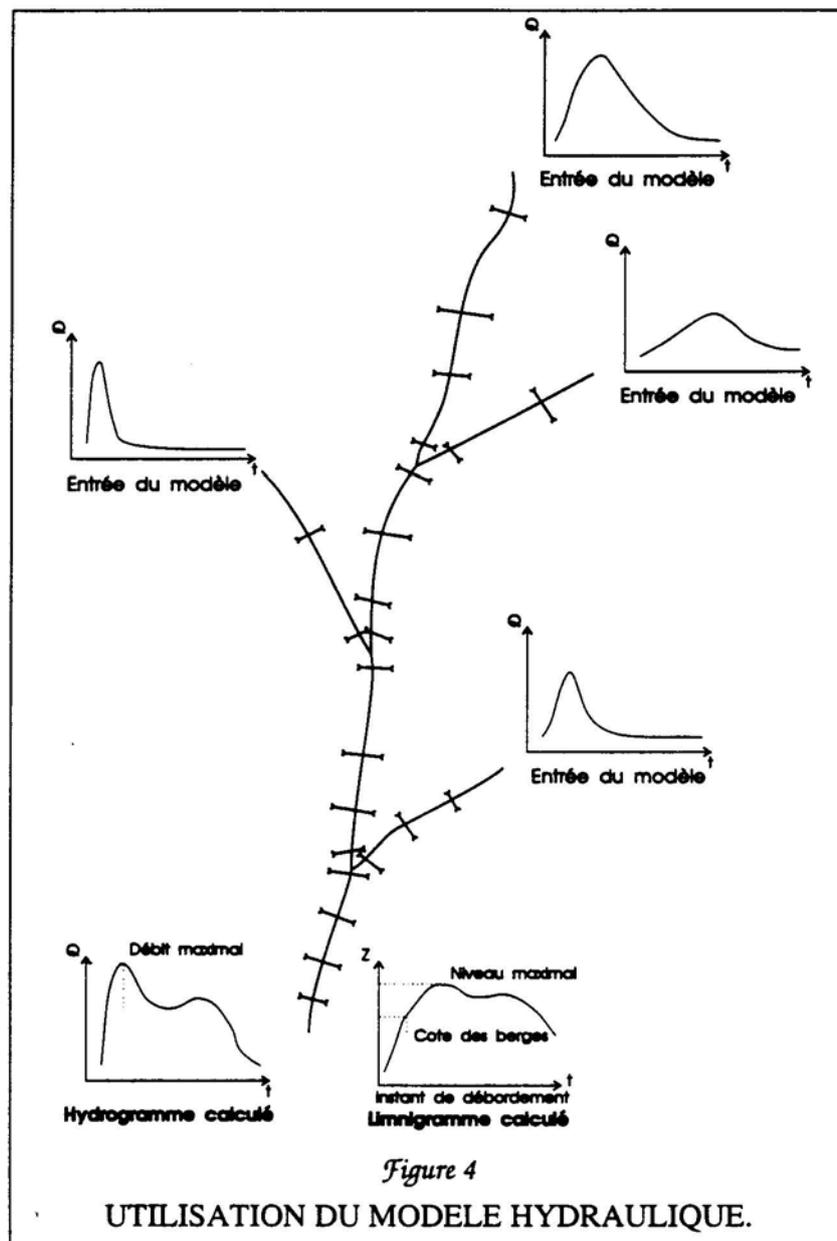
La variable qui mesure l'aléa est la période de retour de la première crue inondant une parcelle donnée, c'est à dire qui atteint tout juste la parcelle ( $d=0^+$ ,  $p=0^+$ ), dénommée TRIN.

La mesure de l'aléa et de la vulnérabilité par des variables de même nature et, par conséquent, comparables, permet de les confronter et de définir ainsi objectivement le risque associé.



Les modèles QdF permettent aussi de reconstituer des hydrogrammes synthétiques monofréquence pour toute période de retour. Ces hydrogrammes  $Q(t)$ , construits pour chaque période de retour  $T$ , sont des constructions théoriques qui intègrent l'information hydrologique. Ils vérifient la propriété suivante, qui en fait tout l'intérêt pour le routage hydraulique : pour toute durée, le débit continûment dépassé pendant cette durée  $d$  est de période de retour  $T$ . De plus leur volume est fortement corrélé avec le volume de la crue de même période de retour. La figure 3 montre le procédé de construction de ces hydrogrammes à partir d'une des courbes QdF choisie pour une période de retour donnée.

### 3.2 Hydraulique.



Selon le degré de connaissance du régime hydrologique du bief principal à modéliser et de ses affluents, le modèle hydraulique est alimenté par des débits affluents asservis

d'entrée au respect de la fréquence dans le bief principal ou monofréquence pour les affluents, ce qui entraîne alors une nécessaire correction en fréquence des résultats obtenus.

La modélisation hydraulique permet de calculer des cotes d'eau atteintes pour des conditions hydrauliques particulières. Elle doit prendre en compte les phénomènes de stockage et de déstockage de volumes d'eau dans les zones de débordements, phénomènes fondamentaux lors de la propagation d'une onde de crue le long d'un cours d'eau. De plus, elle doit être à même de composer les hydrogrammes de crue en provenance des différentes superficies participantes du bassin versant (affluents, apports latéraux, ...). Dans la plupart des cas, on peut se contenter d'utiliser un modèle hydraulique monodimensionnel en régime transitoire. Ce type de modèle fait l'hypothèse que l'écoulement se produit le long d'un axe privilégié, qui est l'axe du lit mineur. Les vitesses latérales ne sont pas modélisées. Pour certaines zones aux écoulements complexes, on fait alors appel à un maillage des écoulements qui permet de prendre en compte des écoulements secondaires dans d'autres directions et à d'autres vitesses moyennes. La figure 4 schématise l'utilisation de ces modèles. Ils permettent de reconstituer en tout point des tarages locaux, c'est à dire des courbes  $Q(h)$  qui permettent de prendre en compte les paramètres de profondeur et de vitesse pour quantifier l'objectif de protection.

Le modèle MAGE (MAille GENéralisée), mis au point au CEMAGREF, remplit ces différentes fonctions et permet de réaliser ces calculs.

### 3.3 Cartographie.

L'utilisation des données topographiques, nécessaires pour décrire les conditions aux limites du modèle hydraulique et pour restituer sous forme cartographique les résultats, nécessite de faire appel à un modèle cartographique adapté aux spécificités d'une rivière. Les éléments topographiques spécifiques d'une rivière (fond, berges, ...) servent de lignes de structure du modèle numérique de terrain (MNT) développé spécifiquement pour ces applications.

Ce modèle illustré sur la figure 5 permet de cartographier, d'une part, la variable représentative de la vulnérabilité (ou TOP) et, d'autre part, celle représentant l'aléa (ou TRIN), résultat direct du calcul hydraulique.

Le fait d'utiliser la même représentation topographique pour alimenter le modèle hydraulique et pour restituer les résultats permet d'automatiser les reports cartographiques et de multiplier les simulations possibles. Dans ce domaine, le CEMAGREF a développé un outil spécifique qui intègre ces contraintes de description d'une situation hydrauliquement cohérente. Cet outil dispose de certaines fonctions de type "système d'information géographique" (SIG) qui permettent de croiser deux "plans" d'information comparables.

Un code de couleur a été retenu pour synthétiser l'information résultant de cette démarche. Pour une parcelle de terrain donnée, trois situations peuvent apparaître :

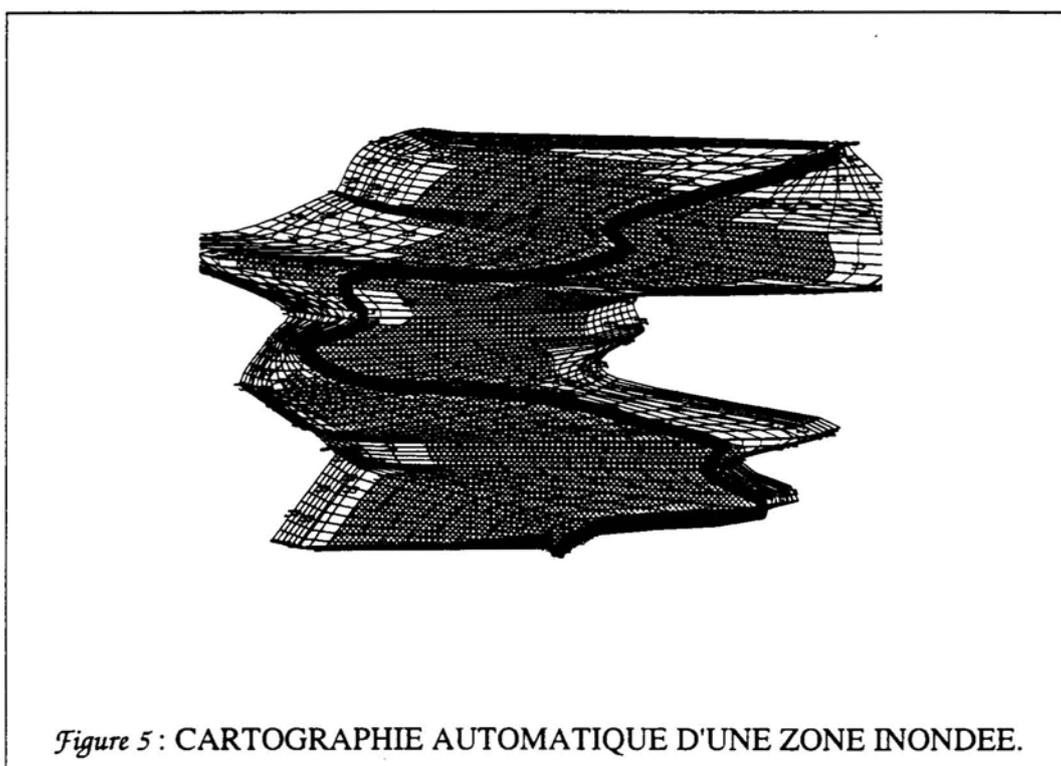
- la parcelle est **hors d'eau** même pour la crue la plus rare simulée, elle est colorée en **jaune**\* ; on mentionne alors l'objectif de protection choisi (TOP) ;

---

\* la période de retour de cette crue la plus rare simulée doit être explicitée

- la parcelle est inondée pour une crue plus rare que son objectif de protection ( $TOP < TRIN$ ), elle est colorée en **vert** ; elle est **correctement protégée** ; les deux variables apparaissent sur la pastille qualifiant la parcelle ;
- la parcelle est inondée plus qu'elle ne le tolère ( $TRIN < TOP$ ), elle est colorée en **rouge** ; elle est **insuffisamment protégée** ; les deux variables apparaissent sur la pastille qualifiant la parcelle.

Ce code de couleur permet de faire apparaître sur la carte de synthèse la situation de risque de chaque parcelle d'une manière facilement lisible même pour des non spécialistes. L'écart entre ces deux variables (TOP et TRIN) donne une première estimation du "déficit" ou du "crédit" de protection. Un exemple de carte obtenue sur un cas réel (et adapté à une visualisation en noir et blanc) est fourni en page 14 (figure 9).



#### 4. UTILISATION DES RESULTATS.

Les résultats obtenus à l'issue d'une telle étude sont principalement les 3 jeux de cartes figurant :

- la vulnérabilité des parcelles,
- l'aléa d'inondation,
- et la synthèse de ces deux informations.

Cette carte de synthèse fait apparaître des zones rouges, donc à risque ou à déficit de protection, et des zones vertes ou jaunes, donc à "crédit" de protection. L'accès facile et automatique aux profondeurs d'eau inondantes ou aux marges de protection disponibles permet aussi de comparer les volumes à déplacer et la faisabilité de ces transferts éventuels.

La souplesse de la méthode permet d'intégrer toutes les demandes de protection exprimées et de montrer leur impact sur la situation générale de la rivière. Il existe alors plusieurs solutions pour améliorer celle-ci : diminuer l'aléa grâce à des travaux hydrauliques souvent lourds et coûteux, mais aussi diminuer la vulnérabilité en choisissant une occupation du sol adaptée dans les zones à fort aléa. L'intérêt de comparer ces différentes solutions est évident et on dispose là d'un moyen objectif de le faire.

Il est alors relativement aisé d'interpréter ces cartes pour déterminer un schéma général d'aménagement le long de la rivière de façon à intégrer cette gestion du risque d'inondation dans les modifications futures de l'occupation du sol et dans la programmation des travaux hydrauliques. On dispose avec ces documents d'une plate-forme de négociation pour la protection des zones sensibles.

## **5. TRAVAUX REALISES DANS LE CADRE DU X<sup>e</sup> PLAN.**

Dans le cadre du X<sup>e</sup> plan (phase 1, 1989-1992), le programme de travail a consisté à formaliser les différentes hypothèses nécessaires au développement de cette méthode et à définir précisément les concepts de base préalables à sa mise en oeuvre : définition de la continuité et de la monotonie des modèles hydrologiques, définition rigoureuse de la quantification de l'aléa et de la vulnérabilité, détermination des procédés de comparaison de ces deux types d'information.

Les outils de modélisation ont été développés dans le domaine de l'hydrologie avec le logiciel AGREGEE, en hydraulique avec les développements du logiciel MAGE (MAille GEnéralisé), et en cartographie automatique.

L'extrapolation des débits vers des périodes de retour rares et extrêmes par le modèle AGREGEE est illustrée sur la figure 7. Elle repose sur une extension de la méthode du Gradex à toute durée et permet d'obtenir de manière continue (pour les durées et les périodes de retour) les quantiles de débit pour des variables définies en débit moyen (VCX) comme en débit seuil (QCX).

Le développement des modèles hydrauliques permet de reconstituer des hydrogrammes et des limnigrammes en tout point du réseau modélisé. La figure 7 montre ainsi un hydrogramme et un limnigramme recalculé par modèle hydraulique et la sensibilité du calcul à diverses hypothèses. Cet exemple est extrait d'une application d'inondabilité à un cas réel.

La visualisation tri-dimensionnelle de la figure 8 est un exemple de ce que permet ce type de modèle. A partir du maillage qui sous-tend cette représentation il est possible de développer des fonctions de type SIG en attribuant des valeurs de paramètres à chacune des mailles du modèle. En attendant le développement opérationnel de ces fonctions et leur application à un cas réel, les cartes de synthèse sont réalisées manuellement comme sur l'exemple de la figure 9. On y voit apparaître des parcelles en différentes situation de risque (ou de non-risque), les variables quantifiant aléa et objectif de protection étant explicitées.



## 6. CONCLUSION.

Cette méthode a été testée en grandeur réelle sur 4 rivières : le Bon-Nant (74), la Bourbre (38), le Rival (38) et l'Egrenne (61), présentant des caractéristiques diversifiées tant par l'hydrologie du bassin versant que par l'hydraulique des écoulements. On passe de quelques dizaines de kilomètres carrés de bassin versant à plusieurs centaines, de quelques kilomètres de linéaire de rivière à quelques dizaines. On a ainsi démontré son caractère opérationnel et ces résultats montrent l'intérêt d'une démarche exhaustive et synthétique qui devrait se généraliser dans le cadre des nouveaux textes législatifs sur la gestion des eaux (SAGE).

Cette évolution paraît indispensable dans la mesure où, le plus souvent, les solutions lourdes d'aménagement visant à accélérer le transit vers l'aval ont déjà été utilisées au maximum et ne sont donc plus disponibles pour améliorer la situation. L'exemple des crues catastrophiques de l'automne 92 et de l'année 93 est là pour rappeler que ces phénomènes naturels sont incontournables et qu'il est indispensable d'adapter notre manière de les prendre en compte lors des travaux d'aménagement et d'occupation des sols.

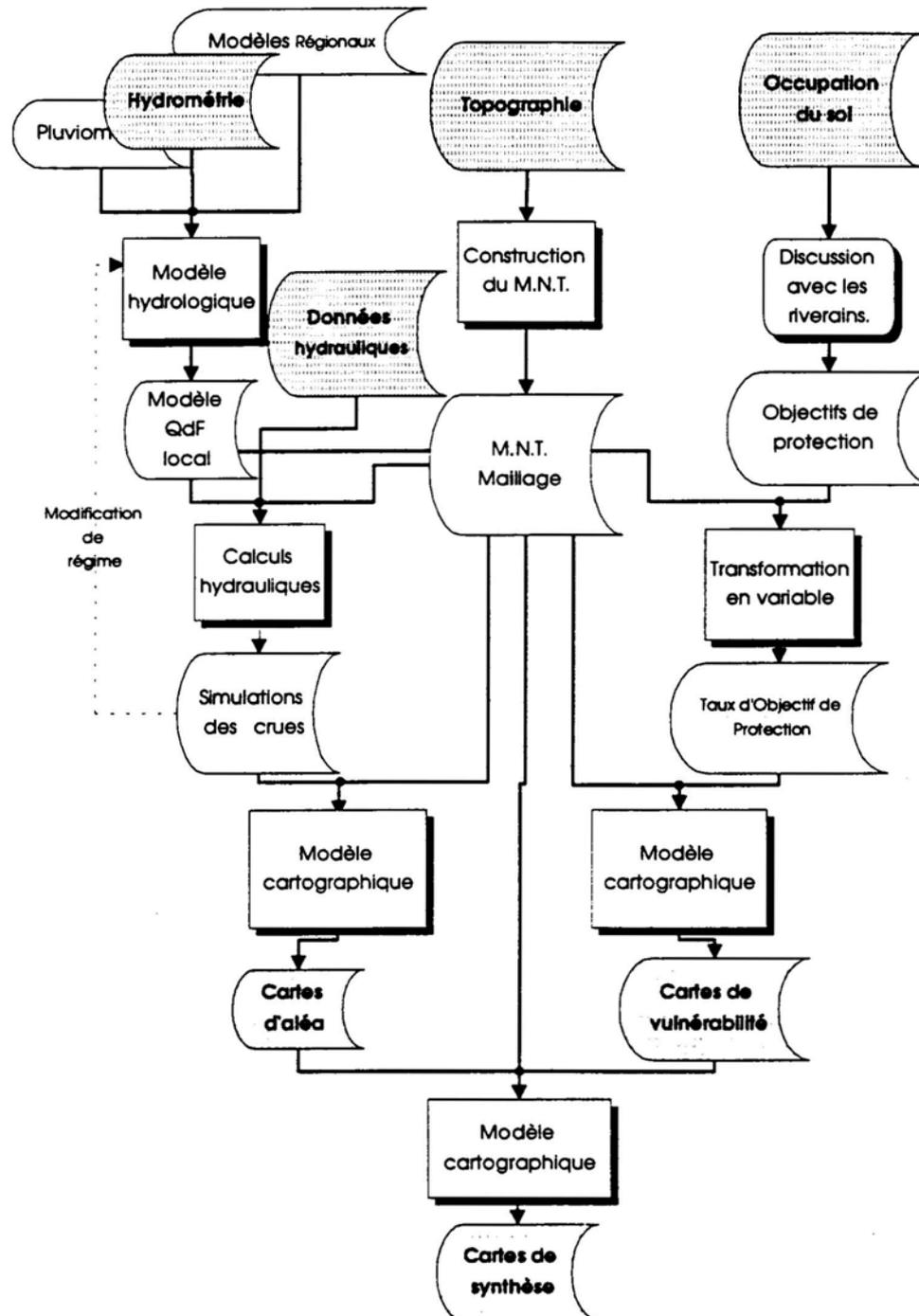
Certains développements sont encore nécessaires d'un point de vue méthodologique pour prendre en compte d'autres critères de vulnérabilité comme la profondeur\* et la vitesse de l'eau qui sont parfois essentiels pour juger du caractère contraignant d'une inondation. Par ailleurs la mise en oeuvre opérationnelle nécessite aussi des développements pour améliorer l'intégration informatisée des outils nécessaires et leur productivité. L'ensemble des informations utilisées dans cette démarche aboutit à un volume considérable de données que l'utilisateur a des difficultés à gérer sans interface performante.

La poursuite de ces travaux dans le cadre d'un nouveau plan ou d'un autre programme de recherche paraît tout a fait d'actualité suite aux nouvelles catastrophes qui ont touché encore récemment de nombreuses régions de France.

---

\* La prise en compte de ces critères est résolue sur le plan théorique depuis la fin de cette phase mais la mise en oeuvre pratique soulève encore certaines difficultés.

### INONDABILITE : ORGANIGRAMME GENERAL



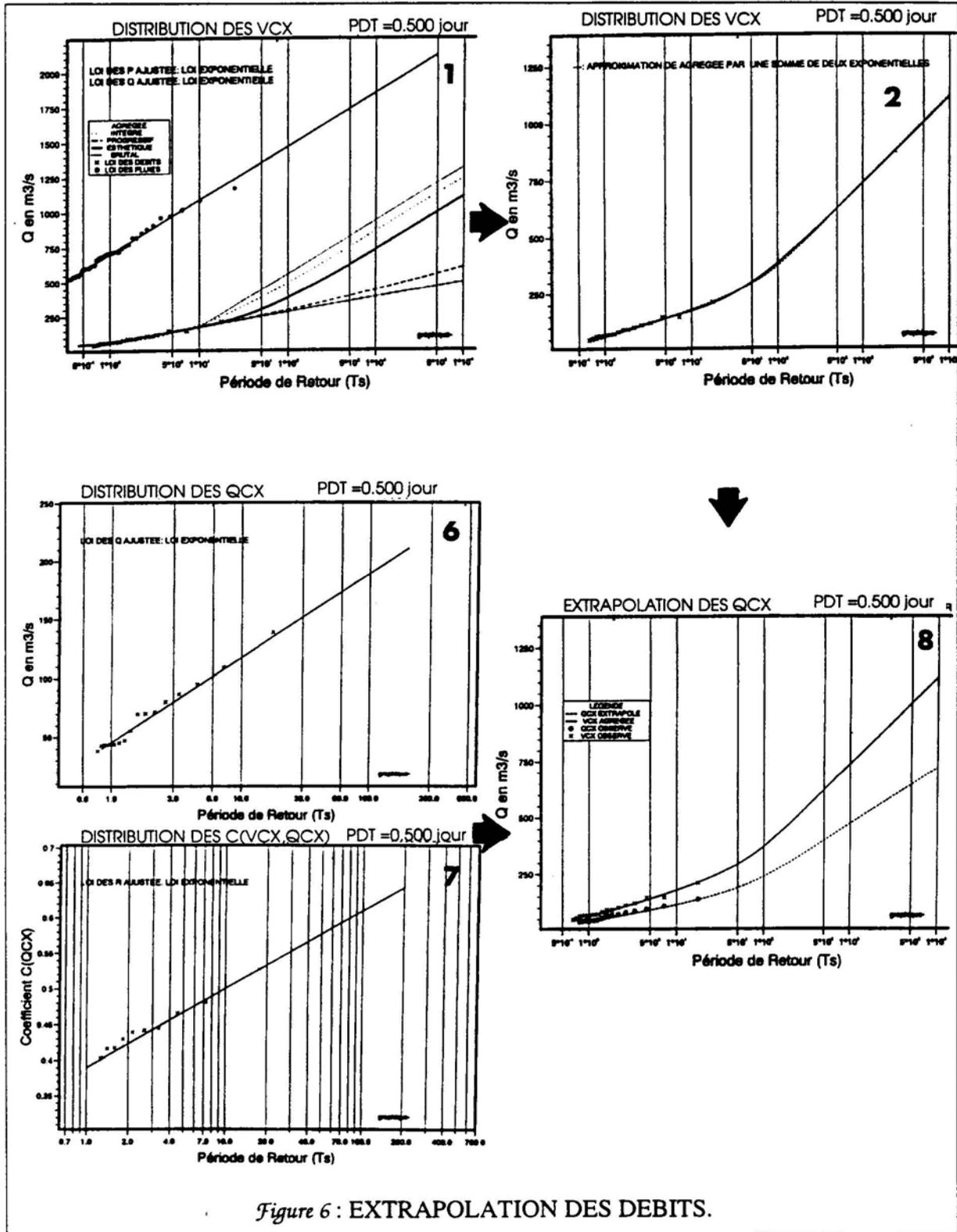
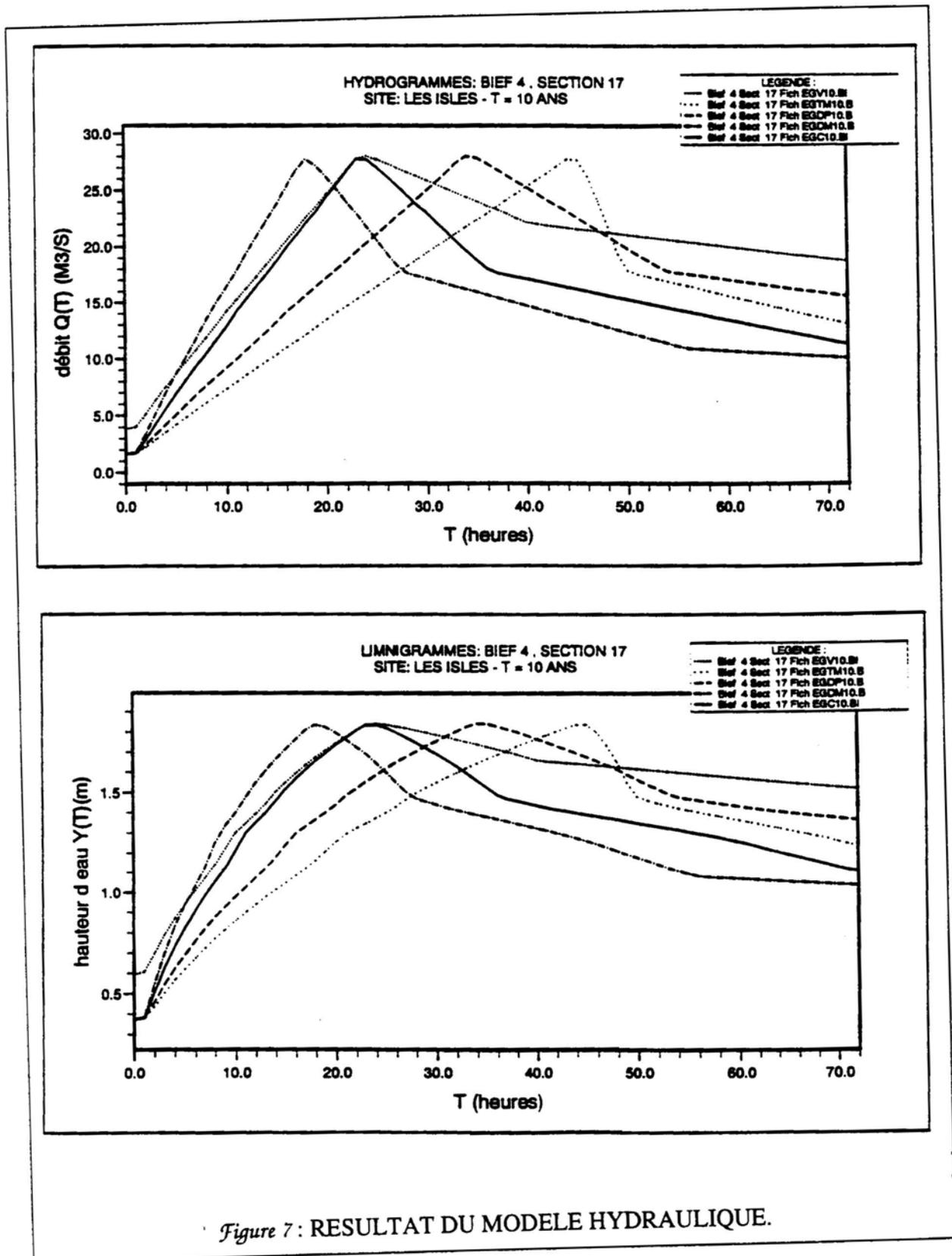


Figure 6 : EXTRAPOLATION DES DEBITS.



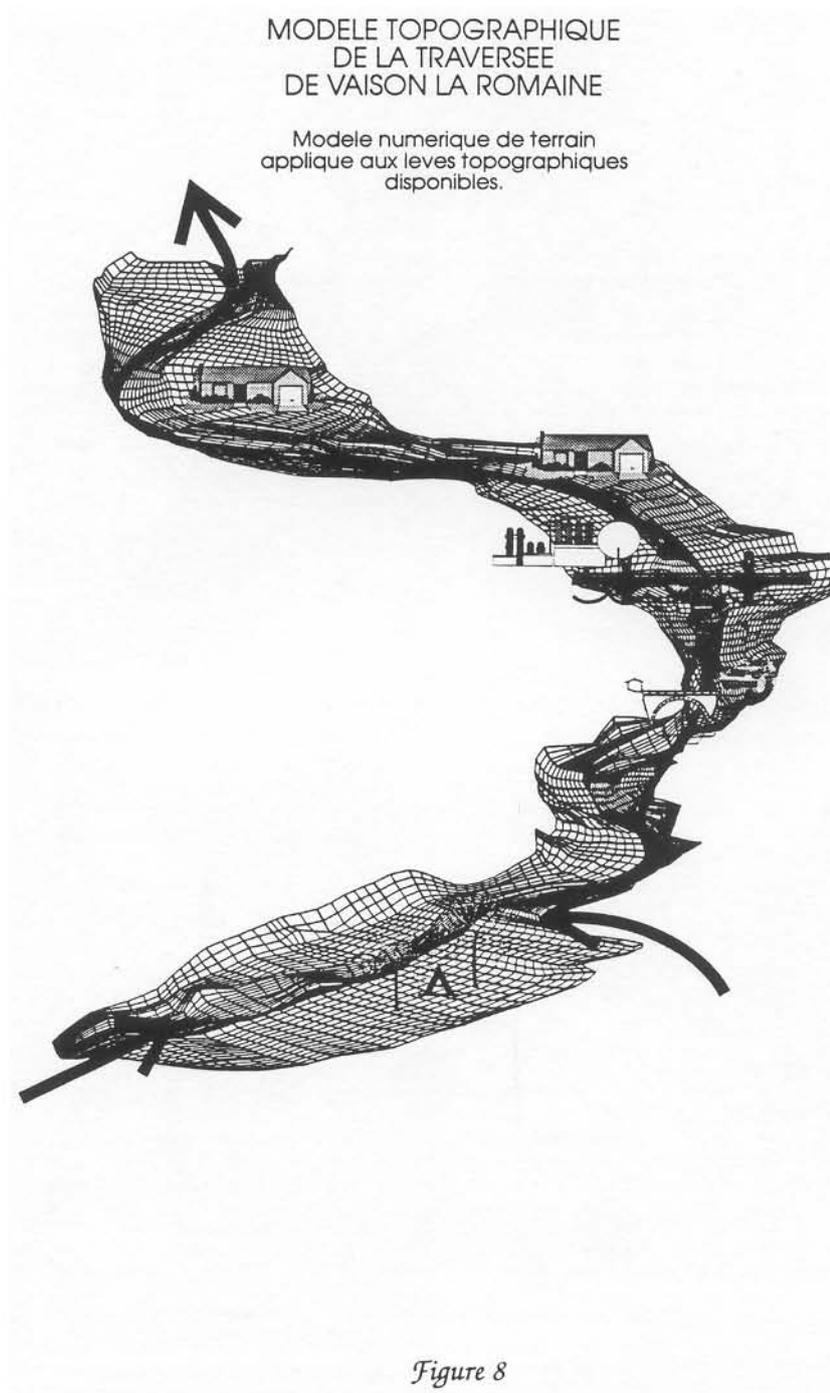


Figure 8

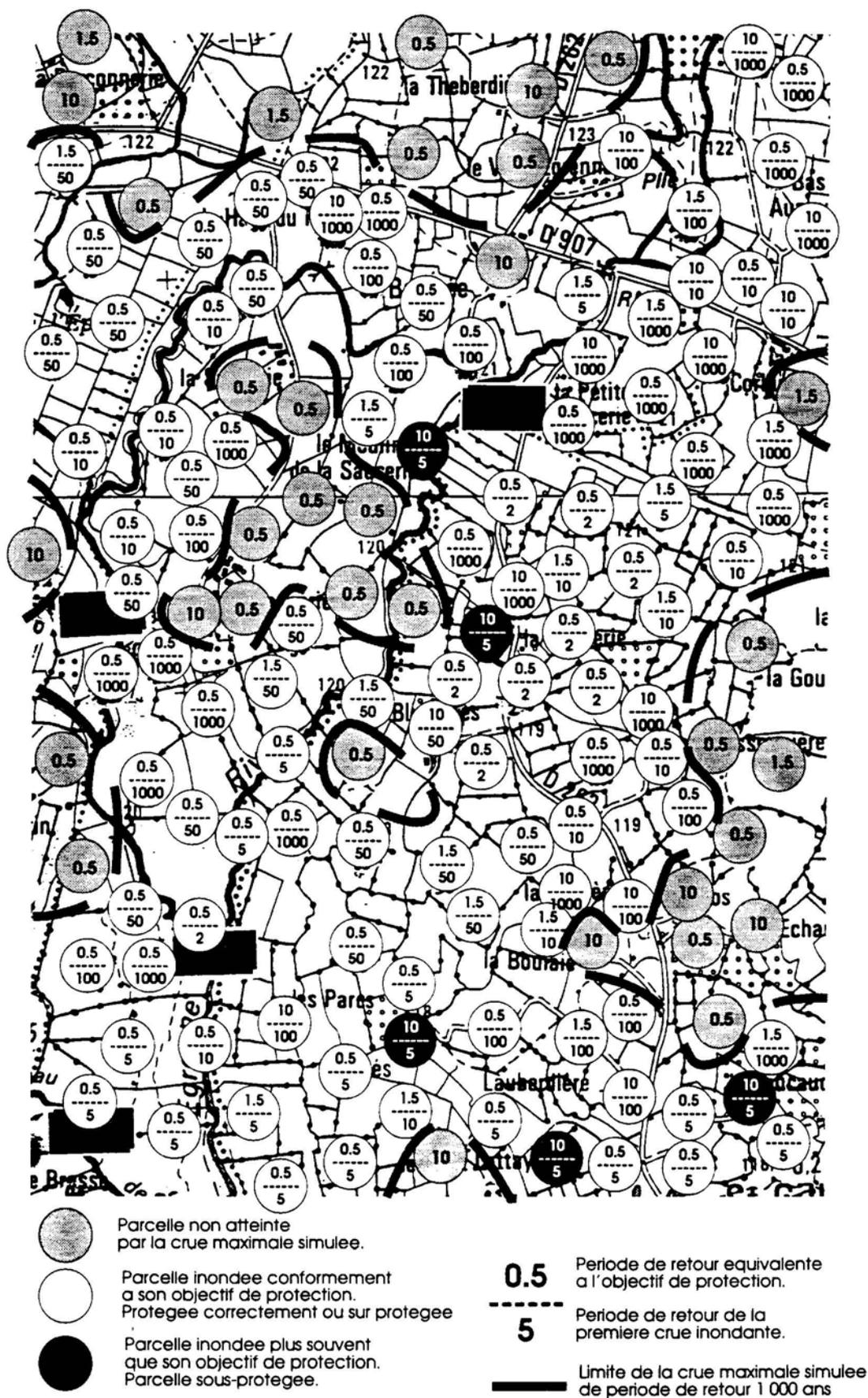


Figure 9 : EXEMPLE DE CARTE OBTENUE.

## BIBLIOGRAPHIE

**GIVONE P., OBERLIN G., PARSY C., 1990**

Aménagements et inondations, Colloque interrégional "Entretien et gestion des rivières, AFBLB, Angers, 25 janvier 1990, 12 p.

**OBERLIN G., 1990**

Inondabilité : un programme pour l'aménagement rationnel des zones inondables. Informations techniques du CEMAGREF, décembre 1990, n°80, note 5, 4 p.

**OBERLIN G., LAMBERT P., 1991**

Inondabilité, occupation du sol et besoins en protection. Courants, n°8.- 45-52

**OBERLIN G., MARGOUM M., 1991**

AGREGEE : un modèle opérationnel d'estimation des crues rares et extrêmes. Informations techniques du CEMAGREF, n°84, note 4.-10 p.

**GAUTIER J.-N., 1991,**

INONDABILITE, cartographie de synthèse, Rapport X' Plan Etat-Région Rhone-Alpes, risque naturels en montagne, crues et inondations en vallée, 1991, 100 p.

**GIVONE P., GILARD O., OBERLIN G., GAUTIER J.-N., FARISSIER P., LAMBERT P., 1991,**

Etude d'inondabilité de la Bourbre, Rapport d'étude, 1991, 5 volumes dont un de cartes.

**STRADIOTTO S., 1992**

Modélisation des plaines d'inondation par un modèle monodimensionnel d'écoulements en rivière, DEA de thermique et énergétique, UCBL, ECL, INSA Lyon, septembre 1992, 151 p.

**GAUTIER J.-N., 1992**

INONDABILITE, modélisation des connaissances hydrologiques en vue d'une confrontation "Risque/Besoin de protection" directe : synthèse cartographique, Thèse de Doctorat "Sciences et Techniques de l'Eau", IMF Strasbourg, Octobre 1992, 192 p + annexes.

**GILARD O., 1992**

La méthode Inondabilité : présentation générale, Note de travail, CEMAGREF Lyon, octobre 1992, 5 p.

**CHASTAN B., GILARD O., 1992**

Mise en oeuvre d'une étude d'Inondabilité, Note de travail, CEMAGREF Lyon, octobre 1992, 6p.

**OBERLIN G., CHASTAN B., 1992**

Le modèle Inondabilité et ses potentialités pour mieux maîtriser les aspects qualitatifs des crues, Les entretiens sur l'Eau, atelier Crues, Grenoble, décembre 1992, 4 p.

**GILARD O., OANCEA V., ROBIN O., 1993**

Etude d'inondabilité du Rival. Rapport d'étude, Lyon, avril 1993, 114 p + annexes.

**RIGAUDIERE P., 1993**

Inondabilité : étude de l'Egrenne, les enseignements d'un cas particulier. Rapport de DEA MMGE, Université Joseph Fourier - CEMAGREF, Lyon, juin 1993, 112 p + annexes.

**GILARD O., GAZELLE O., KAYANFARD M., RIGAUDIERE P., 1993**

Etude d'inondabilité de l'Egrenne. Rapport d'étude, Lyon, juin 1993, 136 p + annexes.

**GILARD O., GIVONE P., 1993**

Flood events of september 1992 South of France : reflexions about flood management. Conference of coastal and river engineering, Loughborough University, 5-7 July 1993, 12 p.