

# Eléments pour une méthode d'évaluation d'un risque parcellaire de contamination des eaux superficielles par les pesticides

P. Aurousseau <sup>(1)</sup>, C. Gascuel-Oudoux <sup>(2)</sup>, H. Squividant <sup>(1)</sup>

1 - ENSAR, Laboratoire de Spatialisation Numérique, 65 Route de Saint-Brieuc, 35042 Rennes Cedex

2 - INRA, Unité de Science du Sol et de Bioclimatologie, 65 Route de Saint-Brieuc, 35042 Rennes Cedex

## RÉSUMÉ

Des éléments sont proposés pour l'élaboration d'une méthode d'évaluation d'un risque parcellaire de contamination des eaux superficielles par les pesticides. Cette méthode suit les étapes suivantes : (1) une liste hiérarchisée de facteurs de risque est établie, faisant pour partie suite à une consultation d'experts régionaux et nationaux; (2) chaque facteur de risque est traduit en un critère mesurable à l'échelle de la parcelle, plusieurs critères étant évaluables directement sous système d'information géographique à partir du parcellaire, des données d'occupation du sol et d'un modèle numérique de terrain; (3) chaque facteur est subdivisé en deux, trois ou quatre modalités, les limites entre ces modalités s'appuyant là aussi pour partie sur l'avis des experts; (4) la technique de combinaison des facteurs de risque choisie est une technique hiérarchique de rang, la méthode SIRIS, déjà utilisée pour classer les molécules de pesticides.

Les facteurs de risques de contamination et les modalités retenus ont été choisis en tenant compte du contexte régional de l'étude et en privilégiant les mécanismes de contamination des eaux de printemps et de début d'été qui se produisent principalement par ruissellement après les désherbages du maïs. Cette technique a été appliquée sur plusieurs bassins versants à la demande de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne. Dans cette article nous présentons une mise en œuvre sur la partie aval du bassin versant de l'Aulne en couplant des données d'occupation du sol obtenues par traitement d'images satellitaires et un modèle numérique de terrain à pas de 20 mètres. La méthode d'évaluation des risques utilisée met en œuvre cinq facteurs de risque renseignés automatiquement par système d'information géographique : distance hydraulique de la parcelle au réseau hydrographique, pente de la parcelle, longueur de la parcelle dans le sens de la pente, protection par une zone concave, protection aval par une culture minimisant le ruissellement. Les rangs de risque finaux calculés par la méthode SIRIS sont ensuite partagés en quatre classes de risque qui sont visualisées dans le système d'information géographique.

Cette méthodologie est aisément applicable à d'autres contextes régionaux et à d'autres mécanismes de contamination à condition de réexaminer les facteurs de risque, leur hiérarchie et le choix des modalités.

## Mots clés

Modèle Numérique de Terrain, réseau de drainage, pesticide, indice de risque.

## SUMMARY

A method is proposed for evaluating the risk of pesticide contamination in surface waters at the scale of the plot. The five steps of the method are as follows : (1) identification of risk factors, using a list drawn up and validated after consultation with 29 regional and national experts ; (2) each risk factor is represented in terms of a measurable criterion at the scale of the plot. Several criteria can be directly evaluated by means of a Geographical Information System (GIS), making simultaneous use of land use and plot-related data as well as a Digital Elevation Model ; (3) each factor is broken down into two, three or four classes. The thresholds for defining the classes are chosen also on the basis of advice from experts ; (4) the method selected here for risk combination is known as SIRIS, a ranking technique already used for classifying pesticide molecules.

The selected risk factors and thresholds were chosen by taking into account the regional setting of the study, while favouring mechanisms of water contamination in spring and early summer mainly caused by runoff after weeding of maize crops. This approach has been applied to several catchment areas following a request from the Loire-Bretagne Water Board. The present study reports an application of this risk assessment technique to the downstream part of the Aulne river catchment. It combines land-use data obtained from the treatment of satellite imagery with a digital elevation model having a sampling step of 20 m. The assessment method used here involves five risk factors that are automatically supplied by a GIS, i.e. : flow path length from the plot to the river system, slope of plot, length of plot in direction of slope, protection due to concave zones and downstream protection due to crops that minimize runoff. The final risk rankings calculated by the SIRIS method are then split into four risk classes that can be displayed by the GIS.

This methodology is readily applicable to other regional settings and other contamination mechanisms, provided a re-examination is made of the risk factors as well as the chosen threshold values that are used to split the risk factors into classes.

## Key-words

Digital Elevation Model, drainage pattern, pesticide, risk class, risk factor, SIRIS ranking method.

Des contaminations importantes des eaux superficielles par les pesticides sont de plus en plus fréquemment observées. Ainsi, le ministère français de la santé (1994) (In Barriuso et al., 1996) a publié des résultats d'analyses des teneurs en atrazine de 6 773 eaux d'origines diverses échantillonnées en 1991. Les analyses montrent que 37 % des eaux brutes et 25 % des eaux distribuées contenaient plus de  $0,1 \mu\text{g.l}^{-1}$  d'atrazine et que 1,2 % de la population suivie avait reçu de l'eau contenant plus de  $2 \mu\text{g.l}^{-1}$ . Cette contamination a pour partie et pour certaines molécules une origine agricole (Schiavon et al., 1995). La gravité de cette situation requiert la mise au point d'outils de diagnostic et de décision pour mieux gérer l'espace agricole. Il faut d'une part identifier et hiérarchiser les facteurs de risque liés au milieu physique et aux situations culturelles pour mieux localiser les zones sensibles. Il faut d'autre part proposer des solutions adaptées à un niveau de risque estimé.

Ces outils de diagnostic des situations sensibles dépendent des échelles d'espace, en relation notamment avec la disponibilité des informations. Par exemple, à l'échelle régionale, l'objectif est de hiérarchiser des bassins versants en fonction des caractéristiques climatiques, pédologiques et des systèmes de culture (BRGM, 1975-1979; Hollis, 1990; Arousseau et al. 1996). Sur des bassins versants de quelques centaines d'hectares à quelques dizaines de km, ces paramètres sont généralement considérés comme homogènes ou ne sont souvent pas connus. C'est le cas général des constituants du sol, notamment de la teneur en matières organiques qui joue cependant un rôle important dans la rétention et la biodégradation des molécules. A cette seconde échelle, c'est un risque parcellaire que l'on cherche à définir. Celui-ci dépend de l'occupation du sol, des itinéraires techniques suivis et de la position de la parcelle vis à vis du réseau hydrographique. L'objectif est alors de fournir une aide pour décider de l'assolement des cultures dans le bassin versant et proposer des itinéraires techniques adaptés. Cette seconde échelle est essentielle car de nombreux travaux montrent en effet que les fortes contaminations des eaux par les pesticides ne sont pas liées de façon diffuse à l'ensemble de l'espace agricole, mais à quelques secteurs ou parcelles d'un bassin versant (Squillace and Thurman, 1992; Gillet et al., 1995). C'est à cette seconde échelle et dans ce cadre que se situe ce travail.

Les outils de diagnostic présentés ici sont basés sur les processus de transferts des pesticides, sans toutefois les traiter par un modèle déterministe. En effet, ce type de modèle ne prend souvent pas en compte la complexité spatiale et temporelle de l'espace rural, de l'activité agricole et des aménagements anthropiques : contour parcellaire, drainage, haies... qui détermine de façon importante les conditions de propagation des pesticides le long des versants. C'est pourquoi les outils de diagnostic présentés ici partent au contraire d'une analyse spatiale détaillée qui est complétée au niveau des pro-

cessus par des dire d'expert. C'est en ce sens une démarche empirique : des facteurs de risque de contamination des eaux superficielles sont identifiés et hiérarchisés pour un contexte agronomique et hydrogéologique donné. Cette démarche fondée sur une simplification des processus a en contre partie l'avantage d'être adaptée au contexte étudié. Les outils de diagnostic mis en œuvre peuvent cependant être transposés à d'autres situations à condition d'analyser à nouveau la pertinence, la hiérarchisation et les modalités des facteurs retenus.

Cet article expose les éléments d'une méthode d'évaluation du risque parcellaire de contamination des eaux superficielles par les pesticides, au sein de bassins versants de tailles allant de quelques centaines à quelques milliers d'hectares. Cette méthode n'aborde que le classement des parcelles selon leur configuration géographique au regard des caractéristiques du milieu. Elle est fondée sur le même formalisme que la méthode SIRIS développée pour le classement des molécules (Vaillant et al., 1995). Cette méthode de rang est appliquée dans le contexte agronomique et hydrologique de la Bretagne (France) pour fournir une évaluation du risque parcellaire de contamination des eaux superficielles par les pesticides.

## MATÉRIEL

### Contexte hydrogéologique et agricole

Dans le contexte hydrogéologique de la Bretagne, et dans une première approche traitant des risques de fortes contaminations des eaux par les pesticides suite aux traitements, l'intérêt d'une spatialisation des processus de transferts, notamment de l'occurrence d'écoulements rapides, paraît prioritaire par rapport à une spatialisation des processus biogéochimiques d'adsorption et de dégradation liés plutôt aux constituants, aux états hydriques et biogéochimiques du sol. De nombreux travaux ont souligné l'importance des écoulements de surface et de subsurface dans ces contaminations (Gouy, 1993; Schiavon, 1992)

Du point de vue hydrologique, la Bretagne présente un réseau hydrographique dense, de  $0,7 \text{ km/km}^2$  à l'échelle des bassins versants d'ordre 1 (Crave et Davy, 1996). En fait ce chiffre recouvre de fortes variations. La densité du réseau hydrographique va de  $0,5 \text{ km/km}^2$  dans le Bassin de Rennes à  $1,5 \text{ km/km}^2$  dans les régions les plus arrosées de l'ouest de la Bretagne (Arousseau, travaux personnels non publiés). A ce réseau naturel s'ajoute un important réseau de fossés. Les zones humides sont très présentes, en relation avec un substrat de faible perméabilité (schiste et granite) observable à faible profondeur. Ces zones sont présentes dans deux types de position dans les bassins versants. Elles sont le plus souvent riveraines du réseau hydrographique et correspondent à des sols lessivés dégradés de faible perméabilité qui conduisent en période de

crue à des transferts latéraux rapides de subsurface (Curmi et al., 1995). Ces zones humides riveraines du réseau hydrographique représentent de 10 à plus de 15 % de la surface des bassins versants. Ces zones humides peuvent être aussi présentes sur les versants ou en haut de topographie. Elles ont alors souvent été soumises à des drainages agricoles.

Dans ce contexte hydrologique, la position relative des parcelles vis à vis du réseau hydrographique est importante. Le raisonnement est basé sur le principe de réadsorption des pesticides au cours de leur transfert (Orhon, 1993), de l'infiltration des écoulements de surface et de subsurface, ou du dépôt des particules entre la zone source et le réseau hydrographique. La position relative des parcelles s'analyse ainsi à la fois en terme de distance de parcours des écoulements, mais aussi en terme de topographie et de couvert dans l'espace parcouru. L'indicateur le plus simple est ainsi la distance géographique, ou mieux encore la distance hydraulique qui tient compte, si possible, des structures hydrographiques anthropiques (drains, fossés) qui assurent une liaison artificielle mais rapide et directe de la parcelle vers le réseau hydrographique. La forme du versant et les aménagements à proximité du réseau hydrographique, ou entre la parcelle et le réseau tels que la présence de zones filtrantes ou de haies, constituent également des facteurs essentiels (Patty, 1997).

La Bretagne est par ailleurs une région d'élevage intensif qui a connu un considérable développement depuis quelques décennies. Ce développement de la production animale s'est accompagné d'une modification des systèmes de cultures. La culture de maïs, et en particulier le maïs ensilage, pivot de l'alimentation animale s'est considérablement étendue. Cette culture couvre actuellement 450 000 ha, soit près du quart de la SAU, dont un cinquième en monoculture. Cette culture est considérée comme une culture à risque pour la contamination des eaux (Gillet et al., 1995; Gascuel-Oudou et al., 1996a; 1996b). Le sol est sensible au ruissellement pour cette culture, compte tenu du faible recouvrement du sol par le végétal (de 70 à 80 % à son maximum de développement, durant deux mois par an si l'on considère le cas de la monoculture de maïs). L'application des herbicides, entre mai et juin, coïncide avec une période où l'occurrence d'averses de forte intensité sur sol nu conduit à des risques de ruissellement hortonien. L'intensité de la contamination diminue d'une part, au fur et à mesure des averses ruisselantes, en relation avec un lavage plus ou moins important de la surface, d'autre part avec la durée de la période sans averses ruisselantes au cours de laquelle les produits sont plus ou moins rapidement dégradés. L'atrazine se dégradant lentement, la première pluie ruisselante conduit toujours à une contamination forte, d'autant plus intense que le ruissellement est important. Dans ce contexte, la géométrie de la sole de maïs (importance et localisation des parcelles) semble également jouer un rôle important. Ce risque est d'autant plus accentué que les sols sont en Bretagne limo-

neux, à teneur en matières organiques variables, allant de moins de 2 % de matières organiques dans l'est de la Région à plus de 7 % dans l'ouest (Leleux et al. 1988, Walter et al. 1996). Ils peuvent donc être sensibles à la battance (Gascuel-Oudou et al., 1996a).

A ces modifications de l'occupation du sol s'ajoutent des évolutions des structures paysagères. C'est le cas du réseau de haies qui a été pour partie arasé et ce de façon très variable à l'échelle de la Bretagne : 200 000 km de haies ont disparu en un demi-siècle lors du remembrement des terres agricoles. Or ces haies jouent un rôle important dans l'infiltration des eaux de ruissellement et le dépôt des sédiments (Merot et al., 1998). Elles peuvent ainsi contribuer à limiter les contaminations des eaux de surface par les pesticides.

## Données

### Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est obtenu par numérisation des cartes topographiques au 1/25 000. Il est en mode vecteur. C'est un réseau permanent. Il peut être complété par le réseau obtenu par traitement du Modèle Numérique de Terrain (MNT), soit pour compléter un chevelu fin du réseau jugé mal représenté dans les cartes topographiques, soit pour corriger des erreurs ou des omissions manifestes (Arousseau P., et Squidant H., 1995). On peut y adjoindre, lorsqu'un relevé spécifique existe, le réseau de fossés qui n'est pas représenté sur ces cartes topographiques. On subdivise habituellement ce réseau de fossés en distinguant les fossés où l'eau stagne et ceux où l'eau circule, dénommés respectivement fossés stagnants et fossés circulants. Dans une première approche présentée ici, on ne considérera que le réseau hydrographique représenté sur les cartes topographiques.

### Le Modèle Numérique de Terrain

Les MNT utilisés ont été extraits du MNT régional qui couvre l'ensemble de la Bretagne au pas de 20 mètres et comprend 135 millions de nœuds. Ce MNT a été établi à partir des images SPOT et acquis auprès de la société ISTAR. Pour les bassins versants dont la surface est comprise entre 500 et 10 000 hectares, le pas de 20 mètres a été gardé. Pour les bassins versants de plus grande surface, entre 10 000 et 100 000 hectares, ce MNT a été dégradé au pas de 40 mètres, en retenant régulièrement un nœud sur quatre. Ce MNT a été utilisé pour établir l'arbre de drainage et calculer les différents paramètres topographiques dérivés.

### L'occupation du sol

L'occupation du sol est issue d'une classification d'images satellitaires. Il s'agit selon les cas d'images multispectrales SPOT ou Landsat Thematic Mapper (LTM). Deux séries d'images, une d'hiver et une série d'été, sont en général requises pour l'identification de certaines cultures. La tech-

nique de traitement utilisée est de type « classification supervisée ». Les classes d'occupation du sol reconnues sont les suivantes : maïs, céréales à paille, prairies permanentes ou temporaires, surfaces inondées, surfaces imperméabilisées (zones urbaines, routes), bois. Dans le travail présenté ici, cette information a été fournie par le laboratoire COSTEL (Université de Rennes II). Compte tenu de la résolution des images traitées, respectivement de 20 mètres avec SPOT et 30 mètres avec LTM, le pixel des images classées a été fixé à 20 mètres. L'image finale est rectifiée et projetée sur le MNT.

Avec cette résolution des images de télédétection certaines identifications posent problème :

ζ d'une part, on ne peut identifier que le réseau bocager de largeur supérieure à 20 ou 30 mètres. Pour des largeurs inférieures, de l'ordre de 10 mètres par exemple, le signal résultant est un signal composite qui est interprété selon les cas comme du bois, de la prairie, de la culture ou du maïs. Pour identifier par traitement d'image un réseau de haies de quelques mètres de large, les images satellitaires ne conviennent pas. Il faut recourir à des images aériennes numérisées avec une plus haute résolution spatiale (pixel de 1 à 3 mètres) ;

ζ D'autre part, on ne peut pas séparer des parcelles jointives ayant une même occupation du sol, même si elles sont séparées par un rideau d'arbres ou un chemin de moyenne largeur. Elles apparaissent alors comme une seule pseudo-parcelle.

### Caractéristiques pédoclimatiques

Bien qu'importantes, ces caractéristiques ont été ici négligées compte tenu des échelles d'étude choisies, allant de quelques centaines à quelques milliers d'hectares. Le plus souvent, à ces échelles, une information spatialisée n'est pas disponible, ou bien faiblement variable ou encore variable mais peu structurée dans l'espace. C'est le cas en particulier de la teneur en matières organiques, de la texture des sols, de l'intensité des pluies, de la nature du substrat géologique, facteurs qui semblent jouer un rôle important dans la variabilité régionale de la contamination des eaux superficielles par les pesticides mais qu'il est difficile de spatialiser aux échelles considérées ici et dans l'état actuel des connaissances.

## MÉTHODE

### Identification et hiérarchisation des facteurs. Choix des critères et des bornes.

Dans le contexte agricole et environnemental de la Bretagne tel qu'il a été rappelé, différents facteurs ont été retenus et hiérarchisés. Lors du lancement de ce programme, il a été demandé à une trentaine d'experts de proposer une liste

de facteurs de risque et une hiérarchie de ces facteurs pour la contamination des eaux superficielles par les pesticides (Simon, 1994). Les réponses des experts ont été très cohérentes entre elles en ce qui concerne la liste des facteurs de risque. Par contre, la hiérarchie de ces facteurs proposée par les différents experts présentait une grande disparité, chacun donnant une importance hiérarchique dépendant principalement de sa spécialité scientifique. Aucune tendance n'apparaissant clairement, il a été décidé d'adopter une hiérarchie fondée à la fois sur l'avis des experts régionaux et sur les études régionales réalisées. La hiérarchie adoptée a pu ensuite être confrontée à diverses expérimentations réalisées depuis. Ces facteurs sont présentés dans la suite du texte selon leur ordre d'importance décroissante. Ils ont été traduits en critères qui permettent leur évaluation quantitative. Ces critères ont ensuite été répartis selon différentes modalités. Selon les cas, deux, trois ou quatre modalités maximum ont été choisies par critère.

Trois grands groupes de facteurs ont été considérés :

ζ le premier groupe comprend deux facteurs liés aux écoulements rapides, que l'on considère l'écoulement de surface ou de subsurface, en prenant en compte (1) la distance hydraulique de la parcelle au cours d'eau, et (2) l'existence éventuelle d'un drainage agricole artificiel ;

ζ le second groupe évalue spécifiquement les risques de ruissellement et d'érosion dans le versant, en prenant en compte (3) le gradient et (4) la longueur des parcelles, dans le sens de la pente. Le gradient de pente n'est formellement qu'un facteur d'intensité de l'érosion, alors que la mobilisation des produits phytosanitaires est plus liée au ruissellement qu'à l'érosion. Cependant le gradient de pente intervient aussi sur le déclenchement du ruissellement et sur la connexion des écoulements. La longueur de la parcelle dans le sens de la pente a été préférée à la surface de la parcelle, la longueur recoupant très souvent la direction des lignes de semis et favorisant les écoulements concentrés ;

ζ le troisième groupe de facteurs évalue les possibilités d'infiltration et de dépôt en aval d'une parcelle donnée, en prenant en considération, (5) la forme de la pente, (6) l'occupation du sol, (7) la présence d'une haie, sur le chemin hydraulique entre la parcelle et le réseau hydrographique.

Les critères, leur mode de calcul et leur séparation en classes sont les suivants :

1 - la distance au réseau hydrographique est estimée en prenant en compte la distance entre le bas de la parcelle considérée et le réseau hydrographique. Il s'agit de la distance hydraulique calculée à partir du chemin de l'eau selon l'arbre de drainage établi à partir du MNT. Quatre classes sont

considérées, avec les bornes suivantes : 1) nulle ; 2) inférieure à 50 mètres ; 3) entre 50 et 200 mètres ; 4) supérieure à 200 mètres. Cette répartition prend en compte : la contiguïté au cours d'eau, les parcelles étroites et en lanière de bord de cours d'eau que ce soient des dispositifs enherbés ou des prairies, les parcelles de mi-versant, les parcelles de plateau ;

2 - la présence ou non d'un drainage agricole est traduite selon deux modalités de présence ou absence. En effet de nombreux travaux montrent l'importance des drainages agricoles artificiels sur la contamination des eaux du réseau hydrographique par les pesticides (Wauchope, 1978) ;

3 - le gradient de pente est considéré en prenant en compte comme critère, la moyenne des pentes de la parcelle, les pentes étant calculées au pas du MNT. Trois classes ont été retenues avec comme bornes intermédiaires 3 et 5 %, correspondant à des seuils en terme de vitesse critique d'arrachement des particules (Pæsen, 1984) ;

4 - la longueur de la parcelle, calculée dans le sens de la pente, intervient également sur les vitesses de ruissellement et donc sur l'arrachement des particules de sol. Elle donne également une indication sur l'importance de la surface contributive traitée. Des seuils intermédiaires de 50 et 150 mètres, correspondant respectivement à des parcelles de petite, moyenne et grande tailles dans le contexte étudié, ont été adoptées ;

5 - la forme de la pente entre la parcelle et le réseau hydrographique est prise en compte en considérant comme critère la concavité de la parcelle ou la présence d'une zone concave en aval de la parcelle considérée. On évalue ainsi les possibilités d'infiltration ou de sédimentation en bas de versant, à la faveur d'une rupture de pente, comme c'est le cas dans les profils de pente convexo-concaves généralement rencontrés. Trois classes ont été considérées : la parcelle a une forme concave ; elle est protégée à l'aval par une zone de forme concave sur le chemin hydraulique entre le bas de la parcelle et le réseau hydrographique ; elle n'est pas protégée par une telle zone concave ;

6 - dans le même axe visant à évaluer les possibilités d'infiltration et de dépôt à l'aval de la parcelle considérée, l'occupation du sol en aval de la parcelle est prise en compte. Le critère retenu est la longueur du chemin hydraulique à l'aval de la parcelle correspondant à une occupation du sol considérée comme favorable à l'infiltration de l'eau : ici prairies et bois. Trois modalités ont été retenues, avec comme bornes intermédiaires 50 et 150 mètres ;

7 - toujours dans cet axe, la présence d'un talus associé à une haie en aval de la parcelle est un facteur retenu, avec deux modalités de présence ou absence.

Le tableau 1 présente d'une façon synthétique ces sept facteurs de risque, leurs modalités et leurs codifications. Dans cet article, nous présentons à titre d'illustration les résultats obtenus avec une méthode simplifiée prenant en compte cinq facteurs de risque parmi les sept cités : 1, 3, 4, 5, 6.

## Méthode de combinaison des facteurs et spatialisation

Une fois les critères et les intervalles de classes choisis pour chacun des facteurs de risque, la question qui se pose est celle du choix de la méthode de combinaison ou de conjonction des facteurs. De nombreuses méthodes existent. Le plus souvent, la méthode utilisée est la plus simple, c'est la méthode de pondération ou l'arbre de décision. La méthode de pondération a été écartée car elle pose le problème délicat du choix des coefficients de pondération. A l'opposé l'arbre de décision ne prend pas en compte le problème du rôle de la conjonction des facteurs.

Nous avons fait le choix d'utiliser une méthode hiérarchique de rang, utilisée par les Ministères français de la santé, de l'environnement et de l'agriculture pour le classement des molécules : la méthode SIRIS (Vaillant et al., 1995). Cette méthode hiérarchique de rang est en fait une méthode générale de combinaisons de facteurs de risque. Son usage n'est nullement lié ou limité à la question du classement des molécules ; elle peut être appliquée à tout autre problème de combinatoire de facteurs de risque. Cette méthode transforme des critères de décision quantitatifs ou qualitatifs, en variables qualitatives ordonnées. Cette stratégie ne limite donc pas l'information aux seules variables quantitatives. L'agrégation de différents critères est possible quelle que soit la nature des critères. On procède ensuite à un classement des critères par ordre de risque et à un choix de classes également rangées par ordre d'importance. Aux modalités défavorables sont attribuées des pénalités dont le total conduit à un rang sur une échelle de risque. La conjonction de modalités défavorables amplifie ainsi la pénalisation. Cette graduation des risques suit donc des règles logiques simples. Cette simplicité est un gage de flexibilité pour tester la sensibilité du modèle aux différents facteurs ou pour l'adapter à d'autres contextes, soit différents ou soit mieux informés. On peut alors ajouter ou choisir d'autres facteurs, modifier leur hiérarchisation, changer les critères ou les classes. Cependant la sophistication de ce type de méthode par le choix d'un nombre plus grand de facteurs ne constitue pas une réelle alternative. Elle impliquerait plus de règles de hiérarchisation et de choix de modalités, et comprendrait sans doute aussi plus d'arbitraire. Le choix de cette méthode, notamment de sa simplicité, correspond en définitive aux limites des connaissances actuelles sur les processus de transfert des pesticides.

## RÉSULTATS

Cette méthode a été appliquée à plusieurs bassins versants de Bretagne. Nous ne l'illustrerons ici qu'à partir de l'exemple du bassin versant de l'Aulne situé dans la région de Châteaulin. Dans la base de données sous SIG, un identifiant

Tableau 1 - Les sept facteurs de risque retenus, leur modalités et leur codification : D = très défavorable, d = défavorable, m = moyennement défavorable, 0 = non défavorable.  
 Table 1 - The seven risk factors selected in this study, with their mode of action and coding. D = highly unfavourable, d = moderately unfavourable, m = moderately unfavourable, 0 = not unfavourable.

	F1	note	F2	note	F3	note	F4	note	F5	note	F6	note	F7	note
Facteur	Distance de l'aparc au réseau hydrographique		Drainage de parcelle		Pente de la parcelle		Longueur de parcelle dans sens de la pente		Parcelle protégée par une zone concave		Parcelle protégée par une haie/talus		Parcelle protégée par une haie/talus	
Critère traduisant l'importance du facteur sous forme numérique	Le plus court des chemins hydrauliques entre la parcelle et le réseau hydrographique		Parcelle drainée		Moyenne de la pente des mailles du MNT qui appartiennent à la parcelle		Le plus long des chemins hydrauliques traversés par la parcelle		Parcelle protégée par une zone concave		Le plus court des chemins hydrauliques traversés par la parcelle		Parcelle protégée par une haie/talus	
1	distance = 0	D	oui	d	moins de 3%	0	moins de 50 m	0	Parcelle concave	0	Parcelle occupée par une culture à minime ruissellement	0	oui	
2	distance < 50 m	d	non	0	entre 3 et 5%	m	entre 50 et 150 m	m	Parcelle protégée par une zone concave à l'aval	m	Parcelle protégée par une culture à minime ruissellement à l'aval	m	non	d
3	distance comprise entre 50 et 200 m	m			plus de 5%	d	plus de 150 m	d	Parcelle protégée par une zone concave à l'aval		Parcelle protégée par une culture à minime ruissellement à l'aval			m
4	distance > 200 m	0												

est attribué à chaque parcelle. Il lui est aussi attribué une classe d'occupation du sol par importation des données d'occupation de sol dans le MNT (figure 1). Un premier module informatique a pour charge de calculer les critères correspondant aux facteurs de risque. Un deuxième module, indépendant du premier, a pour charge de calculer la note finale, c'est-à-dire le rang SIRIS de chaque parcelle. Une procédure d'interrogation parcelle par parcelle est disponible au niveau du logiciel. Elle permet d'afficher les valeurs des différents critères (figure 2). L'étendue des rangs SIRIS est ensuite partagée en quatre classes, correspondant à quatre niveaux de risque des parcelles de maïs (figure 3). Les notes de rang SIRIS s'étendent en théorie de 0 à 226, pour le cas traité ici comportant cinq facteurs de risque avec 2, 3 ou 4 modalités. La parcelle qui présente, dans le cas d'étude, le risque le plus grand a une note SIRIS de 130. En effet dans le contexte du bassin versant de l'Aulne, les parcelles les plus à risque ne combinent pas simultanément tous les facteurs de risque. Les parcelles collées au réseau hydrographique se trouvent dans une situation de pente faible et en zone concave. Leur rang est alors du type D0d0d et leur note SIRIS de 130 (parcelle type 2 du tableau 3).

On peut constater que les rangs SIRIS des parcelles de maïs sont distribués régulièrement (figure 3). Les bornes des quatre classes de risque choisies sont les suivantes : 32, 60, 92. Une représentation cartographique, selon ces classes, peut alors être réalisée (figure 4).

L'effet de la hiérarchie des facteurs peut être décrit (tableau 2) : seul le premier facteur de risque peut à lui seul avoir un effet primordial sur la classe de risque finale. Les autres facteurs ne peuvent à eux seuls placer une parcelle dans une classe maximale de risque. C'est alors la combinaison des facteurs qui joue. Les tableaux 2 et 3 illustrent bien cet effet souhaité par l'utilisation de la méthode SIRIS vis à vis de la combinaison des facteurs.

Le rang SIRIS a été calculé pour quelques parcelles se trouvant dans des situations types dans le bassin versant (tableau 3). Il permet de vérifier la vraisemblance des classements obtenus.

Les parcelles qui sont dans la classe de risque le plus élevé (rang SIRIS supérieur à 92) sont les suivantes :

ζ la parcelle de type 1 qui combine tous les facteurs de risque. Ce type de parcelle peut se rencontrer dans des vallons d'amont à profil transversal en V : parcelle convexe, collée au réseau hydrographique, en pente forte, orientée dans le sens de la pente, protégée par aucune zone tampon. Cette situation reste malgré tout assez rare ;

ζ la parcelle de type 2 qui se rencontre assez souvent en particulier dans le cas des vallées à fond plat comme sur l'Aulne inférieur dans la région de Châteaulin ; il en est de même pour la parcelle du type 3, allongée perpendiculairement à la pente ;

ζ les parcelles du type 4 et 5 qui sont à plus de 50 mètres du réseau hydrographique mais combinent d'autres facteurs de risque ;

ζ les parcelles de type 6 et 7 montrent des combinaisons de facteurs conduisant à une classe de risque 3. Les parcelles de type 8, 9 et 10 montrent des combinaisons de facteurs conduisant à une classe de risque 2 ;

ζ les parcelles de type 11 montrent une des combinaisons conduisant à un des rangs SIRIS les plus faibles : parcelle convexe mais protégée par une zone concave et une culture minimisant le ruissellement, dans le sens de la pente mais en pente faible et loin du réseau hydrographique, par exemple en situation de plateau faiblement incliné en position d'interfluve.

## DISCUSSION

### Adéquation des données aux processus de contamination des eaux

D'autres facteurs n'ont pu être retenus ici faute de données à résolution spatiale suffisante pour fournir une information spatialement distribuée, voire parcellaire. C'est le cas des facteurs pédologiques. Il s'agit en particulier de la teneur en matière organique, de l'indice de battance (Arousseau et al., 1996) et de la profondeur des sols qui jouent respectivement sur la rétention des molécules, le ruissellement hortonien et le ruissellement par saturation.

C'est aussi le cas des caractéristiques climatiques qui peuvent varier notablement sur des bassins versants d'ordre 3 ou 4. Il s'agit par exemple de l'intensité pluviométrique et du cumul pluviométrique (Arousseau et al., 1996) qui modifient l'occurrence du ruissellement hortonien et du ruissellement par saturation. Il s'agit aussi de la durée moyenne entre la date d'application des molécules et la première pluie, facteur souvent cité dans la bibliographie et qui peut être traduit par un critère tel que la fréquence des pluies d'importance supérieure à un seuil donné, facteur qui peut lui aussi varier notablement à ces échelles. Pour l'évaluation d'un indice parcellaire de risque dans des bassins versants de taille limitée, ces facteurs peuvent être considérés comme invariants à l'échelle du bassin versant étudié. Pour des bassins versants plus grands, leur introduction dans le formalisme SIRIS peut être envisagée si des données sont disponibles. Ces facteurs climatiques ont déjà été pris en compte pour l'évaluation d'indices de risque par bassins versants (Arousseau et al. 1996).

Enfin, la hiérarchie des facteurs, et implicitement, celle des processus de transfert, est liée aux caractéristiques des molécules, et notamment de leur solubilité. Par exemple, les écoulements de surface et de subsurface concernent surtout les molécules les plus solubles telles que l'atrazine alors que le ruissellement concentré par rigoles ou ravines concernera

Figure 1 - Carte de l'occupation du sol de la partie aval du bassin versant de l'Aulne. Cette carte résulte de l'importation dans le MNT d'une image d'occupation du sol classée selon cinq classes. La variable occupation du sol a été ensuite transformée en cinq couches binaires d'occupation du sol : parcelles de maïs, de céréales, de prairies, de bois, surfaces minérales (routes et urbain), eau. Ces cinq couches binaires sont ici représentées en surcharge sur une représentation hypsométrique de l'altitude. Trois modes de visualisation sont permis : visualisation 2D à plat, en bloc diagramme 3D ou en survol virtuel interactif temps réel à partir d'un logiciel et d'une machine de réalité virtuelle.

Figure 1 - Land-use map of the downstream part of the Aulne river catchment. The map was produced by importing a land-use image (with five ranks of risk class) into a DEM. The land-use variable was then converted into five binary land-use layers, i.e. : plots containing maize, cereals, grassland, woodland, mineral surfaces (roadways and built-up areas) and water. These five layers are here represented as overprinted colours on a hypsometric elevation map. Three modes of display are possible : flat 2D plan view, 3D block diagram and as a virtual interactive overflight. The latter is carried out in real time using a software application run on a virtual reality machine.

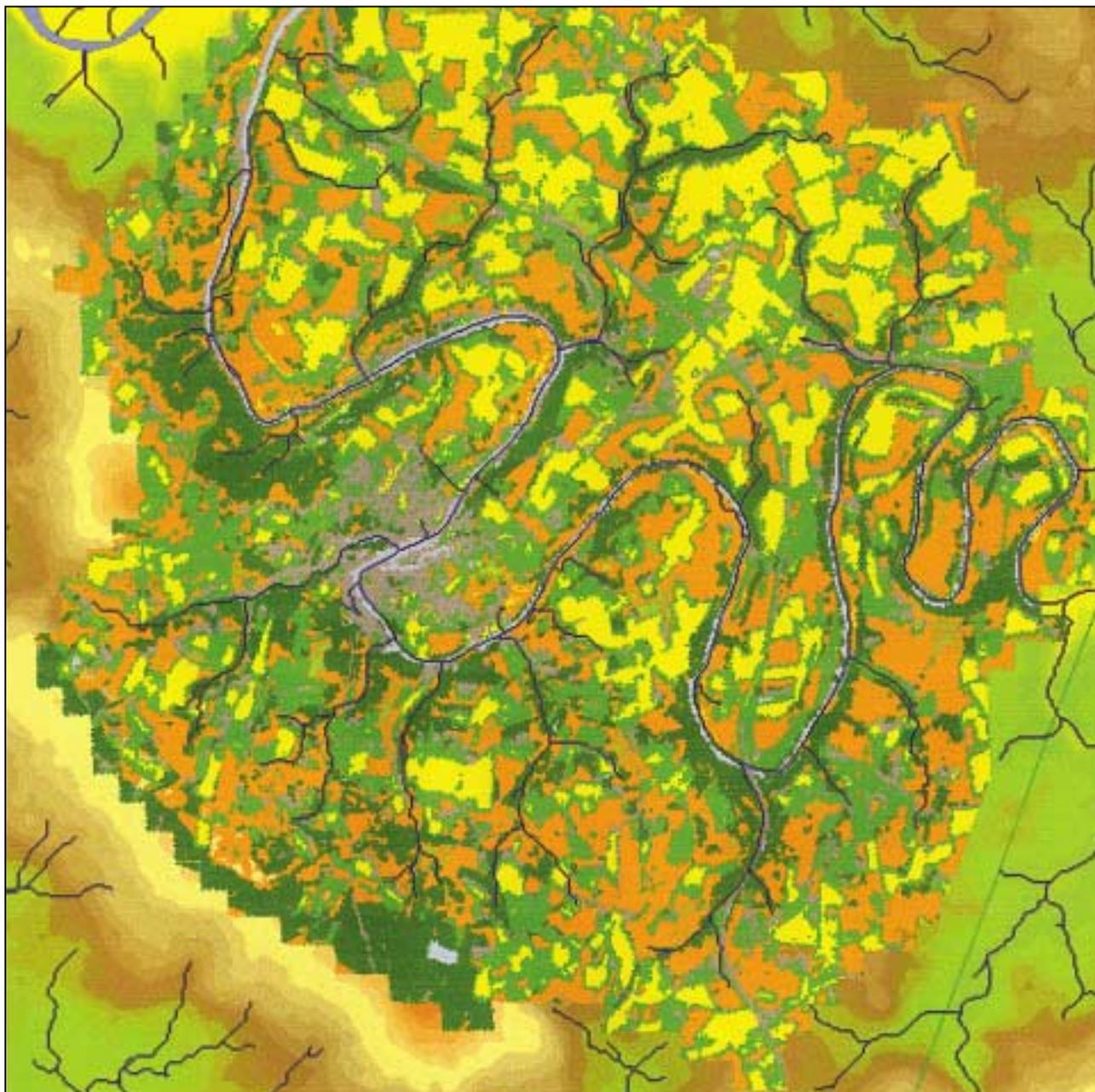
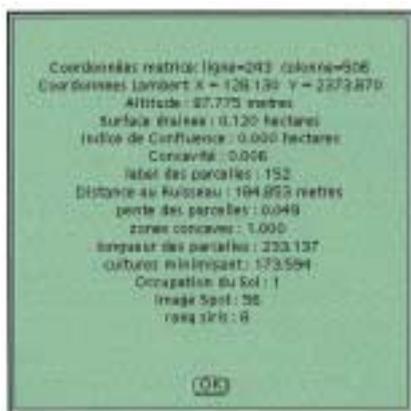


Figure 2 - Interrogation ponctuelle dans le logiciel de traitement de MNT, « MNTSURF ». Cette interrogation fournit le numéro de la parcelle de maïs (label de la parcelle), les valeurs numériques des cinq facteurs de risque et le rang SIRIS de la parcelle.

Figure 2 - Pin-point interrogation using the DEM processing software « MNTSURF », yielding the number of the maize plot (plot identifier) as well as the numerical values of the five risk factors and the SIRIS rank of the plot.



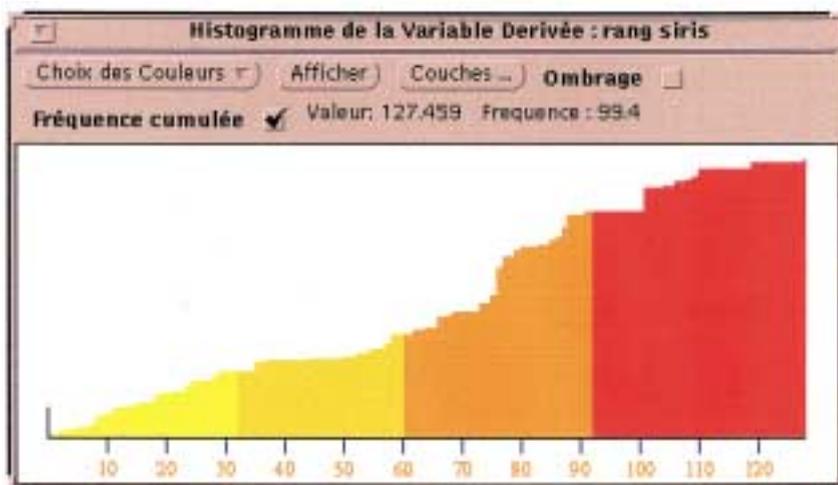
un panel plus large de molécules. Là aussi le modèle pourrait être élargi en hiérarchisant au plus près les risques en fonction des caractéristiques des molécules et des processus hydrologiques associés.

### Intérêt et limite du modèle d'estimation d'un risque parcellaire

La démarche présentée ici se limite à une évaluation spatiale pour des processus qui se déploient en fait dans l'espace et le temps. Les apports de pesticides en agriculture se font selon un calendrier agricole assez bien connu. Les herbicides du maïs sont apportés entre une et trois fois, entre le début mai, en pré-levée, et fin juin, en rattrapage au stade 6-8 feuilles, alors que les traitements sur blé se font plus fréquemment, mais essentiellement durant la période hivernale. De même, le ruissellement hortonien concerne la période printemps-été en relation avec une occurrence d'averses de forte intensité et des cultures de maïs encore peu couvrantes, alors que le ruissellement par saturation, les écoulements de subsurface, les écoulements liés au drainage agricole concernent surtout la reprise des écoulements en automne et en hiver.

Figure 3 - Histogramme des rangs SIRIS sur la partie aval du bassin versant de l'Aulne. Cet histogramme est une des fenêtres graphiques du logiciel de traitement du MNT, « MNTSURF ».

Figure 3 - Histogram of SIRIS ranks obtained for the downstream part of the Aulne river catchment. This histogram is one of the graphics windows available with the DEM processing software « MNTSURF ».

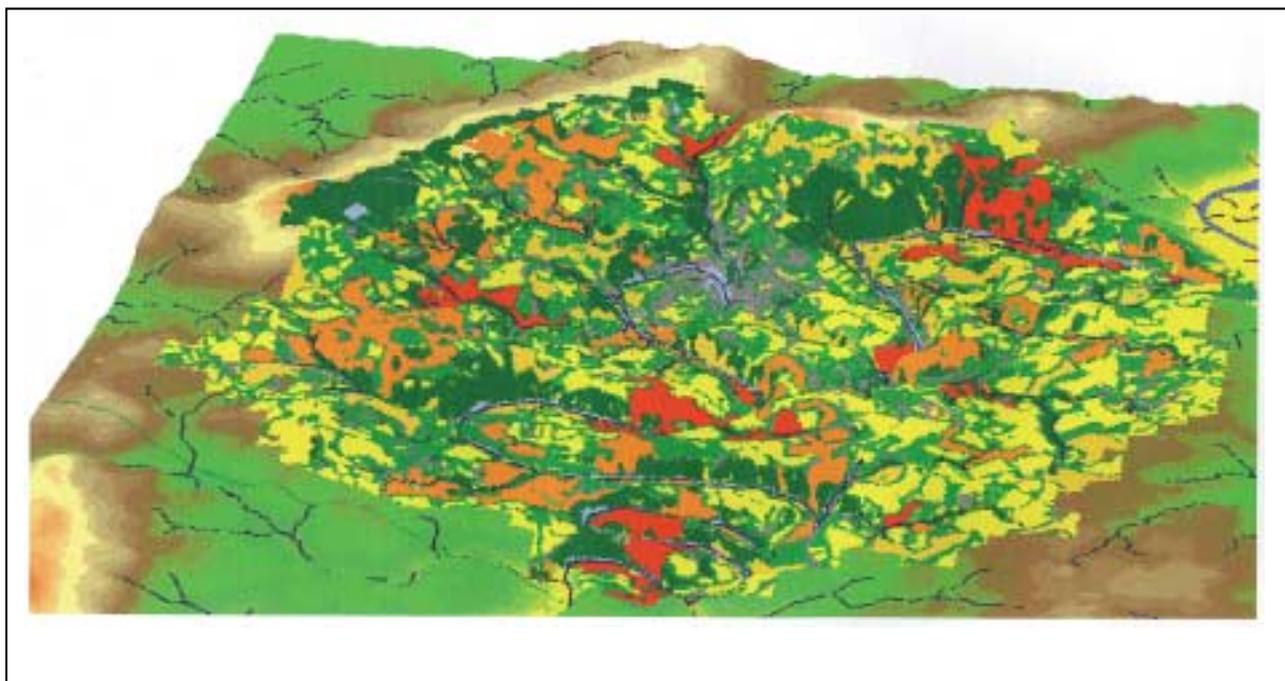


Les facteurs retenus ici traduisent essentiellement des risques de contamination des eaux par les désherbants du maïs, dus à des écoulements rapides dans la période proche des traitements. On pourrait s'attacher à traiter d'autres cas comme celui de la contamination des eaux par les herbicides du blé en période hivernale. Cependant l'établissement d'un modèle dynamique, donnant une évaluation du risque à la fois en terme d'exposition et d'effet, intégré sur une période de temps donnée est encore éloigné. En effet, cette extension nécessiterait de prendre en compte de façon explicite les variations des quantités disponibles, et donc les processus de dégradation et de rétention, la dynamique climatique en interaction avec la dynamique hydrique et structurale du sol, ce qui alourdirait la démarche et requerrait d'autres choix méthodologiques.

La transposition de ce modèle à d'autres contextes géographiques, tant physiques qu'agronomiques, passe par une nouvelle formulation du modèle, en terme de choix et de hiérarchie des facteurs, de choix des classes. Cette nouvelle formulation, une fois réalisée, est par contre facile à mettre en œuvre informatiquement dans le cadre de la méthode SIRIS. La transposition est techniquement simple à condition de disposer d'un diagnostic fiable des facteurs de risque. Cette démarche s'apparente à une démarche d'expert formalisée dans un modèle de structuration et de spatialisation des facteurs de risque. Dans l'état actuel, la validation expérimentale par des mesures de contamination des eaux s'avère difficile

Figure 4 - Bloc diagramme 3D représentant l'occupation du sol et le rang de risque SIRIS des parcelles de maïs de la partie aval du bassin versant de l'Aulne. L'occupation du sol est représentée en cinq classes d'occupation du sol : parcelles de maïs (orange), de céréales (jaune), de prairies (vert clair), de bois (vert foncé), surfaces minérales : routes et urbain (gris), eau (bleu). Ces cinq couches binaires sont ici représentées en surcharge sur une représentation hypsométrique de l'altitude. L'indice de risque SIRIS a été calculé pour chaque parcelle de maïs et partitionné en quatre classes de risque, représentées en quatre niveaux de couleur allant de l'orange clair au rouge. Trois modes de visualisation sont permis : visualisation 2D à plat, en bloc diagramme 3D ou en survol virtuel interactif temps réel par traitement par un logiciel et une machine de réalité virtuelle.

Figure 4 - 3D block diagram showing land use and rank of the SIRIS risk for maize plots in the downstream part of the Aulne river catchment. The land use is split into five classes, i.e. : plots containing maize (coloured orange), cereals (yellow), grassland (light green), woodland (dark green), mineral surfaces (grey) and water (blue). These five layers are here represented as overprinted colours on a hypsometric elevation map. The SIRIS risk index is calculated for each plot and then split into four risk classes, which are represented as four colour levels ranging from light orange to red. Three modes of display are possible : flat 2D plan view, 3D block diagram and as a virtual interactive overflight. The latter is carried out in real time using a software application run on a virtual reality machine.



compte tenu du coût, de la variabilité spatiale et temporelle des concentrations en pesticides dans les eaux à l'échelle des bassins versants. Les données obtenues à ces échelles confortent cependant la hiérarchie des premiers facteurs retenus dans le contexte de l'étude tels que l'importance de la surface en maïs, la distance de la sole de maïs au ruisseau ou l'existence d'un drainage agricole (Gillet et al., 1995).

Cette démarche peut être envisagée à d'autres échelles. A l'échelle du bassin versant, elle permet, comme on l'a vu, de localiser les domaines géographiques les plus sensibles aux risques d'écoulements rapides et donc de contamination des eaux. Il s'agit alors d'identifier les secteurs géographiques où des actions prioritaires doivent être mises en œuvre pour limiter cette contamination. A l'échelle de l'exploitation, la

distribution statistique des évaluations parcellaires, leur répartition géographique peuvent permettre de faire un diagnostic des contraintes physiques qui pèsent sur l'exploitation en relation avec le système de production et de culture. A l'échelle de la parcelle, ce diagnostic doit conduire à une adaptation raisonnée de l'assolement et des itinéraires techniques en fonction d'une estimation du risque parcellaire. Les outils proposés actuellement dans cette démarche répondent bien à l'objectif de diagnostic des secteurs à risque sur des bassins versants pilotes, démarche qui est actuellement mise en œuvre sur quelques bassins versants représentatifs de la Bretagne. Ce sont des outils qui requièrent encore des moyens sophistiqués (station de travail, environnement Unix). La généralisation de cette démarche

Tableau 2 - Effet de la méthode SIRIS sur le plus petit rang et le plus grand rang de risque, ainsi que sur la plus petite et la plus grande classe finale de risque.

Table 2 - Effect of SIRIS method on assessing the smallest and the largest ranking risk classes, as well as on the smallest and the largest final risk class.

Facteur	Modalité	Note	Pluspetit rang SIRIS	Plus grand rang SIRIS	Pluspetite classe de risque	Plus grande classe de risque
F1	distance	0	0	54	1	2
F1		m	21	111	1	4
F1		d	43	169	2	4
F1		D	64	226	3	4
F2	Pente	0	0	166	1	4
F2		m	7	196	1	4
F2		d	15	226	1	4
F3	longueur	0	0	181	1	4
F3		m	4	203	1	4
F3		d	8	226	1	4
F4	concavité	0	0	162	1	4
F4		m	2	205	1	4
F4		d	9	226	1	4
F5	Culture minimisante	0	0	187	1	4
F5	l'érussellement	m	1	206	1	4
F5		d	2	226	1	4

nécessite des outils plus conviviaux déployés sur des supports courants (PC). Elle est en fait possible, la principale difficulté étant du côté de la disponibilité des bases de données géographiques, MNT au pas de 20 mètres et données d'occupation du sol obtenues à partir d'images satellitaires.

## CONCLUSION

Une approche de l'évaluation d'un risque parcellaire pour la contamination des eaux superficielles a été proposée ici. Elle repose sur un choix et un classement de facteurs, eux-même traduits en critères qualitatifs ordonnés en terme de risque, et combinés selon la méthode SIRIS. Ces facteurs prennent essentiellement en compte la topographie, l'occupation du sol et les structures paysagères. Ils s'attachent ainsi à évaluer les risques d'écoulements rapides donnant lieu à des pics de concentration en pesticides dans les eaux superficielles dans la période suivant les traitements herbicides.

Cette méthode est ici développée dans le contexte hydrogéologique et agricole de la Bretagne. Elle s'attache au cas particulier de la contamination des eaux par les désherbants du maïs. Elle a été recommandée par la CORPEP et le comité paritaire de Bretagne-Eau-Pure, pour le classement des parcelles à risque sur les bassins versants de démonstration du programme

Bretagne-Eau-Pure. Elle a été présentée devant deux instances nationales : le comité de liaison et le conseil de l'information géographique du Ministère de l'Agriculture. La simplicité de la méthode permet son adaptation à d'autres contextes moyennant une structuration adaptée de l'information.

Cette démarche vise à localiser les secteurs les plus sensibles pour la contamination des eaux sur des bassins versants pilotes. Il s'agit d'identifier les secteurs où des actions prioritaires doivent être menées pour limiter ces contaminations. Cette démarche pourrait aussi être développée, avec cependant des outils plus conviviaux, pour discuter des modifications de l'assolement ou des itinéraires techniques, en fonction des contraintes imposées par le milieu physique à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation agricole.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne qui a financé cette étude dans le cadre d'un contrat de recherche. Nous remercions les experts qui ont été consultés lors du lancement de ce programme. Nous remercions également Frédérique Simon qui a réalisé son mémoire de fin d'étude dans le cadre de ce programme.

Tableau 3 - Analyse de onze parcelles type : facteurs de risque, rang SIRIS et classe finale de risque.

Table 3 - Analysis of the eleven plot types in terms of risk factor, rank of SIRIS risk class and final risk class.

Type de parcelle	Distance hydraulique au réseau hydrographique	Pente de la parcelle	Longueur de la parcelle dans le sens de la pente	Protection par une zone concave	Protection par une culture minimisant le ruissellement		Rang SIRIS	Classe de risque
1	Près du réseau	Pente forte	Parcelle longue	Non protégé par une zone concave	Non protégé par une culture minimisant le ruissellement	32222 Ddddd	226	4
2	Près du réseau	Pente faible	Parcelle longue	Zone concave	Non protégé par une culture minimisant le ruissellement	30202 D0d0d	130	4
3	Près du réseau	Pente faible	Parcelle courte	Zone concave	Non protégé par une culture minimisant le ruissellement	30002 D000d	93	4
4	Relativement près du réseau	Pente moyenne	Parcelle longue	Non protégé par une zone concave	Non protégé par une culture minimisant le ruissellement	21222 dmddd	143	4
5	Relativement près du réseau	Pente moyenne	Parcelle longue	Protégé par une zone concave	Non protégé par une culture minimisant le ruissellement	21212 dmdmd	128	4
6	Relativement près du réseau	Pente faible	Parcelle courte	Protégé par une zone concave	Protégé par une culture minimisant le ruissellement	21011 dm0mm	64	3
7	Relativement loin du réseau	Pente forte	Parcelle longue	Protégé par une zone concave	Protégé par une culture minimisant le ruissellement	12211 mddmm	89	3
8	Relativement loin du réseau	Pente moyenne	Parcelle moyenne	Protégé par une zone concave	Protégé par une culture minimisant le ruissellement	11111 mmmmm	60	2
9	Relativement loin du réseau	Pente moyenne	Parcelle courte	Protégé par une zone concave	Protégé par une culture minimisant le ruissellement	11011 mm0mm	48	2
10	Loin du réseau	Pente forte	Parcelle longue	Protégé par une zone concave	Protégé par une culture minimisant le ruissellement	02211 0dmm	40	2
11	Loin du réseau	Pente faible	Parcelle longue	Protégé par une zone concave	Protégé par une culture minimisant le ruissellement	00210 00dm0	3	1

## BIBLIOGRAPHIE

- Arousseau P., Bouedo T., Squidant H. et Quidu O. 1997 - Serveur html du Laboratoire de Spatialisation Numérique. <http://viviane.roazhon.inra.fr/spanum/index.htm>
- Arousseau P., Squidant H., Baqué M.C. et Simon F., 1996 - Analyse des facteurs de risque de transferts de pesticides dans les paysages. Établissement d'une hiérarchie de ces risques : application au calcul d'un indice de risque par bassin versant et par parcelle. Rapport de contrat pour l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 22 pages, 12 cartes, 12 tableaux, 6 figures.
- Arousseau P., et Squidant H. 1995 - Rôle environnemental et identification cartographique des sols hydromorphes de bas fonds. Ingénieries EAT - 1995, 75-85.
- Barrioso, E., Calvet, R., Schiavon, M., Soulas, G., 1996 - Les pesticides et les polluants organiques des sols. Transformation et dissipation. Etude et gestion des sols, 3, 279-295.
- BRGM, 1975-1979 - Cartes de vulnérabilité à la contamination des eaux souterraines (FF : 1/250 000). BRGM, Orléans.
- Crave, P., et Davy, P., 1997 - Scaling relationships and channel network from two large-magnitude watershed in French Brittany. Tectonophysics, 269, 91-111.
- Curmi, P., Durand, P., Gascuel-Oudou, C., Hallaire, V., Merot, P., Robin, P., Trolard, F., Walter, C., et Bourrie, G., 1995 - Le programme CORMORAN-INRA : de l'importance du milieu physique dans la régulation biogéochimique de la teneur en nitrate des eaux superficielles. Journal Européen d'Hydrologie, 26, 37-56.
- Gascuel-Oudou, C., Cros-Cayot, S. et Durand, P., 1996a - Spatial variation of sheet flow and sediment transport on an agricultural field. Earth surf. and landform proc., 21, 843-851.
- Gascuel-Oudou, C., Heddadj, D., Clement, M., Maquerre, M., Seux, R., 1996b - Impact des pratiques de désherbage sur le transfert des eaux et des phytosanitaires. Rapport CORPEP, 50 p.
- Gillet, H., Clement, M., Choisy, A.M., Seux, R., 1995 - Evaluation du niveau de contamination des eaux de surface par les produits phytosanitaires. Journal Européen d'hydrologie, 26, 57-92.
- Gouy, V., 1993 - Contribution de la modélisation à la simulation du transfert des produits phytosanitaires de la parcelle agricole vers les eaux superficielles. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Université Louis Pasteur, 350p.
- Hollis, J.M., 1990 - Mapping the vulnerability of aquifers and surface waters to pesticide contamination at the national/regional scale. In 'Pesticides in soil and waters : current perspectives, Ed. A. Walker, BCPC monograph, 47, Lavenham Press Limited, Lavenham, 165-174.
- Leleux, A., Arousseau, P. et Roudaut, A., 1988 - Synthèse cartographique régionale à partir d'analyses de terre. Science du Sol, 26, 1, 29-40.
- Merot, P., Gascuel-Oudou, C., Walter, C., Zhang, X., Molenat, J, sous presse - Influence du réseau de haie d'un paysage bocager sur les écoulements de surface. Water Resour.
- Orhon, L., 1993 - Influence de la distance des épandages au ruisseau collecteur sur le transfert par ruissellement des pesticides. Mémoire de DEA, 28p.
- Patty, L., 1997 - Limitation du transfert par ruissellement vers les eaux superficielles de deux herbicides (isoproturon et diflufenicanil). Méthodologie analytique et étude de l'efficacité de bandes enherbées. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, 217p.
- Poesen, J., 1984 - The influence of slope angle on infiltration rate and hortonian overland flow volume. Z. Geom., N.F., Sup., 49, 117-131.
- Roussel, O., 1997 - Mise en œuvre d'un indicateur d'évaluation de l'impact environnemental des pesticides. Mémoire ENSAR, Rennes, 52 pp.
- Simon, F., 1994 - Analyse des facteurs de risque de transferts des pesticides dans les paysages. Établissement d'une hiérarchie de ces risques. Application à des bassins versants. Mémoire ENSAR, Rennes, 46 pp.
- Schiavon, M., 1992. Données actuelles sur les transferts d'atrazine dans l'environnement. Agronomie, 12, 129-139.
- Schiavon, M., Perrin-Garnier, C., Portal, J.M., 1995 - La pollution de l'eau par les produits phytosanitaires : état et origine. Agronomie, 15, 157-170.
- Squillace, P.J., Thurman, E.M., 1992. - Herbicide transport in rivers : importance of hydrology and geochemistry in nonpoint-source contamination. Environ. Sci. Technol., 26, 538-544.
- Vaillant, M., Jouany, J.M., Devillers, J., 1995 - A multicriteria estimation of the environmental risk of chemicals with the SIRIS method. Toxicology Modeling, 1, 57-72.
- Walter, C., Bouedo, T. et Arousseau, P.- 1996 - Cartographie communale des teneurs en matière organique des sols bretons et analyse de leur évolution temporelle de 1980 à 1995. Rapport final de la convention d'étude entre le Conseil Régional de Bretagne, l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et l'ENSAR. 30p., 6 cartes.
- Wauchope, R.D., 1978 - The pesticide content of surface water draining from agricultural fields, a review. J. Environ. Qual., 7, 459-472.