

Classification des bassins versants alsaciens en fonction de leur sensibilité aux produits phytosanitaires

R. Koller⁽¹⁾, J. Sauter⁽¹⁾, S. Pierrillas⁽¹⁾ et M. Viro⁽²⁾

(1) ARAA, Association pour la Relance Agronomique en Alsace, 2 rue de Rome, BP 30022 Schiltigheim, 67013 Strasbourg Cedex

(2) APRONA, Association pour la protection de la nappe phréatique de la plaine d'Alsace, 140 rue du Logelbach, 68000 Colmar

RÉSUMÉ

Une classification des bassins versants en fonction de leur sensibilité aux produits phytosanitaires a été réalisée en 2002 pour les 8300 km² du territoire alsacien. Son objectif était de hiérarchiser les zones prioritaires pour optimiser le plan de surveillance de la qualité des eaux et la mise en place de programmes d'actions visant à réduire les pollutions des eaux superficielles et souterraines.

L'étude est inspirée en partie de la méthodologie de diagnostic régional proposée par le CORPEN (Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles Respectueuses de l'ENVironnement). Elle repose sur l'élaboration d'un modèle spécifique d'organisation des connaissances concernant la circulation de l'eau et le transfert des produits phytosanitaires, fondé sur l'identification et la compréhension des facteurs qui les commandent. Ce modèle prend en compte des processus jugés pertinents dans le contexte régional. Le travail a porté sur l'analyse de la sensibilité des eaux de surfaces et des eaux souterraines par bassin versant, déterminée à partir de la vulnérabilité (prise au sens d'une aptitude d'une ressource en eau à être atteinte par une pollution) modulée par les phénomènes de dilution potentielle de la pollution par les masses d'eau.

L'analyse s'est appuyée sur l'utilisation d'un système d'information géographique et a été rendue possible grâce à l'existence des différentes couches de données spatialisées descriptives du milieu, en particulier la base de données régionale sur les sols d'Alsace constituée dans le cadre du programme national Inventaire Gestion et Conservation des Sols (IGCS) piloté par le Ministère de l'agriculture et l'INRA. Pour la mise en œuvre de cette méthode, la principale limite rencontrée a néanmoins été la disponibilité des données nécessaires à l'analyse.

L'analyse a permis la classification des bassins versants. La validation des résultats obtenus est partielle, et la démarche reste soumise à une analyse critique. Ce travail constitue la première étape d'une analyse du risque potentiel de contamination des eaux, qui nécessiterait de disposer d'une connaissance des pratiques relatives à l'usage des produits phytosanitaires. Elle constitue néanmoins d'ores et déjà une incitation à l'action aux échelles locales.

Mots clés

Bassins-versants – pollution diffuse des eaux – phytosanitaires – SIG – base de données sur les sols IGCS- modèle

SUMMARY

This paper presents a classification of Alsatian catchments according to their sensitivity to pesticides contaminations. The study was carried out in 2002 and concerns the entire region (8300 km²). The main objective was the establishment of a target area hierarchy, which allows to optimize both the monitoring strategies of water quality and the definition of measures to reduce the contamination of ground and surface water.

The study was partly based on the methodology concerning regional diagnostics proposed by the CORPEN (Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles Respectueuses de l'ENVironnement). The CORPEN method integrates knowledge about water circulation and pesticides transfers in a specific model, and accounts for the principal controlling factors of these processes at the regional scale. For each Alsatian catchment, the sensitivity of surface and groundwater was determined as a function of the vulnerability (i.e. the ease at which a pollution can reach the considered water body) and of the potential dilution effect of the contaminants by the water bodies.

The analyses were carried using a geographical information system in which indispensable spatial data about the physical environment were stored. A data layer of particular importance for this study was the regional soil database of the Alsace which was constructed in the framework of the national IGCS program (Inventaire Gestion et Conservation des Sols), directed by the Ministry of Agriculture and the INRA. However, the data requirements of the method are heavy, and the collection of all the data necessary for the analyses was the main difficulty.

The resulting catchment classification was partially validated and a critical examination of the concepts of the method is still going on. The present study constitutes a first step towards the assessment of the potential risk of water pollution by pesticides. Solid information about agricultural practices with respect to pesticides use in the field is required to improve the assessment, though this study already constitutes an incitement to local actions.

Key-words

RESUMEN

CLASIFICACIÓN DE LAS CUENCAS DE ALSACIA EN FUNCIÓN DE SU SENSIBILIDAD A LOS PRODUCTOS FITOSANITARIOS

Una clasificación de las cuencas, en función de su sensibilidad a los productos fitosanitarios fue realizada en 2002 para los 8300km² del territorio alsaciano. Su objetivo era jerarquizar zonas prioritarias para optimizar el plano de vigilancia de la calidad de las aguas y la organización de programas de acciones para reducir las contaminaciones de las aguas superficiales y subterráneas.

El estudio se inspira en parte de la metodología de diagnóstico regional propuesta por el CORPEN (Comité de Orientación para las Prácticas agrícolas Respetuosas del Medio Ambiente). Se basa sobre la elaboración de un modelo específico de organización de los conocimientos que concierne la circulación del agua y la transferencia de los productos fitosanitarios, fundado sobre la identificación y la comprensión de los factores que actúan. Este modelo toma en cuenta procesos juzgados pertinentes en el contexto regional. El trabajo llevó sobre el análisis de la sensibilidad de las aguas superficiales y de las aguas subterráneas por cuencas, determinado a partir de la vulnerabilidad (tomada en el sentido de un aptitud de un recurso en agua a ser alcanzado por una contaminación) modulada por los fenómenos de dilución potencial de la contaminación por las masas de agua.

El análisis apoyándose sobre el uso de un sistema de información geográfico fue posible gracias a la existencia de diferentes capas de datos especializados descriptivas del medio, en particular el banco de datos regional sobre los suelos de Alsacia constituido en el cuadro del programa nacional Inventario, Gestión y Conservación de los Suelos (IGCS) coordinado por el ministerio de Agricultura y el INRA. Para la aplicación de este método, el principal limitante encontrado fue la disponibilidad de los datos necesarios al análisis.

El análisis permitió la clasificación de las cuencas. La validación de los resultados es parcial, y el enfoque queda sometido a un análisis crítico. Este trabajo constituye la primera etapa de un análisis de un riesgo potencial de la contaminación de las aguas, que necesitarían disponer de un conocimiento de las prácticas relativas al uso de los productos fitosanitarios. Constituye sin embargo actualmente una incitación al acción a las escalas locales.

Palabras claves

Cuenca, contaminación difusa de las aguas, fitosanitarios, SIG, banco de datos sobre suelos IGCS, modelo.

Comme les autres régions françaises, l'Alsace est concernée par la contamination des eaux par les produits phytosanitaires relevée au niveau national par l'IFEN¹. Cette contamination concerne à la fois les eaux superficielles et les eaux souterraines. L'enjeu est particulièrement important vis-à-vis des eaux souterraines, puisque 75 % de l'alimentation en eau domestique et 50 % des besoins en eau industrielle sont assurés à partir d'une unique ressource, la nappe phréatique du Rhin et de ses affluents.

Les origines suspectées de ces contaminations sont de deux types :

- Des pollutions ponctuelles, liées aux risques de fuites qui accompagnent la manipulation des produits phytosanitaires en amont et en aval de l'application, fuites accidentelles ou liées à l'absence de précautions suffisantes. Ce type de pollution concerne tous les utilisateurs de produits phytosanitaires, qu'ils soient professionnels ou amateurs et il est largement maîtrisable par la combinaison d'une vigilance permanente, d'équipements adaptés et du respect de procédures de stockage et de manipulation. La maîtrise de ce risque de pollution ne dépend pas des caractéristiques du territoire mais du degré de maîtrise des utilisateurs des produits phytosanitaires ;

- Des pollutions diffuses, liées au risque d'entraînement des substances actives appliquées ou de leurs métabolites au delà des limites du champ en milieu agricole, de la zone traitée en milieu non agricole. Les conditions particulières d'état du milieu et leur évolution après l'application vont largement déterminer les possibilités de mouvement des substances actives et leur transfert vers différents compartiments de l'environnement, en particulier les eaux de surface et les eaux souterraines. Ainsi le risque de pollution diffuse dépend à la fois des pratiques de traitement et de la sensibilité du milieu.

Les connaissances disponibles sur le comportement des substances actives phytosanitaires appliquées à une parcelle d'une part, et sur les facteurs de transfert vers les eaux d'autre part, sont suffisantes d'un point de vue qualitatif pour envisager la construction d'une analyse objective de la sensibilité du milieu, première étape vers une analyse plus complète du risque de pollution.

C'est cette possibilité qui a motivé l'étude réalisée en Alsace. Celle-ci vise une analyse comparative de la sensibilité des bassins versants, fondée sur l'exploitation croisée de différentes données spatialisées, descriptives du milieu. Les données descriptives des sols de la région, rassemblées et gérées par l'ARAA² dans une base de données respectant l'architecture DONESOL³ du programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols, ont été largement uti-

lisées. Elles ont été complétées par d'autres données spatialisées descriptives des autres facteurs déterminants de la sensibilité des bassins versants.

La finalité d'une telle étude est de hiérarchiser les zones prioritaires au sein du territoire régional tant pour la surveillance de la qualité des eaux que pour l'élaboration de programmes d'action. Après un rappel des enjeux nous présentons les connaissances et les données mobilisées pour l'étude, le modèle de traitement des informations et discutons des limites de ce travail.

Les mécanismes de transfert des substances actives : des connaissances mobilisables

Les mécanismes qui commandent le transfert vers la ressource en eau des produits phytosanitaires appliqués sur la parcelle sont identifiés. Ce transfert suit bien évidemment les chemins de l'eau au sein du bassin versant. Dans la parcelle, ces chemins de l'eau sont déterminés par les caractéristiques et les états locaux des sols. Au delà des limites du champ, à l'échelle du versant, les circulations de l'eau issue des parcelles vont alimenter les ressources en eau souterraines et / ou superficielles après un parcours plus ou moins long et complexe commandé par la pédologie, la topographie, la géologie et la structure du paysage (Ambroise, 1999).

Les molécules de substances actives entraînées par l'eau circulant dans les parcelles interagissent avec les milieux traversés. Les capacités d'entraînement sont ainsi très variables selon les chemins suivis : les concentrations résultantes dans l'eau à la sortie des parcelles varient ainsi de 2 à 3 ordres de grandeur selon le processus de transfert, eau de ruissellement intense, eau issue du réseau de drainage, eau de percolation au bas de la zone racinaire (Voltz et Louchart, 2001). Dans tous les cas, à la dérive atmosphérique près, le compartiment sol est la première interface entre l'application d'un produit phytosanitaire et la ressource en eau. Ses caractéristiques et son état vont déterminer le devenir de l'eau apportée par les précipitations, d'abord à la surface du sol, puis en profondeur.

Ces connaissances ont permis au CORPEN⁴ de proposer dès 1999 une méthodologie d'analyse du risque de transfert des substances actives à l'échelle de la parcelle (coll., 1999 ; Réal, 2003). Celle-ci place en première étape une identification de la circulation dominante de l'eau dans la parcelle : l'eau excédentaire se répartit entre infiltration (rapide ou lente), ruissellement et écoulement subsuperficiel. Cette répartition est commandée par des caractéristiques de milieu :

- pour le sol : sensibilité à la battance, hydromorphie, présence d'une rupture de perméabilité, présence de drains, réserve utile et pierrosité ;
- pour les pluies : intensité et volume des pluies ;
- pour la topographie : la pente.

Au-delà des limites de la parcelle, l'identification des chemins de l'eau et des interactions possibles des substances actives avec les

1 : IFEN = Institut Français de l'Environnement

2 ARAA = Association pour la Relance Agronomique en Alsace

3 : DONESOL = Structure de base de données multi-échelle permettant de gérer à la fois des données de sols ponctuelles (solums, analyses de terres) et spatialisées (unités cartographiques de sols composées de types de sols déclinés en strates)

4 : CORPEN = Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'ENvironnement

milieux traversés mobilisent d'autres données descriptives :

- pour les eaux souterraines : existence d'une nappe, caractéristiques de cette nappe, nature et épaisseur de la zone non saturée, existence de circuits préférentiels (milieux karstiques) ;
- pour les eaux de surface : pente, voisinage d'un fossé ou d'un cours d'eau, existence de zones tampon.

Du fait que l'analyse parcellaire proposée vise la mise en œuvre de solutions pratiques de prévention des risques de transfert, elle intègre la prise en compte de facteurs plus locaux spécifiques à chaque parcelle, comme la teneur en matière organique du sol, les caractéristiques de comportement des substances actives utilisées ou utilisables, la nature et l'état du couvert végétal ou son absence, l'existence d'un réseau de drainage.

Sans prétendre se substituer au diagnostic parcellaire élaboré pour l'action locale proposé par le CORPEN, il est envisageable avec une approche semblable, de qualifier la sensibilité potentielle relative des bassins versants d'une région vis-à-vis du risque de contamination diffuse par les produits phytosanitaires et de définir les zones dans lesquelles des efforts particuliers de surveillance de la qualité des eaux, de diagnostic et de prévention des pollutions diffuses devront être entrepris. Plusieurs régions françaises ont entrepris des travaux de ce type (Gilles, 2001 ; Gravier, 1999 ; Toutan, 2001), et le CORPEN a lui-même élaboré et publié une méthodologie de diagnostic régional (coll., 2003).

Une transposition de la démarche à l'échelle de bassins versants est en effet possible en faisant appel aux capacités des systèmes d'information géographique, sous réserve de disposer de données spatialisées descriptives des éléments permanents du milieu : description de la topographie, des caractéristiques des sols, du sous-sol, de l'hydrologie et des structures paysagères pour les différentes unités hydrologiques d'une région (bassins versants et / ou zones d'alimentation des nappes souterraines). Elle requiert une formalisation de la démarche dans un modèle intégrant ces éléments de connaissance.

L'existence d'une base de données régionale sur les sols d'Alsace a permis de développer cette démarche en réponse à une demande d'expertise exprimée par l'autorité publique.

LE CONTEXTE RÉGIONAL ET LA DÉFINITION DE L'ÉTUDE

Une préoccupation croissante concernant la qualité des eaux et l'émergence de plans d'action

En Alsace, la qualité des eaux fait l'objet d'un suivi régulier et systématique concernant les produits phytosanitaires depuis 1997.

Les données concernant la qualité des eaux souterraines sont principalement issues d'opérations d'inventaire concernant les

grands aquifères de la région, la nappe phréatique du Rhin et de ses affluents d'une part (1997 et 2003), les nappes du Sundgau d'autre part (1998 et 2003). Ces inventaires montrent une contamination certaine par les produits phytosanitaires, qu'il s'agisse des substances actives ou de leurs métabolites pertinents. La proportion de points de mesure dépassant la norme de $0,5 \mu\text{g l}^{-1}$, valeur fixée pour la somme des substances actives, était respectivement de 9 % en 1997 dans la nappe rhénane et de 13 % en 1998 dans les nappes du Sundgau.

La qualité des eaux superficielles est régulièrement analysée chaque mois depuis 1997, sur un réseau constitué en 2002 de 16 points de mesure (réseau national de bassin). Sur les 15 points suivis en 2001, la situation est jugée préoccupante (mauvaise ou très mauvaise) pour les phytosanitaires sur 2/3 des points, au regard des critères du Système d'Évaluation de la Qualité, le SEQ-Eau.

Le préfet de Région a constitué en 2000 le GREPPAL (Groupe Régional Eaux et Produits Phytosanitaires d'Alsace), chargé d'établir des propositions pour bâtir un programme d'actions destiné à lutter contre la pollution par les produits phytosanitaires. Ce groupe est un lieu de concertation entre les différents acteurs, permettant un large débat des orientations proposées.

La définition de l'étude : une analyse de la sensibilité des bassins versants

En 2002, afin d'optimiser la mise en place des actions, le GREPPAL a proposé un travail de « Classification des bassins versants vis-à-vis du risque de pollution par les produits phytosanitaires » et sa réalisation en a été confiée à l'APRONA⁵ et à l'ARAA. Ce travail devait aussi bénéficier à la Commission Locale de l'Eau réunie pour la définition du SAGE⁶ Ill-nappe-Rhin, dont le périmètre correspond globalement à la plaine d'Alsace et dont l'un des enjeux est de garantir la qualité des eaux souterraines sur l'ensemble de la nappe alluviale rhénane d'Alsace. Cette nappe s'étend sur 1/3 du territoire alsacien et stocke un volume d'eau de l'ordre de 32 milliards de m³. Sa recharge est assurée pour 80 % par l'infiltration du Rhin et de ses affluents et pour 20 % par les eaux de pluie percolant à travers les sols.

Toutefois, et en accord avec les commanditaires représentés par la DIREN Alsace et la DRAF-SRPV, l'objectif de l'étude s'est limité à une classification des différents territoires alsaciens en fonction de leur sensibilité aux produits phytosanitaires, en retenant le bassin versant de troisième ordre (ou sous-secteur hydrographique) comme unité spatiale de base.

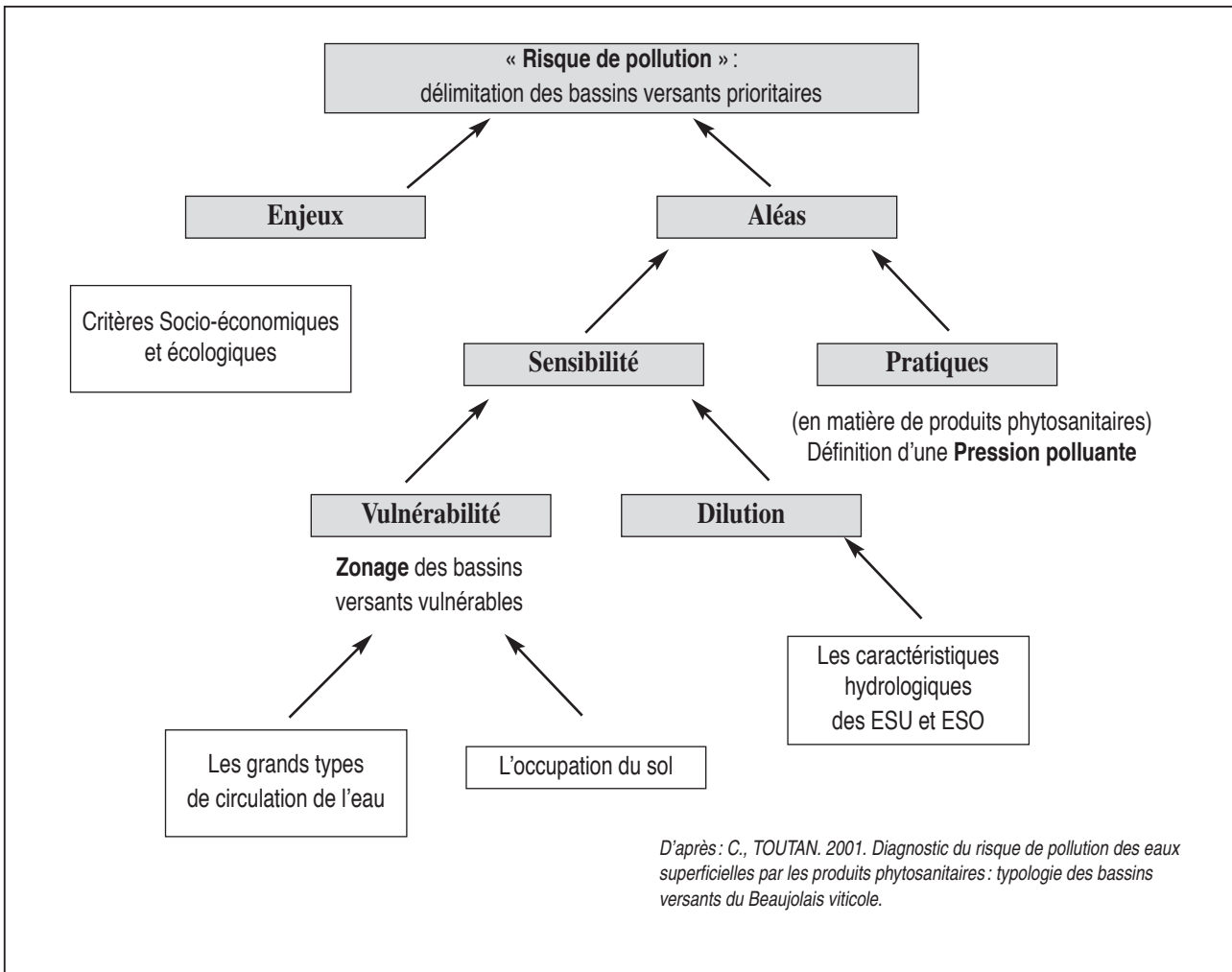
En effet, en référence à la démarche d'analyse de risque formalisée par Toutan (*figure 1*), l'analyse complète du risque (dans la définition retenue par la Commission Européenne et par le CORPEN

⁵ APRONA = Association pour la PROtection de la Nappe phréatique de la plaine d'Alsace

⁶ SAGE = Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux

Figure 1 - Démarche générale pour l'évaluation du risque

Figure 1 - General approach for the risk assessment



Légende et terminologie utilisée :

ESU = eaux superficielles

ESO = eaux souterraines

La **vulnérabilité** s'applique à la ressource en eau et représente son aptitude à être atteinte par un polluant. Elle est fonction des facteurs du milieu physique, qui déterminent les grands types de circulation de l'eau identifiés à l'échelle de la parcelle puis du territoire. Les facteurs du milieu ont été complétés dans l'étude Alsace, par la prise en compte de l'**occupation du territoire** décrite en grandes classes liées à la probabilité d'usage ou non de produits phytosanitaires.

La **dilution**, ou encore le pouvoir de dilution, correspond à la capacité de la ressource à « diluer » une pollution. Les facteurs intervenant seront différents selon le type de ressource comme, par exemple, le débit des cours d'eau pour les eaux superficielles ou le taux de renouvellement de la nappe pour les eaux souterraines.

La **sensibilité** s'applique également à la ressource en eau et caractérise son aptitude à extérioriser une pollution en étant plus ou moins facilement dégradée sous l'effet de l'arrivée d'un polluant.

Les **pratiques** sont celles relatives à l'utilisation de produits phytosanitaires, aussi bien en usage agricole que non agricole, en milieu urbain par exemple (entretien des espaces verts ou de la voirie, jardins d'agrément, jardins potagers privés...). Ces pratiques, selon leurs caractéristiques et leur intensité, exercent une certaine pression polluante sur le milieu et la ressource.

L'**aléa** est l'occurrence, c'est-à-dire la probabilité que l'événement défavorable (un phénomène de pollution due aux produits phytosanitaires) se produise.

Les **enjeux** découlent de l'importance que l'on va accorder à la ressource et illustrent le niveau de gravité de la pollution compte tenu de ses conséquences potentielles pour la collectivité.

Le **risque** au sens général résulte de « la combinaison, d'une part, de la probabilité qu'un événement défavorable se produise - ou aléa - et, d'autre part, de la gravité de ses conséquences - ou enjeux » (définition de la Commission Européenne), de la « conjonction d'un potentiel de contamination et d'un enjeu » (définition du CORPEN, 2003).

en 2003 dans ses « éléments méthodologiques pour un diagnostic régional », n'est pas apparue accessible, pas plus que celle de l'aléa. Cette limitation résulte conjointement du délai posé pour la présentation des résultats d'une part, de l'absence de données rapidement mobilisables à l'échelle de l'Alsace pour la caractérisation des usages des produits phytosanitaires ou des enjeux d'autre part. L'objectif de l'étude a été ainsi limité à l'analyse de la sensibilité des bassins versants. Elle repose sur la prise en compte des éléments stables du paysage dans les bassins versants. La caractérisation de cette sensibilité résulte, comme dans le schéma précité, d'un croisement entre vulnérabilité des eaux souterraines et superficielles et caractéristiques de dilution potentielle par les masses d'eau concernées.

MODÈLE D'ANALYSE ET DE CARACTÉRISATION DES BASSINS VERSANTS ET ORIGINALITÉ

L'analyse réalisée est une démarche d'experts, formalisée par une modélisation des phénomènes de circulation de l'eau et de transfert des produits phytosanitaires s'appuyant sur l'identification et la compréhension des facteurs qui les commandent. La modélisation est de type conceptuelle : on utilise les connaissances disponibles concernant la description des chemins de l'eau mais cette connaissance n'autorise pas une description quantifiée des phénomènes. Elle est semi-spatialisée car les phénomènes sont décrits à l'échelle de sous-unités spatiales considérées comme homogènes pour l'ensemble de leurs caractéristiques de pente, de sol, de sous-sol, d'occupation du sol. Même si dans ses grands traits, l'analyse se rapproche de la démarche proposée par le CORPEN en 2003, elle se singularise par le modèle de connaissance construit qui a permis de valoriser l'information d'une base de données régionale sur les sols d'Alsace renseignée à la précision du 1/100 000. L'outil privilégié pour la réalisation de cette analyse a été le Système d'Information Géographique (SIG).

Modèle pour l'analyse de la vulnérabilité

Le modèle d'analyse de la vulnérabilité s'appuie sur la caractérisation de la circulation de l'eau dans le paysage de chaque bassin versant ou unité hydrologique (*encadré 1*), d'abord à l'échelle des sous-unités spatiales accessibles les plus proches possibles de l'échelle parcellaire, puis en intégrant des caractéristiques d'environnement de la sous-unité. Il s'agit de décrire, d'une part le devenir probable des précipitations arrivant sur une sous-unité spatiale : alimentation des eaux souterraines (ESO) ou bien des eaux superficielles (ESU) ou encore combinaison des deux ; d'autre part de tenir compte des ordres de grandeur des temps de transfert entre la parcelle et les masses d'eau. La *figure 2* résume la démarche générale suivie pour l'évaluation de la vulnérabilité, contrainte par la disponibilité des données décrite dans le *tableau 1*. Il en résulte

l'organigramme de traitement des données présenté en *figure 3* et commenté ci-dessous.

L'échelle « parcellaire » identifie les chemins de l'eau probables en chaque point

Trois mécanismes principaux de transfert des phytosanitaires vers les eaux hors de la parcelle sont identifiables (Voltz et Louchart, 2001) : par ruissellement de surface, par percolation à travers le sol et *via* le réseau de drainage par drains enterrés.

Le modèle construit estime une probabilité de type de transfert dominant, soit par ruissellement, soit par écoulement latéral au sein du sol, soit par infiltration verticale, soit par combinaison de ces types, à l'échelle des sous-unités spatiales constituées par le croisement des unités cartographiques de classe de pente avec les unités cartographiques de sol identifiées dans la base de données régionale sur les sols d'Alsace. Par contre, le transfert *via* un réseau de drainage ne peut être pris en compte de façon fine à cette échelle car les données disponibles concernant l'état des parcelles sont d'ordre statistique à l'échelle communale et non spatialisées. Le drainage accélère la circulation des eaux de la parcelle vers les eaux superficielles et sa non prise en compte à ce stade minimise la caractérisation de la vulnérabilité de celles-ci.

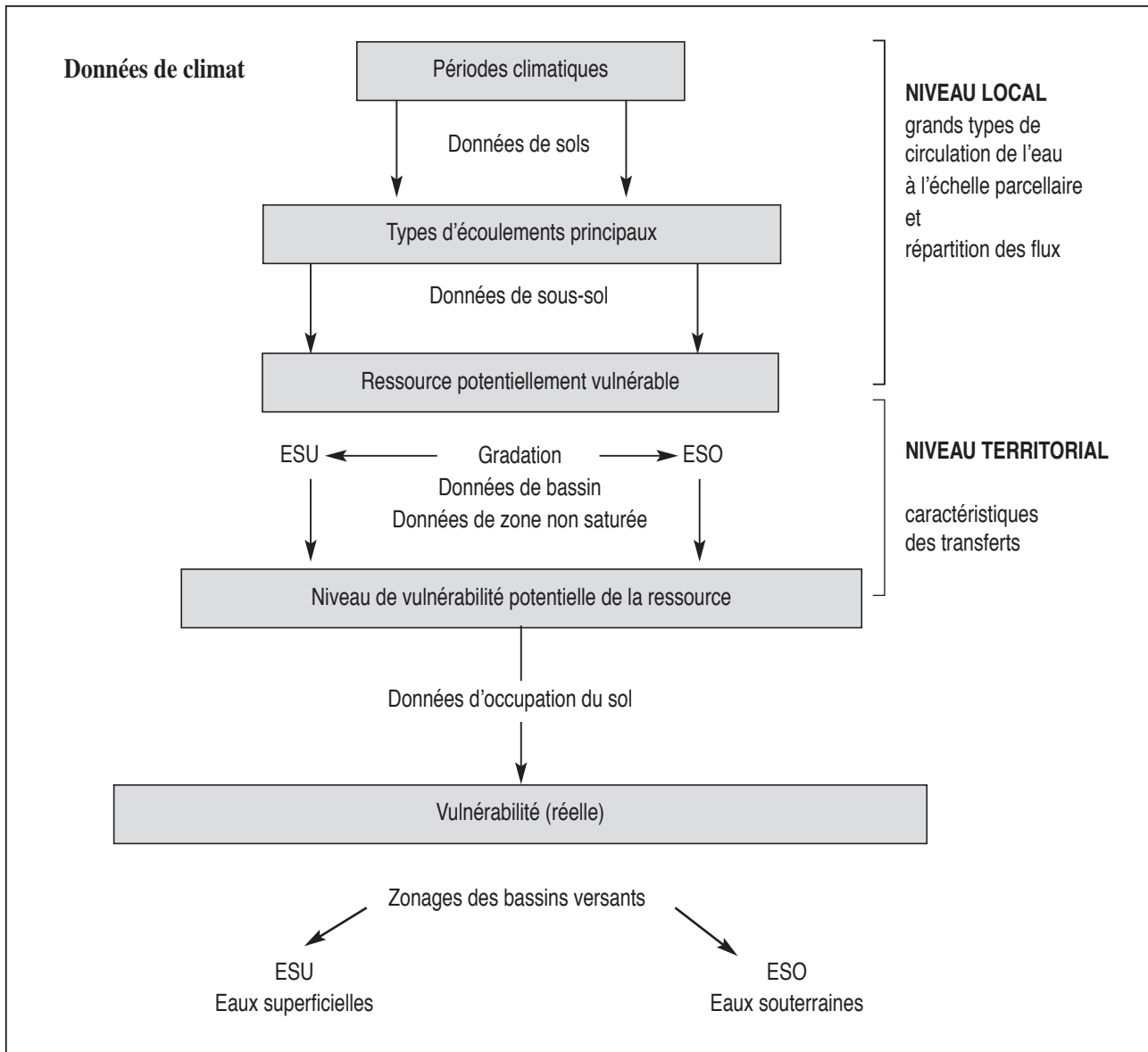
Le découpage de la région en bassins versants : des originalités

Le découpage de la région en bassins versants a été retenu car il s'agissait d'identifier des zones d'actions prioritaires, or le bassin versant se prête bien à une démarche opérationnelle. L'originalité réside dans le fait que les bassins versants retenus pour cette étude ne correspondent pas toujours à des bassins versants au sens hydrologique du terme. En particulier dans la vaste plaine alluviale, les bassins versants obtenus à partir de la BD Carthage, trop grands et peu pertinents pour une analyse de sensibilité, ont nécessité un redécoupage prenant en compte les différentes zones d'alimentation de la nappe rhénane en relation avec les zones d'influence des cours d'eau traversant la plaine et la densité du réseau hydrographique. Par ailleurs les bassins versants localisés pour partie en forêt vosgienne ont été redécoupés en bassins amont à dominante forestière, et en bassins aval. Les bassins amont forestiers ou entièrement forestiers considérés comme quasi indemnes de risque phytosanitaires n'ont pas été traités dans l'étude.

Les éventuelles interactions entre les masses d'eau et entre bassins versants ne sont pas prises en compte, ce qui s'accorde avec l'objectif de classer les bassins d'après leur sensibilité intrinsèque en vue de susciter des programmes d'actions.

Par souci de simplification nous avons gardé le terme de bassin versant pour qualifier ces unités hydrologiques. L'étude porte sur 32 bassins versants au total (*figure 6*).

Figure 2 - Démarche générale pour l'évaluation de la vulnérabilité
Figure 2 - General approach for vulnerability assessment



La première étape de l'analyse « parcellaire » définit la probabilité de ruissellement, en s'intéressant aux caractéristiques de l'horizon de surface, de la pente et à la saison climatique. Elle intègre également les caractéristiques générales du contexte alsacien, actuellement marqué par une forte dominance des cultures de printemps et le recours quasi systématique au labour dans les itinéraires de travail du sol.

- La situation d'automne/hiver correspond en Alsace à des pluies faibles, intervenant, dans le cas de terres labourées, sur des sols dont les états de surface sont rarement limitant de la vitesse d'infil-

tration. Le ruissellement susceptible d'apparaître est alors un ruissellement par saturation du sol, qui interviendra d'autant plus rapidement que le sol est hydromorphe - puisque cette caractéristique est liée à la présence d'un horizon peu ou pas perméable, ou que la texture de l'horizon de surface est fine, commandant une vitesse d'infiltration lente liée à la porosité de cet horizon.

- La situation de printemps et d'été correspond à un maximum pluviométrique en mai et juin suivi de pluies orageuses en été, intervenant, toujours dans le cas des terres labourées, sur des sols dont les états de surface se dégradent et évoluent rapidement vers

Tableau 1 - Liste des paramètres utilisés et sources de données**Table 1** - List of used parameters and data sources

Facteur pris en compte	Paramètres descriptifs	Unité spatiale de traitement de l'information de base / origine des données de base	Classification / calcul
Découpage de la région en zones d'études, communément appelées « bassins versants »			
Hydrologie de surface	Limites de bassin versant	Unité Cartographique bassin versant/ BD Carthage AERM et direx d'experts	32 bassins versants
Hydrologie de surface	Densité du réseau hydrographique	Unité Cartographique bassin versant/ BD Carthage Agence de l'Eau Rhin Meuse	2 classes : seuil 1 100 m km ²⁻¹
Hydrogéologie	Zones d'influence hydrographique de la nappe	Unité Cartographique bassin versant/ DIREN-Service des Eaux et Milieux Aquatiques Alsace et direx d'experts	20 zones d'alimentation de la nappe identifiées
Aspect Vulnérabilité			
Climat	Régime des pluies	Région / statistiques climatiques générales METEO FRANCE	2 saisons : printemps-été ; automne-hiver
Topographie	Pente	Unité Cartographique pente / d'après BD Alti IGN au pas de 50 m retravaillée en classes de pente avec agrégations d'Unités Cartographiques par Laboratoire IMFS ULP Strasbourg	4 classes : < 2 %, 2-5 %, 5-10 %, > 10 %
Sol	Battance	Unité Cartographique de sol en retenant la valeur d'Unité Typologique de Sol dominante / BD sols Alsace ARAA - IGCS 2002 à 1/100 000 constituée à partir des guides des sols d'Alsace (REGION ALSACE) et expertise SOL-CONSEIL et ARAA sur deux secteurs en cours d'étude pour les guides des sols et BD sols de France INRA-SESCPF 1998 à 1/1 000 000	3 classes, à partir du calcul de IB
	« Filtrance » = estimation de vitesse d'infiltration de l'horizon L		3 classes, à partir de la texture, de la carbonatation et des cailloux
	Hydromorphie		2 classes : H0 à H2 / H3 à H4 (notation Favrot Devillers)
	Rupture de perméabilité		2 classes : substrat imperméable ou horizon argileux < 60 cm
Sous-sol	Perméabilité du substrat	Unité Cartographique sous-sol / Données BD RHF BRGM	3 classes : imperméable, semi-perméable, perméable
Occupation du sol	Grands types d'occupation du sol	Unité Cartographique classe d'occupation du sol / CORINE Land Cover – IFEN 1991	7 classes : forêt, prairie, vignes et verger, terres labourables, bâti, autres
Hydrologie de surface	Densité de drainage agricole	Commune (BD Carto IGN) puis agrégation Unité Cartographique bassin versant / Recensement Général Agricole (RGA) 2000 AGRESTE SCEES	2 classes : seuil 20 %
Hydrogéologie	Epaisseur Zone Non Saturée	Unité Cartographique Zone Non Saturée / Carte du schéma régional d'aménagement des eaux publiée par le Conseil régional d'Alsace en 1990	2 classes : seuil 2 mètres
Aspect Sensibilité			
Hydrologie de surface	Débits spécifiques (en l s ⁻¹ km ²⁻¹)	Unité Cartographique bassin versant / DIREN-SEMA Alsace et Service de la Navigation de Strasbourg	4 classes définies d'après traitement statistique par quartiles
Hydrogéologie	Epaisseur de la nappe phréatique d'Alsace	Unité Cartographique épaisseur de la nappe / Modèle hydrodynamique géré par l'APRONA ; maillage 250 X 250 m	5 classes d'épaisseurs : 0-10 m, 10-25 m, 25-50 m, 50-100 m, > 100 m

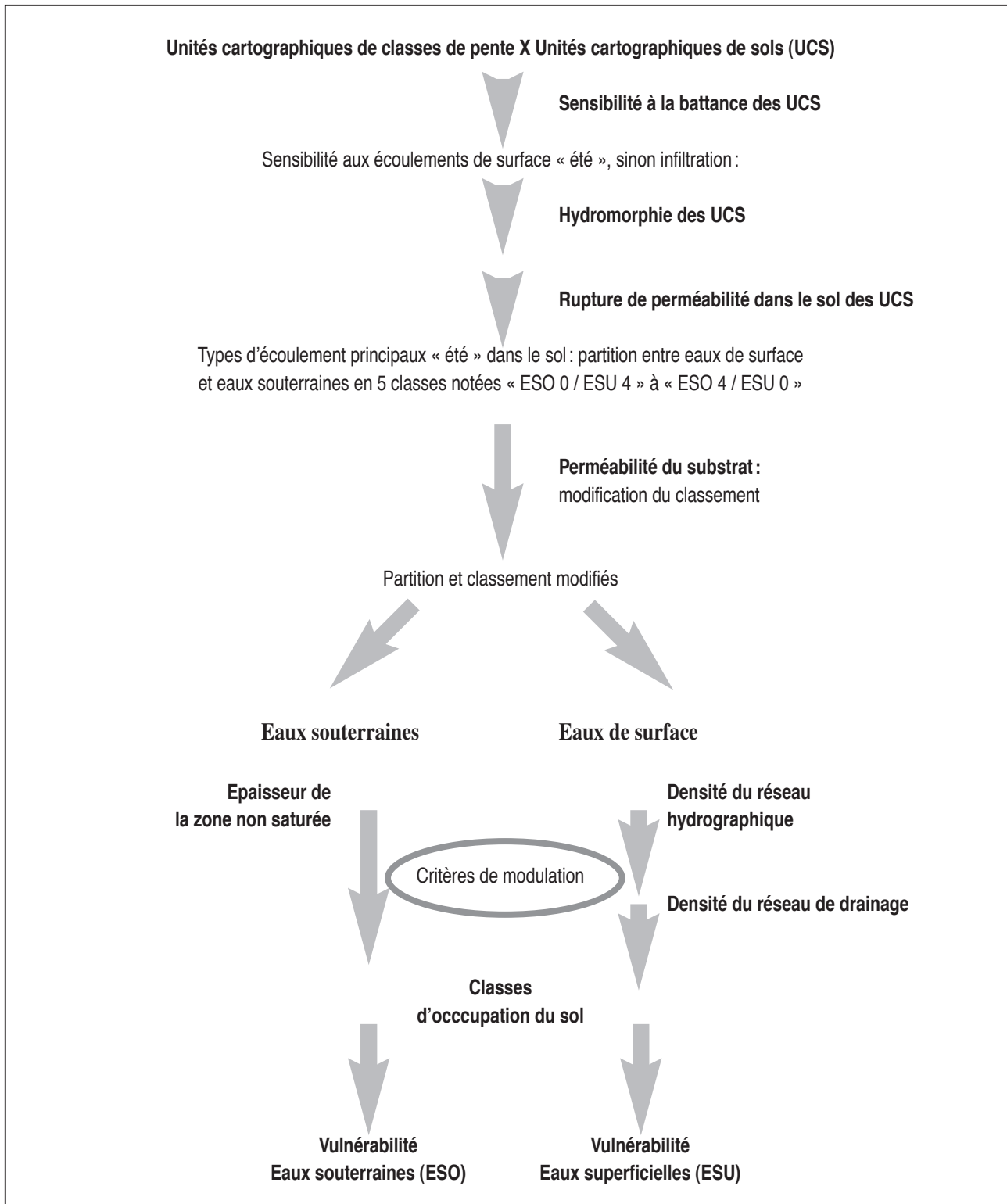
Figure 3 - Facteurs pris en compte pour la détermination de la vulnérabilité - exemple de la période estivale**Figure 3** - Factors considered for vulnerability determination – for example, summer period

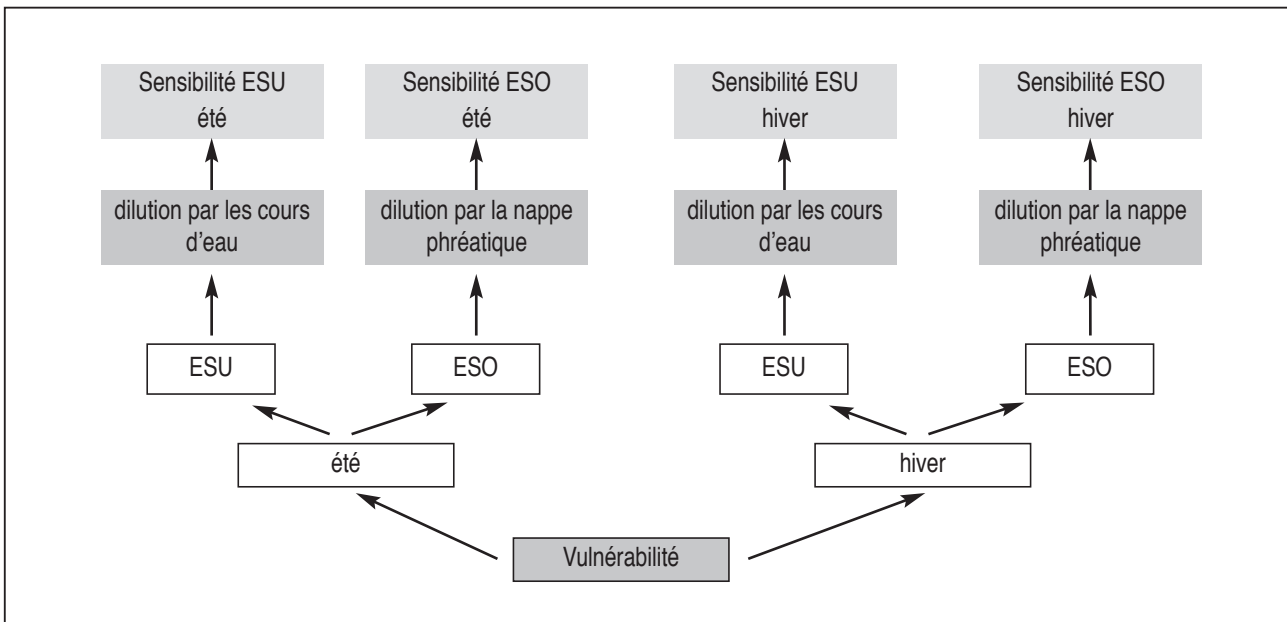
Tableau 2 - Exemple de répartition des notes de vulnérabilité et calcul d'une note globale pour le bassin versant n° 2**Table 2** - Example of vulnerability notes distribution and global note calculation, for catchment n° 2

Exemple : Bassin versant n° 2				
Superficie occupée par chacune des classes de vulnérabilité (en % de la superficie totale du bassin versant)				
Classe de vulnérabilité	Eaux superficielles printemps - été (ESUP)	Eaux superficielles hiver (ESUH)	Eaux souterraines printemps - été (ESOP)	Eaux souterraines hiver (ESOH)
0	0,6 %	3,7 %	73,0 %	24,3 %
1	0,2 %	18,8 %	4,9 %	10,7 %
2	0,6 %	7,1 %	18,3 %	26,7 %
3	38,4 %	33,9 %	2,7 %	13,7 %
4	60,2 %	36,5 %	1,0 %	24,6 %

La note globale pour les ESOH, par exemple, sera alors

$$N = (24,3 \times 0) + (10,7 \times 1) + (26,7 \times 2) + (13,7 \times 3) + (24,6 \times 4)$$

$$N = 203,6$$

Figure 4 - Organigramme de traitement pour passer de la vulnérabilité à la sensibilité**Figure 4** - Processing flowchart to go from vulnerability to sensitivity

une structure défavorable à l'infiltration. Le mode de ruissellement dominant est alors hortonien, par dépassement de la capacité d'infiltration de la surface du sol en regard de l'intensité de la pluie. Cette dégradation des états de surface est d'autant plus rapide que l'horizon de surface est sensible à la battance. La caractérisation de cette sensibilité repose sur le calcul de l'indice de battance.

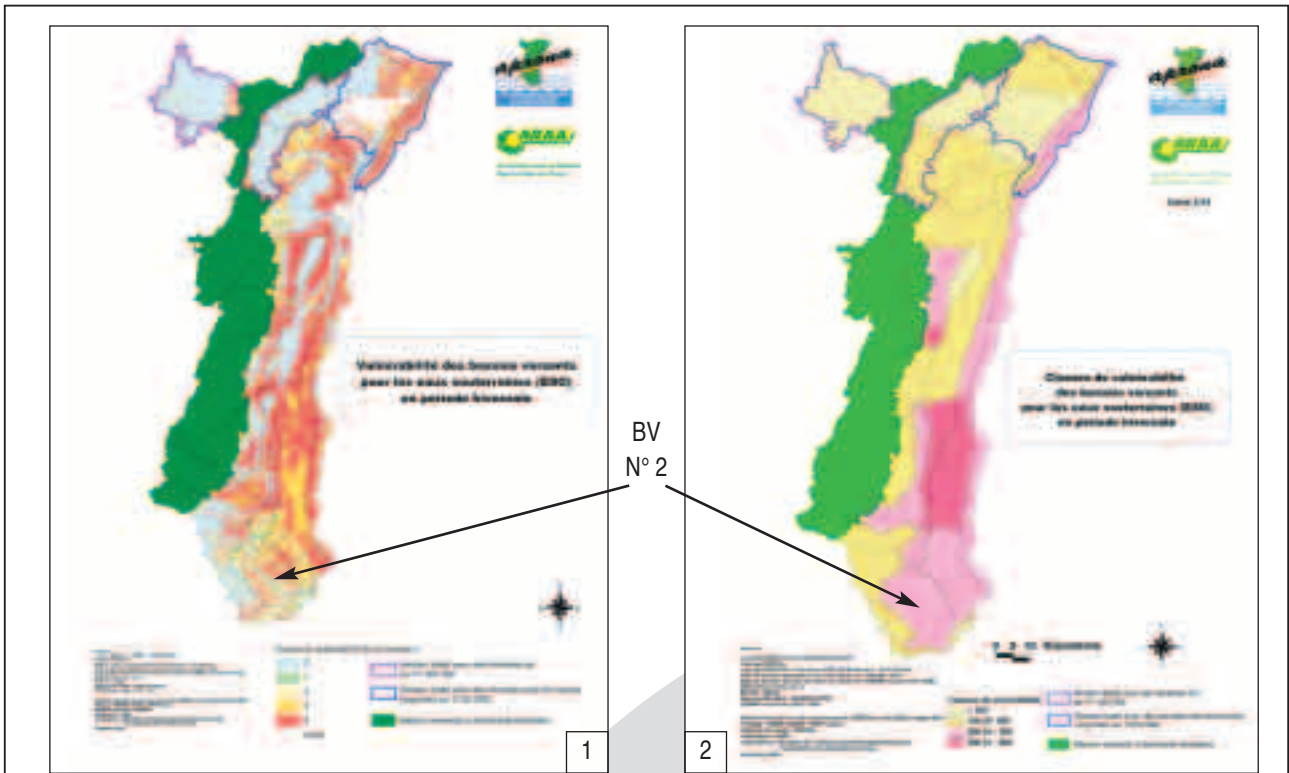
Cette distinction nous a conduit à élaborer deux versions du modèle, l'une pour la situation dite d'hiver, l'autre pour la situation dite d'été qui est celle présentée en figure 3. Ces deux situations se différencient

par le choix des variables de caractérisation de l'horizon de surface du sol qui conduisent à des probabilités d'apparition du ruissellement distinctes. Cette distinction été/hiver sera conservée tout au long de l'analyse de vulnérabilité puis de sensibilité de chaque bassin versant.

La seconde étape analyse le devenir de l'eau infiltrée dans l'horizon de surface en identifiant les obstacles potentiels à la percolation au sein du sol, constitués par des horizons ou des couches de sol de moindre perméabilité. Ces obstacles, appelés ruptures de perméabilité, sont liés à des variations de texture, à la présence d'une

Figure 5 - Principaux résultats de l'étude

Figure 5 - Main results of the study



Exemple : carte de vulnérabilité des bassins versants pour les eaux souterraines en période hivernale

Passage d'une carte détaillée avec des polygones résultant du croisement de plusieurs couches d'informations vectorielles (classes de pentes, sols, substrat, zones de remontée de nappe, occupation du sol) à une carte présentant une note globale par bassin versant

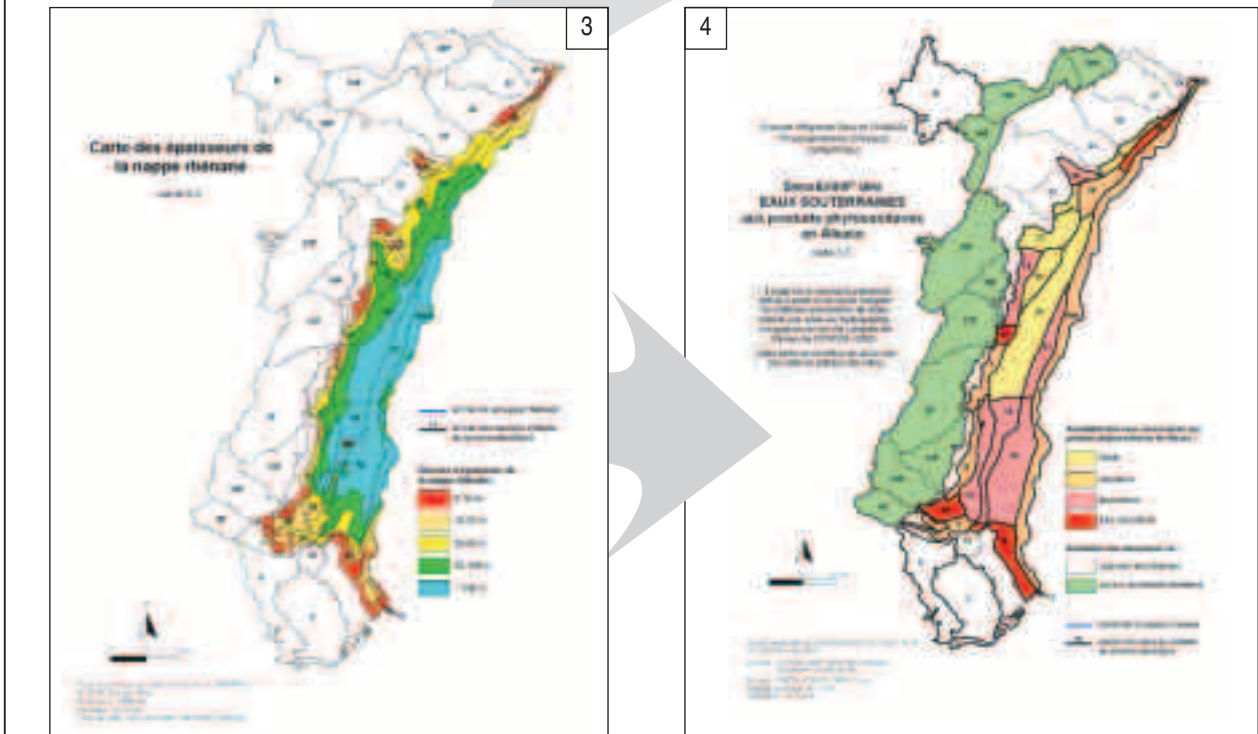
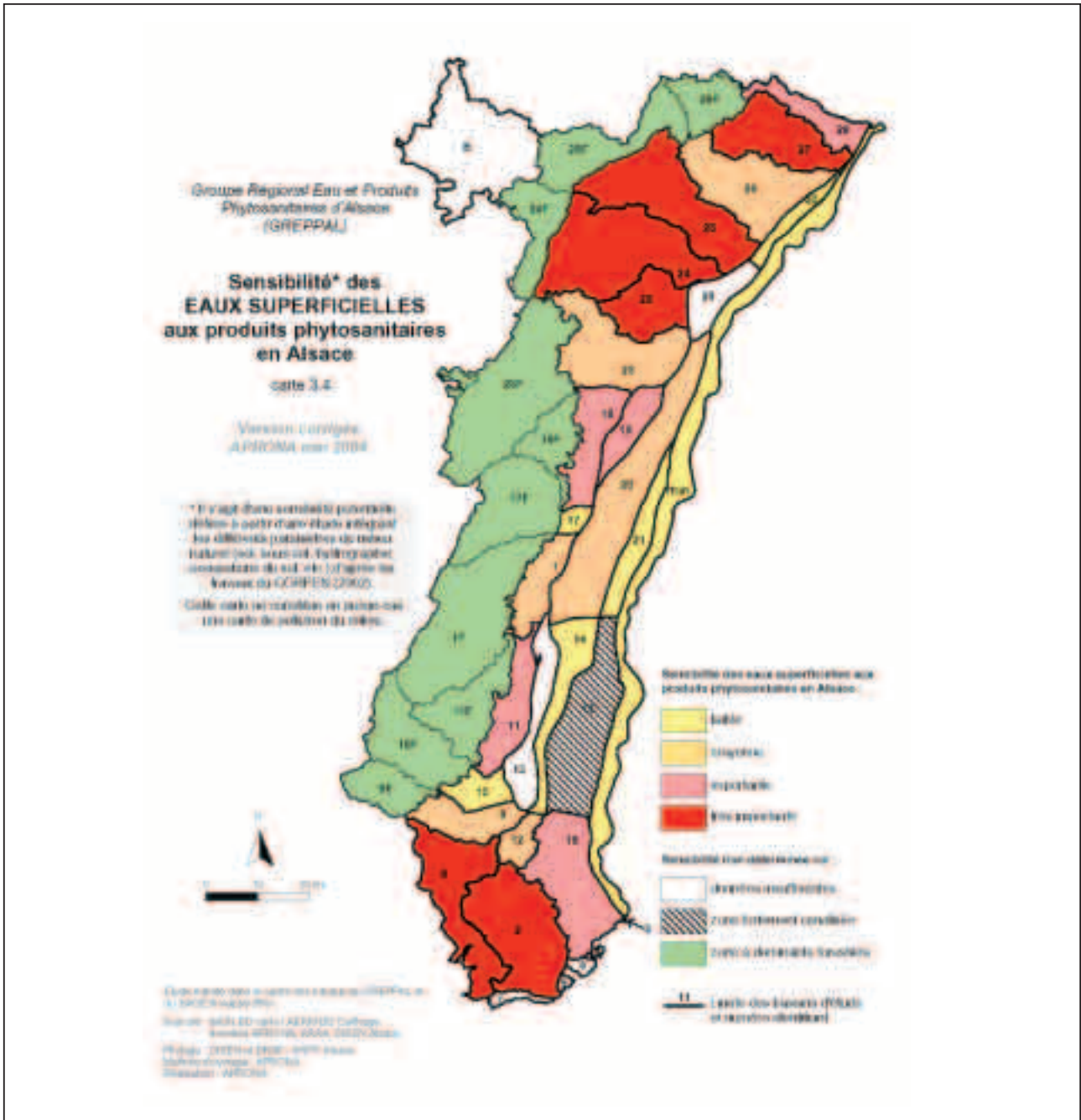


Illustration du passage de la vulnérabilité (2) à la sensibilité (4) en intégrant le paramètre dilution (3) correspondant à la puissance de l'aquifère pour le paramètre eaux souterraines

Figure 6 - Carte de synthèse de sensibilité des eaux superficielles aux produits phytosanitaires
Figure 6 - Global map of superficial waters sensitivity to pesticides



roche imperméable, à l'existence d'une nappe perchée temporaire dont la présence est indiquée par l'intensité de l'hydromorphie. Ces obstacles, en ralentissant ou en s'opposant à l'infiltration verticale de l'eau, génèrent des écoulement latéraux plus ou moins profonds, qui aboutissent néanmoins aux eaux superficielles.

L'identification de ces obstacles est elle aussi réalisée à l'échelle des unités cartographiques de sol, par l'exploitation des informations relatives à la teneur en argile des différents horizons ou à la présence d'une roche imperméable (argile ou marne) dans la description de l'unité de sol.

La troisième étape concerne l'analyse des conditions hydrogéologiques qui peuvent elles aussi s'opposer à l'infiltration des eaux – cas d'un substrat géologique imperméable ou semi-perméable par exemple. Là encore, un écoulement latéral est alors possible, générant une alimentation des eaux superficielles. Les données sont issues d'une cartographie générale décrivant la perméabilité des substrats géologiques.

A ce stade, pour chaque sous-unité spatiale du bassin versant, on aboutit à une caractérisation de la probabilité d'écoulement vers les eaux superficielles et / ou les eaux souterraines, en 5 classes pour les ESU et 5 pour les ESO. Cette probabilité décrit une répartition approximative des eaux excédentaires entre recharge d'une nappe et alimentation d'un cours d'eau. On associe implicitement à ces flux une vulnérabilité des eaux superficielles ou souterraines.

Les caractéristiques de l'environnement modulent le classement affecté à chaque sous-unité spatiale

Pour les écoulements vers les eaux de surface, un réseau hydrographique dense ou une probabilité de drainage des parcelles élevée sont synonymes de diminution des temps de transfert entre les parcelles et les eaux de surface. La vulnérabilité de celles-ci est donc accrue. Les données disponibles pour décrire ces deux caractéristiques ne sont accessibles qu'à partir de statistiques agrégées à l'échelle du bassin versant. Leur prise en compte est réalisée par une augmentation arbitraire et uniforme de la classe de vulnérabilité ESU de toutes les sous-unités du bassin versant.

Pour les écoulements vers les eaux souterraines, l'épaisseur de la zone non saturée détermine le temps de transfert entre le sol et la nappe. Si cette épaisseur est très faible, la vulnérabilité des eaux souterraines est accrue. Les sous-unités ou fractions situées dans des secteurs de probabilité de remontée de nappe à moins de 2 mètres de la surface du sol (information spatialisée) ont été affectées d'une augmentation arbitraire de leur classe de vulnérabilité ESO.

Les modes principaux et relativement durables d'occupation du sol (information spatialisée) ont également été utilisés pour moduler le classement tant ESU que ESO de chaque sous-unité ou fractions, compte tenu des probabilités d'emploi de produits phytosanitaires selon l'usage du sol :

- diminution des vulnérabilités ESU et ESO pour les prairies, bois et forêts (pas ou très peu d'application de produits phytosanitaires) ;
- augmentation des vulnérabilités ESU et ESO pour terres labourables, vignes et vergers (usage régulier de produits phytosanitaires) ;
- augmentation de la vulnérabilité ESU seule pour le bâti, afin de tenir compte des probabilités fortes de traitement sur surfaces imperméabilisées ;
- pas de modulation pour les autres classes.

L'introduction de ces classes d'occupation du sol dans le modèle de connaissance a pour but d'aider à différencier *a priori* des situations, en l'absence de données caractérisant l'usage des produits

phytosanitaires. De ce fait, l'analyse réalisée dépasse la définition stricte de l'analyse de vulnérabilité.

A l'issue de ces 2 étapes, dans chaque bassin versant, chaque sous-unité spatiale est affectée d'une note de vulnérabilité.

Méthode d'agrégation pour l'analyse de vulnérabilité

Pour obtenir une note globale de vulnérabilité par bassin versant permettant de classer les bassins, nous avons été amenés à calculer, pour chaque bassin versant, la superficie occupée par chacune des classes de vulnérabilité (en % de la superficie totale du bassin versant) et ce, pour chacune des situations étudiées (ESUP, ESUH, ESOP, ESOH) (tableau 2 et figure 5, cartes 1 et 2).

La somme de ces valeurs n'est pas forcément égale à 100, puisqu'il peut exister des secteurs pour lesquels nous n'avons pas de résultat, des données ayant manqué à un moment ou à un autre du traitement. Ensuite, nous avons calculé une note globale par bassin et par situation, en faisant une somme des surfaces pondérées par leur note de vulnérabilité.

On obtient ainsi une note de 0 à 400, grâce à laquelle il est possible de hiérarchiser les bassins versants, pour chaque situation saisonnière, du moins vulnérable au plus vulnérable.

Afin d'aboutir au zonage final et à la cartographie demandés, nous avons regroupé ces bassins versants en 4 classes de vulnérabilité.

Après analyse de la distribution des notes obtenues, aucun seuil particulier ne semblant se différencier et cette distribution s'étendant sur toute l'échelle de notation, nous avons retenu les classes suivantes :

Classe 1 : 0 – 100,

Classe 2 : 100,01 – 200,

Classe 3 : 200,01 – 300,

Classe 4 : 300,01 – 400.

Méthode pour la détermination de la sensibilité

Pour la détermination de la sensibilité à partir de la vulnérabilité, une méthode a été adoptée par le groupe de travail constitué de représentants de la DIREN, de l'Agence de l'Eau Rhin Meuse, du SAGE III-nappe-Rhin, de la Région Alsace, de la DRAF-SRPV, de la DDAF du Haut-Rhin, de l'ARAA et de l'APRONA (figure 4).

La sensibilité des bassins versants est exprimée par une note de 0 à 400. La note de sensibilité est égale à :

$$\text{Note de sensibilité} = \frac{\text{Note de dilution} + (2 \times \text{Note de vulnérabilité})}{3}$$

avec *Note de dilution* pour les eaux souterraines proportionnelle à l'épaisseur de la nappe phréatique, et pour les eaux de surfa-

ce proportionnelle au débit spécifique des cours d'eau à l'exutoire du bassin versant considéré.

La note de sensibilité est ainsi une moyenne pondérée entre les notes de dilution et de vulnérabilité. Nous avons choisi de donner deux fois plus de poids à la note de vulnérabilité qu'à la note de dilution, car la vulnérabilité exprime la fragilité intrinsèque du milieu, tandis que la dilution ne fait qu'atténuer l'impact de la pollution.

Les bassins versants sont distribués dans 4 classes de sensibilité, dont les limites sont issues d'un traitement statistique des notes de sensibilité concernées, par quartiles. Cette répartition par quartiles permet d'obtenir une répartition des bassins versants en 4 classes de taille égale, contenant chacune un quart des bassins versants étudiés.

Ce mode de répartition permet une bonne discrimination des bassins versants les uns par rapport aux autres.

Pour chaque carte, les valeurs de sensibilité étant différentes, les limites des classes définies par quartiles sont également différentes.

LES DONNÉES UTILISÉES

L'analyse de la sensibilité fait intervenir de nombreux paramètres. La disponibilité des informations permettant de les renseigner de façon fiable est primordiale. Elle a grandement conditionné les critères retenus pour cette analyse.

De multiples sources de données ont été mobilisées, certaines ont nécessité des compléments à dire d'expert. La priorité était d'accéder à un maximum d'informations si possible spatialisées dans un temps très limité (*tableau 1*).

L'existence d'une base de données informatique sur les sols établie à 1/100 000 pour près de 2/3 du territoire agricole alsacien a été déterminante. La base de données gérée par l'ARAA, et élaborée dans le cadre du programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols (IGCS) piloté par le Ministère de l'Agriculture et l'INRA a permis de fournir rapidement des données spatialisées sur les sols, structurées et homogènes sur un vaste périmètre d'étude.

Ces données qui n'étaient malheureusement pas encore disponibles sur tout le territoire alsacien, ont dû être complétées par la base de données sols France au millionième gérée par l'INRA et par des travaux d'expertise avec l'aide de la société SOL-CONSEIL, sur deux secteurs en cours d'étude dans le cadre de la réalisation de guides des sols par petites régions naturelles sous maîtrise d'ouvrage de la Région Alsace.

TRAITEMENT FINAL DES RÉSULTATS

La première phase du diagnostic conduit à 4 cartes de vulnérabilité

- Vulnérabilité eaux superficielles en période printemps-été (ESUP)
- Vulnérabilité eaux superficielles en période hivernale (ESUH)
- Vulnérabilité eaux souterraines en période printemps-été (ESOP)

- Vulnérabilité eaux souterraines en période hivernale (ESOH) issues d'une représentation très précise et spatialisée de la vulnérabilité à l'intérieur même des bassins versants (*carte 1 de la figure 5*).

Une seconde phase a permis de calculer une note globale de vulnérabilité par bassin versant et d'établir un classement des bassins versants (*carte 2 de la figure 5*).

La sensibilité exploite les résultats issus de l'analyse de vulnérabilité en la modulant par la capacité de dilution des masses d'eau concernées et donne 4 notes de sensibilité par bassin versant (ESU/ESO x printemps-été/hiver).

Pour un zonage opérationnel au sens de la démarche, deux cartes de sensibilité ont été produites, concernant les eaux souterraines d'une part (ESO) (*carte 4 figure 5*), et les eaux superficielles d'autre part (ESU) (*figure 6*). Ces cartes ont été obtenues par la combinaison moyenne des cartes été et hiver dans chacun des cas.

Par contre, nous n'avons pas calculé des notes de sensibilité eaux superficielles et eaux souterraines confondues. En effet, effectuer une simple moyenne des notes ESUPH et ESOPH est insatisfaisant tant la sensibilité des eaux de surface aux produits phytosanitaires est différente de la sensibilité des eaux souterraines.

DISCUSSION

Un modèle perfectible et délicat à valider

Le modèle d'analyse de la vulnérabilité et la méthode de calcul de la sensibilité mis en œuvre reposent sur des règles de décision définies pour chaque étape de traitement des données. Ces règles concernent autant le choix des facteurs considérés comme pertinents, le prétraitement des caractéristiques descriptives de ces facteurs prises en compte – à travers leur découpage en classes de valeur par exemple – que les résultats des modalités de croisement entre paramètres. Bien que ces règles aient été déterminées et validées par des experts régionaux, elles comportent une large part d'appréciation arbitraire. C'est ainsi que la capacité de stockage pour l'eau des sols a été ignorée par notre analyse alors que sa prise en compte est jugée pertinente pour la méthodologie CORPEN. Par ailleurs, les outils conceptuels utilisés pour le croisement des facteurs de vulnérabilité sont critiquables (Aurousseau, 2003). Ainsi, tout en respectant la démarche générale d'analyse de sensibilité proposée, des résultats différents pourraient être obtenus en donnant des poids différents aux paramètres pris en compte. Se pose dès lors la question de la validation du travail réalisé, c'est-à-dire la confrontation des résultats issus du « modèle » mis en œuvre avec des observations ou mesures disponibles, concernant la présence de phytosanitaires dans les masses d'eaux des différents bassins versants.

Une validation systématique de ce type n'est malheureusement pas possible pour deux raisons majeures :

1) Le travail réalisé exprime une sensibilité potentielle des eaux à la contamination par les phytosanitaires. La contamination réelle résulte de cette sensibilité et des pratiques mises en œuvre, tant dans le domaine des traitements (pollutions diffuses) que des manipulations (pollutions ponctuelles). Un bassin versant peu sensible peut être gravement affecté en relation avec une pression d'usage très forte et *a contrario* un bassin très sensible ne présenter aucune dégradation grâce à un usage judicieux et maîtrisé des traitements.

2) Il n'a pas été tenu compte dans l'analyse des interactions entre masses d'eau, en particulier pour les bassins versants de plaine, dans lesquels l'alimentation en eau de la nappe phréatique est assurée en grande partie par les eaux d'infiltrations des rivières qui les traversent, et dont la qualité s'est constituée dans des bassins versants situés en amont.

Une validation par les experts régionaux a cependant été acquise, dans la mesure où les bassins versants identifiés comme les plus sensibles correspondent effectivement aux secteurs où des problèmes majeurs sont avérés.

Une validation plus rigoureuse pourrait intervenir avec la prise en compte des pratiques de traitement selon le type d'occupation du sol et le type de systèmes de culture, en intégrant dans leur description les programmes de protection phytosanitaires des cultures concernées. En ce sens, les travaux réalisés constituent la première étape d'une analyse régionale de risque plus complète.

Un modèle à ajuster aux réalités régionales

Une partie des règles de décision est liée à un contexte régional susceptible d'évoluer à terme. Elles ont tenu compte de la réalité actuelle des systèmes de cultures de la région, caractérisés par la prédominance des cultures de printemps et du labour. Le ruissellement intervenant sur une croûte de battance formée en quelques semaines au cours du printemps, simultanément avec les traitements de désherbage a été ainsi pris en compte de façon privilégiée par le modèle de vulnérabilité de printemps et d'été. Mais une évolution de la répartition entre cultures de printemps et cultures d'hiver ou le développement de techniques sans labour produisant des états de surface différents tant au printemps qu'en hiver, pourrait conduire à revoir ce modèle régional, en modifiant ou affinant les règles de traitement des données descriptives des sols.

Une utilité néanmoins certaine

Les objectifs d'un diagnostic régional peuvent être très complets (Gilles, 2001 ; CORPEN, 2003) :

- optimiser les réseaux d'observation de la qualité des eaux à l'échelle du territoire régional ;
- hiérarchiser les zones prioritaires ou l'aléa est le plus important pour y concentrer les moyens de mesure et d'action ;
- aider à la définition des plans d'action sur ces zones ;
- sensibiliser et communiquer vers les différents publics concernés.

Dans le cas présent, tous ces objectifs ne sont pas accessibles. Si le premier de ces objectifs peut être retenu, la limitation de l'étude à la sensibilité, sans prise en compte des pratiques et donc de la pression polluante, en limite l'usage pour le second objectif. Une vérification locale de la qualité des eaux doit être privilégiée dans les zones apparaissant comme les plus sensibles, avant d'y concentrer des moyens d'action. Par ailleurs, la définition des plans d'action passe par l'établissement d'un diagnostic sur les pratiques à l'intérieur de la zone retenue que l'analyse de sensibilité ne fournit pas.

Si les étapes intermédiaires de l'analyse de la vulnérabilité en particulier, fournissent une représentation en sous-unités qu'il peut être tentant d'utiliser, leur mode d'élaboration ne le permet cependant pas. Outre l'échelle de précision à 1/100 000 des données intégrées dans le modèle (voir moins pour certaines zones), le traitement des données réalisé reste très éloigné des principes d'une analyse du risque parcellaire, dans laquelle certaines caractéristiques de la parcelle (et non du sol seulement) et la nature des interfaces entre cette parcelle et son environnement sont déterminants du risque de transfert vers les eaux de surface.

D'autres outils d'analyse de la sensibilité doivent être développés reprenant les étapes de la démarche mise en œuvre, mais visant le diagnostic territorial local interne au bassin versant et intégrant ces dimensions, en analysant les possibilités de leur représentation spatiale en particulier.

Au-delà des questions méthodologiques qui définissent les limites de l'utilisation de toute expertise, nous avons cependant pu répondre dans un délai court à la demande de classement relatif des bassins versants, grâce en particulier à la disponibilité quasi immédiate de données spatialisées sur les sols et l'hydrologie de la région. Ceci souligne l'importance des bases de données spatialisées descriptives des caractéristiques des milieux naturels pour tout diagnostic rapide relatif à des préoccupations environnementales. L'analyse de la sensibilité des bassins versants alsaciens pourrait ainsi être améliorée par une couverture complète de la région dans la base de données sur les sols d'Alsace à 1/100 000. En l'état, les cartes de sensibilité produites constituent déjà une incitation forte à l'action aux échelles locales, en permettant aux acteurs de s'interroger sur la réalité de la situation qui les concerne.

BIBLIOGRAPHIE

- Ambroise B., 1999 - La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. HGA, Bucarest (RO), EPFL, Lausanne (CH), 200 p.
- Aurousseau P., 2003 - Agrégation des paramètres et bases mathématiques de combinatoire de facteurs de risque, *in* Estimation des risques environnementaux des pesticides, INRA Editions (F), pp. 87-103
- Cann Ch., 1998 - Transferts de polluants vers l'eau *in* Agriculture intensive et qualité des eaux. C. Cheverry et INRA, Paris (F), pp. 233-247
- Col., 2000. - Inventaire de la qualité des eaux souterraines dans la vallée du Rhin supérieur : synthèse et recommandations. Région Alsace, Strasbourg (F), 30 p.
- Col., 2000. - Inventaire de la qualité des eaux des aquifères du Sundgau en 1998. Région Alsace, Strasbourg (F), 78 p.

- Col., 2004. - Inventaires 2003 de la qualité des eaux dans le Fossé Rhéna, premiers résultats pour la plaine d'Alsace et le Sundgau. Région Alsace, Strasbourg (F), 12 p.
- Col., 2003. - Les pesticides dans les eaux, cinquième bilan annuel, données 2001. Etudes et travaux IFEN 37, 27 p.
- Col., 1999 - Désherbage : éléments de raisonnement pour une maîtrise des adventices limitant le risque de pollution des eaux par les produits phytosanitaires. CORPEN, Paris (F), 161 p.
- Col., 1996 - Qualité des eaux et produits phytosanitaires : proposition pour une démarche de diagnostic. CORPEN, Paris (F), 120 p.
- Col., 2003 - Éléments méthodologiques pour un diagnostic régional et un suivi de la contamination des eaux liée à l'utilisation des produits phytosanitaires - Utilisation des Systèmes de traitement de l'Information Géographique (SIG). CORPEN, Paris (F), 85 p.
- Col.; 2003 - Projet de Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux Ill-nappe-Rhin. Commission Locale de l'eau, Région Alsace, Strasbourg (F), 204 p. et cartes
- Col., 2002 - Réseau national de bassin, qualité des cours d'eau année 2001. Direction régionale de l'environnement Alsace, Strasbourg (F), 51 p.
- Gilles A., 2001 - Transfert des produits phytosanitaires vers les eaux : zonage régional en Midi-Pyrénées. Perspectives agricoles 274, pp. 88-90
- Gravier M.-H., 1999 - Approche de la variabilité du risque potentiel de contamination des eaux par les substance phytosanitaires en Franche-Comté. ENESAD, Dijon et DRAF-SRPV Franche Comté, Besançon (F), 45 p.
- Lebreton A., Koller R., Sauter J. et Burtin M.L., 1999 - Guide des sols Piémont bas-rhinois, REGION ALSACE, 189 p.
- Lebreton A., Koller R., Sauter J. et Burtin M.L., 2001 - Guide des sols Collines de Brumath, du Kochersberg et de l'arrière Kochersberg, REGION ALSACE, 226 p.
- Party J.-P., Koller R., Sauter J. et Burtin M.L., 1994 - Guide des sols Plaine Centre-Alsace, REGION ALSACE, 145 p.
- Party J.-P., Koller R., Sauter J. et Burtin M.L., 1999 - Guide des sols Plaine Sud-Alsace, REGION ALSACE, 183 p.
- Party J.-P., Koller R., Sauter J. et Burtin M.L., 2001 - Guide des sols Plaine Sundgau et Jura alsacien, REGION ALSACE, 252 p.
- Party J.-P., Koller R., Sauter J. et Burtin M.L., 2003 - Guide des sols Piémont haut-rhinois et Ochsenfeld, REGION ALSACE, 236 p.
- Réal B., 2003 - Démarche proposée par le CORPEN pour l'estimation des risques de contamination des eaux, *in* Estimation des risques environnementaux des pesticides, INRA Editions (F), pp. 87-103
- Toutan C., 2001 - Diagnostic du risque de pollution des eaux superficielles par les produits phytosanitaires : typologie des bassins versants du Beaujolais viticole. ENITA de Bordeaux, Gradignan et Comité de développement viticole du Beaujolais, Villefranche sur Saône, (F), 66 p.
- Voltz M., Louchart X., 2001 - Les facteurs clés de transfert des produits phytosanitaires vers les eaux de surface. Ingénieries n° spécial Phytosanitaires, pp. 45-54