

Une méthode de spatialisation des activités agricoles au service des politiques agri-environnementales (RA-SPACE)

Application au calcul d'un indicateur pesticide spatialisé sur le bassin Adour-Garonne dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive cadre sur l'eau

Françoise Vernier, Frédéric Zahm, Frédéric Saudubray, Kevin Petit et Gladys Bousquet

La dégradation de la qualité des eaux, notamment en termes de concentration en pesticides liée aux activités agricoles, a incité les acteurs publics à renforcer leurs actions à l'échelle du territoire afin de définir des zones prioritaires où intervenir pour réduire les risques de pollution. Dans cet article, les auteurs nous présentent les principes d'utilisation, sur le bassin Adour-Garonne, d'une méthode qui permet l'intégration de données statistiques agricoles recueillies au niveau de la commune, afin de réaliser un état des lieux des masses d'eau.

Au plan institutionnel, l'intégration de l'environnement dans la politique agricole commune a modifié les règles classiques d'une intervention publique uniforme sur le territoire. En effet, jusqu'à la fin des années quatre-vingt, la Politique agricole commune (PAC) est essentiellement consacrée à la gestion des organisations communes de marchés fondées sur une politique de prix agricoles et de quotas, puis évolue à partir de 1992 en un régime de soutiens directs aux produits. Cependant, bien que la PAC intègre à partir de 1992 une politique de soutien agri-environnemental destinée à inciter les exploitants agricoles à préserver les ressources naturelles, elle reste en France trop peu spatialisée pour répondre aux enjeux territoriaux (Barbut et Baschet, 2005). En revanche, d'autres politiques environnementales telles que la Directive cadre sur l'eau (DCE) ou Natura 2000 ont bouleversé ce principe d'aspatialité de l'intervention publique en agriculture (Berriet-Sollicet *et al.*, 2006) pour prendre en compte la diversité des enjeux environnementaux propres à chaque territoire (Lacroix *et al.*, 2004). La mise en œuvre de ces politiques environnementales territorialisées demande des méthodes d'évaluation (*ex ante*) adaptées et opérationnelles pour le choix des

zonages pertinents d'application de ces politiques. Ainsi, pour réaliser les états des lieux lors de la mise en œuvre de la DCE (Commission européenne, 2000), les recommandations méthodologiques mettaient en avant l'intérêt de spatialiser les données publiques à l'échelle de la zone hydrographique. Or, les six agences de l'eau françaises ont été confrontées à l'absence de méthodes opérationnelles permettant de traiter des données socio-économiques, environnementales et agricoles, collectées à l'échelle d'unités administratives (commune, canton) et de les analyser à l'échelle de la zone hydrographique, zone élémentaire d'analyse de la DCE.

Cette approche territorialisée relativement récente des politiques environnementales pose ainsi la question de la disponibilité de méthodes opérationnelles pour résoudre cette question de l'intégration d'informations issues de niveaux d'organisation différents. De même, la combinaison de données environnementales et socio-économiques issues de découpages spatiaux différents interroge sur la manière de spatialiser les informations étudiées en passant d'une échelle à une autre, ou plus exactement d'un niveau d'organisation à un autre (Dumolard, 1998). L'impact du choix du découpage spatial

Les contacts

Cemagref, UR
ADBX, Aménités et
dynamiques des
espaces ruraux,
50 avenue de Verdun,
Gazinet, 33612 Cestas

sur les résultats d'analyse de certaines variables a été décrit en tant que *modifiable areal unit problem* (MAUP) (Openshaw, 1984) à partir essentiellement d'analyses de données socio-économiques ou épidémiologiques, sans toutefois qu'il soit mis en place de solutions génériques et opérationnelles, applicables directement à notre domaine d'étude.

L'objectif de cet article est de présenter une méthode opérationnelle dans le domaine de l'agri-environnement qui permette de traiter la question méthodologique de l'intégration de données statistiques agricoles recueillies à un niveau d'organisation administratif – la commune – dans un niveau d'organisation à enjeu environnemental – la zone hydrographique.

Nous rappellerons tout d'abord les principes et concepts mis en œuvre au plan méthodologique par les agences de l'eau pour la réalisation de l'état des lieux. Puis nous situerons nos travaux dans l'état de l'art sur cette question de l'intégration de plusieurs niveaux d'organisation appliquée aux questions agri-environnementales. Nous présenterons alors la méthode développée (RA-SPACE) en nous appuyant sur un exemple d'application : la mise à jour de zonages de pression phytosanitaire *via* le calcul d'un indicateur spatialisé sur le bassin Adour-Garonne, dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE. Nous conclurons par une discussion sur les limites et les perspectives d'utilisation de cette méthode dans la mise en œuvre de programmes agri-environnementaux.

La mise en place de la DCE nécessite des outils de spatialisation des activités agricoles

La DCE fixe comme objectifs environnementaux de prévenir la détérioration du statut de toutes les eaux (eaux de surface, souterraines, transitaires et côtières), mais aussi de rendre aux milieux aquatiques leur « bon état » d'ici à 2015, par une politique de préservation ou de restauration des milieux (Commission européenne, 2000).

Les entités spatiales de la DCE

La DCE établit un principe essentiel d'unicité spatiale pour éviter de dissocier l'unité spatiale qui serait celle de l'analyse de la situation, d'une unité spatiale de la gestion des mesures. Il s'agit du concept de masse d'eau, qui est le découpage élémentaire des milieux aquatiques mais aussi l'unité de référence de l'évaluation pour la DCE.

Plusieurs échelles de travail ou de synthèse sont utilisées dans l'état des lieux pour caractériser l'état des eaux de surface :

- **la masse d'eau** correspond pour les eaux de surface à un tronçon de cours d'eau, un lac ou une zone côtière homogène du point de vue de ses caractéristiques physiques (influençant la vie aquatique) et des pollutions ou prélèvements qui l'affectent (Miquel, 2001). La « masse d'eau » constitue l'unité de travail élémentaire à l'échelle de laquelle toutes les opérations d'analyse des pressions et de suivi des milieux doivent être réalisées ;

- **la zone hydrographique** correspond au plus petit bassin versant élémentaire défini dans le référentiel national hydrographique (la base de données Carthage®). La zone hydrographique représente la zone surfacique rattachée à une masse d'eau superficielle dans le cadre de l'évaluation des pressions. En d'autres termes, c'est le territoire agricole ou non, susceptible d'avoir une influence sur une masse d'eau superficielle. La base Carthage® référence environ 6 200 zones hydrographiques pour la France métropolitaine ;

- **l'unité hydrographique de référence** (UHR) est un bassin versant correspondant à un territoire sur lequel la mise en place d'une gestion intégrée (SAGE²) est ou serait pertinente. Ce découpage est défini dans le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE)³. Il s'agit donc d'une unité de gestion, alors que la masse d'eau est une unité d'objectif (le bon état) et de surveillance. Une UHR regroupe plusieurs masses d'eau.

Une évaluation du risque pour chaque masse d'eau lors de l'état des lieux

La démarche d'élaboration de l'état des lieux comprend une caractérisation des sources de pollutions ponctuelles et diffuses d'origine agricole, une estimation des pressions sur l'état quantitatif des eaux ainsi qu'une analyse des incidences de l'activité humaine et des décisions d'aménagement du territoire sur l'état des eaux. En France, cette étape s'est terminée début 2005. Le risque de non-atteinte du bon état des eaux (RNABE) est estimé à partir d'une double analyse qui croise qualité physico-chimique et qualité biologique pour arriver à un classement de la masse d'eau suivant cinq classes de niveau de risque (de bleu à rouge). Cette première évaluation du RNABE

1. Cartographie thématique des agences de l'eau et du ministère de l'Écologie et du Développement durable.

2. Schéma d'aménagement et de gestion des eaux.

3. Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux.

▼ Tableau 1 – Schéma d'évaluation du risque de non-atteinte du bon état des eaux (RNABE) en 2015 (source : Agence de l'eau Adour Garonne, 2005).

		État actuel des masses d'eau				
		Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
Tendance issue des scénarii d'évolution (horizon 2015)	Baisse	Non-risque	Non-risque	Doute	RNABE	RNABE
	Stabilité	Non-risque	Non-risque	RNABE	RNABE	RNABE
	Hausse	Doute	Doute	RNABE	RNABE	RNABE

est alors confrontée avec des scénarii d'évolution des pressions anthropiques pour au final estimer le RNABE en 2015, selon les règles de décision schématisées dans le tableau 1. Notons que ce risque évalué à l'échelle de chaque masse d'eau prend en compte le fait que certaines pressions situées sur une masse d'eau peuvent avoir des répercussions sur les masses d'eau voisines.

Bilan de l'analyse des méthodes pour caractériser les pressions agricoles au titre de l'état des lieux : une volonté de spatialisation, mais un manque de méthode harmonisée entre les agences de l'eau

Le guide méthodologique national édité par le ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer proposait aux agences de l'eau de calculer les différentes pressions polluantes exercées par les activités agricoles au niveau de zones homogènes et suggère une

« ventilation » des données du dernier recensement agricole (RA) par zone hydrographique, sans toutefois en préciser la méthode.

En pratique, les agences de l'eau ont conduit leurs évaluations de l'état des lieux en fonction des données dont elles pouvaient disposer localement et dans des délais très courts. Compte tenu de ce manque d'outil identifié et des délais imposés pour finaliser l'état des lieux, chaque agence de l'eau a dû élaborer sa propre méthode (tableau 2). Les agences de l'eau Adour-Garonne, Loire-Bretagne et Rhône-Méditerranée et Corse ont fait le choix de les utiliser, le plus souvent à l'échelle du canton, sans les transférer à l'échelle de la zone hydrographique. À l'inverse, les agences Rhin-Meuse et Seine-Normandie ont choisi une évaluation de la pression à l'échelle de la zone hydrographique, mais sans valoriser l'information présente à l'échelle des unités administratives. Notre analyse des méthodes utilisées (Zahm *et al.*, 2005) souligne l'absence de méthodes opérationnelles utilisables par les

▼ Tableau 2 – Différentes méthodes d'évaluation des pressions phytosanitaires d'origine agricole sur les masses d'eau superficielles par les agences de l'eau.

Agences de l'eau	Données sources mobilisées	Échelle d'analyse (commentaires)
Adour-Garonne	Utilisation du sol par canton (RA ⁴)	Canton (indicateur de pression)
Seine-Normandie	Occupation du sol (Corine Land Cover)	Zone hydrographique (niveau de pression)
Artois-Picardie	Utilisation du sol par canton (PAC ⁵ + RA)	Zone hydrographique (estimation)
Rhin-Meuse	Occupation du sol (Corine Land Cover)	Zone hydrographique (espace traité pondéré)
Loire-Bretagne	Utilisation du sol (RA)	Canton (indicateur CORPEN)
Rhône-Méditerranée et Corse	Utilisation du sol (RA)	Zone hydrographique (par approximation – indicateurs)

4. Données issues du recensement agricole.

5. Données issues des déclarations PAC (politique agricole commune).

agences de l'eau pour résoudre ce problème du transfert de l'information issue du recensement agricole vers l'échelle de la zone hydrographique, limitant ainsi la précision de l'évaluation des pressions d'origine agricole dans les états des lieux.

Lors de ce diagnostic, les agences de l'eau ont donc bien été confrontées à un problème d'utilisation de données non géoréférencées, notamment des données agricoles à l'échelle des entités spatiales de gestion de la DCE. Elles le sont encore aujourd'hui, dans le cadre de leur 9^e programme cadre (2007-2012) avec deux enjeux majeurs : l'élaboration de programmes de mesures susceptibles de permettre d'atteindre le bon état pour les masses d'eau qualifiées en situation de RNABE et la révision des SDAGE.

La spatialisation des activités agricoles : des méthodes à développer

L'exemple d'une politique environnementale territorialisée telle que la DCE montre combien la caractérisation des activités agricoles dans des zones à enjeux environnementaux constitue une condition préalable pour la gestion et l'aide à la décision. En effet, les données pertinentes pour sa mise en œuvre n'existent pour la plupart qu'à l'échelle d'entités administratives ; aussi est-il nécessaire de définir à quels niveaux d'organisation, à quelles entités spatiales il est fait référence pour transférer ces informations vers un niveau d'organisation à enjeu environnemental.

Entités spatiales et niveaux d'organisation

En agri-environnement, on distingue trois types d'organisation spatiale dont les niveaux s'entremêlent : l'organisation écologique (versant, bassin versant, unité paysagère, etc.), l'organisation fonctionnelle (parcelle, exploitation, tissu d'exploitations), l'organisation administrative (commune, canton, pays). La réduction efficiente des impacts environnementaux de l'agriculture implique d'étudier, sur un espace donné, les relations d'un système complexe intégrant des processus de nature variée aux différents niveaux d'organisation, à savoir l'échelle physique des processus mais aussi l'échelle d'organisation des acteurs socio-économiques : le territoire peut ainsi être défini comme un objet hybride des sciences de la nature et de l'homme (Caron,

2005). Un niveau d'organisation peut être défini comme une entité qui a du sens, derrière laquelle se lit également la notion de seuil alors que celle d'échelle renvoie à l'idée de continuité (Houdart, 2005).

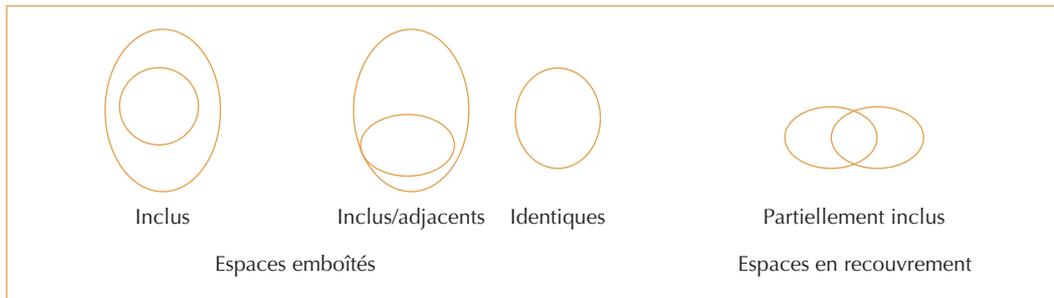
Cette question du transfert d'informations entre niveaux d'organisation mobilise la théorie hiérarchique. Cette théorie suppose que l'espace soit structuré en niveaux d'organisation superposés qui interfèrent les uns avec les autres. Elle prédit qu'il n'y a pas un continuum dans les échelles, mais un certain nombre de valeurs distinctes (Burel *et al.*, 1992 ; Brunet *et al.*, 1997). Dans chaque niveau, l'espace est décrit en unités fonctionnelles élémentaires qui sont fondamentalement dépendantes de l'échelle. À chaque niveau d'organisation correspondent des objets (une nomenclature), des processus et des paramètres pertinents. Dans cette organisation de type hiérarchique, aucune échelle ne permet, à elle seule, de comprendre les causes et les conséquences de l'état d'une masse d'eau ou d'en prévoir les évolutions (Roche *et al.*, 2005). Il faut donc prendre en compte l'ensemble de ces échelles, mais aussi le fait que chaque niveau de cette hiérarchie abrite son propre cycle adaptatif et donc, évolue à son propre rythme.

Deux types de situations sont mis en avant dans la littérature :

- le transfert d'informations s'opère le plus souvent au sein d'un même type d'organisation, entre entités spatiales emboîtées : de la parcelle à l'exploitation, de la commune au pays, ou encore du bassin versant au bassin versant englobant (Marceau, 1999 ; Dumanski *et al.*, 1998) ;

- le transfert d'informations peut s'opérer entre entités spatiales qui ne s'organisent pas selon une relation d'emboîtement, où les partitions de l'espace sont dites incompatibles (Sanders, 2001). Brunet parle alors d'espaces « de recouvrement » ou espaces intersectés, pour lesquels seulement une partie du territoire ou de l'entité spatiale est incluse dans un(e) autre territoire ou entité, ce qui correspond à notre cas d'étude. Il faut alors pouvoir décrire les relations entre entités spatiales et niveaux d'organisation.

Les relations entre les entités spatiales peuvent être décrites selon les relations classiques entre objets définies dans les systèmes d'information géographique (figure 1). Les espaces emboîtés ou recouverts peuvent ainsi, dans une certaine mesure, utiliser des opérateurs de topologie spatiale classiques.



◀ Figure 1 – Emboîtement et recouvrement d'espaces sources et opérateurs de topologie spatiale (adapté d'après Allen, 1983)

Comment transférer l'information dans des espaces emboîtés ou intersectés ?

Le transfert d'information s'opère soit par agrégation à un niveau supérieur englobant les entités spatiales, soit par désagrégation à un niveau inclus dans les entités spatiales. C'est dans ces deux démarches que se trouvent les solutions pour le changement d'échelle dans le cas d'entités spatiales en recouvrement.

Les méthodes d'agrégation et de désagrégation

L'agrégation permet de passer des constituants au tout. Elle est le plus souvent à la fois spatiale (entités fusionnées à un niveau supérieur) et thématique (données agrégées à un niveau thématique supérieur) – (Dumolard, 1998). Une première difficulté en agri-environnement : la transposition des processus identifiés à une échelle n'offre aucune garantie de validité à une autre échelle. Une seconde difficulté tient dans l'interaction entre les processus physiques : s'il est envisageable de représenter le processus isolé, le tout est souvent plus que la somme des parties. Pour cette raison, Dalgaard *et al.* (2003) distinguent trois procédures d'agrégation, la dernière permettant au mieux de pallier cette difficulté : la procédure linéaire, la procédure non linéaire et la procédure « hiérarchique ». La procédure d'agrégation linéaire, la plus classique, consiste à effectuer la somme des parties. Quant à la procédure d'agrégation non linéaire, elle postule que la variable étudiée n'est pas une fonction linéaire de l'unité fondamentale, mais qu'elle prend des valeurs différentes selon plusieurs seuils. L'agrégation doit alors prendre en compte les caractéristiques intrinsèques des unités fondamentales. Enfin, la procédure « hiérarchique » ne prend plus seulement en compte les caractéristiques intrinsèques de chacun des éléments du système, mais également les relations entre ces éléments (Riitters, 2005).

La désagrégation permet de déterminer le comportement des constituants à partir de celui du tout. Elle correspond au passage d'une valeur moyenne sur un domaine à sa répartition détaillée à l'intérieur d'un découpage de ce domaine. Les méthodes pour la désagrégation sont plus nombreuses et plus complexes que celles requises pour l'agrégation. Elles dépendent notamment des données disponibles : proximité des points d'acquisition des données, quantité de données initiales (Houdart, 2005). La méthode générale permettant la désagrégation d'information pour passer d'un échantillon spatial à une couverture complète de l'espace est celle de l'interpolation spatiale : elle implique une procédure générant au mieux des valeurs vraisemblables. Cette méthode repose sur des outils caractérisant directement la forme d'une organisation spatiale et regroupe un grand nombre de techniques. Certains indicateurs sont utilisés pour mesurer globalement la forme d'une distribution spatiale : les indices d'auto-corrélation sont les plus classiques. D'autres méthodes de géostatistique appréhendent l'espace de manière plus locale tels les variogrammes qui permettent de repérer des ruptures dans la répartition des données (Iraola, 1999) ou les techniques d'interpolation et de krigeage (Ernault *et al.*, 2003). Toutefois, ces méthodes traitent essentiellement les situations d'emboîtement, alors que les gestionnaires sont souvent confrontés à des situations d'espaces en recouvrement.

Les espaces en situation de recouvrement : changement de niveau d'organisation

Dans notre cas d'étude, les entités spatiales considérées (communes et zones hydrographiques) se trouvent en situation de recouvrement. Les méthodes décrites précédemment ne permettent donc pas de répondre complètement à notre

question du transfert de l'information d'une entité spatiale vers une autre (de la commune vers la zone hydrographique).

Selon Sanders (2001), l'analyse de découpages spatiaux incompatibles impose généralement de se ramener à un niveau d'échelle commun, soit par agrégation à un niveau supérieur englobant les deux espaces, soit par désagrégation à un niveau inclus dans les deux espaces. Dans l'optique de transférer l'information entre deux espaces en situation de recouvrement, l'étape initiale de désagrégation des données doit être suivie d'une démarche agrégative permettant de reconstituer l'information au niveau le plus pertinent. Cette démarche implique la création d'une nouvelle partition constituée d'unités élémentaires incluses dans les deux espaces intersectés (Macary et Vernier, 2005). Cependant, la phase d'agrégation doit être réalisée en veillant à ne pas franchir de seuil dans les niveaux d'organisation car les références en paramètres et fonctionnements, équations et conceptualisations peuvent changer (Puech, 2000).

Peu de méthodes ont été proposées jusqu'à récemment pour transférer l'information d'une échelle à une autre en agri-environnement (Dalggaard, 2003). La question de l'eau est celle qui revient le plus souvent dans la littérature en raison des nombreux découpages environnementaux et administratifs qui interviennent dans la mise en œuvre des politiques publiques. Ainsi, Wasson relève en 2001 que la mise en œuvre de la DCE nécessite de pouvoir disposer de modèles prévisionnels pour le choix des actions prioritaires de restauration et souligne l'absence de méthodes disponibles aux échelles pertinentes de territoires, pour la modélisation des liaisons pressions-impacts. Cette question de l'intégration de niveaux d'organisation en situation de recouvrement se retrouve dans le traitement des données de l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE), à agréger soit au niveau de la commune, soit au niveau des îlots de recensement. En effet, les découpages administratifs liés à la collecte des données sont incompatibles avec les zonages concernés par les nouvelles problématiques sociales ou environnementales étudiées (bruit, déplacement, travail, etc.). Un autre exemple concerne l'estimation des populations résidentes exposées au bruit des aéroports à partir des données administratives existantes. Certains îlots de recensement faisant partie de zones différentes d'exposition aux

bruits, il n'est pas possible d'agréger directement les données du recensement de la population. Cependant, l'examen de ces approches ne nous a pas permis d'identifier une méthode applicable aux questions agri-environnementales pour transférer l'information entre niveaux d'organisation. La méthode RA-SPACE présentée dans cet article s'inscrit donc dans un champ de recherche d'un transfert d'information entre entités spatiales non emboîtées.

Une spatialisation de données de la statistique agricole à l'échelle des zones hydrographiques avec la méthode RA-SPACE

Le support d'application de cette méthode concerne la spatialisation des données communales du recensement agricole (RA, 2000) dans les zones hydrographiques de la DCE sur l'ensemble du bassin Adour-Garonne. L'objectif est de reconstituer ces données de statistique agricole à l'échelle des zones hydrographiques, afin de caractériser l'agriculture puis y effectuer des traitements ou analyses spécifiques tels que la production d'indicateurs agri-environnementaux.

Relation entre les objets spatiaux entre commune et zone hydrographique

Nous sommes confrontés à des entités spatiales en situation de recouvrement, c'est-à-dire qu'une partie seulement du territoire ou de l'entité spatiale est incluse dans un(e) autre territoire ou entité. Une zone hydrographique peut en effet se trouver sur le territoire de une à plusieurs communes (dans la pratique, de une à trois le plus souvent), et à l'inverse, une commune peut se partager entre plusieurs zones hydrographiques.

Schéma général de la méthode

La méthode développée pour reconstituer les données du RA à l'échelle de la zone hydrographique implique donc d'une part la mise en place d'une base de données spatialisées permettant la prise en compte des entités spatiales et de leurs attributs (logiciel ArcGIS), et d'autre part de développer un modèle statistique (logiciel SAS) permettant de contrôler et maîtriser la désagrégation-réagrégation des données thématiques attachées aux objets spatiaux de référence, communes et zones hydrographiques de la DCE.

En effet, les données agricoles communales de la statistique agricole (le RA) ne sont pas localisées.

La description de l'agriculture dans les zones hydrographiques nécessite donc de réaffecter les données de surface de chaque culture de la manière la plus pertinente possible :

- soit en affectant les surfaces agricoles de chaque commune au prorata de leur surface dans chaque zone hydrographique ;
- soit en utilisant la base de données Corine Land Cover (CLC, 2000) comme variable de contrôle pour répartir les surfaces agricoles.

Cette seconde approche est plus satisfaisante car elle permet de mieux prendre en compte l'hétérogénéité de cette répartition. Mais elle implique au préalable d'établir une correspondance entre

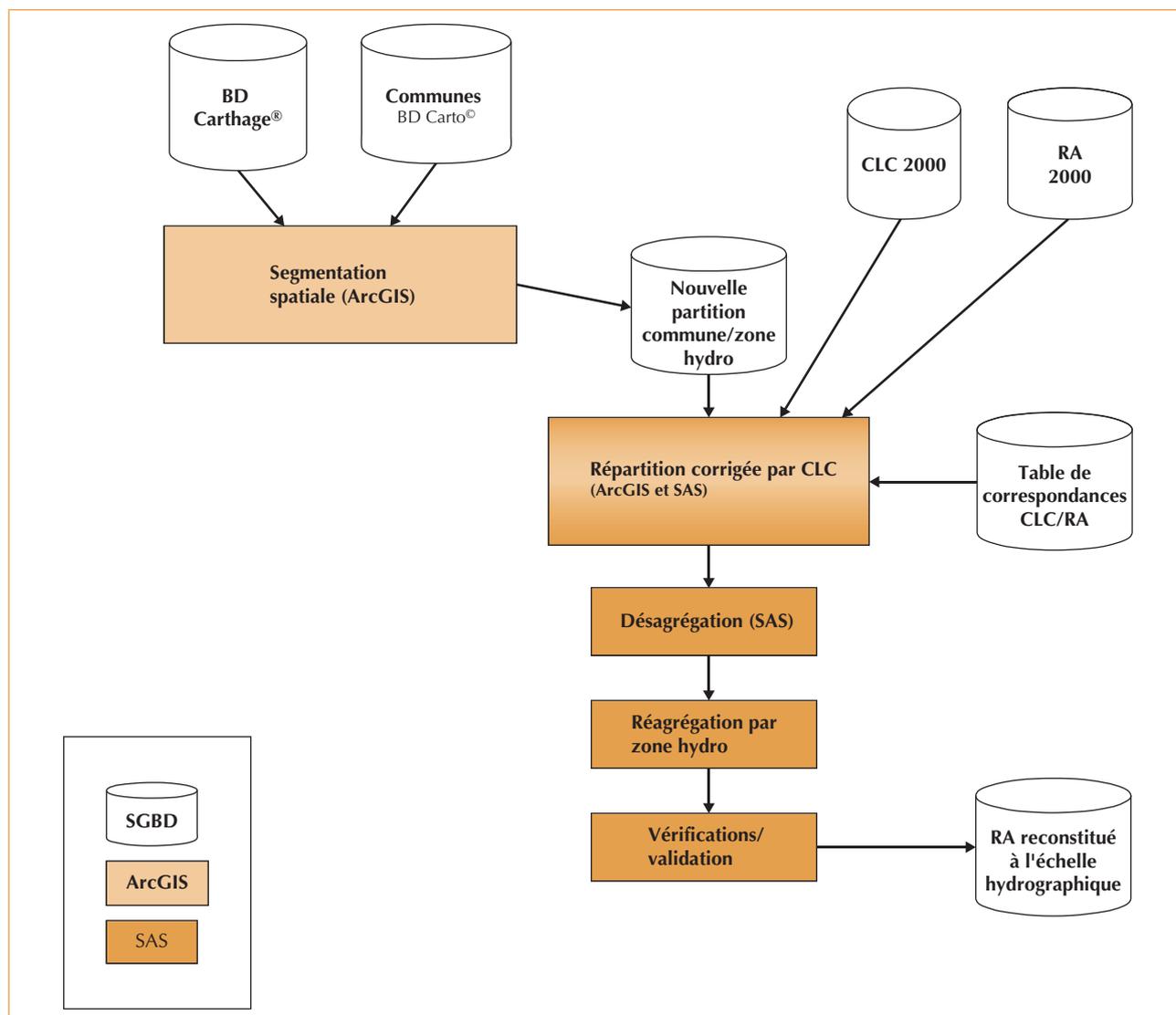
les variables de la statistique agricole du RA et celles de la nomenclature de la base de données CLC 2000. En effet les classes d'utilisation du sol dans Corine Land Cover sont plus agrégées que les variables du RA qui détaillent toutes les cultures et autres occupations du sol.

La mise en œuvre de la méthode RA-SPACE comprend six étapes (figure 2) :

- établir une partition de la zone d'étude composée de nouvelles entités spatiales élémentaires, en intersectant les couches d'information (BD Carthage®, BD Carto® [IGN®], CLC 2000) et après analyse topologique (ArcGIS 9 et SAS) ;

6. Institut géographique national.

▼ Figure 2 – Schéma des différentes étapes de la méthode RA-SPACE.



- mettre en place une base de données spatialisée prenant en compte ces entités spatiales et leurs attributs ;
- définir une table de correspondance entre les variables des deux bases de données : RA 2000 et CLC 2000 ;
- désagréger les données du RA communal dans ces nouvelles entités spatiales élémentaires par un processus itératif ;
- ré-agréger ces données de ces nouvelles entités dans les zones hydrographiques ;
- réaliser les contrôles de validité.

Obtention des entités spatiales élémentaires

Les données utilisées sont les données des exploitations agricoles, agrégées à l'échelle communale, issues de la base de données du recensement agricole (RA 2000). Les couches d'information géographique utilisées sont la base de données BD Carthage®, le référentiel national hydrographique (IGN, 2002), une couche d'information communale issue de traitements effectués sur la BD Carto® de l'IGN et enfin la base de données Corine Land Cover 2000 (CLC 2000) réalisée à partir d'images satellitales à une date proche de celle du recensement agricole utilisé.

Un traitement statistique effectué sous le logiciel SAS permet de déterminer les seuils de tolérance à appliquer dans le logiciel SIG⁷ pour minimiser les erreurs dues à l'imprécision des couches géographiques et éviter la création d'artefacts ne correspondant pas à une intersection réelle entre commune et zone hydrographique. Ces nouvelles entités spatiales possèdent un double identifiant : le code de la commune et le code de la zone hydrographique : on peut les noter **P(i,j)** où **i** représente le numéro de la commune et **j** le numéro de la zone hydrographique. On peut

définir le taux d'appartenance d'une commune à une zone hydrographique comme étant le **rapport de la surface de l'objet P(i,j) sur la surface totale de la commune Ci**. La somme des taux d'appartenance de chaque commune aux différentes zones hydrographiques doit être égale à 1.

Désagrégation des données du RA dans les entités spatiales élémentaires

Pour disposer d'une meilleure estimation de la localisation des informations, les surfaces culturales du RA sont désagrégées en utilisant une variable de contrôle. La variable de contrôle choisie est le type d'occupation du sol donnée par la base de données géographique Corine Land Cover (CLC 2000). Cette base de données, issue du traitement d'images satellitales (IFEN⁸, 2005), possède une nomenclature hiérarchisée à trois niveaux et quarante-quatre postes répartis selon cinq grands types d'occupation du territoire : territoires artificialisés, territoires agricoles, forêts et milieux semi-naturels, zones humides, surface en eaux. Les données du RA et les données de CLC 2000 déclinent respectivement l'utilisation du sol et l'occupation du sol, et par conséquent n'utilisent pas la même nomenclature. Il est donc nécessaire d'établir une table des correspondances.

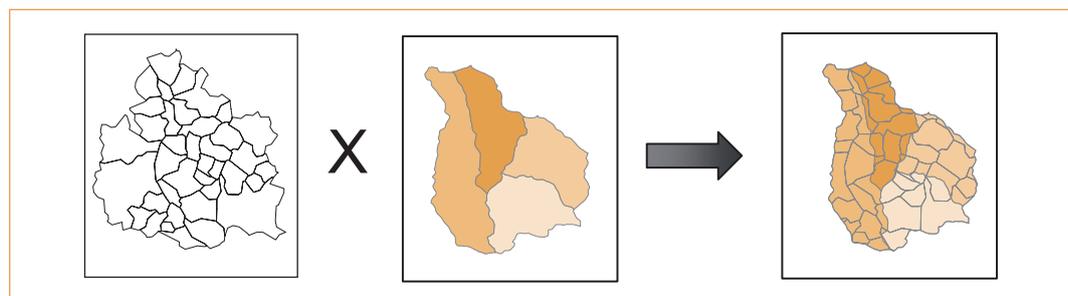
La table des correspondances retenue est celle proposée par Forge (*Institute for Environment and Sustainability*, 2000), seule table de correspondance validée à partir de travaux de comparaison entre les deux nomenclatures de Kayadjanian et Vidal (*European Environment Agency*, EUROSTAT *et al.*, 2001). Elle a été adaptée par les auteurs au contexte du bassin Adour-Garonne (*cf.* l'extrait présenté dans le tableau 3).

La désagrégation est réalisée à l'aide d'un programme (SAS) et par l'intermédiaire de la variable de contrôle. Chaque variable du RA est « répartie » entre une ou plusieurs zones hydrographiques,

7. Système d'information géographique.

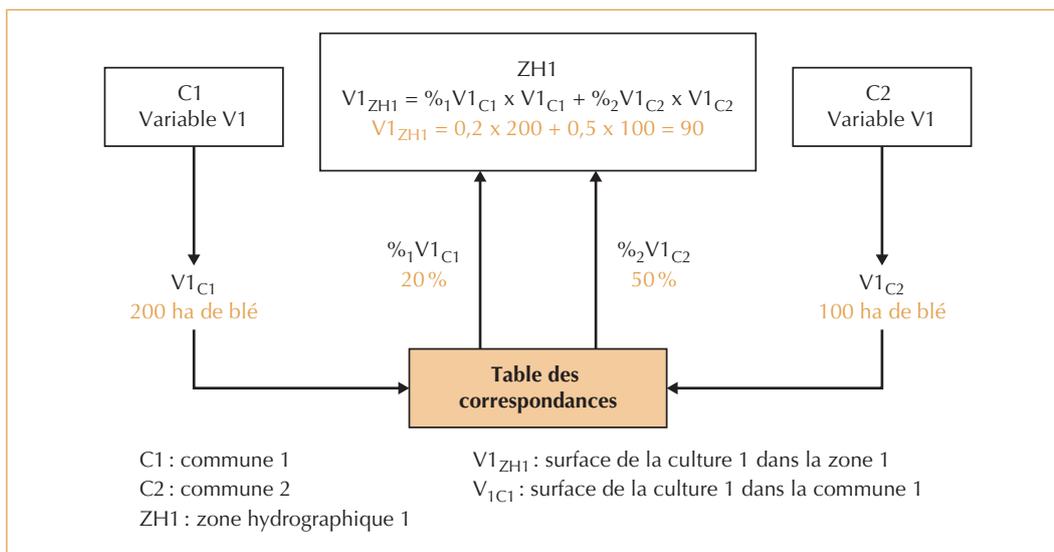
8. Institut français de l'environnement.

► Figure 3 – Nouvelle partition de l'espace par intersection des couches géographiques et définition de seuils de tolérance appropriés.



▼ Tableau 3 – Extrait de la table de correspondance entre les variables du RA 2000 et la nomenclature CLC (source : *European Environment Agency*, 2001, adaptée Cemagref, 2006). La variable agrégée « céréales » du RA se retrouve dans les types d'occupation du sol 211, 242 et 243 de la nomenclature CLC.

Variables du RA	CLC	211	221	222	231	242	243
		Terres arables hors périmètres d'irrigation	Vignobles	Vergers et petits fruits	Prairies	Systèmes culturaux et parcellaires complexes	Territoires principalement occupés par l'agriculture
Céréales		x				x	x
Cultures industrielles		x				x	x
Légumes secs et protéagineux		x				x	x
Fourrages annuels		x				x	x
Prairies fourrages		x			xx	x	x
STH (surfaces toujours en herbe)					x	xx	xx
Pommes de terre		x				x	x
Légumes frais		x				x	x
Fleurs		x				x	x
Vignes			x			xx	xx
Vergers et petits fruits				x		xx	xx
Pépinières		xx		x		xx	xx
Jachères		x				x	x



◀ Figure 4 – Désagrégation des données du RA pour chaque zone hydrographique.

non pas en fonction de la surface représentée par cette zone hydrographique mais en fonction de la présence d'une occupation du sol compatible dans la base CLC : de nouvelles pondérations sont ainsi calculées et permettent de créer un tableau (ou matrice) des pondérations pour chaque type d'occupation du sol.

La répartition des données agricoles dans les entités spatiales élémentaires est ainsi effectuée par désagrégation des données initiales par pondération variable par variable. Cette démarche est itérative, car à une commune peut correspondre plusieurs zones hydrographiques et vice et versa. Ainsi, pour une commune qui se répartit sur deux zones hydrographiques ZH1 et ZH2, et ce pour chaque variable du RA, un traitement est réalisé pour l'affecter en ZH1 ou ZH2 selon la table de correspondance établie. En l'absence de correspondance entre les variables du RA et de CLC, le calcul s'établit au prorata des surfaces des objets spatiaux ; s'il existe une correspondance, le calcul s'effectue au prorata des surfaces présentes dans ZH1 et ZH2. Dans ce cas, la somme des surfaces de ces différentes zones est réalisée dans ZH1 et ZH2 et la répartition se fait au prorata des totaux obtenus (exemple : blé et terres arables/céréales/surfaces essentiellement agricoles). Au final, il est vérifié, à titre de validation, que pour chaque poste de nomenclature, la somme des surfaces désagrégées est égale à la somme des surfaces données par la base d'origine.

Réagrégation des données du RA dans les zones hydrographiques

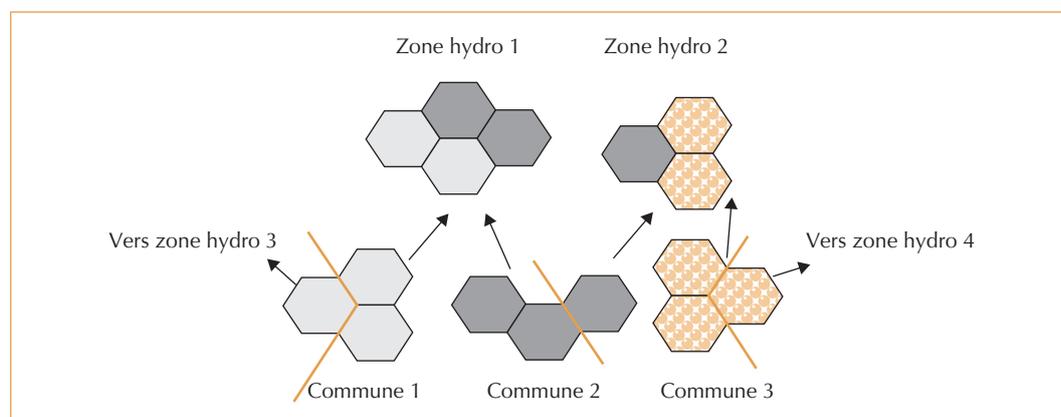
Les variables du RA ont été ainsi désagrégées de chaque commune vers une ou plusieurs zones

hydrographiques. Il faut alors reconstituer par agrégation, pour chaque zone hydrographique, les données agricoles qui lui sont affectables, à partir des données agricoles issues des différentes parties de communes qui se trouvent sur son territoire comme le montre la figure 5. L'agrégation des données agricoles aux niveaux des zones hydrographiques est calculée variable par variable en fonction de la typologie d'utilisation du sol et en utilisant la table des correspondances entre variables. La démarche est itérative pour les *n* communes considérées.

La réalisation des contrôles de validité

Plusieurs contrôles de validité sont réalisés tout au long des différentes étapes. En premier lieu, il s'agit de vérifier la validité topologique de la couche des entités spatiales élémentaires (éviter les artefacts). Ensuite, la validité de la désagrégation nécessite un contrôle des surfaces qui s'effectue par une comparaison entre les surfaces du RA original et les surfaces du RA désagrégé et par vérification avec les surfaces données par la base Corine Land Cover (variable de contrôle). Enfin, il faut effectuer une validation du RA ré-agrégé par rapport aux surfaces (totaux croisés). Par ailleurs, l'utilisation des données du RA communal est conditionnée à une demande officielle auprès de l'INSEE pour la levée du secret statistique. Le respect de ce secret statistique impose, lors des publications de résultats, que les données issues de chaque variable ré-agrégée dans une zone hydrographique proviennent d'au moins trois exploitations agricoles recensées dans le RA 2000 (loi n° 51-711 du 7 juin 1951 consolidée le 9 avril 2005). Il faut donc vérifier que les résultats respectent bien ces conditions.

► Figure 5 – Réagrégation des données pour chaque zone hydrographique.



Enfin, l'usage de ces données doit prendre en compte les erreurs dues à l'imprécision des couches géographiques et de la donnée statistique elle-même (exemple : le siège de l'exploitation induit le rattachement à la commune alors que certaines parcelles peuvent se trouver sur une autre commune). Ainsi, la couche d'information du RA par zone hydrographique qui est produite relève de la cartographie statistique, avec un domaine de validité découlant des règles qui ont été appliquées.

Application de la méthode RA-SPACE au calcul d'un indicateur phytosanitaire spatialisé sur le bassin Adour-Garonne

Nous avons choisi d'illustrer l'application de cette méthode à partir du travail conduit avec l'agence de l'eau Adour-Garonne pour le calcul d'un indicateur de pression phytosanitaire à l'échelle du bassin hydrographique, dans l'objectif d'une mise à jour de l'état des lieux (Vernier *et al.*, 2006).

Bilan des méthodes utilisées par les agences pour l'évaluation de la pression phytosanitaire exercée par les activités agricoles

Nous avons vu comment les agences de l'eau avaient utilisé différentes méthodes lors de l'état des lieux initial pour évaluer la pression phytosanitaire provenant des activités agricoles, le plus souvent à l'échelle du canton. L'agence de l'eau Adour-Garonne a ainsi calculé en 2004 un indicateur de pression phytosanitaire à l'échelle cantonale selon la formule :

$$\text{Indicateur} = \sum_{\text{Culture } n}^{\text{Culture } n} (\text{surface culture} / \text{ha} \times \text{nombre traitements} / \text{ha} / \text{an})$$

Cet indicateur mobilise les données suivantes :

- l'utilisation du sol et la localisation des pratiques culturales sur le district Adour-Garonne (données cantonales obtenues à partir du recensement agricole de 2000) ;
- le nombre moyen de traitements phytosanitaires (passages sur la parcelle agricole) sur chaque type de culture par an.

Calcul d'indicateurs pesticides à l'échelle du bassin Adour-Garonne en utilisant RA-SPACE

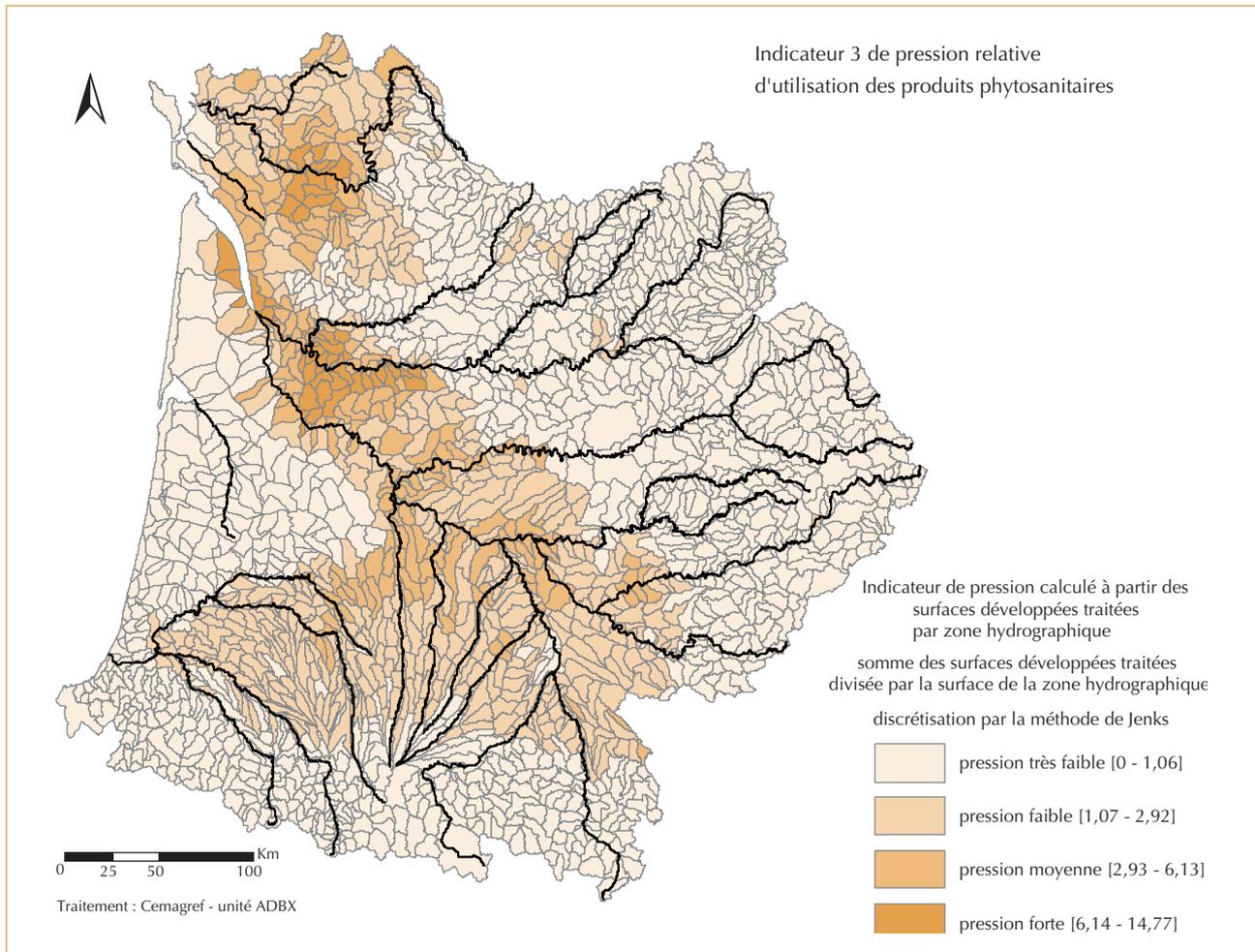
L'indicateur de pression correspond à la somme des surfaces développées traitées et a été calculé dans cette phase d'actualisation de l'état des lieux, non plus à l'échelle cantonale mais en utilisant la méthode RA-SPACE à partir du RA ré-agrégé à l'échelle de la zone hydrographique. L'intersection des 7 093 communes et des 1 980 zones hydrographiques de notre zone d'étude a conduit, en fonction des critères topologiques choisis à la création de 17 000 entités spatiales élémentaires prises en compte dans la suite des traitements, les résultats étant ensuite agrégés à l'échelle des zones hydrographiques. Nous avons proposé que les valeurs de cet indicateur initial (indicateur n° 1) soient rapportées à des surfaces appropriées pour rendre compte d'informations complémentaires. Il a été suggéré de rapporter la valeur brute de l'indicateur :

- à la SAU⁹ totale de la zone hydrographique, afin de décrire l'intensité des traitements sur la surface totale traitée (indicateur n° 2) ;
- à la surface totale de la zone hydrographique, afin de décrire « l'intensité ou la dilution » des traitements sur le territoire correspondant au découpage environnemental (indicateur n° 3).

Les histogrammes de distribution des valeurs de pressions d'utilisation des produits phytosanitaires montrent des formes de distributions fortement asymétriques. En effet, une grande partie des zones hydrographiques possède des niveaux de pression faible. Ainsi, l'histogramme de l'indicateur n° 1 de pression absolue montre que 66,57 % des 1 980 zones hydrographiques du bassin Adour-Garonne ont un niveau de pression inférieur à la valeur 6 000 ; 1,72 % des zones hydrographiques ont une valeur supérieure à 48 000 (sur une échelle de valeurs allant de 0 à 111 218). Une discrétisation en classes par la méthode de Jenks a été réalisée et c'est la carte de restitution présentant l'indicateur n° 3 qui a été considérée comme la plus pertinente par l'agence de l'eau (figure 6).

Nous avons également réalisé une comparaison entre les deux indicateurs calculés à deux niveaux d'organisation différents : le canton et la zone hydrographique. Les valeurs brutes des indicateurs n'étant pas comparables, nous avons comparé sur chacun des objets spatiaux, les valeurs

⁹. Surface agricole utile.



▲ Figure 6 – Valeurs de l'indicateur n° 3 sur le bassin Adour-Garonne calculé à l'échelle de la zone hydrographique (source : données du RA 2000, BD Carthage®, traitement Cemagref, 2006).

de la classe de l'indicateur (classe égale ou classe différente, distance). La comparaison porte bien donc sur l'appartenance à la classe (pression phytosanitaire très faible, faible, moyenne, forte). Pour 65 % de la surface totale du bassin Adour-Garonne, soit 76 301 km², les classes de zonage identifiées par les deux indicateurs de pression phytosanitaires sont les mêmes. *A contrario*, pour respectivement 9,6 % du territoire (soit 10 600 km²), la pression donnée par l'indicateur de l'agence de l'eau est sous-évaluée et pour 25 %, soit 29 300 km², elle est surévaluée par rapport à la pression calculée selon la méthode RA-SPACE.

Si les classes d'affectation données par les deux indicateurs dépassent rarement une classe

de différence, ces résultats montrent que la méthode RA-SPACE apporte une réévaluation significative de la pression à l'échelle du district Adour-Garonne de par la superficie concernée, à partir d'une nouvelle spatialisation des données de la statistique agricole. Au final, ces résultats permettent d'obtenir une évaluation de la pression directement à l'échelle la plus pertinente pour la mise en œuvre de la DCE (la zone hydrographique). L'intérêt de la méthode est donc évident pour la définition des zones d'intervention prioritaires et l'affectation des moyens qui en découle par l'agence de l'eau. Car, au-delà de cet indicateur de pression phytosanitaire, cette méthode est généralisable à l'évaluation de toutes les pressions faisant appel à des données spatialisées.

Discussion

Limites de la méthode

Une première limite de la méthode est liée à la pertinence des données utilisées pour réaliser les intersections de couches géographiques et leur couplage avec les bases de données thématiques. En effet, les précisions géométriques et de nomenclature des bases géographiques utilisées sont sources d'erreurs : ainsi la base CLC ne cartographie pas des zones de moins de 25 ha, ce qui exclut des petites zones de vergers ou de vignes pourtant fortement impliquées pour la définition de zones prioritaires d'action dans une problématique pesticides. L'intersection des couches géographiques utilisées génère des artefacts (polygones sans signification thématique) qu'un processus automatisé permet simplement de limiter en nombre. Par ailleurs, le recensement agricole est réalisé à partir des communes des sièges d'exploitation agricole, autre source d'erreur potentielle. Enfin, la table de correspondance entre la nomenclature du RA et de CLC est à nouveau une source d'erreur, une correspondance ne pouvant d'ailleurs pas toujours être trouvée. Des améliorations pourraient être apportées en ce domaine si l'on disposait d'une couverture géographique d'occupation du sol plus précise, réalisée par exemple à partir d'images satellitaires traitées à l'échelle régionale ou de grand bassin et qui utilise une nomenclature plus fine en termes d'occupation du sol agricole. La table de correspondance recensement agricole/occupation du sol serait en conséquence plus performante et elle serait facilement adaptable à la méthode existante (programme SAS). Concernant les données agricoles, une meilleure prise en compte d'informations sur les pratiques agricoles et l'environnement dans les enquêtes institutionnelles permettraient d'accroître les possibilités d'analyse en agri-environnement.

Utilisation des résultats et transfert possible de la méthode à d'autres territoires ou enjeux

La méthode RA-SPACE a montré sa capacité à répondre aux besoins d'un opérateur (l'agence de l'eau Adour-Garonne) pour la mise à jour de l'état des lieux. Cependant, la diffusion des résultats (données du RA ré agrégées à l'échelle de la zone hydrographique) est confrontée au secret statistique et aux vérifications qui doivent être conduites. Les résultats ne peuvent donc être diffusés que sous forme d'indicateur ou de

données agrégées (avec précaution pour des données déjà issues d'une désagrégation-réagrégation). Un consensus doit donc être trouvé entre la nécessité de préserver la confidentialité des données et leur utilisation par des chercheurs ou des décideurs, en définissant un niveau de risque acceptable. D'autre part, si ce modèle est susceptible de pouvoir directement s'appliquer sur les autres districts hydrographiques français, son utilisation nécessite de pouvoir disposer des données communales d'occupation du sol du RA. Cette étape implique, pour les services opérationnels d'instruire un dossier d'accès pour lever le secret statistique.

Pour la réalisation de la première phase d'état des lieux, l'agence de l'eau Adour Garonne a fait le choix d'un indicateur « simplifié » de pression, avec comme objectif d'identifier les zones où il existe des usages importants de produits phytosanitaires. Ce zonage pourrait donc être actualisé en prenant en compte les nouveaux indicateurs retenus par le ministère chargé de l'agriculture, comme l'indicateur de fréquence de traitement. Cet indicateur, qui rapporte la quantité de chaque substance active à une dose « unité » qui lui est propre, permet d'apprécier également l'intensité du recours aux pesticides. Par ailleurs, ce zonage de la pression phytosanitaire pourrait être complété par un croisement avec la sensibilité des sols aux transferts de ces produits vers les eaux de surfaces en s'appuyant sur les travaux régionaux existants (GRAP Midi Pyrénées, GRAP Aquitaine¹⁰).

La méthode RA-SPACE pourrait également être mobilisée pour les autres enjeux environnementaux en lien avec les pratiques agricoles : pollution diffuse par l'azote notamment. Elle pourrait aussi contribuer à l'évaluation du nouveau règlement de développement rural, en contribuant à des études de cas qualitatives ou quantitatives en spatialisant les données de l'Observatoire de développement rural (ODR) dans les zones à enjeux environnemental. L'ODR¹¹ développé par l'INRA¹² comprend en effet des informations à l'échelle communale sur le suivi des réalisations des soutiens au développement rural (exploitations, aides payées, surfaces engagées...).

Conclusions

L'intégration de différents niveaux d'organisation en situation de recouvrement nécessite d'envisager un changement d'échelle permettant de transférer l'information d'un niveau à un autre. L'état de l'art

10. GRAP : Groupe régional d'action contre les pollutions par les produits phytosanitaires.

11. <https://esrcarto.supagro.inra.fr/intranet/>

12. Institut national de recherche agronomique.

réalisé, sans être exhaustif, montre que plusieurs méthodes existent pour y parvenir, que ce soit la superposition de couches multi-scalaires ou la désagrégation-réagrégation des données. Pourtant, le traitement du recouvrement d'échelles semble n'être encore qu'un problème émergent. Très peu d'outils se sont révélés opérationnels ou transférables pour résoudre le problème de spatialisation des activités agricoles lié à la mise en œuvre de la DCE. Cela a donc créé un besoin important et urgent, par rapport aux délais prévus, d'outils opérationnels, notamment de modèles prévisionnels pour le choix des actions prioritaires de restauration. Ces outils seraient également utiles aux services déconcentrés de l'État. Ils peuvent être élaborés à partir de méthodes développées dans d'autres domaines ou transférées à partir d'équipes de recherche en statistiques et analyse spatiale. Toutefois, un débat sur les échelles et niveaux d'organisation à prendre en compte dans la mise

en œuvre des politiques environnementales serait un préalable.

La méthode utilisée pour développer le modèle RA-SPACE est relativement générique puisqu'elle peut directement être appliquée à tout le territoire français, notamment dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE ou du 9^e programme des agences de l'eau. Les résultats obtenus montrent la plus-value de ce type d'approche spatiale dans le diagnostic et la prise de décision par rapport aux méthodes plus immédiatement opérationnelles qui avaient été mises en œuvre pour la mise en application de la DCE. Son principe peut par ailleurs facilement être repris pour l'adapter à d'autres enjeux environnementaux, en prenant en compte des entités spatiales de nature différente (unité paysagère par exemple). Cela implique toutefois une analyse préalable pour identifier quelle est la variable de contrôle pertinente et définir une table de correspondance appropriée. □

Remerciements

Ce travail a été soutenu financièrement par le ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche (direction générale de la forêt et des affaires rurales – DGFAR) et l'agence de l'eau Adour-Garonne.

Résumé

Dans le domaine de l'agri-environnement, le régulateur est confronté à une absence de méthodes opérationnelles pour accompagner la territorialisation des politiques publiques. En effet, la plupart des données institutionnelles ne sont pas accessibles à l'échelle des entités spatiales à enjeu environnemental où le gestionnaire est censé mettre en œuvre des programmes de mesures. D'autre part, il existe peu de méthodes opérationnelles permettant un transfert d'informations entre plusieurs niveaux d'organisation. Pour s'affranchir de cette difficulté liée à des découpages spatiaux incompatibles, nous proposons une méthode (RA-SPACE) qui permet le transfert de données à l'échelle communale – le recensement agricole – vers une échelle environnementale – la zone hydrographique – unité d'évaluation de la directive cadre sur l'eau (DCE). Basée sur un modèle statistique de désagrégation-réagrégation couplé à un système d'information géographique, la méthode proposée utilise l'information spatialisée d'occupation du sol issue de la base de données Corine Land Cover. Un exemple d'application de la méthode est présenté à partir de l'actualisation du calcul d'un indicateur de pression phytosanitaire à l'échelle du bassin Adour-Garonne : le zonage obtenu par cette méthode a été retenu par l'Agence de l'eau dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE.

Abstract

In the field of agri-environment, decision makers have to face a lack of operational methods useful for the implementation of public policies. The RA-SPACE method presented in this paper aims to provide a solution for transferring data from an administrative level to an environmental one and to describe the agricultural activities at the scale of the hydrographic unit (HU), in the context of the application of the Water Framework Directive (WFD). It is based on a GIS approach and on a statistical model and uses aggregation and breaking up tools, so that all the variables of the RA (Agricultural Census) would be recovered at the hydrological unit scale. This method has been applied to the calculation of a spatialised pesticide indicator at the Adour-Garonne district scale. The sensitive areas for pesticide pressure defined in this way were chosen by the River Basin Agency for the diagnosis phase of the implementation of the WFD.

Bibliographie

- BARBUT, L., BASCHET, J.-F., 2005, L'évaluation de la politique de soutien à l'agri-environnement, *Notes et études économiques*, ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et de la Ruralité, n° 22, p. 39-70.
- BERRIET-SOLLIEC, M., DÉPRÉS, C., TROUVÉ, A., 2006, *La territorialisation de la politique agricole en France. Vers un renouvellement de l'intervention publique en agriculture*, UMR CESAER Working paper 2005/2006, INRA-ENESAD, 14 p.
- BRUNET, R., FRANÇOIS, J.-C., GRASLAND, C. 1997, La discontinuité en géographie : origines et problèmes de recherche, *L'espace géographique*, n° 4, p. 297-308.
- BUREL, F., BAUDRY, J., 1992, Approche spatiale des phénomènes écologiques : échelle et hiérarchie, *Bulletin d'écologie*, 1-2/23, p. 93-101.
- CARON, P., 2005, À quels territoires s'intéressent les agronomes ? Le point de vue d'un géographe tropicaliste, *Natures Sciences Sociétés*, vol. 13, p. 145-153.
- COMMISSION EUROPÉENNE, 2000, *Directive 2000/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau*, JOCE n° L 327 du 22 décembre 2000, 72 p.
- DALGAARD, T., HUTCHINGS, N.J., PORTER, J.R., 2003, Agroecology, scaling and interdisciplinarity, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 100(1), p. 39-51.
- DUMANSKI, J., PETTAPIECE, W.W., MCGREGOR, R.J., 1998, Relevance of scale dependent approaches for integrating biophysical and socio-economic information and development of agroecological indicators, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 50(1-3), p. 13-22.

- DUMOLARD, P., 1998, Validation d'un découpage territorial, in : *10^{es} rencontres Jacques Cartier sur les découpages du territoire*, INSEE Méthodes, n° 76-77-78, p. 59-69.
- ERNOULT, A., BUREAU, F., POUDEVIGNE, I., 2003, Patterns of organisation in changing landscapes : implications for the management of biodiversity, *Landscape Ecology*, 18(3), p. 239-251.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, EUROSTAT, 2001, *Towards agri-environmental indicators - Integrating statistical and administrative data with land cover information*, Topic report, n° 6, 133 p.
- HOUDART, M., 2005, *L'intégration de différents niveaux d'organisation spatiale dans les problématiques agri-environnement. Un état de l'art*, Rapport de recherche, Cemagref, 40 p.
- IFEN, 2005, *L'utilisation de Corine Land Cover 2000*, Orléans, Département des méthodes données et synthèses.
- IRAOLA, C., 1999, Analyse de la variabilité spatiale de la conductivité hydraulique sur sol sableux, Étude ENSG/ Cemagref Bordeaux, ENSG, 50 p. + annexes.
- LACROIX, A., BEL, F., MOLLARD, A., SAUBOUA, E., 2004, Territorialisation des politiques environnementales. Le cas de la pollution nitrique de l'eau par l'agriculture, in : *Actes de la journée d'études « Les territoires de l'eau »*, Université d'Artois, Arras, 26 mars 2004.
- MACARY, F., VERNIER, F., 2007, Zonage de risque potentiel de transferts de pesticides à l'échelle de bassins versants : quelles méthodes pour un transfert d'échelles spatiales ?, in : *Pesticides : impacts environnementaux, gestion et traitements*, Presses Pont et Chaussées, p. 245-259.
- MARCEAU, D.-J., 1999, The scale issue in social and natural sciences, *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 25, n° 4, p. 347-356.
- MIQUEL, G., 2001, *Rapport sur la qualité de l'eau et de l'assainissement en France*, Rapport n° 1, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Tome 1, Paris, Sénat et Assemblée nationale, 195 p.
- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, 2002, *Circulaire du 12 février 2002 relative à l'élaboration des documents de l'état des lieux en application des articles 5 et 6 de la directive n° 2000/60/CE du 23 octobre 2000 du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire de l'eau*.
- OPENSHAW, S., 1984, *The modifiable areal unit problem*, Geo Books, Norwich, UK.
- PUECH, C., 2000, *Utilisation de la Télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes*, Montpellier, Cemagref/Engref, 83 p.
- RIITTERS, K. H., 2005, Downscaling indicators of forest habitat structure from national assessments, *Ecological Indicators*, 5(4), p. 273-279.
- ROCHE, P.-A., BILLEN, G., BRAVARD, J.-P., DÉCAMP, H., PENNEQUIN, D., VINDIMIAN, E., WASSON, J.-G., 2005, Les enjeux de recherche liés à la directive-cadre européenne sur l'eau, *Comptes Rendus Geoscience*, 337(1-2), p. 243-267.
- SANDERS, L., 2001, *Modèles en analyse spatiale*, Paris, Hermès Science.
- VERNIER, F., ZAHM, F., BOUSQUET, G., PETIT, K., 2006, *Méthode de spatialisation des activités agricoles en appui à la mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau. Application au calcul d'un indicateur pesticide par zone hydrographique du bassin Adour-Garonne*, Rapport de recherche Cemagref, 78 p.
- WASSON, J.-G., 2001, Les questions de recherche posées par la Directive Cadre Européenne sur l'eau : problématique pour les eaux de surface continentales, *Hydroécol. Appl. premier*, p. 1-19.
- ZAHM, F., LAPLANA, R., MACARY, F., VERNIER, F., LEIBREICH, J., LESCOT, J.-M., PAULAIS, J., UNY, D., 2005, *Mise en œuvre de la directive cadre eau : démarches et méthodes appliquées par les Agences de l'Eau pour l'évaluation du RNABE et le calcul des pressions polluantes exercées par l'agriculture*, Rapport de recherche Cemagref, 62 p.