Un itinéraire méthodologique pour modéliser les interactions agriculture-environnement. Application à un territoire rural martiniquais

MARIE HOUDART*, MURIEL BONIN*, FRÉDÉRIC SAUDUBRAY, MONIQUE FORT*****

** CIRAD tera, station de Neufchâteau, Sainte Marie, 97 130 Capesterre Belle Eau*
*** Cemagref, Unité ADER, 50 avenue de Verdun, Gazinet, 33612 Cestas cedex*
**** DYNMIRIS-UMR 8586 PRODIG, Université Paris 7, 2 Place Jussieu, 75251 Paris Cedex 05*

RÉSUMÉ
Les problématiques agri-environnementales requièrent la prise en compte de niveaux d'organisation différents. Ceci pose des problèmes de transfert des informations et des données d'une échelle à l'autre. Afin de faire le lien entre activités agricoles et environnement par le biais des pratiques phytosanitaires, nous proposons un itinéraire méthodologique fondé sur l'articulation entre une démarche multi-scalaire et l'utilisation de trois outils (SIG, modélisation graphique et SMA). Testé sur un territoire rural martiniquais soumis au problème de pollution des eaux par les pesticides, cet itinéraire méthodologique permet de mettre en valeur à la fois les déterminants des pratiques à plusieurs niveaux d'organisation, les liens entre ces niveaux et les impacts potentiels de ces pratiques sur l'environnement. Dans le cas de la Martinique, il est ainsi souligné que l'aménagement du territoire est l'une des conditions *sine qua non* pour la diminution des niveaux de pollution dans les eaux de surface. L'approche intégrée apparaît finalement pertinente pour l'anayse et la résolution des problèmes agri-environnementaux et pourrait être appliquée à d'autres situations touchant à la multifonctionnalité de l'agriculture.

MOTS CLES : modélisation intégrée, SIG, modélisation graphique, système multi-agents, Martinique, pollution

ABSTRACT
Agri-environment is defined as an integrative research field, caracterised by scaling and interdisciplinarity, taking into account relations between society and nature. In order to understand the complexity of the rural system in which the various activities and their interrelationships take place, an approach integrating several levels of space organization is necessary. To do this, we used three tools, e.g. GIS, graphic modeling and multi-agents systems (MAS). Tested on a rural territory of Martinique subjected to the problem of water pollution by pesticides, this approach emphasizes the determinants of the practices at several levels of organization, links between these levels and potential impacts of these practices on the environment. It is thus stressed that the regional planning is one of the indispensable conditions for the reduction of water pollution. This study eventually shows the necessity to take into account the various sides of rural development in order to solve environmental problems.

KEY WORDS : integrated modelling, GIS, graphic modelling, multi-agents systems, Martinique, pollution

1. Introduction

L'agri-environnement est un champ de recherche qui nécessite la prise en considération de différents niveaux d'organisation : niveaux d'organisation fonctionnel (compréhension du fonctionnement du système bio-physique), niveaux de gestion agricole (de la parcelle à l'exploitation) et niveaux administratifs (commune, entités de gestion administrative diverses). Ainsi les problématiques agri-environnementales requièrent-elles une approche systémique, transversale et pluridisciplinaire (Bellon *et al.*, 2001 ; Barreteau *et al.*, 2004).

La question de la pollution des eaux de surface par les pesticides, qui constitue par ailleurs un enjeu environnemental majeur à la Martinique, est une bonne illustration de ces problématiques. Afin d'engager une réflexion intégrée de ce problème environnemental (Greiner, 2004), nous sommes partis de l'hypothèse que la compréhension de l'organisation spatiale des activités agricoles à l'échelle d'un territoire rural devait permettre

d'apporter un regard nouveau sur les déterminants des pratiques polluantes et d'amener à proposer des solutions durables pour la diminution des niveaux de pollution (Houdart, 2005). Il s'agissait alors de mettre en place une démarche permettant d'intégrer différents niveaux d'organisation spatiale tout en reliant les informations et les données d'une échelle spatiale à une autre.

Dans cet article, nous rendons compte de cette démarche en soulignant les résultats originaux qu'elle nous a permis d'apporter concernant les déterminants des pratiques polluantes et les solutions à mettre en oeuvre.

2. Matériel et méthode

Le territoire rural est appréhendé comme un système : ses composantes sont les exploitations ; l'environnement correspond aux conditions naturelles ainsi qu'aux contextes économique, politique et réglementaire et conditionne les choix des agriculteurs ; la sortie est représentée par les pratiques phytosanitaires, formalisées sous la forme d'un indicateur de contribution des parcelles à la pression polluante (IcP[1]) (Houdart, 2005). Analyse spatiale et systémique, emboîtement des niveaux d'organisation et triple point de vue sur l'espace (structuré, géré et perçu) constituent alors les fondements de notre approche conceptuelle.

Cette approche est appliquée sur un territoire rural de 1200 hectares situé sur les flancs de la montagne Pelée en Martinique. Cette zone, retenue en raison du niveau élevé de pollution des eaux de surface, se caractérise par l'exclusivité des activités agricoles et la diversité des espèces cultivées : banane, ananas, cultures maraîchères et vivrières, arboriculture fruitière. Les données recueillies auprès des 46 exploitants présents sur cette zone portent sur les itinéraires techniques par parcelle, le fonctionnement global de l'exploitation, les relations des exploitants avec leur environnement (réseaux sociaux et ressources naturelles).

Ces données sont traitées au moyen d'un itinéraire méthodologique reposant sur l'utilisation de trois outils : les Systèmes d'informations géographiques (SIG) ; la modélisation graphique (chorèmes) ; les Systèmes multi-agents (SMA) (figure 1).

Les données relatives aux pratiques et aux activités agricoles sont saisies dans une base de données pluri-scalaire, en lien avec un système d'information géographique (SIG) pour la représentation et l'analyse spatiale. L'indicateur de contribution à la pression polluante (IcP) est calculé à l'échelle des parcelles. Il est spatialisé et mis en relation avec les autres sources d'informations géoréférencées. De premières hypothèses concernant les

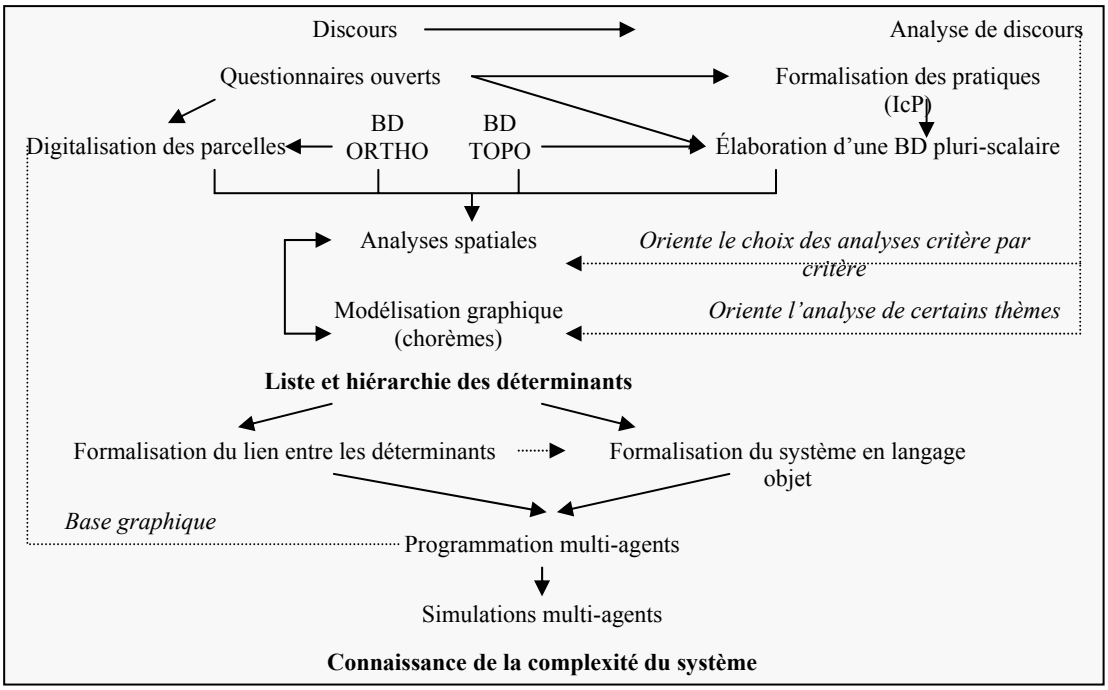

Figure 1. *L'itinéraire méthodologique*

1. Calculé à l'échelle de la parcelle, l'IcP correspond à une pondération de la charge polluante par la toxicité et la solubilité des molécules constitutives de cette charge.

déterminants des pratiques sont alors émises.

Les résultats de ces analyses spatiales constituent le point de départ du travail de modélisation graphique. L'objectif est d'identifier et hiérarchiser les actions majeures qui produisent et transforment l'organisation du système (Cheylan *et al.*, 1990). SIG et modèles graphiques se nourrissent l'un de l'autre selon une démarche dialectique. Dans le sens ascendant (induction), les structures spatiales identifiées sur SIG permettent d'élaborer un alphabet graphique. Ce dernier retient les chorèmes représentatifs des structures élémentaires de niveaux spatiaux emboîtés (exploitation, bassin versant, territoire rural). Les modèles graphiques sont ensuite le fruit de l'association de ces chorèmes et de ceux issus de données moins "visibles" (conflits d'usage, communication). La comparaison entre les différents modèles obtenus révèle le manque de pertinence de certains chorèmes, et met parfois en lumière des relations, des niveaux spatiaux. Dans le sens descendant (déduction), l'alphabet graphique est corrigé et complété. Les nouveaux éléments identifiés font l'objet d'une analyse spatiale à l'aide du SIG. Au final, cette étape graphique permet de lister et hiérarchiser les déterminants des pratiques phytosanitaires.

La conceptualisation du fonctionnement de ce système se fait ensuite par le biais d'un langage de description formel (Unified Modeling Language). L'étape ultime du processus consiste à implémenter le modèle conceptuel en un système multi-agents. Celui-ci permet d'explorer le système et de tester sa dynamique temporelle. Les unités spatiales interviennent comme agent au même titre que les acteurs. La simulation multi-agents enrichit alors le travail de modélisation graphique en intégrant la dynamique temporelle (Bousquet et Le Page, 2004).

3. Résultats

La distribution de l'IcP indique l'importance des charges phytosanitaires et l'utilisation de produits toxiques et solubles, souvent dans les parties basses des bassins versant et à proximité des cours d'eau (Houdart, 2005). L'itinéraire méthodologique suivi permet d'identifier les déterminants majeurs de cette distribution et d'évaluer les liens dynamiques entre ces déterminants.

3.1. Des déterminants de la distribution de l'IcP à plusieurs échelles spatiales

Cinq déterminants principaux suffisent à expliquer la distribution de l'IcP : l'orientation culturale et le système de culture, le fonctionnement spatial des exploitations agricoles, les comportements environnementaux des exploitants et les unités de contraintes du territoire rural.

Les espèces cultivées ne nécessitent pas toutes les mêmes traitements. Dans le cas de la rive gauche de la Capot, la banane et l'ananas et dans une moindre mesure, certaines espèces maraîchères comme la tomate, sont les cultures les plus exigeantes en terme d'utilisation de pesticides.

Une différenciation forte est ensuite introduite d'une espèce à l'autre, en fonction du système de culture. Par exemple, pour la production de bananes, les systèmes de culture intégrant l'utilisation de matériel sain (vitro-plant) sur sol sain (après une jachère de 18 mois) sont beaucoup moins consommateurs de pesticides que les systèmes traditionnels (absence de jachère, utilisation des rejets). Pour le maraîchage-vivrier, l'utilisation de pesticides est fortement dépendante de l'importance temporelle et spatiale accordée à certaines espèces maraîchères telles que la tomate, le concombre ou encore la courgette.

Associé à la permanence des réseaux sociaux hérités de la période coloniale et aux relations qui en découlent (conflits béké/antillais, apprentissage par le travail sur les habitations[2], etc.), des formes originales de gestion de l'espace apparaissent, formalisées sous forme de six types de fonctionnement spatial d'exploitation (Houdart *et al.*, 2004). Alors que les "grandes exploitations stables" (SAU > 20 ha, mode de faire-valoir direct ou fermage) se tournent majoritairement vers des cultures d'exportation, le plus souvent synonymes d'agriculture intensive, les "conjoncturels" s'adaptent aux fluctuations du marché local (SAU comprise entre 5 et 20 ha, diversification de cultures destinées au marché local, agri-tourisme). Les "exploitants sans terre" participent de la même façon au développement des produits locaux pour des raisons différentes (impossibilité de mise en culture de variétés spéculatives en colonage ou occupation sans titre). Les "jardiniers" (SAU < 1 ha, pluri-activité) contribuent à l'entretien d'un paysage rural antillais en voie de disparition. Quant aux "propriétaires terriens" (spéculation foncière), ils nous ramènent au problème de déprise agricole généralisable à l'ensemble de l'île.

2. Terme vernaculaire désignant la plantation, et qui souligne son importance en tant que cadre de vie durant la période esclavagiste.

La composante "sensibilité environnementale" apparaît très importante pour comprendre les différences de conduites pour des espèces similaires : regard porté sur la toxicité du produit et son efficacité (cible) ; choix global d'un système de culture visant une diminution de l'usage des pesticides ; choix d'une culture ne nécessitant aucun pesticide, etc. Trois types de comportement ont été identifiés : ceux qui n'utilisent aucun pesticide ; ceux dont la consommation de pesticides est massive et dont l'attitude générale se rapproche du comportement de lutte systématique ; ceux qui sont portés, pour des raisons idéologiques et/ou économiques, vers un raisonnement de leurs pratiques les incitant à minimiser les épandages de pesticides.

L'analyse locale prenant en compte les contraintes spatiales des exploitations a permis de faire émerger un découpage de la zone d'étude basé sur la perception que les agriculteurs ont de leur environnement. Cinq unités de contraintes ont été identifiées. La première est située à moins de 500 mètres des bourgs. L'espace est morcelé en de petites parcelles et les pressions sociales et foncières sont fortes. La seconde se caractérise par des pentes faibles et les bourgs sont encore proches. La troisième réunit des contraintes fortes pour l'installation d'exploitations, du fait de la pente ou de l'action conjuguée de la pente, de l'altitude et de la distance à un axe de communication (friche et forêt). La quatrième unité comprend peu de pentes fortes mais une altitude élevée. Une extension des exploitations vers cette zone est possible moyennant des limites dans la mise en culture de certaines variétés. Enfin, la partie centrale de la zone, aux pentes moyennes, est la plus densément exploitée.

3.2. L'aménagement du territoire comme solution sine qua non pour la diminution de l'IcP

Des analyses statistiques de type segmentation permettent de dégager les liens quantitatifs existant entre les différents éléments majeurs du système énoncés ci-dessus. Ainsi, (i) les règles d'évolution de ces différents éléments sont construites et (ii) des conclusions peuvent être tirées de la dynamique globale du système rural.

L'IcP, au niveau de la parcelle, dépend de l'orientation culturale et du système de culture de l'îlot[3] auquel elle s'intègre, et de la stratégie environnementale menée sur l'exploitation. Le système de culture présente une probabilité d'évolution directement dépendante de celle de l'orientation. Cette dernière est expliquée par le type de fonctionnement spatial de l'exploitation, la localisation au sein des unités de contraintes et le nombre de parcelles constitutives de l'îlot. Enfin, le fonctionnement spatial de l'exploitation évolue en lien avec l'activité principale de l'exploitant, la surface agricole utile, le mode de faire-valoir majoritaire et l'éclatement des îlots constitutifs de l'exploitation.

Dans ce système ainsi formalisé et intégré à un modèle multi-agents, dès lors qu'un exploitant part à la retraite, ses îlots sont redistribués en fonction de règles de décision relatives aux stratégies des différentes exploitations, c'est-à-dire à leur capacité à acheter ou louer et à la réglementation foncière favorisant la vente ou la location à certaines exploitations plutôt qu'à d'autres. En fonction des modes de gestion de l'espace des exploitations, de la localisation des îlots et de critères propres à chaque exploitant, les orientations culturales et

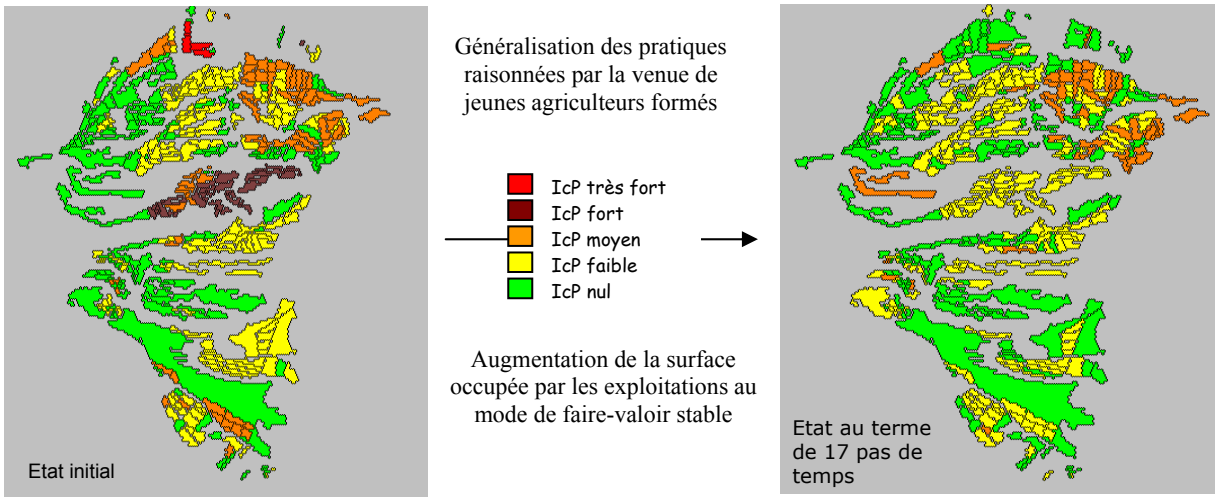

Figure 2. S*tructure des exploitations et distribution de l'IcP en début et fin de simulation multi-agents*

3. L'îlot correspond ici à une unité de gestion, comprenant plusieurs parcelles ayant le même mode de faire-valoir.

les systèmes de culture sont calculés par le modèle multi-agents. Au final, l'IcP est lui-même recalculé, en fonction de l'orientation culturale et du système de culture.

Au terme des simulations lancées sur 17 pas de temps (un pas de temps équivaut à une année), on constate une augmentation surfacique des exploitations de faire-valoir stable et la généralisation de pratiques raisonnées (principalement du fait de la venue de jeunes agriculteurs formés et sensibilisés aux questions environnementales). Cette dynamique générale provoque une diminution de la contribution des parcelles à la pression polluante (diminution des valeurs d'IcP), de même qu'à une nouvelle distribution caractérisée par une moindre concentration dans les parties basses des bassins versants (figure 2).

4. Conclusion

La modélisation multi-agents est de plus en plus fréquemment utilisée pour la gestion des ressources renouvelables et dès lors qu'interviennent, sur un même espace, actions anthropiques et processus ou déterminants naturels. Utilisé seul, cet outil est parfois taxé de réducteur, synthétisant trop, pour certains, la complexité des relations homme/nature. De la même façon, l'utilisation des chorèmes, et l'élaboration de modèles graphiques qui en découle, fait l'objet de controverses. Il nous semble que l'utilisation des chorèmes, selon la démarche dialectique présentée dans cet article, garantit la confrontation entre observation et modélisation. Par ailleurs, la connaissance développée par cette démarche s'enrichit de l'utilisation des SMA, qui participent à une synthèse et une clarification des résultats. Ainsi l'itinéraire méthodologique proposé permet-il une approche à la fois de complexité et de formalisation.

Cette double approche apparaît pertinente pour l'analyse d'une problématique agri-environnementale. Tout d'abord, l'analyse exhaustive d'un territoire rural permet de révéler des déterminants des pratiques peu soulignés jusque là. Dans le cas martiniquais, la structure foncière du territoire rural et les relations entre exploitants (marquage historique) semblent prépondérants. Parallèlement, la formalisation permet de faire le lien entre les déterminants majeurs et le volet environnement.

Il nous semble qu'un tel raisonnement pourrait être mené avec succès dans d'autres situations touchant à la multifonctionnalité de l'agriculture et à sa territorialisation. L'itinéraire de recherche se place ainsi au rang d'un itinéraire méthodologique générique et reproductible, fournissant les principes d'analyse applicables à d'autres situations agri-environnementales.

5. Bibliographie

Barreteau, O., Cernesson, F., Garin, P., Belaud, G., 2004. Quels niveaux d'organisation pour la gestion de tensions sur l'eau ? Etudes de cas dans le Sud de la France. *Actes de la journée d'études « Les territoires de l'eau »*, Université d'Artois, Arras, p. 128-140.

Bellon, S., Etienne, M., Lécrivain, E., Lavarette, M., 2001. Activités agricoles, territoires et questions d'environnement : quelles entités d'actions ? *Académie d'Agriculture de France*: 10 pages.

Bousquet, F., Le Page, C., 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management : a review. *Ecological modelling*, 176, p. 313-332.

Cheylan, J.-P., Deffontaines, J.-P., Lardon, S., Thery, H., 1990. Les chorèmes : un outil pour l'étude de l'activité agricole dans l'espace rural ? *Mappemonde*, 4, p. 2-4.

Greiner, R., 2004. Systems framework for regional-scale integrated modelling and assessment. *Mathematics and Computers in Simulation*, 64(1), p. 41-51.

Houdart, M., Bonin, M. and Saudubray, F., 2004. Typologie de fonctionnement spatial d'exploitations agricoles : application au bassin versant de la rivière Capot en Martinique. *Les Cahiers de la multifonctionnalité*, 5, p. 57-69.

Houdart, M., 2005. Organisation spatiale des activités agricoles et pollution des eaux par les pesticides. modélisation appliquée au bassin-versant de la Capot, Martinique. *Doctorat de Géographie, Université des Antilles et de la Guyane*, 318 pages + annexes.

Houdart, M., Bonin, M., LePage, C., Fort, M. and Saudubray, F., 2005. SIG, Chorèmes et Systèmes Multi-Agents, Evolution d'un système rural martiniquais et pression polluante. *Revue Internationale de Géomatique*, n°15/3, p. 339-356.