

Dynamiques agricoles et pollution nitrique diffuse : Modélisation intégrée du transfert des nitrates sur le bassin de la Seine

E. Gomez¹, C. Mignolet², C. Schott², D. Brunstein³, C. Bornerand², E. Ledoux¹, M. Benoît², J. Tournebize⁴, N. de Louvigny⁴, G. Ponsardin⁵, B. Mary⁵

Avec, par ordre alphabétique, la contribution de :

N. Beaudoin⁵, E. Bienaimé⁷, N. Brisson⁶, M. Caty², R. Cosserat⁷, C. Kao⁴, J.-F. Mari⁸, N. Nikolic⁴, J.-M. Trommenschlager², P. Viennot¹, D. Zimmer⁴

¹ Ecole des Mines de Paris, CIG, UMR Sisyphe, 35 rue St Honoré, 77305 Fontainebleau cedex
gomez@cig.ensmp.fr, ledoux@cig.ensmp.fr

² INRA, Station de recherche SAD, BP 29, 88501 Mirecourt cedex
mignolet@mirecourt.inra.fr, schott@mirecourt.inra.fr, benoit@mirecourt.inra.fr

³ CNRS, UMR – 1, place Aristide Briand, 92195 Meudon cedex

⁴ CEMAGREF, Parc de Tourvoie, BP 44, 92163 Antony

⁵ INRA, Unité d'Agronomie, rue Fernand Christ, 02007 Laon cedex
mary@laon.inra.fr

⁶ INRA, Unité CSE, Domaine Saint-Paul, Site AgroParc, 84914 Avignon cedex 9

⁷ INRA, Unité SIG, CRF, 54280 Champenoux

⁸ LORIA, UMR 7503, BP 239, Vandoeuvre-lès-Nancy

Table des matières

1.	Introduction	1
2.	Les mutations agricoles du bassin de la Seine au cours des trente dernières années	3
2.1.	Les sources d'informations.....	3
2.1.1	Les statistiques agricoles nationales.....	3
2.1.2	Les dires d'experts.....	4
2.2.	Des différenciations spatiales analysées à partir du maillage des Petites Régions Agricoles ..	5
2.3.	Dynamiques et différenciation spatiale des systèmes de production agricoles	7
2.3.1	Segmentations du bassin de la Seine en zones agricoles homogènes.....	7
2.3.2	Segmentation du bassin de la Seine en zones aux dynamiques agricoles homogènes	9
2.4.	Dynamiques et différenciation spatiale des assolements.....	11
2.4.1	Sur l'ensemble du bassin versant de la Seine	11
2.4.2	Sur la zone enquêtée.....	13
2.5.	Dynamiques et différenciation spatiale des successions de cultures	14
2.6.	Conclusion.....	18
3.	Modélisation du transfert des nitrates dans le bassin de la Marne	21
3.1.	Mise en œuvre du modèle hydrologique couplé (MODCOU)	21
3.1.1	Modélisation du bassin de la Seine	21
3.1.2	Ajustement du modèle de surface.....	25
3.1.3	Ajustement du modèle de la zone non saturée	25
3.1.4	Ajustement du modèle souterrain.....	26
3.1.5	Résultats et validation	26
3.2.	Mise en œuvre du modèle agronomique (STICS).....	29
3.2.1	Principe du modèle STICS	29
3.2.2	Adaptation du modèle au bassin de la Seine	30
3.2.3	Evaluation du modèle pour différentes cultures	30
3.2.4	Adaptation du modèle au cas du drainage artificiel	32
3.2.5	Construction de la base de données "Pratiques agricoles"	35
3.2.6	Constitution du maillage STICS.....	39
3.2.7	Définition des zones vulnérables en terme de pollution nitrique	39
3.2.8	Application de STICS sur le bassin de la Marne.....	40
3.3.	Couplage STICS – MODCOU	43
4.	Conclusions et perspectives.....	49
5.	Bibliographie.....	50

Liste des figures et tableaux

Figure 1 : Choix et rôle des niveaux de description des activités agricoles	3
Figure 2 : Délimitation de la zone d'enquête	5
Figure 3 : Concordance des maillages des PRA et des aquifères	6
Figure 4 : Répartition cantonale des Otex dans le département de l'Oise en 2000	7
Figure 5 : Segmentations du bassin de la Seine selon les combinaisons des Otex d'après les RGA de 1970, 1979 et 1988	8
Figure 6 : Segmentation du bassin de la Seine selon les combinaisons d'Otex d'après le RGA 2000	9
Figure 7 : Typologie des trajectoires d'évolution des PRA du bassin de la Seine entre 1970 et 1988 ..	10
Figure 8 : Evolution des prairies permanentes d'après les RGA de 1970, 1988 et 2000	11
Figure 9 : Evolution des surfaces en blé d'après les RGA de 1970, 1988 et 2000	12
Figure 10 : Evolution des surfaces en colza d'après les RGA de 1970, 1988 et 2000	12
Figure 11 : Segmentation du bassin de la Seine selon les combinaisons des occupations du sol d'après les RGA de 1970 et 2000	13
Figure 12 : Segmentation de la zone enquêtée selon l'évolution des occupations du sol depuis 1970..	14
Figure 13 : Interprétation d'un diagramme de Makov	14
Figure 14 : Carte hydrogéologique simplifiée	22
Figure 15 : Discrétisation de la couche de surface et des couches souterraines	23
Figure 16 : Bilan hydrique annuel, moyenne sur la période 1971-1999	26
Figure 17 : Piézométrie en régime permanent (Oligocène, Eocène, Craie)	27
Figure 18 : Comparaison des débits simulés et observés sur la période 1971-1999	28
Figure 19 : Comparaison de la piézométrie simulée et observée sur la période 1971-1999	29
Figure 20 : Matière sèche aérienne du blé d'hiver ($t\ ha^{-1}$) observée et simulée par STICS sur des essais annuels	30
Figure 21 : Quantité d'azote absorbé par le blé d'hiver ($kg\ ha^{-1}$) observée et simulée par STICS (essais annuels)	31
Figure 22 : Quantité d'azote absorbé par la betterave à sucre ($kg\ ha^{-1}$) observée et simulée par STICS sur des essais annuels.	31
Figure 23 : Quantité d'azote absorbé par le pois protéagineux ($kg\ ha^{-1}$) observée et simulée par STICS sur des essais annuels.	31
Figure 24 : Stock d'eau dans le sol (mm) observé et simulé par STICS sur le réseau de parcelles de Bruyères (02)	32
Figure 25 : Stock d'azote minéral dans le sol ($kg\ ha^{-1}$) observé et simulé par STICS sur le réseau de parcelles de Bruyères (02).	32
Figure 26 : Comparaison des hauteurs de nappe et profondeur racinaire à l'interdrain simulées par STICS avec celles mesurées par B. Rebière sur la parcelle 1 du site d'Arrou (28) en 1993-1994.	34
Figure 27 : Comparaison des concentrations journalières observée et simulée au drain, et évolution des débits simulés par STICS.	35
Figure 28 : Modèle physique simplifié de la base de données "Pratiques agricoles"	36
Figure 29 : Evolution comparée de la fertilisation azotée et du rendement, et évolution du nombre d'apports sur blé depuis 1970	37
Figure 30 : Evolution comparée de la fertilisation azotée et du rendement sur betterave	37

Figure 31 : Cartographie des doses totales d'azote minéral apportées et des rendements sur blé dans les décennies 1970 et 1990, sur les PRA de la zone enquêtée	38
Figure 32 : Cartographie des doses totales d'azote minéral apportées et des rendements sur betterave dans les décennies 1970 et 1990, sur les PRA de la zone enquêtée	38
Figure 33 : Comparaison des valeurs de rendement et de fertilisation azotée issues des dires d'experts et de l'OCERA	39
Figure 34 : Zones vulnérables en fonction de critères agronomiques et pédologiques	40
Figure 35 : Flux d'azote annuel, moyenne sur la période 1979-1999	41
Figure 36 : Flux d'azote annuel (1979-1999) en fonction de la réserve utile du sol (RU)	42
Figure 37 : Concentration moyenne annuelle (1979-1999) en fonction du taux de renouvellement du sol (TR)	43
Figure 38 : Evolution des flux d'azote sur la PRA Perthois sur la période 1979-1999	45
Figure 39 : Représentation schématique du couplage entre STICS et MODCOU-NEWSAM.....	45
Figure 40 : Comparaison des volumes d'eau calculés par STICS et par MODSUR sur la période 1996-2000.....	46
Figure 41 : Comparaison entre les flux de nitrates entrant et sortant de la zone non saturée sur la période 1979-1999.....	46
Figure 42 : Evolution de la concentration en nitrate simulée dans le piézomètre de Morains (Craie)..	47
Figure 43 : Concentration en nitrates dans les différents aquifères (parties libres) en mai 1999.....	47
Figure 44 : Evolution du bilan des flux de matière par couche souterraine	48
Tableau 1 : Définition et importance des Otex retenues sur le bassin de la Seine	7
Tableau 2 : Evolution des successions de cultures sur la Champagne crayeuse	15
Tableau 3 : Evolution des successions de cultures sur les Plateaux picards	15
Tableau 4 : Evolution des successions de cultures sur le secteur Valois - Vexin	16
Tableau 5 : Evolution des successions de cultures dans le Gâtinais	16
Tableau 6 : Evolution des successions de cultures sur les Plateaux de Brie	16
Tableau 7 : Evolution des successions de cultures dans les régions intermédiaires.....	17
Tableau 8 : Evolution des successions de cultures dans les régions maïsicoles.....	17
Tableau 9 : Evolution des successions de cultures sur les Plateaux du Barrois et de Langres.....	18
Tableau 10 : Evolution des successions de cultures dans les régions d'élevage.....	18
Tableau 11 : Evolution des successions de cultures dans la Champagne humide (52).....	18
Tableau 12 : Maillage des différentes couches.....	22
Tableau 13 : Définition des zones de production	24
Tableau 14 : Paramètres hydrodynamiques.....	28
Tableau 15 : Comparaisons des profondeurs racinaires et des rendements au drain et à l'interdrain simulés par STICS avec ceux obtenus sur la parcelle 1 du site d'Arrou en 1993-1994.....	34
Tableau 16 : Bilan des flux de matière par aquifère(t NO ₃ /an) , moyenne annuelle sur la période 1979-1999.....	48

1. Introduction

La contamination par les nitrates de l'hydrosystème de la Seine s'accroît depuis quelques dizaines d'années. Cet accroissement de la pollution nitrique diffuse est une conséquence directe de l'évolution des activités agricoles, de leur nature mais aussi de la façon dont elles s'organisent dans le territoire du bassin versant. En vue de construire un outil de prévision de la qualité des eaux du bassin en fonction de scénarios agricoles, une démarche de recherche pluridisciplinaire a été développée au cours de la 3^{ème} phase du PIREN-Seine, marquant l'entrée des agronomes dans le programme. Cette démarche s'inscrit dans le projet général de la 3^{ème} phase du programme, qui vise à progresser dans la compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème par le développement d'outils opérationnels de modélisation, tout en faisant le lien avec l'activité humaine, identifiée comme la cause première d'altération de l'hydrosystème. Nous avons ainsi tenté d'associer un processus de modélisation des flux de nitrates dans le système hydrologique avec une analyse de l'agriculture du bassin, de ses dynamiques et de son organisation spatiale.

Cette démarche peut se décliner selon trois objectifs principaux, qui s'avèrent très différents du point de vue des disciplines sollicitées. Le premier consiste à comprendre l'augmentation passée et actuelle des teneurs en nitrates dans les eaux, en réalisant un « état des lieux » des dynamiques agricoles et de leur différenciation spatiale sur le bassin. Cet état des lieux part du début des années soixante-dix, qui marquent le début des mutations agricoles de grande ampleur en France, suscitées par des progrès agronomiques et techniques sans précédent et encouragés par la protection de la Politique Agricole Commune. Il porte en particulier sur l'évolution des successions de cultures et des techniques culturales qui jouent sur le cycle de l'azote, en tant que déterminants directs des pertes en nitrates sous-racinaires. Mais il porte également sur les systèmes de production agricoles pris dans leur ensemble, qui déterminent les choix des modes d'occupation du sol, par leur inscription dans des filières différentes et par leur adaptation à des milieux naturels et humains contrastés. L'ensemble de ces relations est important à comprendre pour raisonner en termes de scénarios de modifications de pratiques agricoles et des conditions, à la fois économiques, techniques et organisationnelles, de leur faisabilité.

Le deuxième objectif porte sur la modélisation du transfert des nitrates dans le système hydrologique de la Seine, depuis les zones d'épandage d'engrais jusqu'aux exutoires, en passant par les différents réservoirs souterrains. Cette modélisation est basée sur trois modèles existants, entre lesquels des interfaces sont construites : le modèle hydrologique MODCOU¹ (simulation des écoulements superficiels et souterrains), le modèle agronomique STICS² (simulation des flux de nitrates à la base de la zone racinaire), et le modèle NEWSAM³ (simulation du transport de matières en solution dans le domaine souterrain). Elle a pour objet de quantifier le lien entre la contamination des aquifères et des cours d'eau et les pratiques agricoles (citées précédemment) au cours des trois dernières décennies.

Enfin, le troisième objectif du programme vise à simuler le transfert de nitrates en fonction d'hypothèses de modifications de pratiques agricoles. Cet objectif a été moins poussé que les deux premiers, et s'est limité à tester un petit nombre d'hypothèses choisies par la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne dans le cadre de l'Opération Ferti-Mieux des Morins à la Marne. Les simulations ont pour but de donner des premières indications concernant l'effet de modifications de pratiques agricoles sur les pertes en nitrates, sans prendre en compte les conditions de l'adoption de ces modifications par les agriculteurs, et leurs conséquences sur les systèmes de production (la construction de scénarios prospectifs sur l'évolution de l'agriculture du bassin de la Seine a été initiée en parallèle sur la fin du programme, mais elle fait l'objet d'un rapport distinct).

Ces trois objectifs, fixés en 1998, étaient ambitieux non seulement parce qu'ils supposaient une collaboration étroite entre disciplines pour associer une modélisation mécaniste de phénomènes

¹ Modèle Couplé (développé par l'Ecole des Mines de Paris)

² Simulateur Multidisciplinaire des Cultures Standards (développé par l'INRA, département Environnement & Agronomie)

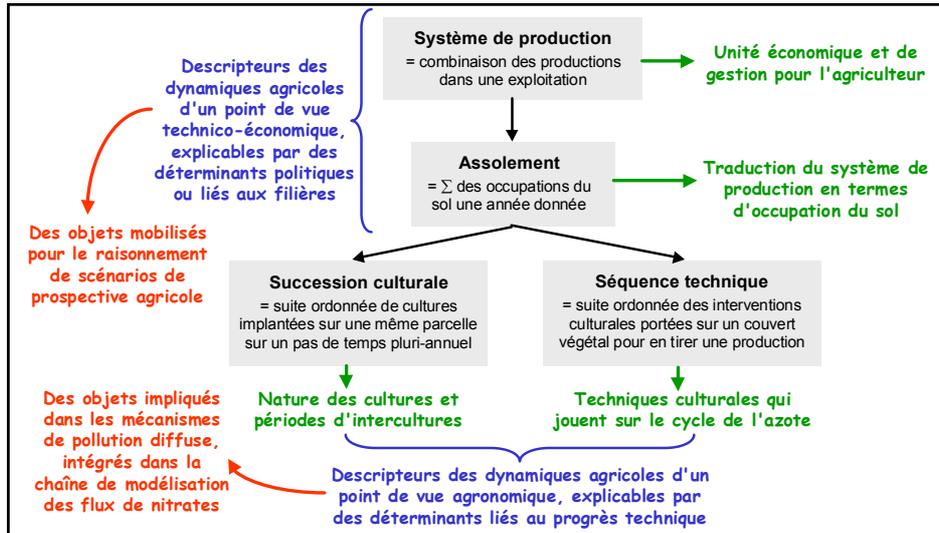
³ Modèle de simulation des écoulements et des transports de matière dans les systèmes aquifères complexes (développé par l'Ecole des Mines de Paris)

physiques avec une compréhension des activités humaines qui les gouvernent en partie, mais aussi parce qu'ils étaient posés à une très large échelle d'espace et de temps (sur un territoire d'un peu moins de 100000 km² et sur une période de 30 ans). Cette échelle a soulevé des problèmes méthodologiques assez peu abordés dans les travaux liant agriculture et qualité des eaux, dont la plupart vont de la parcelle agricole jusqu'à de petits bassins versants de quelques centaines d'hectares et se limitent à la période actuelle. Des avancées méthodologiques ont ainsi été nécessaires, au moins dans trois directions :

- Des méthodes spécifiques ont été développées en analyse spatiale et temporelle pour reconstituer les dynamiques agricoles, aux niveaux des systèmes de production, des successions de cultures et des techniques culturales, sur lesquels de surcroît les sources d'informations existantes sont actuellement lacunaires (il a ainsi été nécessaire de construire *ex nihilo* une base de données renseignant l'évolution des techniques culturales, présentée ultérieurement dans ce rapport).
- Une adaptation du modèle agronomique STICS a été entreprise à la fois pour augmenter la nature des cultures simulées en fonction des cultures pratiquées couramment sur le bassin, et pour rendre compatible une modélisation fine des processus d'utilisation de l'azote par les plantes (telle que développée initialement par le modèle à la parcelle) avec l'échelle de travail qui induit la disponibilité d'informations moins précises.
- Une méthode de régionalisation du modèle STICS et de son interfaçage avec un modèle hydrologique discrétisé a été développée. La régionalisation de STICS implique de tenir compte des évolutions spatiales et temporelles des pratiques agricoles. L'interfaçage entre STICS et MODCOU implique de développer des modèles de transfert en solution dans le domaine souterrain.

Le présent rapport est conçu en deux parties, qui reprennent les trois objectifs précédemment cités, tout en explicitant les avancées méthodologiques sous-jacentes. La première retrace les transformations de l'agriculture du bassin de la Seine au cours des trois dernières décennies, telles qu'elles peuvent être reconstituées à partir de statistiques agricoles nationales et de dires d'experts, qui permettent d'avancer des éléments d'explication sur l'évolution constatée des teneurs en nitrates dans les ressources en eau. La deuxième partie détaille la chaîne de modélisation qui a été développée pour simuler les transferts de nitrates sous influence des pratiques agricoles, en interfaçant des modèles existants. Elle présente aussi les résultats à différents niveaux de la chaîne de modélisation en exploitant la base de données des pratiques agricoles citée précédemment.

2. Les mutations agricoles du bassin de la Seine au cours des trente dernières années



La diversité des dynamiques agricoles sur un territoire peut être abordée selon différents points de vue en fonction des questions posées sur ce territoire. Concernant nos objectifs qui visent à relier les activités agricoles et des risques de pollution par les nitrates, mais également à comprendre les évolutions agricoles passées pour travailler sur des scénarios prospectifs, quatre niveaux de description de l'agriculture ont été retenus (Figure 1) : (i) les systèmes de production agricoles et leur traduction en termes (ii) d'assolement sur le territoire du bassin sont des descripteurs technico-économiques des dynamiques agricoles, dont les déterminants sont principalement à rechercher dans les modifications de Politique agricole ou dans les stratégies des filières de transformation et de commercialisation des produits agricoles ; (iii) les successions de cultures et (iv) les séquences techniques associées sont également des descripteurs des dynamiques agricoles mais d'un point de vue beaucoup plus agronomique, dont les évolutions sont en partie explicables par la diffusion du progrès technique. Ces deux derniers niveaux qui interviennent directement dans les mécanismes de pollution diffuse, ont été intégrés dans la chaîne de modélisation des flux de nitrates, alors que les deux premiers ont été mobilisés dans la construction de scénarios de prospective agricole (Poux et Dubien, 2002).

Figure 1 : Choix et rôle des niveaux de description des activités agricoles

Dans cette première partie du rapport consacrée à l'exposé des mutations qui ont caractérisé l'agriculture du bassin de la Seine au cours des trente dernières années, nous commencerons par présenter les différentes sources d'informations mobilisées, puis nous justifierons le choix du maillage spatial utilisé pour agréger les informations, et enfin nous exposerons les principaux résultats concernant les évolutions des systèmes de production, des assolements et des successions de culture. L'évolution des séquences techniques, directement liée aux flux de nitrates et à leur modélisation, sera présentée dans la seconde partie du rapport.

2.1. Les sources d'informations

2.1.1 Les statistiques agricoles nationales

L'extension géographique du bassin de la Seine incite à mobiliser des sources statistiques nationales, qui apparaissent assez variées par le type d'informations qu'elles apportent, mais qui sont en nombre restreint. Nous avons choisi de travailler à partir de deux sources d'informations, qui nous permettent à la fois de renseigner le niveau des systèmes de production relatif aux exploitations agricoles et le niveau des assolements et des successions culturales relatif aux parcelles agricoles.

Les quatre derniers Recensements Généraux de l'Agriculture, réalisés en 1970, 1979, 1988 et 2000, renseignent de façon exhaustive sur les caractéristiques structurelles des exploitations, décrites par de nombreuses variables : gestion des terres (cultures, équipements hydrauliques), cheptel,

équipement (bâtiments, matériel agricole), main d'œuvre (âge des exploitants, composition des familles, formation, etc). La diversité des exploitations y est décrite grâce à une classification de leur orientation technico-économique (§ 2.3), harmonisée au sein du Réseau d'Information Comptable Agricole européen. Les informations sont disponibles sur tous les maillages administratifs (de la commune à la région), et sur un maillage spécifiquement dédié à la diffusion des statistiques agricoles, qui est celui des Petites Régions Agricoles. Nous avons mobilisé les RGA pour reconstituer les dynamiques des systèmes de production agricoles et des modes d'occupation du sol.

L'enquête nationale Ter-Uti renseigne annuellement depuis 1982, l'occupation du sol sur un échantillon constant (modifié en 1991) de plus de 550000 points en France (soit un point pour environ 100 ha). Les informations sont agrégées et rendues disponibles à l'échelle des départements sur la décennie quatre-vingt, et également à l'échelle des Petites Régions Agricoles depuis 1992. Le fait que l'échantillon de points soit constant permet d'aller plus loin que l'étude des assolements annuels, et de rechercher des régularités dans les suites d'occupation du sol pour approcher les successions de cultures (§ 2.2).

2.1.2 Les dires d'experts

Hormis l'enquête Ter-Uti qui permet d'approcher les successions de cultures après un processus de modélisation, les statistiques agricoles nationales n'informent que très peu sur les successions culturales et les séquences techniques, voire pas du tout aux échelles de temps et d'espace qui nous intéressent⁴. Nous avons donc choisi d'informer les pratiques agricoles en mettant en place un protocole d'enquête directive auprès d'experts agricoles. Ces experts sont principalement des conseillers de Chambres d'Agriculture, de Centres d'Economie Rurale ou de coopératives agricoles, qui ont une forte et ancienne expérience de terrain. Même si leur réseau n'est constitué que d'une partie des exploitants d'une zone donnée, excluant le plus souvent les plus traditionnels et les plus innovants, ils occupent une place non négligeable dans les dispositifs d'encadrement de la production agricole par leur rôle de diffusion de l'information destinée à faciliter la maîtrise de l'exploitation (Darré, 1994). Nous leur demandons de se comporter en observateurs objectifs de la réalité agricole et de ne se référer ni aux « meilleurs agriculteurs » ni « aux moins bons », mais à une moyenne ou à une médiane qui éventuellement n'existerait pas .

Le questionnaire d'enquête a été construit de manière à collecter les informations nécessaires à la mise en œuvre du modèle STICS. Il consiste pour chaque unité géographique étudiée (infra 2.2), à découper les trente années investiguées en périodes d'activités agricoles à peu près stables, puis pour chacune d'elles, à reconstituer les successions culturales majoritaires et à détailler les séquences techniques associées (dates de semis et de récolte, rendements, pratiques de fertilisation azotée minérale et organique, travaux du sol, pratique de culture intermédiaire, etc). Dans la pratique, chaque entretien dure en moyenne une demi-journée, selon l'implication des experts et leur recul par rapport aux questions posées.

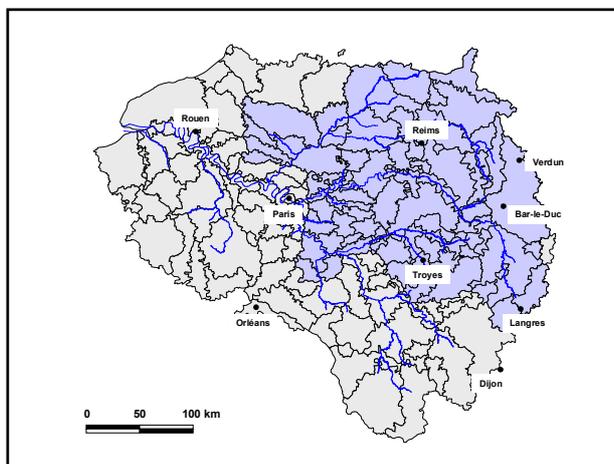
Ce type d'enquête présente certaines limites. En premier lieu, le choix des personnes interrogées, déterminant pour la fiabilité des résultats, est rendu délicat par le recul historique adopté. Du fait d'une importante mobilité professionnelle au sein des organismes de développement agricole, il est souvent nécessaire de rencontrer plusieurs personnes sur une même zone géographique pour balayer les trente années étudiées⁵. La reconstitution des évolutions peut ainsi introduire des biais liés à la plus ou moins grande subjectivité des experts. En corollaire, il s'avère que très peu de personnes sont compétentes pour informer des pratiques agricoles sur une zone et une période données, et que rares sont les cas où nous pouvons croiser les informations de plusieurs experts. A titre indicatif, les

⁴ Nous n'avons répertorié qu'une seule enquête nationale menée par le SCEES en 1994 sur les pratiques agricoles, mais elle est limitée à l'année 1994 et ses résultats sont agrégés par région administrative, qui est un maillage trop grossier pour notre étude. D'autres informations sur les conduites des cultures sont disponibles auprès de certaines Chambres départementales d'Agriculture ou de Centres d'Economie Rurale, mais elles ne concernent que les cultures majoritaires des départements sur des périodes plus courtes que les trente années étudiées.

⁵ Nous sommes même amenés à rencontrer des conseillers agricoles à la retraite pour informer les pratiques agricoles du début des années 1970, mais ils se prêtent en général volontiers à la démarche.

enquêtes réalisées en 2001 pour les départements de l’Aisne, de l’Oise, des Ardennes, de la Seine-et-Marne et de l’Aube ont nécessité de rencontrer 39 experts pour 48 Petites Régions Agricoles, dont 27 étaient issus de Chambres d’Agriculture et 12 de coopératives ou centres de gestion.

En second lieu, les pratiques agricoles telles qu’elles nous sont décrites par les experts correspondent dans la grande majorité des cas aux pratiques préconisées et non pas aux pratiques réelles des agriculteurs. Or, le biais dû à l’écart entre pratiques conseillées et pratiques réalisées est assez difficile à évaluer.



A l’heure actuelle, la zone enquêtée sur le bassin de la Seine couvre 64 Petites Régions Agricoles sur une dizaine de départements en amont de Paris, qui correspondent au bassin de la Marne auquel s’ajoutent les annexes hydrauliques figurées par les cours d’eau des bassins adjacents (Figure 2).

Figure 2 : Délimitation de la zone d’enquête

2.2. Des différenciations spatiales analysées à partir du maillage des Petites Régions Agricoles

La mise en relation des dynamiques agricoles passées sur le bassin versant de la Seine avec la hausse des teneurs en nitrates dans les aquifères et les cours d’eau rend nécessaire une spatialisation des phénomènes et donc le choix d’un maillage spatial d’agrégation des différents types d’informations. Le choix de ce maillage doit être guidé par trois principales contraintes : (i) les sources d’informations disponibles sur ce maillage doivent être de bonne qualité ; (ii) la précision spatiale de la maille doit être suffisante au regard de la zone étudiée, mais également dans la perspective de mobiliser certaines informations lors de la modélisation des flux de nitrates par STICS ; (iii) le maillage doit avoir une signification par rapport aux phénomènes que l’on cherche à mettre en évidence (dans notre cas, des dynamiques agricoles représentées par des évolutions de systèmes de production, de modes d’occupation du sol et de pratiques agricoles). Par rapport à ces contraintes, le maillage des Petites Régions Agricoles nous paraît constituer le meilleur compromis.

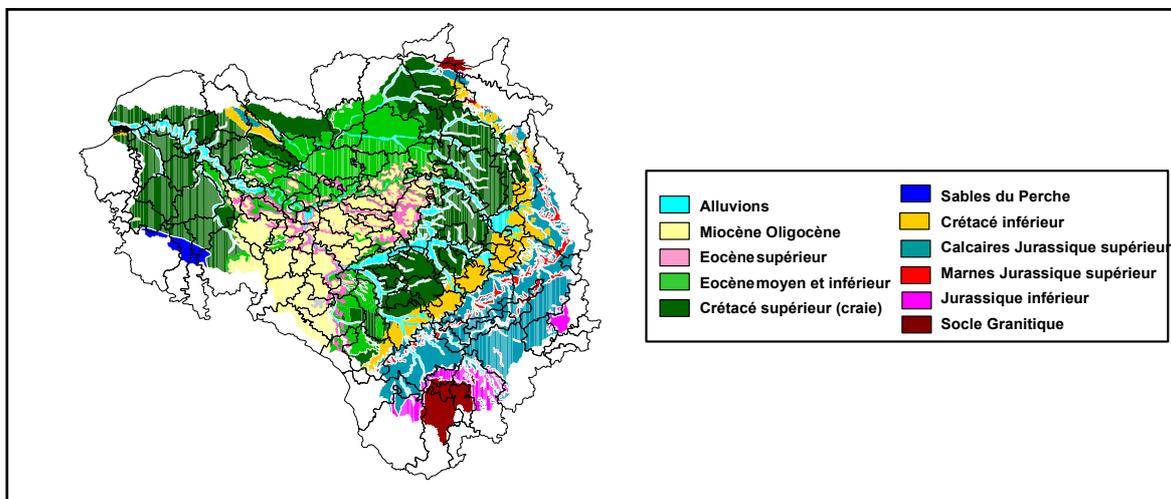
Concernant les sources d’informations, les services nationaux de statistiques agricoles avaient coutume d’utiliser ce maillage pour diffuser les résultats des recensements agricoles et de l’enquête Ter-Uti (ce n’est plus totalement vrai depuis l’an passé puisque les résultats du dernier RGA ne sont diffusés à l’échelle des PRA que sur demande). Pour les informations collectées à dire d’experts auprès des organismes de développement agricole, les PRA offrent un bon support de réflexion car elles représentent des unités supposées homogènes du point de vue de la qualité agronomique des sols.

La précision spatiale de la maille PRA, au nombre de 147 sur le bassin et de taille moyenne⁶ égale à 425 km², est relativement bonne au regard des 95 000 km² couverts par le bassin de la Seine, auxquels s’ajoute un recul historique de trente années. Lors des enquêtes sur les pratiques agricoles, il paraît illusoire d’exiger des acteurs rencontrés une précision plus grande sur des pratiques vieilles de

⁶ La superficie moyenne des PRA cache une importante variabilité, qui va de 50 km² pour les Buttes de Dammartin en Seine-et-Marne à 3600 km² en Champagne crayeuse.

trente ans, et d'approfondir avec eux toutes les nuances qu'ils ont pu observer dans leur secteur d'intervention. Ainsi, les maillages cantonal et communal multiplieraient inutilement le nombre et la durée des enquêtes, car il est peu probable que la précision des données en serait améliorée. Par contre, le maillage départemental – 23 départements couvrent le bassin de la Seine – masquerait d'importantes hétérogénéités.

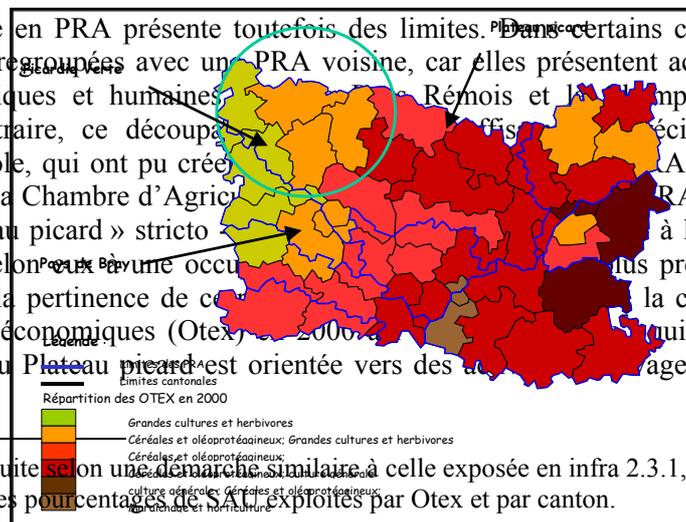
Enfin, de par la méthode qui a présidé leur délimitation au début des années cinquante, les PRA ont *a priori* un sens pour décrire des dynamiques agricoles. En effet, les critères de délimitation portaient sur les conditions de sol et de climat et sur la nature des activités humaines, et principalement des activités agricoles (occupation du sol, systèmes de production, type d'habitat, ...). Compte tenu de l'ancienneté du découpage des PRA et des profondes mutations qui ont caractérisé l'agriculture française dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle, nous avons souhaité mettre en œuvre une procédure de validation de leur identité agricole actuelle (Bornerand, 2000). Dans ce but, nous les avons comparées aux découpages en zones agricoles homogènes réalisés par des acteurs d'organismes de développement agricole dans quatre départements du bassin de la Seine (Seine-et-Marne, Marne, Meuse et Haute-Marne). Malgré quelques nuances selon les endroits, nous avons conclu à la pertinence des PRA pour décrire des dynamiques agricoles de 1970 à nos jours.



Par rapport aux trois contraintes qui ont guidé notre choix, s'est ajouté un atout supplémentaire du maillage PRA dans le cadre d'une problématique liant agriculture et qualité des eaux. Nous avons ainsi remarqué qu'elles présentaient une bonne concordance avec les grands ensembles géologiques des aquifères du bassin de la Seine (Caty, 1999). Cette concordance s'avère particulièrement nette entre le Morvan et le socle granitique, la Champagne crayeuse et les couches du Crétacé supérieur, la Champagne humide et les couches du Crétacé inférieur, et enfin pour le Barrois, les plateaux de Langres et de Bourgogne et les couches du Jurassique (Figure 3).

Figure 3 : Concordance des maillages des PRA et des aquifères

Le découpage en PRA présente toutefois des limites. Dans certains cas, des PRA de petite taille pourraient être regroupées avec un PRA voisine, car elles présentent actuellement les mêmes caractéristiques physiques et humaines (Pays de Rémois et la Champagne crayeuse). Dans d'autres cas au contraire, ce découpage est insuffisant pour répondre aux besoins des organismes de développement agricole, qui ont pu créer des PRA supplémentaires. C'est notamment le cas de la Chambre d'Agriculture de la Région de Paris, qui a créé une PRA « Plateau picard » en deux parties : « Plateau picard » stricto sensu à l'Ouest. Cette dernière zone correspondait selon nous à une occupation agricole plus proche du Pays de Bray voisin. Pour vérifier la pertinence de ce découpage, nous avons consulté la carte de répartition des orientations technico-économiques (Otex) en 2000, qui montre effectivement que la partie Ouest du Plateau picard est orientée vers des activités agricoles similaires au Pays de Bray (Figure 4).



⁷ Cette carte a été construite selon une démarche similaire à celle exposée en infra 2.3.1, à partir d'analyses factorielles portant sur les pourcentages de SAU exploitées par Otex et par canton.

Figure 4 : Répartition cantonale des Otex dans le département de l'Oise en 2000

2.3. Dynamiques et différenciation spatiale des systèmes de production agricoles

Les systèmes de production agricoles représentent des modes de combinaison entre terre, forces et moyens de travail à des fins de production végétale et / ou animale, qui sont communs à un ensemble d'exploitations (Reboul, 1976). Dans les statistiques agricoles nationales et notamment les RGA, ils sont décrits par la classification des orientations technico-économiques des exploitations (Otex), fondée sur la valeur monétaire des productions agricoles, traduite en marge brute standard et estimée sur la répartition des cultures dans la SAU et sur l'importance des troupeaux. Les Otex distinguées sur le bassin de la Seine sont présentées dans le Tableau 1. Elles sont identiques sur les trois premiers RGA de 1970 à 1988. Entre les RGA de 1988 et 2000 est intervenue une révision de la classification des Otex qui, entre autres modifications, fait disparaître la distinction entre les exploitations céréalières et les exploitations céréales et autres grandes cultures. Désormais sont distinguées les exploitations spécialisées en céréales et oléoprotéagineux, qui constituent actuellement les cultures primées dans le cadre de la PAC, et les exploitations de culture générale, qui pratiquent la culture de plantes sarclées, de légumes frais de plein champ ou d'autres combinaisons de grandes cultures (Agreste, 1997).

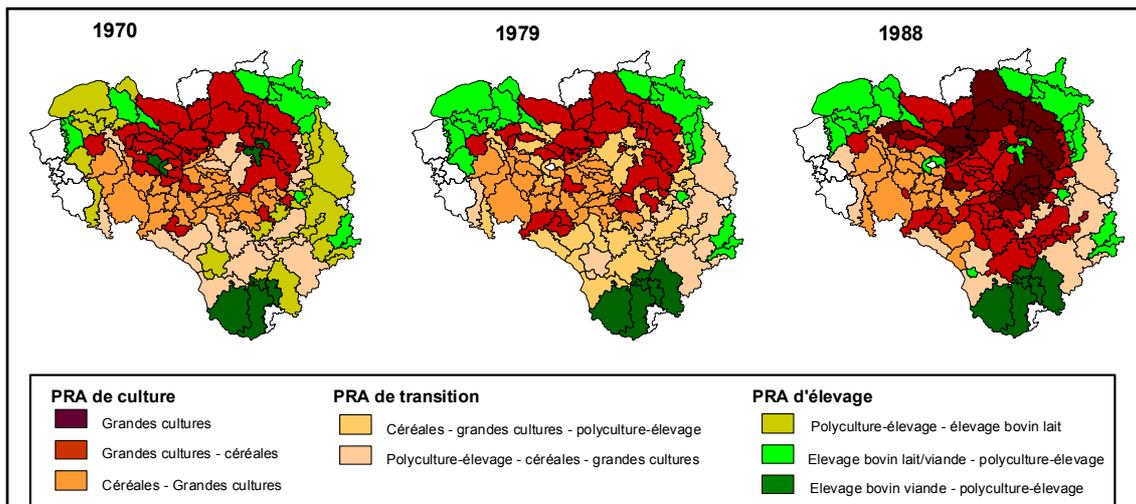
2.3.1 Segmentations du bassin de la Seine en zones agricoles homogènes

Une première démarche d'analyse des données relatives aux systèmes de production a consisté à segmenter le bassin de la Seine en zones homogènes du point de vue des Otex qui y ont été répertoriées pour chacun des quatre derniers RGA (Mignolet *et al.*, 2001). Pour délimiter ces zones « d'égaux agricultures », nous avons construit des typologies de PRA par des techniques d'analyses multivariées portant sur la répartition en pourcentage de leur SAU parmi les 13 Otex distinguées sur le bassin de la Seine. Les quatre découpages obtenus aux quatre dates des RGA montrent d'importantes transformations de l'agriculture du bassin, qui sont spatialement différenciées (Figure 5).

En 1970, le bassin de la Seine est constitué de cinq zones agricoles principales. Au centre, se trouvent les PRA à dominante « Céréales – Grandes cultures » au sud de Paris ou à dominante « Grandes cultures – Céréales » au nord. Sur les bordures ouest et est, sont localisées les PRA orientées vers des activités d'élevage : polyculture – élevage bovin lait en Haute-Normandie, en Lorraine et au sud de la Champagne – Ardennes, dominance de l'élevage laitier spécialisé dans les Ardennes, le Bassigny et quelques PRA normandes, dominance de l'élevage bovin viande au nord du Morvan. Enfin, entre les PRA du centre et celles de la bordure est, apparaît une zone de transition, au niveau des départements de l'Yonne et du Loiret, constituée de PRA mixtes orientées vers la polyculture – élevage et les céréales.

Tableau 1 : Définition et importance des Otex retenues sur le bassin de la Seine

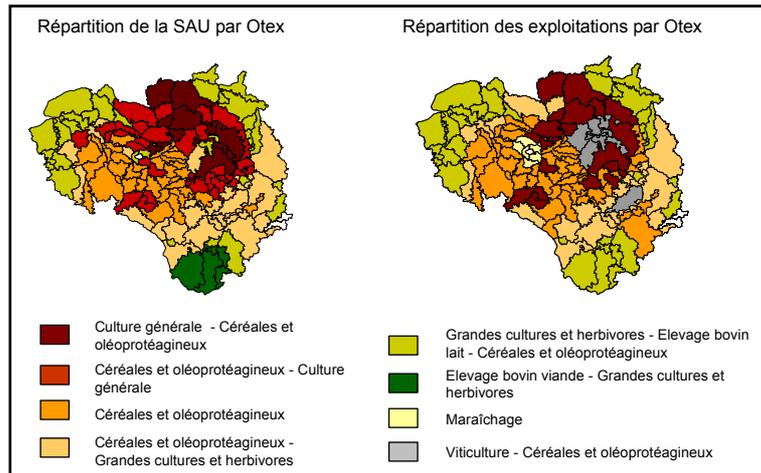
Dénomination de 1970 à 1988	% de SAU en 1970	% de SAU en 1979	% de SAU en 1988	Dénomination en 2000	% de SAU en 2000
Céréales	23,7	27,9	19,7	Céréales et oléoprotéagineux	48,7
Grandes cultures	24	26,5	42,6	Culture générale	15
Maraîchage	0,2	0,1	0,2	Maraîchage	1,2
Viticulture	0,7	0,9	1	Viticulture	1,1
Fruits	0,4	0,3	0,3	Fruits	0,6
Bovins Lait	8,9	8,5	5,9	Bovins lait	5,7
Bovins Viande	4,2	5,2	5,6	Bovins Viande	5,4
Bovins Lait-Viande	5,3	4,9	3,5	Bovins Lait-Viande	2,7
Ovins	2,6	2,5	2,2	Ovins	2
Granivores	0,2	0,3	0,2	Granivores	0,1
Polyculture	2,7	2,4	2,2	Polyculture	1,7
Polyculture-élevage	26,7	19,7	16	Grandes cultures et herbivores	15,3
Autres	0,3	0,5	0,6	Autres combinaisons	0,5



Dix-huit ans plus tard, au RGA de 1988, la carte obtenue offre une image très différente de l'agriculture du bassin. Les zones d'élevage dominant se sont repliées sur ses bordures : élevage bovin laitier associé à de la production de viande en Haute-Normandie, dans les Ardennes et en Haute-Marne, élevage bovin viande au nord du Morvan. La zone dominée par l'Otex « Céréales » se restreint également autour de la Beauce au sud-ouest de Paris, alors qu'un nouveau type de PRA, dans lesquelles plus de 80% de la SAU est exploitée dans l'Otex « Grandes cultures », fait son apparition sur les départements de la Marne et de l'Aisne.

Figure 5 : Segmentations du bassin de la Seine selon les combinaisons des Otex d'après les RGA de 1970, 1979 et 1988

La révision de la classification des Otex entre 1988 et 2000 rend le découpage du bassin de la Seine obtenu d'après le dernier RGA très difficilement comparable aux précédents. Il peut être utilisé pour décrire les activités agricoles et leur différenciation spatiale sur cette année, mais il serait hasardeux d'en tirer des conclusions en termes de dynamiques agricoles. Toutefois, le RGA 2000 ne semble pas remettre en cause les grandes zones agricoles définies en 1988. La zone orientée vers les productions de céréales et d'oléoprotéagineux reste cantonnée au sud de Paris, alors que l'Otex « Culture générale » est dominante au nord, voire très largement majoritaire en Champagne crayeuse et sur les Plateaux picards. Hormis quelques PRA à l'extrême sud du bassin, toujours dominées par l'élevage bovin viande, les bordures du bassin, à l'ouest comme à l'est, sont caractérisées par une majorité de systèmes de polyculture - élevage, associés en moindre mesure avec des systèmes laitiers spécialisés. Enfin, le territoire des PRA de transition qui forme un long croissant caractéristique de la bordure est du bassin, est essentiellement exploité par l'Otex « Céréales et oléoprotéagineux », à laquelle s'ajoute l'Otex de polyculture - élevage.

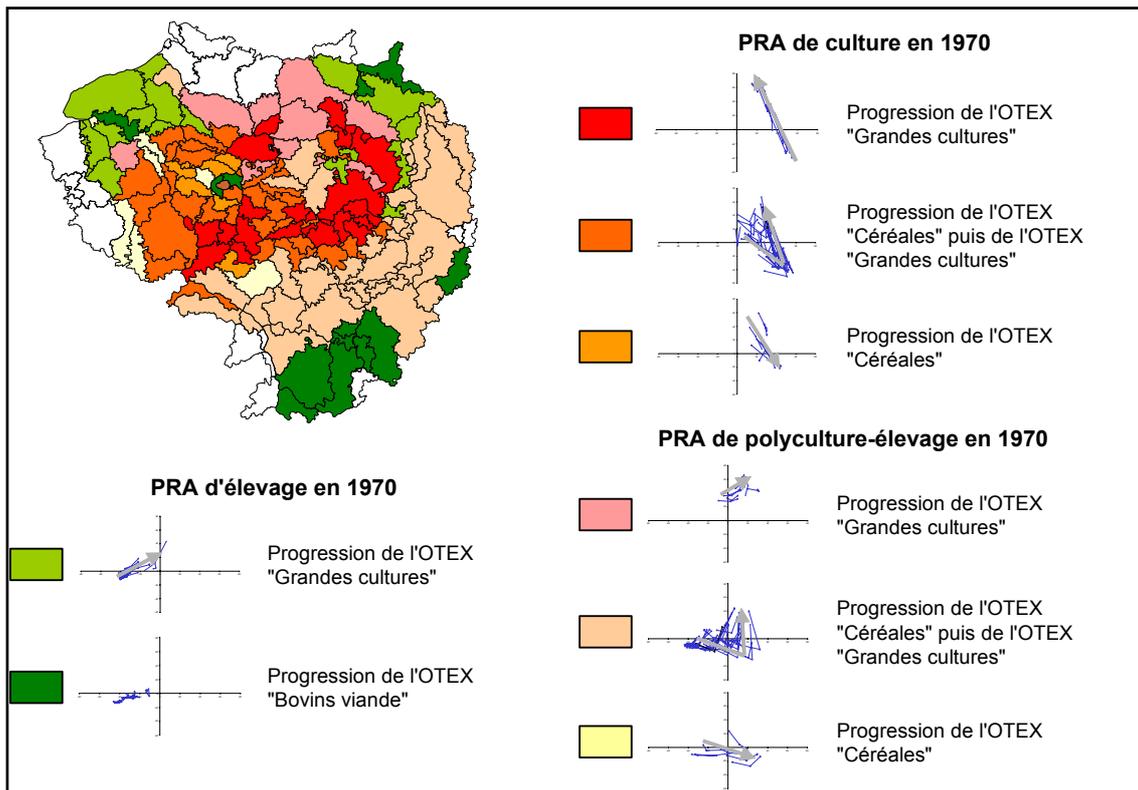


Pour construire ces cartes, nous avons choisi de travailler sur la part de la SAU exploitée par chaque Otex dans chaque PRA, qui nous paraissait être le critère le plus représentatif pour mesurer l’emprise des différents systèmes de production sur le territoire du bassin de la Seine et pour instruire les relations entre agriculture et qualité des eaux. Il peut être envisageable de conduire la même démarche sur le nombre d’exploitations affectées à chaque Otex dans chaque PRA (ramené en pourcentage), en adoptant un point de vue plus « humain », centré sur les unités économiques de production et sur la main d’œuvre agricole. La Figure 6 montre que le découpage obtenu en 2000 apparaît globalement assez peu différent de celui basé sur le critère de la SAU. On peut toutefois noter l’apparition de deux types de PRA très localisés, qui n’étaient pas mis en évidence lors de l’étude des surfaces : il s’agit des PRA maraîchères de la Couronne parisienne et des PRA viticoles de la Marne et de l’Aube, qui sont caractérisées par des exploitations de faible superficie mais de forte dimension économique associées à une main d’œuvre abondante. Les deux démarches apportent des informations complémentaires sur les dynamiques agricoles du bassin de la Seine.

Figure 6 : Segmentation du bassin de la Seine selon les combinaisons d'Otex d'après le RGA 2000

2.3.2 Segmentation du bassin de la Seine en zones aux dynamiques agricoles homogènes

La démarche précédemment exposée aboutit à quatre typologies de PRA indépendantes aux quatre dates des RGA. Elle présente l’avantage d’offrir, pour une année donnée, une image de la répartition spatiale des différents systèmes de production, mais les dynamiques agricoles, essentiellement visibles par le biais des changements de type des PRA, sont plus délicates à reconstituer. Nous proposons donc une autre démarche d’analyse des données, complémentaire à la précédente, qui consiste à construire une typologie des trajectoires d’évolution des PRA entre 1970 et 1988 (nous n’avons pas pu étendre cette démarche au RGA 2000 en raison de la révision de la classification des Otex). Cette typologie n’est plus fonction des pourcentages de SAU exploités par Otex et par PRA, mais des différences de pourcentages de SAU exploités par les Otex entre les années 1970 – 1979 et 1979 – 1988. Ces différences sont traduites graphiquement sur un plan multifactoriel sous la forme de deux vecteurs qui représentent une trajectoire (Mignolet *et al.*, 2001 ; Mignolet et Benoît, 2001).



Huit types de trajectoires d'évolution de PRA sont distingués entre 1970 et 1988, en fonction de l'orientation agricole initiale des PRA, de la régularité et de l'ampleur des évolutions (Figure 7). Ces types de trajectoires s'avèrent spatialement différenciés, car ils sont le plus souvent localisés dans des groupes de PRA contiguës. Les PRA de culture en 1970 ont suivi trois trajectoires d'évolution principales : le type 1 reflète une diversification croissante des systèmes de production vers des cultures de vente à plus forte valeur ajoutée (betteraves, pois, colza, pomme de terre, etc), et représente 25% des PRA localisées dans la Marne, l'Aube et le Loiret ; le type 2, qui concerne près des deux-tiers des PRA de culture, est caractérisé par un changement d'orientation productive (+11% de la SAU dans l'Otex « Céréales » et -6,5% dans l'Otex « Grandes cultures » dans les années 1970 ; -19% de la SAU dans l'Otex « Céréales » et +23% dans l'Otex « Grandes cultures » dans les années 1980) ; le type 3 se rapporte à une minorité de PRA (11%), situées sur la frange ouest de Paris, avec spécialisation céréalière, surtout marquée dans les années 1970 (+15% de la SAU dans l'Otex « Céréales »), et progression des Otex « Maraîchage » et « Polyculture » dans la décennie 1980.

Les PRA de polyculture – élevage en 1970 montrent une progression régulière de l'Otex « Grandes cultures » pour 18% d'entre elles situées au nord du bassin (type 4) ; augmentation de l'Otex « Céréales » pendant la décennie 1970, puis de l'Otex « Grandes cultures » pendant la décennie 1980 pour les deux-tiers, qui constituent, pour la plupart, un long croissant de l'Argonne meusienne au nord-est vers la Bourgogne nivernaise au sud (type 5) ; progression régulière de l'Otex « Céréales » pour les 16% restants (type 6). Les évolutions se font principalement aux dépens de l'Otex « Polyculture – élevage » (-10% de la SAU pour le type 4, -21% pour le type 5 et -18% pour le type 6).

Figure 7 : Typologie des trajectoires d'évolution des PRA du bassin de la Seine entre 1970 et 1988

Enfin, les PRA orientées vers l'élevage en 1970 ont connu deux principaux types de trajectoires. Le type 7, représenté en Haute-Normandie et dans les Ardennes, correspond à une augmentation régulière de l'Otex « Grandes cultures » au détriment des Otex « Polyculture – élevage » (-7% de la SAU, principalement sur la période 1970 – 1979) et « Bovins lait » (-11% de la SAU, principalement sur la période 1979 – 1988 où les quotas laitiers sont entrés en vigueur). Le type 8, qui concerne surtout le Bassigny de la Haute-Marne et le Sud du bassin versant (Morvan, Nivernais et Auxois), représente un développement régulier de l'Otex « Bovins viande » (+12,5% de la SAU entre

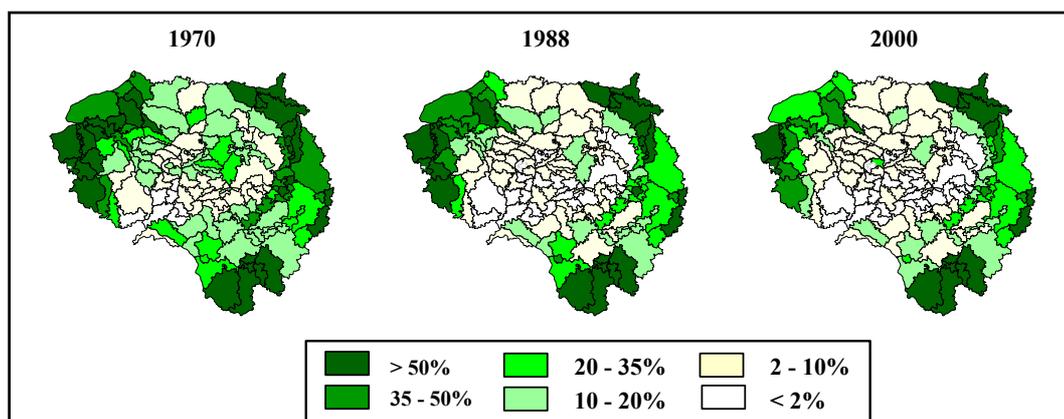
1970 et 1988), principalement aux dépens des Otx « Polyculture – élevage » (-4%) et « Bovins lait » (-8%).

2.4. Dynamiques et différenciation spatiale des assolements

Les dynamiques observées au niveau des systèmes de production agricoles sont liées aux dynamiques des modes d'occupation du sol, c'est-à-dire aux dynamiques d'assolement. Nous en proposons deux approches dans ce chapitre : la première, réalisée sur l'ensemble du bassin versant, repose sur une analyse des quatre RGA selon des méthodes de cartographie statistique similaires aux précédentes ; la seconde, centrée sur la zone enquêtée, propose un découpage géographique fondé sur une synthèse « manuelle » des évolutions des principales occupations du sol de 1970 à 2000 selon une méthode proche de celle développée par Bertin (Bertin, 1977).

2.4.1 Sur l'ensemble du bassin versant de la Seine

L'analyse des RGA de 1970, 1979, 1988 et 2000 montre des changements de grande ampleur dans les modes d'occupation du sol du bassin de la Seine, qui sont là encore spatialement différenciés. A titre d'exemples, les Figure 8, Figure 9 et Figure 10 montrent l'évolution des surfaces en prairies permanentes, du blé et du colza au cours des trente dernières années. Les premières, supports d'activités d'élevage, sont bien présentes en 1970, hormis en Champagne crayeuse et dans la Beauce où elles représentent déjà moins de 10% de la SAU. Depuis cette période, la baisse des surfaces en prairie est continue, jusqu'à quasi – disparaître dans toute la partie centrale du bassin. Les surfaces en herbe ne se maintiennent que sur les bordures ouest et est, où elles occupent encore dans certaines PRA plus de 50% de la SAU. A l'inverse des prairies, les surfaces en blé sont en progression constante sur la quasi – totalité du bassin versant. Alors qu'en 1970, elles ne dépassent que très rarement 40% des surfaces agricoles des PRA, on voit apparaître dès 1979 une zone autour de la Beauce dans laquelle le blé prédomine. Cette zone s'étend progressivement sur toute la moitié Ouest du bassin, hormis la bordure. Enfin, le colza connaît également une progression assez spectaculaire mais qui, à la différence du blé, ne concerne que certaines zones du bassin de la Seine. En 1970 et 1979, le colza est une culture peu répandue, qui reste le plus souvent inférieure à 5% des surfaces agricoles. C'est à partir du milieu des années 1980 que les surfaces augmentent essentiellement à l'Est du bassin. En 2000, les surfaces en colza sont multipliées par trois ou quatre pour un groupe de PRA localisées entre



la Meuse et l'Aube, auxquelles s'ajoutent la Brie marnaise et quelques PRA à l'ouest de Paris.

Figure 8 : Evolution des prairies permanentes d'après les RGA de 1970, 1988 et 2000

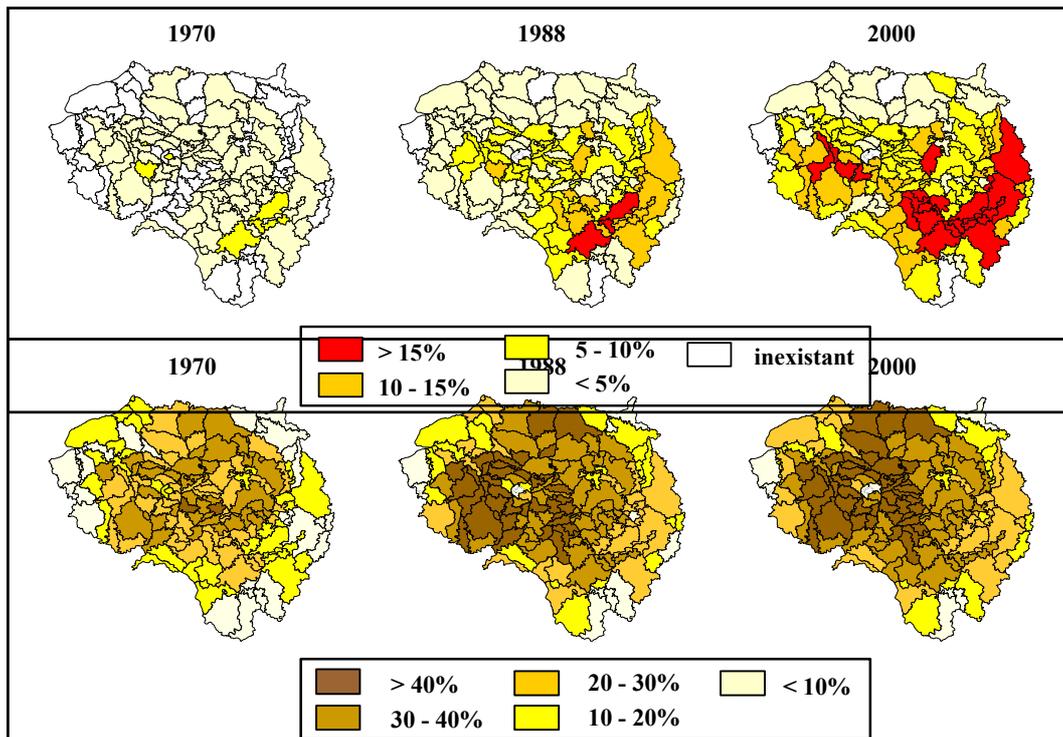


Figure 9 : Evolution des surfaces en blé d'après les RGA de 1970, 1988 et 2000

Figure 10 : Evolution des surfaces en colza d'après les RGA de 1970, 1988 et 2000

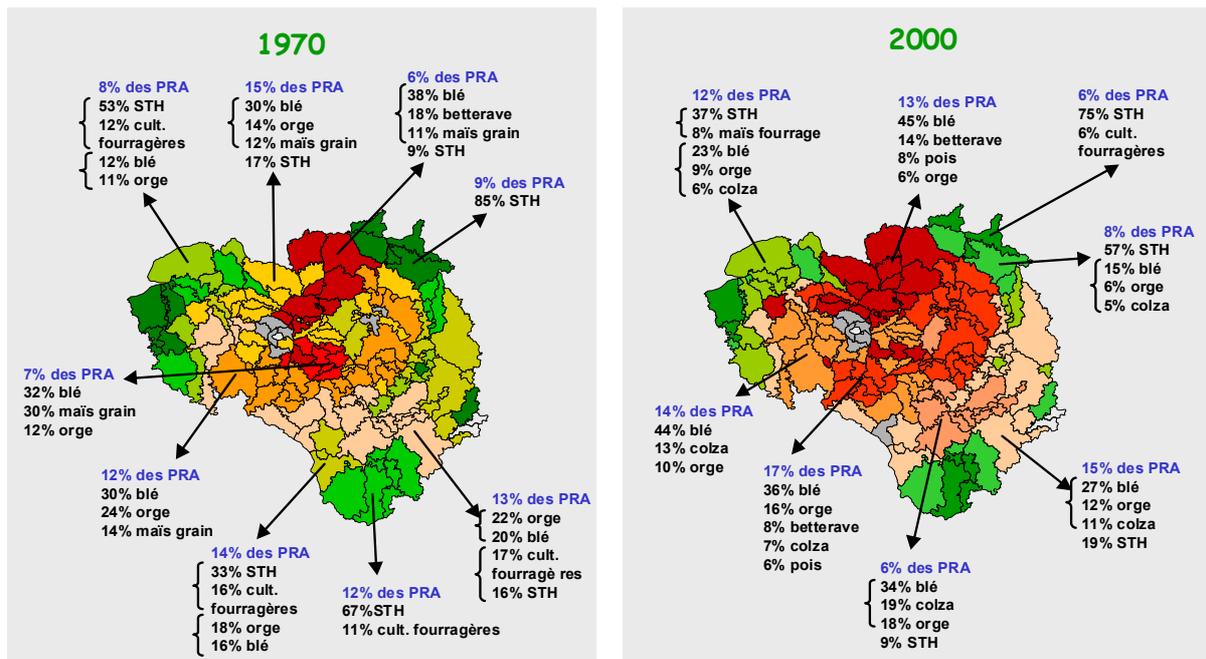
Afin de synthétiser les évolutions de l'ensemble des occupations du sol sur le bassin de la Seine, nous avons construit à chacune des quatre dates de RGA une typologie des PRA en fonction des pourcentages des différentes occupations du sol⁸ (Figure 11). En 1970, deux types de PRA sont dominés par les surfaces toujours en herbe (STH) : plus de 85% des surfaces dans les Ardennes et en Basse-Normandie ; deux - tiers des surfaces en association avec d'autres cultures fourragères dans le Morvan, la Haute-Marne, la Meuse et quelques PRA de Normandie. Quatre types de PRA combinent, selon des proportions différentes, surfaces en herbe et cultures fourragères d'une part, et cultures céréalières d'autre part :

- en Normandie et dans la Champagne humide, les prairies représentent la moitié des surfaces, alors que les cultures céréalières de blé et d'orge sont inférieures au quart des surfaces,
- dans le Barrois, la Brie et la Bourgogne nivernaise, les surfaces en herbe et les cultures de blé et d'orge sont à parité sur un tiers du territoire agricole,
- dans l'Yonne et la Côte d'Or, apparaît un type de PRA avec plus de 40% des surfaces en blé et orge, et un tiers de surfaces fourragères dont la moitié est constituée de STH,
- enfin, un dernier type apparaît au nord du bassin, qui présente les mêmes pourcentages de surfaces en herbe et en céréales que le précédent auxquels s'ajoute la culture de maïs grain sur 12% des surfaces.

Les trois derniers types représentent des PRA où les cultures de vente sont largement dominantes : plus de la moitié des surfaces en blé et orge et 14% en maïs grain pour la Champagne crayeuse et la Beauce ; un tiers des surfaces en blé et un tiers en maïs grain dans une zone bien localisée en Seine-et-Marne ; près de 20% des surfaces en betterave, au côté du blé (40%) et en moindre mesure du maïs grain dans les plateaux de Picardie et le Soissonais.

L'image obtenue en 2000 est très différente, pas tant au niveau des zones géographiques que l'on peut distinguer sur le bassin qu'au niveau de la définition des différents types de PRA. Un seul type, d'extension réduite par rapport à 1970, reste à forte dominance de prairies : elles y occupent encore les trois - quarts des surfaces en combinaison avec d'autres cultures fourragères. Trois types de

⁸ Ces quatre typologies sont issues d'une analyse en composantes principales sur les pourcentages des différentes occupations du sol par PRA suivie d'une classification ascendante hiérarchique sur les premiers facteurs de l'ACP.



PRA associent surfaces fourragères et cultures de céréales mais aussi de colza : près de 60% de prairie, 20% de blé et d'orge et 5% de colza dans certaines PRA des Ardennes, de Haute-Marne, du Morvan et de Haute-Normandie ; plus d'un tiers de STH, un tiers de blé et d'orge, 8% de maïs fourrage et 6% de colza en Normandie et dans l'Argonne meusienne ; 40% de céréales, 20% de prairies et 11% de colza sur la bordure est du bassin. Deux types de PRA sont dominés par des cultures actuellement primées par la PAC : 44% de blé, 13% de colza, 10% d'orge autour de la Beauce ; 34% de blé, 19% de colza et 18% d'orge dans les Vallées de l'Yonne à la Marne et le vignoble du Barrois. Enfin, deux types de PRA sont caractérisés par une forte diversité des cultures têtes de rotation, avec notamment la betterave, le pois (qui était quasi absent en 1970), mais aussi la pomme de terre et les légumes de plein champ en moindre pourcentage.

Figure 11 : Segmentation du bassin de la Seine selon les combinaisons des occupations du sol d'après les RGA de 1970 et 2000

2.4.2 Sur la zone enquêtée

De la même façon que pour les systèmes de production, nous avons cherché à synthétiser l'évolution des assolements en une seule représentation cartographique, c'est-à-dire à délimiter des zones aux évolutions d'assolement homogènes. Nous avons ainsi effectué une classification des PRA de la zone d'enquête en réalisant des tris successifs sur les évolutions des occupations du sol les plus discriminantes, calculées à partir des RGA sur les périodes 1970 – 1979, 1979 – 1988 et 1988 – 2000.

La betterave étant la culture la plus stable dans le temps et la plus localisée en fonction des contrats avec les sucreries et des propriétés agronomiques des sols, nous l'avons choisie comme première variable discriminante. Nous avons ainsi défini trois grandes catégories dans lesquelles la betterave est absente, peu représentée ou très importante. Nous avons ainsi de suite sélectionné la culture la plus discriminante au sein de chaque catégorie pour finalement aboutir à une classification en onze types d'occupation du sol, pour lesquels l'évolution dans le temps a été similaire (Figure 12).

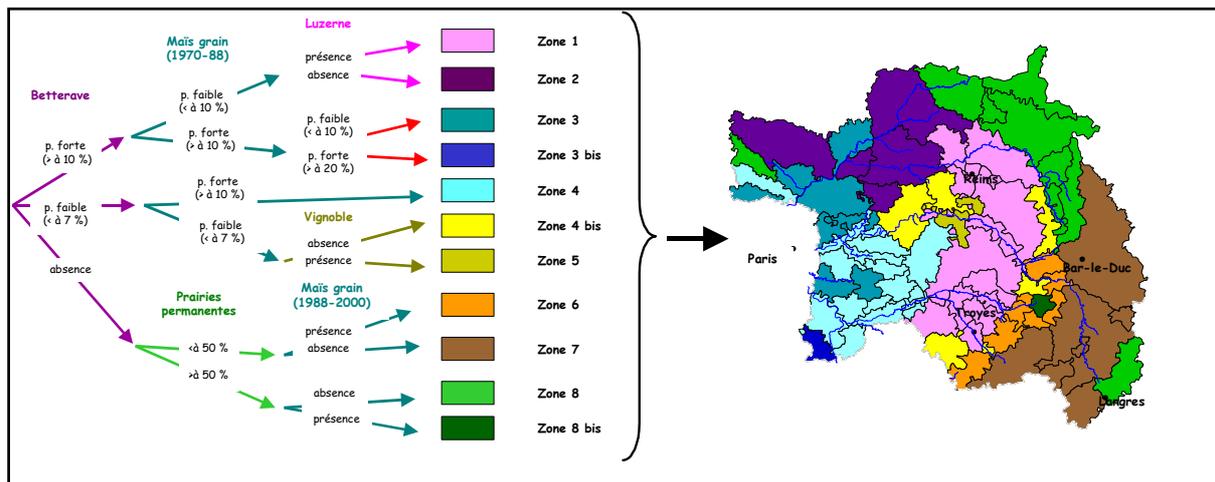
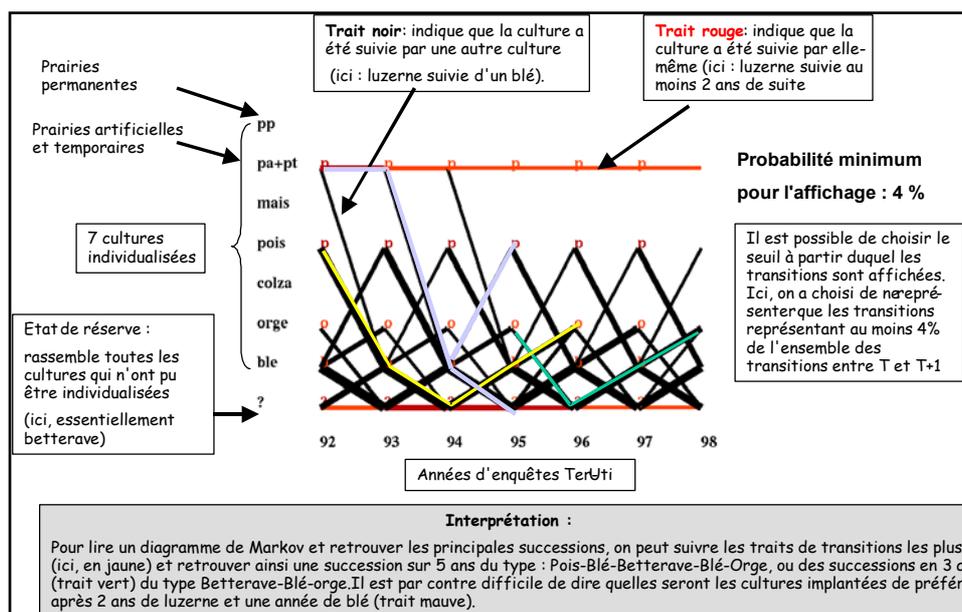


Figure 12 : Segmentation de la zone enquêtée selon l'évolution des occupations du sol depuis 1970

2.5. Dynamiques et différenciation spatiale des successions de cultures

En termes d'évaluation des risques de pollution par les nitrates, l'analyse des successions culturales, c'est-à-dire des suites d'occupation du sol implantées sur une même parcelle, est plus riche que celle des assolements annuels, notamment parce qu'elle permet de prendre en compte les effets liés à la culture précédente et les périodes de sol nu plus propices au lessivage hivernal de l'azote. Mais contrairement aux assolements qu'il est facile de reconstituer à partir d'informations territorialement agrégées issues des statistiques agricoles nationales, la reconnaissance des successions de cultures ne peut se baser que sur des enquêtes à échantillon constant, comme l'enquête Ter-Uti depuis 1992, ou sur des dires d'experts.



Pour reconnaître les successions de cultures à partir de l'échantillon Ter-Uti, nous avons mis en œuvre une démarche de fouille de données temporelles basée sur des modèles de Markov cachés (Mari *et al.*, 2000 ; Benoît *et al.*, 2001). Cette démarche vise à extraire des régularités dans l'utilisation des terres agricoles, qui sont traduites en termes de probabilité de transition entre cultures. Les régularités temporelles sont recherchées par le biais de diagrammes de transition entre cultures (Figure 13), appelés diagrammes de Markov, qui permettent non seulement de décrire les principales transitions observées sur un territoire donné, mais également de comparer les successions culturales de différents territoires.

Figure 13 : Interprétation d'un diagramme de Markov

Sur la région enquêtée découpée en zones homogènes du point de vue de l'évolution des assolements, nous avons réalisé une synthèse des successions de cultures⁹ et de leurs évolutions depuis les années soixante-dix telles qu'elles nous ont été décrites par les experts. Pour la dernière décennie, nous avons confronté les successions à dire d'experts avec celles que nous avons modélisées à partir de l'enquête Ter-Uti.

Zone 1 : « La Champagne crayeuse »

La Champagne se caractérise par la présence de successions longues à base de luzerne implantée durant deux ou trois ans suivie ensuite de diverses cultures, et de successions sur quatre ou cinq ans. Le pois est particulièrement apprécié dans les rotations associant la betterave. Il est cependant difficile de dresser un tableau exhaustif des successions de culture de cette zone en raison du nombre important de têtes de rotation disponibles et de la grande souplesse dans le choix des cultures que permet la qualité agronomique de ces sols (Tableau 2).

Tableau 2 : Evolution des successions de cultures sur la Champagne crayeuse

1970-1980	1980-1990	1990-2000	6928 points Ter-Uti
LL(L)-B-C-B-Mg-B-OH	LL(L)-B-Mg-B-C-B-OH	LL(L)-B-C-B-P-B-OH	
Bt-B-OH	Bt-B-P-B	Bt-B-P-B-OP	
Bt-B-Mg-B	Bt-P-B-OP		

Zone 2 : « Les plateaux picards »

Toutes les bonnes terres limoneuses des Plateaux picards sont consacrées à la culture de la betterave que l'on évite de semer un an sur deux. Ce sont donc soit des pommes de terre, soit du pois (depuis les années 80) qui sont utilisés pour allonger la rotation. S'il s'agit de céréales, le blé est souvent préféré deux années de suite plutôt qu'une céréale secondaire (Tableau 3).

Tableau 3 : Evolution des successions de cultures sur les Plateaux picards

1970-1980	1980-1990	1990-2000	4841 points Ter-Uti
Bt-B-B (ou OP)	Bt-B-B (ou OH)	Bt-B-B (ou OH)	
Bt-B-Pdt-B	Bt-B-Pdt-B	Bt-B-Pdt-B	
	Bt-B-P-B	Bt-B-P-B	

Zone 3 : « Le secteur Valois – Vexin »

Dans ce secteur, la betterave représente également une surface importante, mais le maïs grain a été très présent dans les années 1970 et 1980. Il était intégré dans des successions biennales, triennales ou quadriennales, en rotation avec la betterave jusqu'à l'arrivée du pois. Depuis les années 1980, la culture du maïs mais aussi du colza est restreinte aux moins bonnes terres où elle participe à des successions sur trois ans avec deux blés ou un blé et une céréale secondaire (Tableau 4).

⁹ Pour plus de commodité, les successions sont décrites avec l'initiale de chaque culture : L (luzerne), B (blé), OH (escourgeon), OP (orge de printemps), C (colza), P (pois), Mg (maïs grain), Mf (maïs fourrage), Bt (betterave), A (avoine), Pdt (pomme de terre), Pt (prairie temporaire).

Tableau 4 : Evolution des successions de cultures sur le secteur Valois - Vexin

1970-1980	1980-1990	1990-2000	2392 points Ter-Uti
Bt-B-Mg-B Mg-B-OP Mg-B	Bt-B-Mg-B Bt-B-P-B Mg-B-OH C-B-OH	Bt-B-P-B Mg-B-OH C-B-B	

Zone 3 bis : « Le Gâtinais »

La particularité du Gâtinais réside dans la dominance des successions triennales, en raison de la forte proportion d'orge de printemps qui y est produite. Depuis les années 1990, cette culture est cependant en perte de vitesse et le blé a tendance à la faire reculer en troisième position. Les têtes de rotation sont limitées à la betterave et au maïs grain jusqu'aux années 1990 (Tableau 5).

Tableau 5 : Evolution des successions de cultures dans le Gâtinais

1970-1980	1980-1990	1990-2000	275 points Ter-Uti
Bt-B-OP Mg-B-OP	Bt-B-OP Mg-B-OP	Bt-B-OP Bt-B-B	

Zone 4 : « Les plateaux de Brie »

Par rapport aux zones précédentes, cette zone est caractérisée par la faible place de la betterave et la prépondérance du maïs grain dans toutes les successions. Dans les années 1970 et 1980, la culture du maïs était même très souvent pratiquée un an sur deux. Depuis son déclin, cette zone a vu de nombreuses têtes de rotation diversifier son assolement (pois, colza et tournesol). Elles sont soit cultivées en rotation triennale, soit en rotation quadriennale avec une autre tête de rotation (Tableau 6).

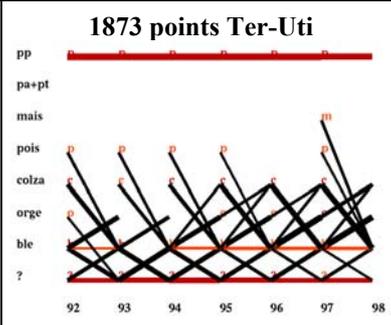
Tableau 6 : Evolution des successions de cultures sur les Plateaux de Brie

1970-1980	1980-1990	1990-2000	3670 points Ter-Uti
Mg-B-OP Mg-B Bt-B-Mg-B	Mg-B-OH Mg-B Bt-B-P-B C-B-OH T-B-OH	Mg-B-OH Bt-B-P-B C-B-OH T-B-OH C-B-P-B	

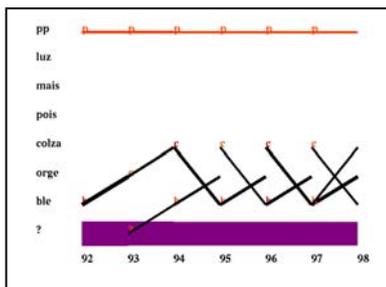
Zone 4 bis : « Les régions intermédiaires »

Cette zone est considérée comme intermédiaire par rapport à la précédente car elle a maintenu plus longtemps une activité d'élevage, comme en témoignent des surfaces en prairies plus importantes et l'existence de successions fourragères longues dans les années 1970. Elle présente cependant les mêmes têtes de rotation que la zone précédente, mais un poids plus important de l'orge indique que les rotations triennales y sont plus fréquentes, notamment en association avec le colza (Tableau 7).

Tableau 7 : Evolution des successions de cultures dans les régions intermédiaires

1970-1980	1980-1990	1990-2000	1873 points Ter-Uti
Mg-B-OH Bt-B-Mg-B LL-B-A-B-Mf-B-OP	Mg-B C-B-OH Bt-B-P-B P-B-OH	C-B-OH P-B-OH Bt-B-P-B Mg-B	

en



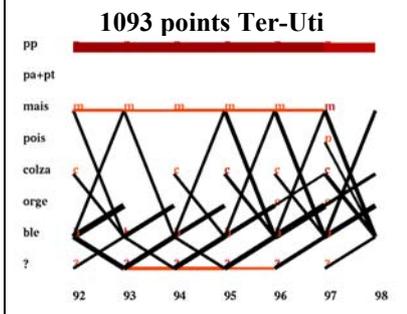
Zone 5 : « Le vignoble champenois »

Cette région, bien spécifique, est marquée par la prédominance d'une culture permanente, la vigne, qui occupe 30 à 40 % de sa superficie. Pour le reste de sa SAU cultures annuelles, les successions de cultures sont similaires à la zone précédente (prédominance des rotations colza-blé-orge).

Zone 6 : « Les régions maïsicoles »

Ces régions ont rapidement arrêté les rotations fourragères liées à la présence de l'élevage pour se tourner vers une culture très intensive du maïs grain et/ou du maïs fourrage, en monoculture jusque dans les années 1980, puis assolé avec introduction du blé tous les deux ou trois ans. Le colza est également très présent, essentiellement sous forme de rotations triennales de type colza-blé-escourgeon (Tableau 8).

Tableau 8 : Evolution des successions de cultures dans les régions maïsicoles

1970-1980	1980-1990	1990-2000	1093 points Ter-Uti
Mg-B-OH Mg LL-B-A-B-Mf-B-OP	Mg-B-OH Mg Mf-B-OH C-B-OH	Mg-B-OH Mg-Mf-B C-B-OH	

Zone 7 : « Les plateaux du Barrois et de Langres »

Les plateaux du Barrois se caractérisaient dans les années 1970 et 1980, par des successions céréalières longues dominées par l'orge, alors plus répandu que le blé. En raison de l'activité d'élevage encore importante à cette époque, les cultures fourragères comme l'avoine, la luzerne et les prairies temporaires servaient de têtes de rotation. La seule qui s'est développée est celle du maïs fourrage. La principale tête de rotation est le colza, qui ne cesse de gagner de l'importance depuis les années 1980 et qui peut être conduit sous forme de rotations triennales ou biennales (Tableau 9).

Tableau 9 : Evolution des successions de cultures sur les Plateaux du Barrois et de Langres

1970-1980	1980-1990	1990-2000	4401 points Ter-Uti
A-B-OH-OP LLL-B-OH-OP Pt-Pt-B-OP-OP-OP Mf-B-OH	C-B-OH-OP Mf-B-OH LLL-B-OH-OP Pt-Pt-B-OH-OP	C-B-OH C-B C-B-B-OH-OP Mf-B-OH	

Zone 8 : « les régions d'élevage »

Les régions d'élevage disposent de peu de surfaces en terres labourables, car plus de la moitié de la SAU est consacrée aux prairies permanentes. Durant les années 1970, les successions de cultures étaient essentiellement céréalières, avec une forte proportion d'orge. Le maïs fourrage a alors pris son essor comme tête de rotation, puis le colza durant les années 1980 (Tableau 10).

Tableau 10 : Evolution des successions de cultures dans les régions d'élevage

1970-1980	1980-1990	1990-2000	4428 points Ter-Uti
A-B-OH-OP Mf-B-OH	Mf-B-OH C-B-OH	Mf-B-OH C-B-OH Mf-Mf-B	

Zone 8 bis : « La Champagne humide de Haute-Marne »

Cette zone, constituée d'une seule PRA, est très particulière car son assolement est constitué presque exclusivement d'importantes surfaces en prairies, de maïs fourrage, de maïs grain, de blé et de prairies temporaires. Les successions ont donc peu changé, même si les cultures occupent aujourd'hui de plus grandes surfaces : il s'agit essentiellement de successions longues à base de maïs grain et de maïs fourrage, interrompues par une année de blé (Tableau 11).

Tableau 11 : Evolution des successions de cultures dans la Champagne humide (52)

1970-1980	1980-1990	1990-2000	109 points Ter-Uti
Mf-Mf-Mg-B-OH Pt-Pt-A-B-OH	Mg-Mf-Mf-B Pt-Pt-B-OH-OP	Mg-Mg-Mf-B Pt-Pt-B-OH	

2.6. Conclusion

Au cours des trente dernières années, l'évolution des systèmes de production du bassin de la Seine et des modes d'occupation du sol, qu'ils soient repérés par les assolements ou les successions culturales, ne peut s'expliquer qu'au travers de multiples facteurs, plus ou moins indissociables et

influent selon la localisation géographique des exploitations agricoles et les types de production. Parmi ces facteurs, nous pouvons retenir comme prédominants :

- des facteurs politiques tels que les orientations prises par la PAC (primes aux surfaces, pourcentage de gel des terres),
- des facteurs économiques jouant à travers les prix des productions agricoles au niveau des cours mondiaux, les nouveaux débouchés, la localisation des industries agro-alimentaires (IAA),
- les évolutions techniques qui ont amélioré les rendements et renforcé la productivité des agriculteurs,
- des facteurs humains, tels que la diminution de la main d'œuvre agricole et la recherche d'une moins grande pénibilité du travail qui a notamment contribué au recul généralisé de l'élevage laitier,
- des facteurs physiques (sol et climat) qui restent, malgré une modernisation sans précédent des techniques agricoles sur cette période, des facteurs limitants dans de nombreuses régions.

Le fait majeur caractéristique des trois dernières décennies, est le recul continu et inexorable de l'élevage, qui dans un premier temps est marqué par une transition de l'élevage laitier vers l'élevage allaitant, puis par un abandon complet pour la majeure partie du centre du Bassin parisien. Ce recul se traduit par une érosion continue des surfaces en prairies permanentes (-25% en trente ans), ainsi que des autres surfaces en cultures fourragères (prairies temporaires et artificielles). La raison principale du recul de l'élevage réside dans la pénibilité du travail et de l'astreinte quotidienne du métier d'éleveur. Toutes les régions possédant des potentialités agronomiques permettant la mise en culture des terres avaient déjà retourné presque toutes leurs prairies au début des années 1970. Les autres régions, limitées par la présence de terres lourdes, ont pu progressivement le faire après avoir investi massivement dans le drainage artificiel et en profitant du développement d'une mécanisation adaptée (tracteurs 4x4, outils animés). La mise en place des quotas laitiers en 1984 marque un second coup d'arrêt à l'élevage laitier, renforcé par l'instauration de primes à l'hectare en 1992 : il devient alors plus intéressant de cultiver des céréales et oléoprotéagineux même pour de faibles rendements plutôt que de maintenir des surfaces en herbe. Même pour les agriculteurs qui ont maintenu un atelier d'élevage, l'intensification de la production passe par la conversion d'une partie des surfaces fourragères en maïs ensilage, culture elle - aussi primée par la PAC.

Le recul de l'élevage est corrélé à la « céréalisation » croissante du bassin de la Seine, traduite par la progression des OTEX de cultures au centre et de polyculture-élevage sur les bordures. Les surfaces en blé sont en augmentation continue sur l'ensemble du bassin (+50% en trente ans), l'orge de printemps et l'escourgeon subissent quelques variations, mais restent globalement stables. Seul le maïs grain a subi un sérieux revers : après avoir culminé dans les années 1970 et 1980, notamment en Brie où il a occupé jusqu'à un tiers des surfaces agricoles, il a été progressivement remplacé par les oléoprotéagineux comme le pois ou le colza. Ce déclin s'explique par une baisse des cours mondiaux et une stagnation des rendements qui ont entraîné une diminution de son attractivité pour les agriculteurs.

Parmi les oléoprotéagineux, le colza est certainement la culture la plus répandue sur toute la zone : il est très bien adapté au contexte pédo-climatique des régions périphériques, notamment de l'Est du bassin, où il est devenu la principale tête de rotation. Il n'a réellement pris de l'importance que dans les années 1980, au cours desquelles les progrès techniques (évolution variétale, maîtrise des problèmes phyto-sanitaires) en ont fait une culture relativement sûre, confortée depuis 1992 par les aides de la PAC. Le pois protéagineux a également connu un développement spectaculaire à partir des années 1980, dans un contexte de forte demande en protéines végétales pour l'alimentation animale en remplacement du soja. Son implantation est toutefois restée limitée au centre du Bassin parisien, les terres argileuses de la périphérie n'étant pas adaptées à sa culture. Il marque un certain repli depuis quelques années en raison de problèmes sanitaires.

Enfin, le nord du bassin de la Seine est caractérisé par d'importantes surfaces en cultures de vente, non primées dans le cadre de l'actuelle PAC, qui sont rassemblées dans l'OTEX « Culture

générale ». Parmi elles, se trouve la betterave sucrière¹⁰ qui, protégée par le système de quotas alloués aux producteurs, bénéficie d'une grande stabilité. Sa culture est toutefois limitée aux bonnes terres limoneuses de Picardie et de Champagne crayeuse. Une partie de sa production étant soumise au cours mondiaux du sucre (« hors - quotas »), les surfaces implantées peuvent tout de même varier. Ce fut par exemple le cas à la fin des années 1970, où un contexte de pénurie de sucre a entraîné une forte progression des surfaces. La tendance actuelle à la diminution des surfaces n'est due qu'à une augmentation des rendements en système de quotas fixes. Les autres cultures industrielles, comme la pomme de terre et les légumes de plein – champs, ne sont soumises qu'aux lois du marché et à l'implantation des IAA. Leur production est donc contractualisée directement entre les producteurs et les industriels en fonction de cahiers des charges précis. Leur bassin de production était auparavant essentiellement situé en Picardie, mais il semble se déplacer progressivement vers la Champagne crayeuse (ex : implantation d'une usine Mac Cain à Matouges en Marne), en raison de la forte capacité d'investissement de ses agriculteurs nécessaire à ces productions (irrigation, réfrigération). Enfin, les usines de déshydratation jouent le même rôle décisif sur les assolements en garantissant aux producteurs de luzerne de Champagne crayeuse un débouché stable depuis près de quarante ans.

Ce balayage rapide des facteurs explicatifs des dynamiques agricoles et des différenciations spatiales que nous avons observées à partir des statistiques agricoles nationales ou des dires d'experts, n'a pas prétention d'être exhaustif. Il nous paraît important d'approfondir notre compréhension des systèmes agraires du bassin de la Seine et de leur évolution, en systématisant l'étude de leurs déterminants, et ce à différentes échelles d'espace : de la petite région agricole, où les logiques de proximité traduites par exemple par l'insertion des agriculteurs dans des réseaux professionnels locaux sont des déterminants importants, à l'ensemble du bassin, où les différences de milieu physique mais aussi de localisation des IAA sont prédominantes dans l'explication des choix de systèmes de production. Cette compréhension du passé nous semble indispensable pour identifier les conditions du changement des systèmes de culture, qui sont inclus dans des systèmes agraires complexes. Elle est également nécessaire pour construire des scénarios de prospective agricole sur des bases solides, et c'est en ce sens que les travaux ici présentés ont été mobilisés dans les premiers travaux prospectifs réalisés sur le bassin de la Marne (Poux et Dubien, 2002).

¹⁰ D'après le RGA 2000, 80% des surfaces nationales en betterave sont localisées dans le bassin de la Seine.

3. Modélisation du transfert des nitrates dans le bassin de la Marne

La modélisation du transfert des nitrates sur un grand bassin implique de résoudre plusieurs problèmes qui suivent les étapes qui vont être abordées dans ce chapitre.

Les nitrates étant soumis essentiellement à un transport convectif, il s'agit, dans un premier temps, de modéliser les écoulements dans le système hydrologique grâce au modèle MODCOU. Ensuite, la modélisation de la fonction production nitrates sera assurée par le modèle agronomique STICS qui devra tenir compte, en particulier, de la variabilité des pratiques agricoles présentes sur un bassin hydrologique. Enfin, ces deux modèles sont couplés de manière à faire la liaison entre le milieu (sols, cultures, climat et pratiques agricoles) et les flux de nitrates dans les aquifères.

3.1. Mise en œuvre du modèle hydrologique couplé (MODCOU)

3.1.1 Modélisation du bassin de la Seine

Conceptualisation du domaine de surface

Le point de départ de cette tâche de modélisation concerne la construction de la structure du modèle hydrologique couplé MODCOU qui fonctionne sur la base d'un schéma multicouche maillé (Ledoux, 1980 ; Ledoux *et al.*, 1984).

L'utilisation du logiciel HydroDem (Leblois, 1993) sous le SIG Idrisi permet d'établir différentes couches d'informations (directions de drainage, réseau hydrographique, limites de sous-bassins...), à partir du MNT GTOPO30 fourni, au pas kilométrique, par l'USGS. La surface seuil utilisée pour définir le réseau hydrographique principal est de 250 km². Les bassins de surface inférieure à cette taille ne seront donc pas modélisés compte tenu de la discrétisation spatiale insuffisante des zones physiographiques et des forçages atmosphériques.

Ces informations sont ensuite utilisées par le logiciel SIGMOD (Golaz, 1995) qui construit le maillage de la couche de surface en gardant une résolution fine au niveau des rivières et des limites des bassins versants. La prise en compte des écoulements souterrains implique d'étendre le domaine modélisé au-delà du bassin hydrologique de la Seine. Les cours d'eau des bassins adjacents définissent ainsi les limites hydrauliques du système qui occupe une surface de 95560 km², discrétisée en 35698 mailles carrées dont le côté varie de 1 à 8 km.

Conceptualisation du domaine souterrain

Le bassin parisien est caractérisé par un empilement de niveaux aquifères (Certes *et al.*, 1997 ; Mégrien, 1970) séparés par des niveaux semi-perméables (Figure 14). Les écoulements souterrains sont simulés, en adoptant une structure multicouche, au niveau des terrains tertiaires et de la Craie. De l'Albien au Lias, les aquifères ne sont pas représentés sous forme de couches individualisées. En effet, la partie captive de ces aquifères, sous la Craie, se situe à plusieurs centaines de mètres sous la surface topographique. Or, sur une échelle de temps d'une cinquantaine d'années, qui correspond environ à la période de simulation, les nitrates transférés dans les aquifères profonds, dont l'écoulement est très lent, n'interfèrent pas avec les nitrates du réseau hydrographique.

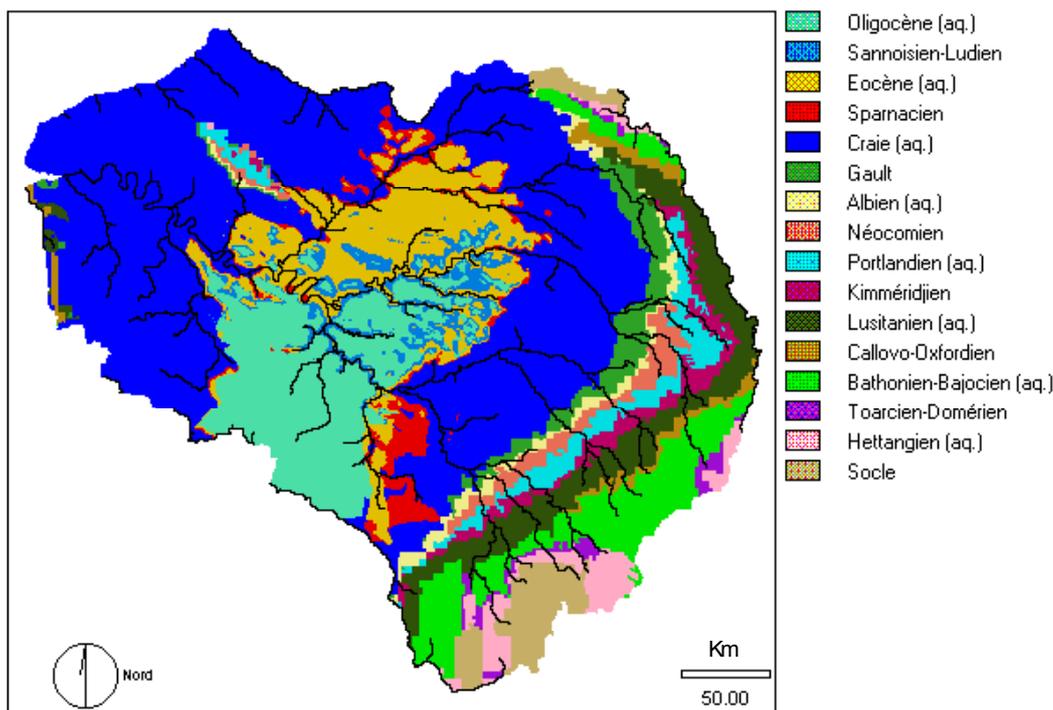


Figure 14 : Carte hydrogéologique simplifiée

En revanche, dans la partie libre de ces aquifères, affleurant à l'est du bassin, les nitrates transportés ont une incidence sur les nitrates du réseau de surface. Cependant, une prise en compte par le modèle souterrain de ces aquifères dans leur partie libre uniquement est exclue car elle ne permettrait pas de représenter de façon satisfaisante l'hydraulique souterraine.

Néanmoins, les écoulements et les transferts de nitrates seront simulés dans cette zone grâce à un modèle à réservoir qui tient compte des volumes d'eau contenue dans ces nappes ainsi que de leurs perméabilités par le biais de coefficients de vidanges.

Au niveau des aquifères modélisés (Oligocène, Eocène et craie) les écoulements seront calculés par résolution de l'équation de diffusivité suivant la méthode des différences finies. De plus, ces aquifères étant connectés hydrauliquement, la drainance verticale sera modélisée en s'appuyant sur l'épaisseur et la perméabilité des couches semi-perméables qui les séparent. Ces épaisseurs sont issues du traitement des données fournies par la CGG.

Discretisation spatiale

Pour les besoins de l'étude, le programme SIGMOD a été développé afin de permettre le maillage des couches souterraines. Le but est de réduire au maximum le nombre de mailles des couches souterraines en regroupant les mailles de la couche de surface suivant des critères topologiques (discretisation en mailles carrées emboîtées) et hydrologiques (résolution fine du maillage au niveau des cours d'eau pour tenir compte des échanges nappe-rivière) (Figure 15). Le modèle totalise 58 014 mailles dont la répartition est présentée par le Tableau 12.

Tableau 12 : Maillage des différentes couches

couches	surface (km ²)	nb. mailles
Surface	95560	35698
Oligocène	9912	2422
Eocène	18928	5082
Craie	65468	14812

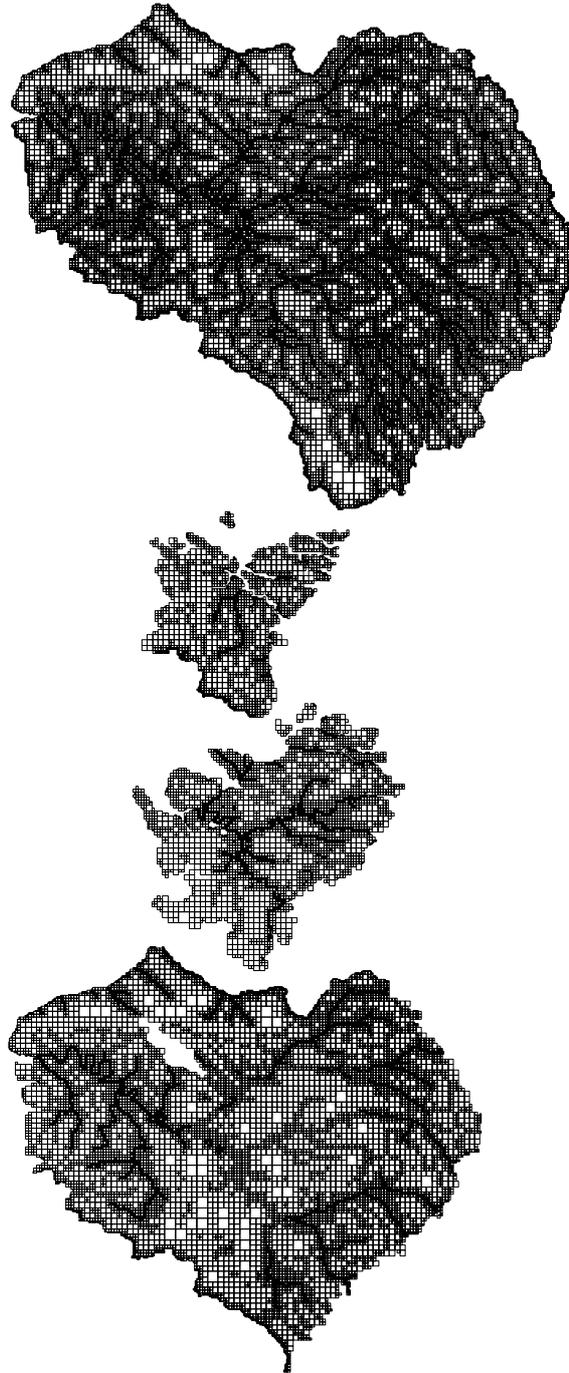


Figure 15 : Discretisation de la couche de surface et des couches souterraines

Constitution des fonctions production

Les zones de productions ont été différenciées en exploitant la base de données des sols de France à l'échelle 1/1 000 000 de l'INRA (King *et al.*, 1995) et la base de données d'occupation du sol Corine Land Cover (Collectif, 1996). L'analyse de ces données a permis de distinguer 6 catégories de sols et 5 types d'occupation des sols, soit 15 fonctions productions.

Le calcul du mode d'écoulement par les fonctions productions est différent suivant qu'une maille de surface est ou non connectée à une maille souterraine. Ainsi, le nombre de fonctions productions est multiplié par 2 pour rendre compte des cas où les mailles de surface sont connectées ou non avec le domaine souterrain, ce qui porte le nombre de zones de productions à 30, numérotées de 1 à 30 (Tableau 13).

Les notations adoptées pour les types de sols sont :

- all : alluvions
- calc : calcaires

- arg : argiles
- sab : sables
- lim : limons
- cri : socle cristallin

Le suffixe « _aq » signifie que la maille de surface est connectée à une maille souterraine.

Les notations concernant les occupations du sol sont :

- imp : surface imperméable (zones urbanisées essentiellement)
- eau : surface en eau (lacs)
- zhum : zones humides
- frt : forêt
- dif : différent des précédents (cultures essentiellement et prairies, broussailles...)

Tableau 13 : Définition des zones de production

Types de sol	Mode d'occupation				
	imp	eau	zhum	dif	frt
all_aq	1	2	3	4	10
cal_aq	1	2	3	5	11
arg_aq	1	2	3	6	12
sab_aq	1	2	3	7	13
lim_aq	1	2	3	8	14
cri_aq	1	2	3	9	15
all	16	17	18	19	25
cal	16	17	18	20	26
arg	16	17	18	21	27
sab	16	17	18	22	28
lim	16	17	18	23	29
cri	16	17	18	24	30

Sur l'ensemble du bassin de la Seine, on observe une prédominance de calcaires et de limons avec une occupation du sol de type culture, prairie, ou broussailles.

Zones météorologiques

Les forçages atmosphériques utilisés par le modèle hydrologique couplé sont les précipitations et l'ETP, auxquelles il faut ajouter (pour STICS) la température minimale, la température maximale et le rayonnement global. Ces variables sont fournies par Météo France au pas de temps journalier, sous la forme de champs interpolés, sur une grille d'un pas de 8 km.

Ces données sont le résultat de la mise en œuvre du logiciel SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) qui fournit au pas de temps horaire, avec une discrétisation verticale : température de l'air à la surface, vent, humidité de l'air, nébulosité, pression, précipitations liquides et solides, rayonnement atmosphérique et rayonnement solaire incident (direct et diffus) (Durand *et al.*, 1993). SAFRAN utilise une méthode d'interpolation qui prend en compte les sorties d'un modèle à méso-échelle (20 à 100 km²) et les observations disponibles qui proviennent des données relevées en 62 postes synoptiques et 1569 postes du réseau climatique d'Etat.

Les données météorologiques fournies par Météo-France couvrent la période 1985-1995. Néanmoins, la période de simulation étant envisagée sur la période 1970-2000, les données météo manquantes doivent être générées sur la période 1970-1985 et 1995-2000 en respectant les bilans mensuels. Une vingtaine de stations météo réparties sur le bassin a donc été retenue pour établir des zones considérées homogènes (iz) à l'aide des polygones de Thyssen. Ces données sont disponibles au pas de temps mensuel pour chaque zone homogène (Vmens(iz)). Pour chaque maille météo SAFRAN (s), des variables météo moyennes mensuelles (Vmens_moy(s)) et journalières (Vj_moy(s)) sont calculées sur la période fournie par Météo-France (1985-1990).

Chaque maille météo SAFRAN (s) étant rattachée à une zone météo homogène (iz), les variables météo sont définies sur la période manquante de la manière suivante :

$$V_j(s) = V_{j_moy}(s) * (V_{mens}(iz) / V_{mens_moy}(s))$$

La variable V pouvant représenter la précipitation, l'ETP, la température minimale ou maximale, ou le rayonnement global.

3.1.2 Ajustement du modèle de surface

Estimation du temps de concentration

Le temps de concentration sur le bassin de la Seine a été estimé à 17 jours de manière à reproduire le synchronisme des pointes de crues en comparant des débits observés le long de la Seine avec les débits issus d'une simulation simple en ruissellement.

Ajustement des fonctions production

Les paramètres des fonctions production sont ajustés de manière à assurer pour chaque station des volumes ainsi qu'une courbe hydrométrique en rapport avec les données observées. La démarche de calibration consiste à identifier des stations où dominant 2 ou 3 fonctions production. Les débits y sont calés en ajustant les paramètres de ces fonctions, de manière à obtenir des critères statistiques (biais et critère de Nash essentiellement) proches des valeurs optimales.

Les bilans hydriques, calculés par ajustement des fonctions production sur la période 1971-1999, sont représentés sur la Figure 16 pour chaque maille de la grille météo, en moyenne annuelle.

On observe ainsi de fortes ETR, jusqu'à 600 mm/an, à l'est du bassin qui, associées aux fortes précipitations, caractérisent un climat à dominante continentale. Dans cette région, ainsi que dans la partie nord du bassin, soumise à l'influence océanique, les quantités d'eau dédiée à l'écoulement sont relativement importantes (environ 300 mm/an). En revanche, les quantités d'eau écoulée sont moindres dans le centre du bassin, notamment en Beauce (environ 100 mm/an).

3.1.3 Ajustement du modèle de la zone non saturée

La modélisation des transferts dans la zone non saturée implique de diviser le domaine en zones homogènes, c'est-à-dire en zones qui ont le même nombre de réservoirs et le même coefficient de vidange (Besbes, 1978). A partir de la profondeur moyenne de la nappe, issue d'un premier calage du modèle souterrain en régime permanent, les zones homogènes sont déterminées, d'une part, d'après l'épaisseur des réservoirs, par différence entre l'altitude de la surface topographique et la piézométrie simulée, et d'autre part, par les types de sols auxquels sont associés les coefficients de vidange. Cependant, à l'est du bassin, où les aquifères ne sont pas représentés par le modèle souterrain, les différents types de sols sont utilisés pour établir les zones homogènes auxquelles sont attribués les 2 paramètres, par calage.

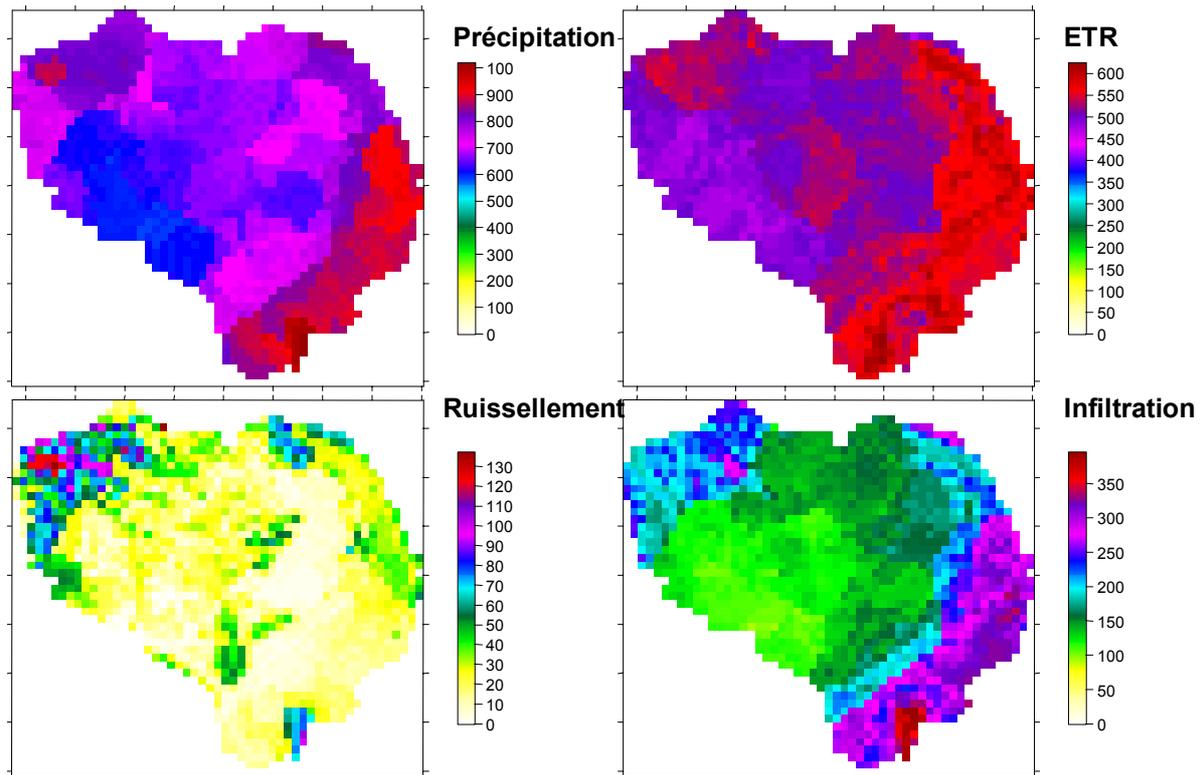


Figure 16 : Bilan hydrique annuel, moyenne sur la période 1971-1999

3.1.4 Ajustement du modèle souterrain

Paramètres hydrodynamiques

Les paramètres hydrodynamiques (transmissivités et coefficients d'emmagasinement) sont ajustés de manière à reproduire l'évolution des variations piézométriques qui seront comparées aux évolutions observées dans les 120 piézomètres disponibles.

Echanges nappes-rivières

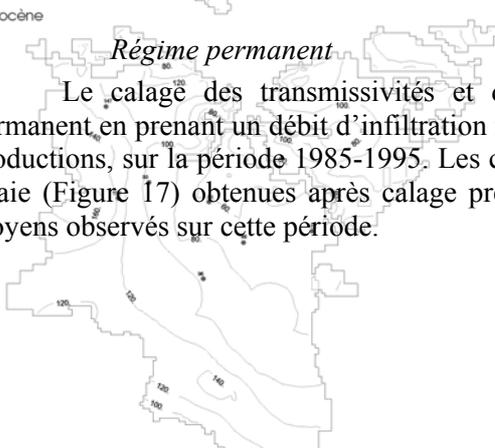
Pour définir les relations hydrauliques entre les rivières et les nappes, les cotes de drainage sont saisies en un certain nombre de points du réseau hydrographique à l'aide de cartes IGN à l'échelle 1/25 000 et 1/100 000, du guide de la navigation et des cotes des stations hydrométriques fournies par la banque HYDRO. Ces altitudes sont ensuite interpolées linéairement le long de mailles rivières en veillant à ce que l'altitude interpolée soit inférieure aux cotes topographiques fournies par le MNT. Il s'agit ensuite de régler les relations hydrauliques entre la rivière et la nappe en affectant des coefficients de transfert nappe-rivière qui reflètent l'état de colmatage du lit mineur. En l'absence de données supplémentaires, ces coefficients sont fixés à $1\text{m}^2/\text{s}$, impliquant une impédance hydraulique négligeable compte tenu des valeurs de transmissivité. A ce stade de l'étude, les fluctuations piézométriques étant prises en compte dans les rivières, MODCOU calcule les débits dans les rivières qui seront comparés aux débits observés dans les 140 stations hydrométriques disponibles.

3.1.5 Résultats et validation

Nappe de l'oligocène

Régime permanent

Le calage des transmissivités et des coefficients de drainance a été réalisé en régime permanent en prenant un débit d'infiltration moyen, issu de la calibration des paramètres des fonctions productions, sur la période 1985-1995. Les cartes piézométriques de l'Oligocène, de l'Eocène et de la Craie (Figure 17) obtenues après calage présentent un bon accord avec les niveaux piézométriques moyens observés sur cette période.



Nappe de la craie

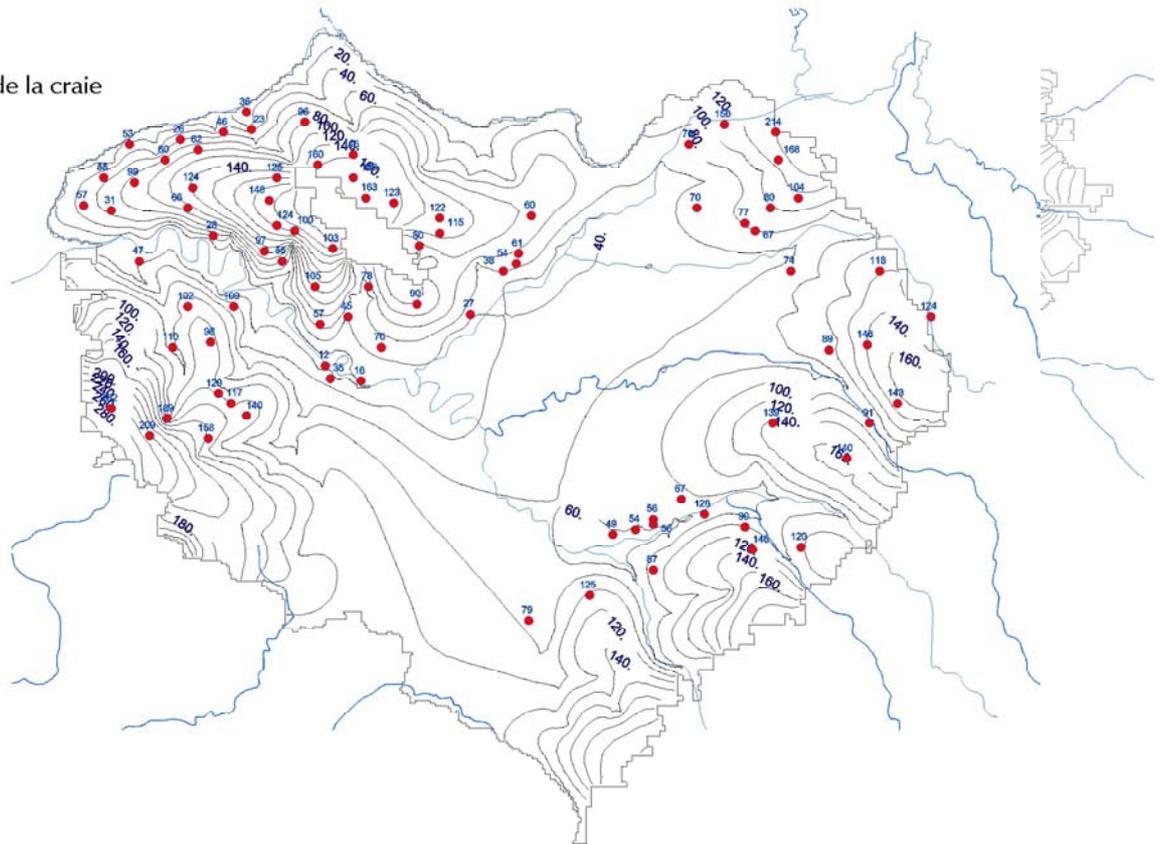


Figure 17 : Piézométrie en régime permanent (Oligocène, Eocène, Craie)
(la nappe de l'oligocène a été grossie de 25% pour une meilleure lisibilité)

Régime transitoire

L'ajustement du modèle couplé en régime transitoire a été mené sur la période 1987-1989. Le Tableau 14 présente les valeurs des transmissivités et des coefficients d'emménagement obtenues par calage.

Tableau 14 : Paramètres hydrodynamiques

couche	Transmissivité (m ² /s)			Coefficient d'emménagement (%)		
	mini	maxi	moyen	mini	maxi	moyen
Oligocène	1.10 ⁻⁴	1,2.10 ⁻¹	1,7.10 ⁻²	5	10	5,3
Eocène	2,3.10 ⁻⁴	2.10 ⁻¹	1,3.10 ⁻²	0,01	10	9,6
Craie	1.10 ⁻³	9.10 ⁻²	4,2.10 ⁻²	1	5	1,8

La Figure 18 et la Figure 19 montrent quelques résultats de simulation menée en régime transitoire sur la période 1971-1999 au pas de temps journalier. Globalement, les résultats de la modélisation rendent compte de façon satisfaisante des variations observées dans le système hydrologique de la Seine. Dans ces conditions, la modélisation du transfert des nitrates peut être envisagée. Néanmoins, le calage des fonctions production et des paramètres hydrodynamiques pourra encore être amélioré ultérieurement.

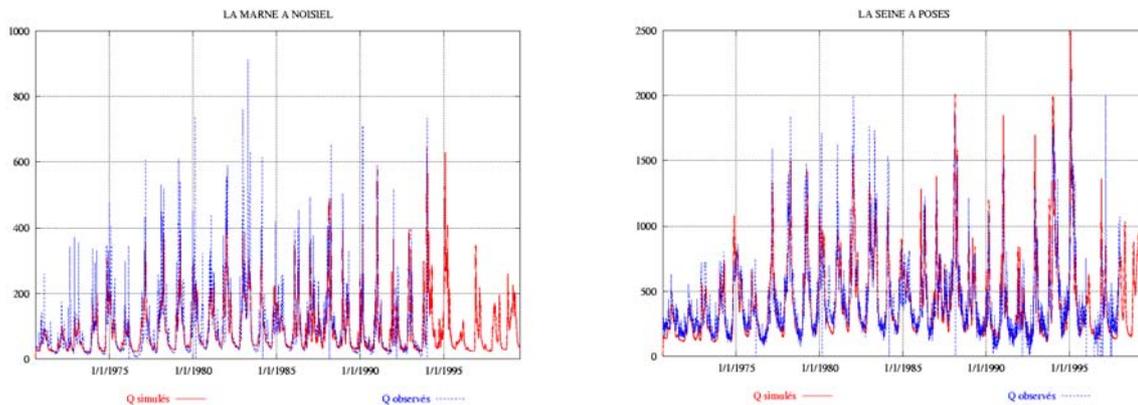


Figure 18 : Comparaison des débits simulés et observés sur la période 1971-1999

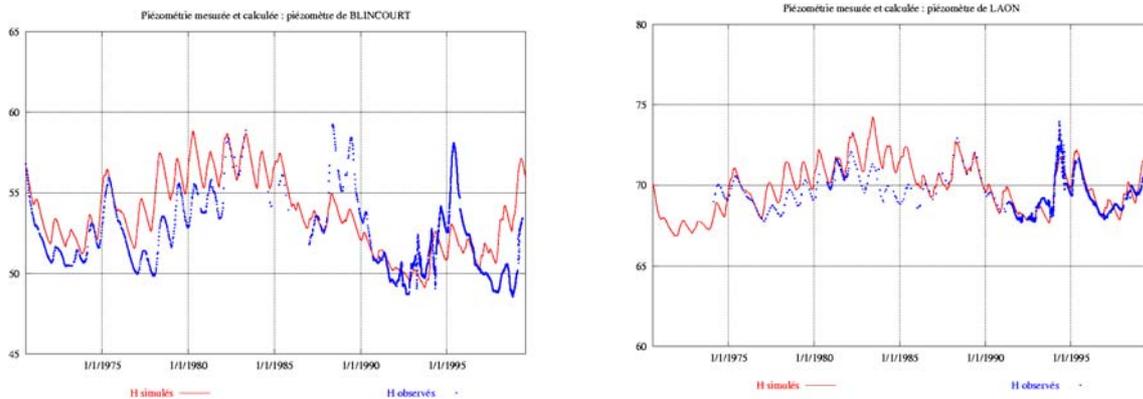


Figure 19 : Comparaison de la piézométrie simulée et observée sur la période 1971-1999

3.2. Mise en œuvre du modèle agronomique (STICS)

3.2.1 Principe du modèle STICS

STICS (Simulateur multidisciplinaire pour les Cultures Standard) est un modèle de fonctionnement des cultures conçu comme un outil de simulation opérationnel en conditions agricoles (Brisson *et al.*, 1998). C'est le modèle retenu dans le thème 1 du PIREN-Seine pour simuler le lessivage du nitrate. STICS simule les bilans d'eau, de carbone et d'azote dans le système sol- plante. Il a été mis au point par diverses équipes INRA afin de simuler la production agricole (en quantité et qualité) et les fuites de nitrate à l'échelle de la parcelle agricole et du cycle cultural, en fonction du climat, du type de sol, du type de culture et des pratiques agricoles. Il a été mis au point à partir de plusieurs sous-modèles testés antérieurement (Brisson *et al.*, 1998). Il a d'abord été évalué en sol sans culture, et pour les cultures de blé d'hiver et de maïs (Justes *et al.*, 2001; Brisson *et al.*, 2002). Il a également été comparé favorablement à d'autres modèles proposés dans la littérature internationale (Gabrielle *et al.*, 2002; Lafolie *et al.*, 2002).

Le système sol simulé correspond à la zone d'enracinement maximale permise par le sol et la culture. Les flux d'eau et de nitrate sortant sous la base racinaire sont supposés alimenter de façon conservative les systèmes aquifères (zones non saturée et saturée). Les principaux processus simulés par ce modèle sont l'évaporation du sol, la transpiration de la plante, l'irrigation, le drainage naturel du sol; le développement, l'interception du rayonnement, la croissance foliaire, l'extension du système racinaire, la croissance en biomasse, l'élaboration du rendement de la culture; le transfert de nitrate dans le sol, l'absorption par le système racinaire, la fixation symbiotique, la décomposition des matières organiques, la minéralisation d'azote par le sol.

Ce modèle agronomique, initialement destiné à effectuer des simulations à l'échelle de la parcelle agricole, a déjà été employé de façon spatialisée, à l'aide du système d'information géographique Arc-Info, afin de simuler la pollution diffuse par les nitrates dans des bassins hydrologiques en zone de grande culture (Beaudoin *et al.*, 1999; Nicoullaud *et al.*, 1999; Parnaudeau *et al.*, 1999; Schnebelen, 2000; Sauboua, 2001).

C'est un modèle considérant une culture homogène et un système sol mono-dimensionnel. Son pas de temps est le jour. Il peut simuler un cycle cultural, mais peut aussi enchaîner les simulations sur un grand nombre d'années. Il faut alors définir la succession des cultures pendant cette période de temps. La mise en œuvre du modèle requiert quatre sources de données :

- des données climatiques : il s'agit de la température minimale, maximale, de la pluviométrie, de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et du rayonnement global, au pas de temps journalier;
- des données "sol" : ce sont les caractéristiques physico-chimiques de la couche labourée (teneurs en argile, en calcaire, en azote organique, albédo, ...), les propriétés physiques de chacune

des couches pédologiques (épaisseur, masse volumique, teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement, teneur en cailloux) et la profondeur maximale d'enracinement permise par le sol;

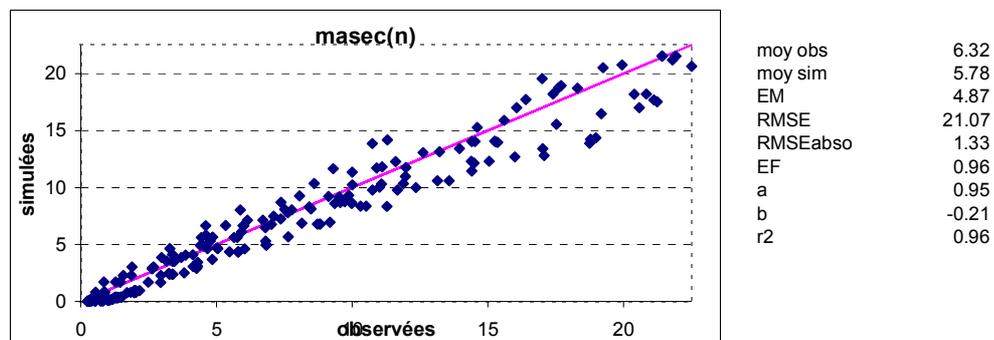
- des paramètres "culture" : il s'agit des paramètres relatifs aux différents processus simulés (germination, levée, développement, mise en place des capteurs souterrains et aériens, absorption d'azote, ...), incluant la prise en compte de l'effet des stress hydrique, thermique et azoté sur le fonctionnement de la plante;
- des données "techniques culturales" : elles sont définies par les modalités et les dates des interventions culturales (semis, irrigation, apports d'engrais azotés, apport d'amendements organiques, récolte, travail du sol, incorporation des résidus de culture, ...)

3.2.2 Adaptation du modèle au bassin de la Seine

Dans cette étude, une procédure de régionalisation de STICS a été réalisée pour permettre son emploi sur l'ensemble du bassin de la Seine (Gomez *et al.*, 2000). Les différentes bases de données ont été constituées de la manière suivante :

- les données "techniques culturales", ont été réparties sur un maillage qui s'appuie sur les petites régions agricoles (PRA),
- les données "sol" proviennent de la carte pédologique de France au 1/1 000 000 (King *et al.*, 1995),
- les données météorologiques ont été fournies par Météo - France sur une grille carrée d'un pas de 8 km,
- les paramètres plante proviennent soit d'études antérieures (blé tendre, blé dur, maïs, prairie, soja,), soit ont été mis au point spécialement dans le cadre de ce travail afin d'obtenir un grand éventail de cultures. Les nouvelles plantes paramétrées sont le colza, le tournesol, la betterave à sucre, le pois protéagineux, l'orge, la moutarde (culture intermédiaire). La pomme de terre, la vigne et la luzerne ont fait l'objet d'un paramétrage sommaire, qui restera à affiner.

Enfin, un travail d'adaptation du modèle au cas des sols drainés artificiellement a été réalisé afin de pouvoir faire des simulations de fuites de nitrate dans les réseaux collecteurs de drains.



3.2.3 Evaluation du modèle pour différentes cultures

Le modèle a été évalué dans différentes situations, soit dans le cadre d'essais expérimentaux annuels, soit sur les parcelles agricoles du bassin hydrologique de Bruyères (près de Laon). Les figures suivantes montrent des exemples de comparaison observé - simulé, dans le cas de la biomasse du blé d'hiver (Figure 20), de la quantité d'azote absorbé par le blé d'hiver (Figure 21), de la quantité d'azote absorbé par la betterave à sucre (Figure 22), de la quantité d'azote absorbé par le pois protéagineux (Figure 23) sur des expérimentations annuelles (avec répétitions).

Figure 20 : Matière sèche aérienne du blé d'hiver ($t\ ha^{-1}$) observée et simulée par STICS sur des essais annuels

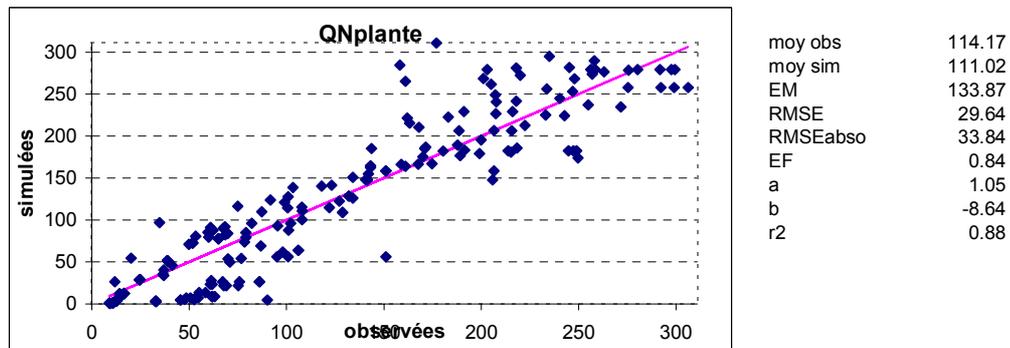


Figure 21 : Quantité d'azote absorbé par le blé d'hiver (kg ha^{-1}) observée et simulée par STICS (essais annuels)

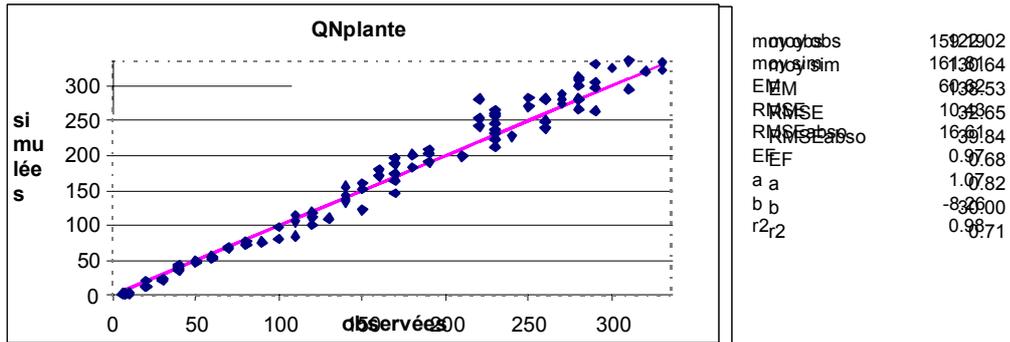
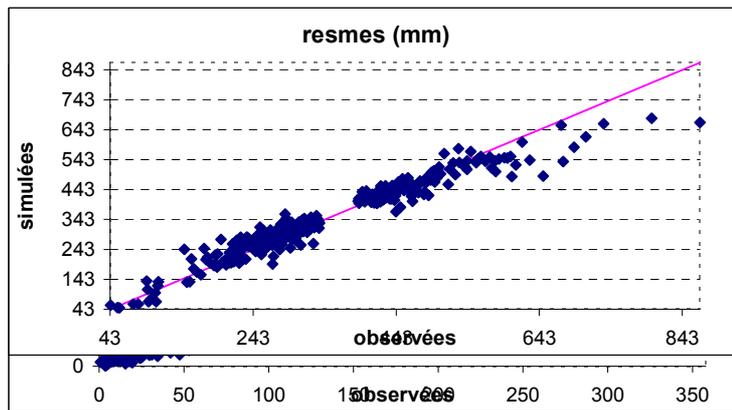


Figure 22 : Quantité d'azote absorbé par la betterave à sucre (kg ha^{-1}) observée et simulée par STICS sur des essais annuels.

Figure 23 : Quantité d'azote absorbé par le pois protéagineux (kg ha^{-1}) observée et simulée par STICS sur des essais annuels.

L'accord entre observations et simulations est suffisamment bon (absence de biais) pour envisager son extrapolation à d'autres conditions pédo-climatiques. La réponse du modèle à la dose de fertilisation azotée a également été testée sur d'autres essais et donne des résultats satisfaisants.

Le modèle a également été évalué sur le réseau de parcelles agricoles de Bruyères, avec des mesures sans répétitions et donc moins précises. L'accord obtenu pour les mesures de stock d'eau et d'azote minéral est satisfaisant, la dispersion étant en partie expliquée par l'absence de répétitions (Figure 24 et Figure 25).



moy obs	352.19
moy sim	349.69
EM	290.63
RMSE	49.23
EMSEabso	139.00
RMSE	50.94
RMSEabso	20.96
EF	45.77
r ²	0.96
b	15.30
r2	0.70

Figure 24 : Stock d'eau dans le sol (mm) observé et simulé par STICS sur le réseau de parcelles de Bruyères (02)

Figure 25 : Stock d'azote minéral dans le sol (kg ha⁻¹) observé et simulé par STICS sur le réseau de parcelles de Bruyères (02).

3.2.4 Adaptation du modèle au cas du drainage artificiel

STICS, dans sa version initiale, simule le transfert d'eau et d'azote dans des sols non drainés et qui ont un drainage interne rapide. Une adaptation du modèle a été faite afin de simuler l'écoulement d'eau et d'azote dans des sols équipés d'un système de drainage artificiel.

L'engorgement qui peut exister temporairement dans les sols à mauvais drainage interne exerce un stress sur la plante : cet effet a également été modélisé, sur la base de résultats antérieurs obtenus sur des cultures de blé d'hiver (Rebière, 1996). La composante transferts d'eau en terrains drainés (Nikolic *et al.*, 2000) et la fonction stress sur la croissance racinaire ont été incorporées à STICS. L'intégration se poursuit pour ce qui concerne la fonction stress sur la croissance des parties aériennes, et le transfert de nitrate en terrains drainés (résultats de la thèse de Arlot, 1999). Le formalisme utilisé pour les terrains drainants peut s'appliquer à la majeure partie des terrains à nappe superficielle même en l'absence de drainage souterrain ; il existe en effet toujours un drain naturel pour ces terrains. Ce travail est calé sur les données de hauteur de nappe et de profondeur racinaire obtenues par Rebière et validé sur des jeux de données d'Arrou (28).

Le module de drainage introduit dans STICS est une simplification du modèle SIDRA (Lesaffre et Zimmer, 1988), en ne tenant compte que du cas où le drain repose sur l'imperméable. SIDRA utilise la recharge nette de la nappe à chaque pas de temps afin d'en déduire les variations de hauteur de nappe à l'interdrain et de calculer le débit au drain. La recharge nette est définie comme la pluie efficace. L'équation différentielle résolue, déduite de l'équation de Boussinesq (Bouarfa et Zimmer, 2000) s'écrit :

$$C \cdot \mu \cdot \frac{dH(t)}{dt} = R(t) - J(H) - H(t) \cdot \mu \cdot \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

où C est un facteur de forme de nappe; μ est la porosité de drainage; $H(t)$ est la hauteur de la nappe à l'interdrain au temps t ; $R(t)$ est la recharge nette au temps t ; $J(H)$ est la fonction de Hooghoudt qui donne le débit évacué par le système en régime permanent.

Le terme de droite de l'équation (1) montre que le fonctionnement des systèmes drainants est régi par trois composantes : la première est l'intensité de la recharge qui parvient à la nappe, la seconde est la production de débit liée à la hauteur de la nappe ; la troisième correspond aux déformations de la forme de la nappe qui conduit à un stockage ou déstockage d'eau de cette dernière. Le passage de SIDRA à STICS a requis 2 adaptations: un changement dimensionnel (2D de SIDRA → 1D de STICS) et un changement temporel (pas de temps horaire de SIDRA → pas de temps journalier de STICS).

La sensibilité de la plante à l'anoxie a été introduite dans STICS via une fonction de stress à l'excès d'eau, qui stoppe la croissance des racines dès que celles-ci arrivent à la nappe. Les travaux de Rebière (1996) ont montré que cette fonction pouvait être paramétrée par le pourcentage de racines

efficaces envoyées (*SEE*). Ce pourcentage est le rapport entre la quantité de racines actives se trouvant dans les couches de sol saturées et la quantité totale de racines. La croissance journalière des racines en profondeur *izrac* est calculée en fonction de *SEE* comme suit :

$$izrac = \alpha * e^{(-\beta * SEE)} + C$$

Les paramètres α (1.60), β (-0.27) et C (-0.60) ont été calés à partir des données expérimentales obtenues sur blé sur le site d'Arrou (28), en 1993-1994. La présence de la nappe arrête la progression des racines dans le sol, ce qui entraîne une moindre croissance des parties aériennes. La fonction de stress agit sur l'activité photosynthétique et la transpiration de la plante par l'intermédiaire de la variable *SEE*.

En ce qui concerne le transfert de nitrate en parcelle drainée, les travaux de Arlot (1999) ont permis de spatialiser les contributions des différentes parties de la zone drainée et ainsi d'évaluer les temps de présence du soluté à différentes cotes. Il a été noté que la zone contribuant au lessivage correspond à celle du niveau de la nappe dans le profil. C'est pourquoi, dans une première approche, nous avons assimilé le lessivage de l'azote dans la parcelle drainée à une exportation du soluté à la cote de la nappe.

Nous avons pu tester la nouvelle version de STICS avec ces modifications. Dans une première étape, le module de drainage a été validé sur le sol nu par Nikolic *et al.* (2000). Le modèle permet de simuler les débits mesurés de manière correcte, sauf pour les débits de pointe : ceci est dû au changement de pas de temps entre le modèle SIDRA et STICS. Les événements printaniers sont souvent mal reproduits.

Dans une seconde étape, non achevée, nous testons le module de simulation des effets des excès d'eau sur la plante. Le modèle STICS permet de reproduire l'allure générale des variations de hauteurs de nappe données dans la thèse de Rebière (Figure 26). Néanmoins les valeurs prédites par STICS sont un peu plus faibles et la nappe se tarit un peu plus rapidement que ce qui a été mesuré.

Le modèle prédit également assez bien l'allure générale de l'enracinement, même si on note un écart entre la simulation et les mesures, de l'ordre de 10 cm durant la période hivernale (Figure 26). Cet écart peut s'expliquer par les conditions de réalisation de la mesure en plein hiver qui se traduisent par une imprécision de la mesure, par des facteurs climatiques ponctuels que les données ne mentionneraient pas (fort débit de quelques heures entre deux mesures ponctuelles).

La comparaison des données de profondeur racinaire et de rendements obtenus avec les simulations effectuées par le modèle STICS au drain et à l'interdrain montre une bonne adéquation entre les valeurs (Tableau 15). En effet que ce soit au drain ou à l'interdrain, l'écart entre les valeurs simulées et observées de profondeur racinaire est de 9% maximum. Quant au rendement, nous surestimons un peu sa valeur de l'ordre de 0.6 t ha⁻¹ au drain et de 1.0 t ha⁻¹ à l'interdrain ce qui représente une erreur de 19% au plus.

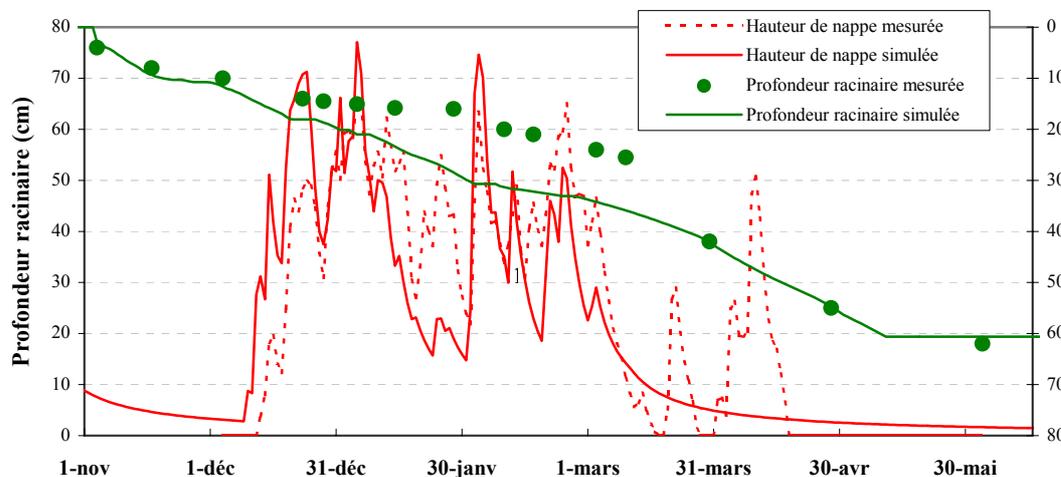


Figure 26 : Comparaison des hauteurs de nappe et profondeur racinaire à l'interdrain simulées par STICS avec celles mesurées par B. Rebière sur la parcelle 1 du site d'Arrou (28) en 1993-1994.

Tableau 15 : Comparaisons des profondeurs racinaires et des rendements au drain et à l'interdrain simulés par STICS avec ceux obtenus sur la parcelle 1 du site d'Arrou en 1993-1994

	Profondeur racinaire (cm)		Rendements (t/ha)	
	Drain	Interdrain	Drain	Interdrain
Mesure	72	62	6.6	5.6
Calage	65	61	7.3	6.7

Le formalisme simple adopté permet de reproduire tous les phénomènes déjà observés expérimentalement (Arlot, 1999). Le caractère asymptotique du lessivage, typique d'un lessivage de stock limité est reproduit. Nous reproduisons ainsi les épiphénomènes liés aux phases d'entraînement de l'azote en début de saison de drainage et les phases de dilution pendant la saison de drainage intense. La concentration simulée dans le profil suit bien une décroissance exponentielle conforme à celle qui est observée sur site expérimental.

Pour la validation, nous avons comparé les chroniques de qualité et les bilans à la parcelle simulés par STICS avec les mesures effectuées sur le site d'Arrou de 1977 à 1978. Cette approche est fortement sensible aux conditions initiales, c'est-à-dire au stock d'azote potentiellement lessivable. La Figure 27 confronte les concentrations mesurées à la sortie du drain avec les concentrations de flux calculées à partir des débits et des exportations d'azote simulés par jour par STICS. Compte tenu des erreurs transmises sur les débits, de la variabilité spatiale des solutés dans le sol et surtout de la méconnaissance des conditions initiales, nous nous intéressons aux tendances qui sont bien retranscrites par cette approche simplifiée. STICS simule un lessivage de 62 kg N-NO₃/ha pour un volume drainé de 183 mm, les mesures donnant 50 kg N-NO₃/ha pour 226 mm. Le rendement simulé s'élève à 7.3 t/ha contre 7.5 t/ha observé.

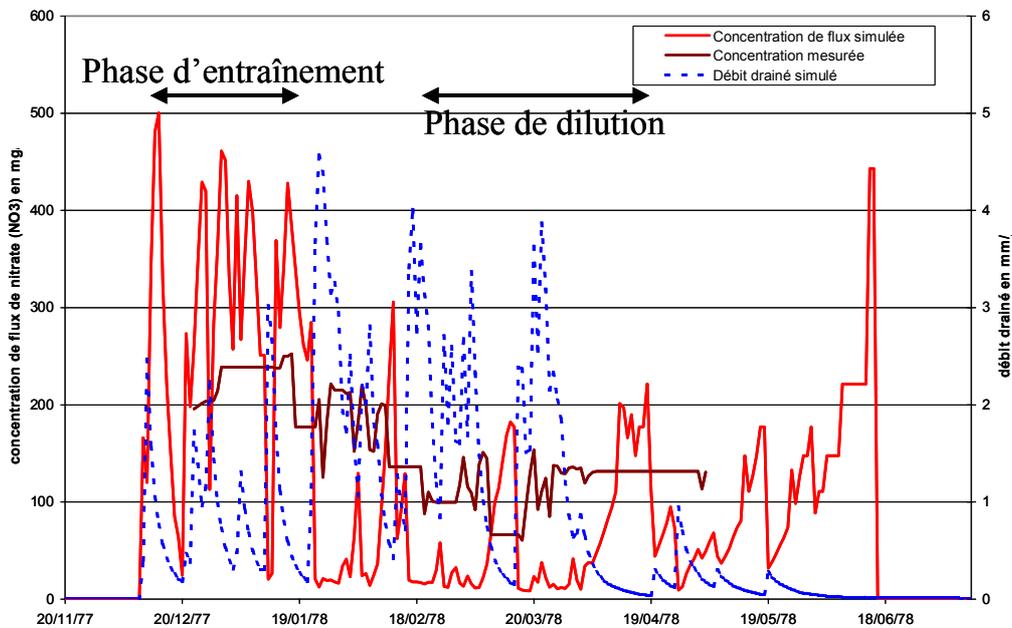


Figure 27 : Comparaison des concentrations journalières observée et simulée au drain, et évolution des débits simulés par STICS.

En conclusion, STICS semble bien validé sur les données obtenues par Rebière (1996), pour le drainage, l'effet de l'excès d'eau sur le blé et le lessivage de l'azote. Cependant, le pas de temps journalier imposé dans STICS ne permet pas de reproduire les débits de drainage de pointe, ni les débits printaniers ponctuels. Le formalisme du lessivage pourra être affiné en déterminant une concentration moyenne de la partie du profil de sol saturé, puis en calculant la quantité exportée obtenue par le débit drainé, et enfin en redistribuant la partie lessivée dans le profil pondérée par la quantité initiale. La validation complète de la nouvelle version de STICS est en cours de réalisation en utilisant les données disponibles sur la parcelle d'Arrou entre les années 1974-1984. D'autres types de plantes, en plus du blé d'hiver, seront utilisés comme le maïs et l'escourgeon.

3.2.5 Construction de la base de données "Pratiques agricoles"

Les informations relatives aux pratiques agricoles nécessaires à la mise en œuvre de STICS ont été collectées par enquêtes auprès d'experts agricoles (§ 2.1.2). Pour gérer ces informations, nous avons choisi de construire une base de données relationnelle, utilisable à la fois pour le processus de modélisation des flux de nitrates et pour la représentation cartographique des pratiques agricoles et de leur évolution sur les PRA du bassin de la Seine. Ce chapitre est consacré à la présentation du modèle de la base de données et d'un exemple de tendance d'évolution des techniques culturales que nous avons pu reconstituer depuis le début des années 1970. Il s'achève sur une première tentative de confrontation des dires d'experts avec une autre source d'informations issue du Centre d'Economie Rurale de l'Aube.

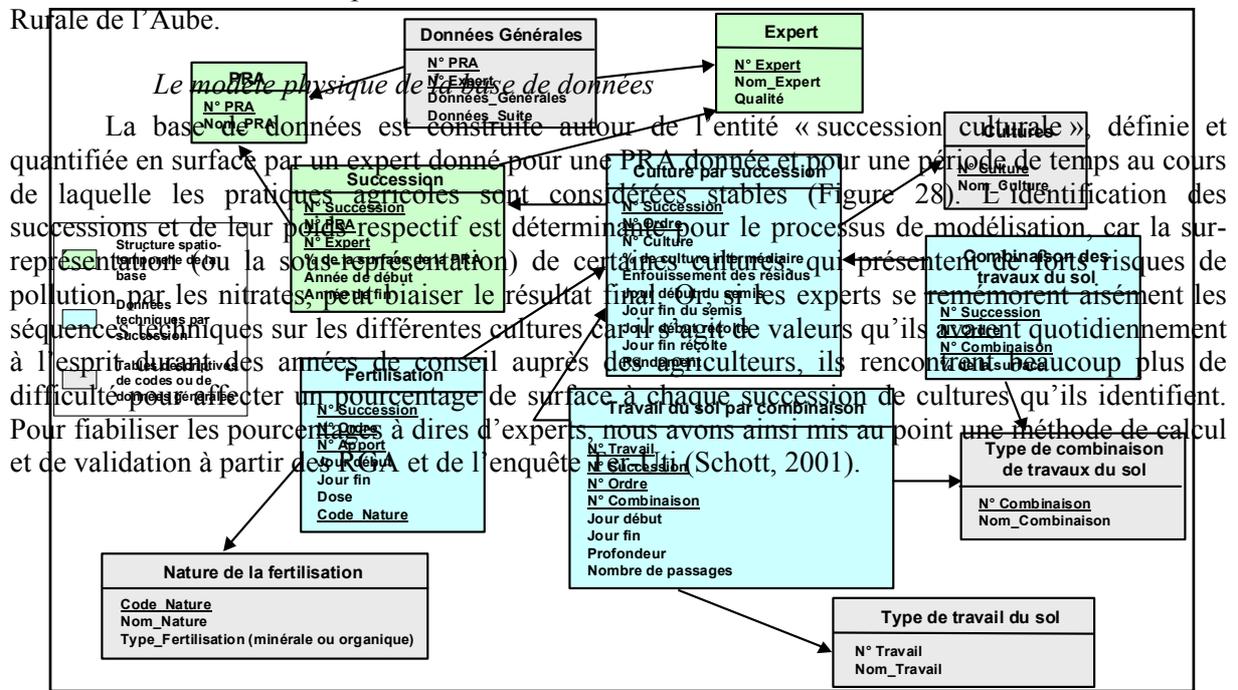


Figure 28 : Modèle physique simplifié de la base de données "Pratiques agricoles"

Pour chaque culture d'une succession culturale, les séquences techniques sont détaillées selon trois thématiques principales :

- des informations sur les dates de semis et de récolte, le rendement, l'enfouissement des résidus de récolte, le pourcentage de culture intermédiaire implantée avant la culture considérée,
- des informations relatives aux pratiques de fertilisation azotée minérale et organique (nombre d'apports, date et dose),
- des informations relatives aux différents types de travaux du sol et à la façon dont ils sont combinés.

Les tendances d'évolution des pratiques de fertilisation azotée minérale depuis 1970

Indépendamment des résultats de la modélisation des flux de nitrates par STICS, il est possible d'extraire de la base de données une série d'indicateurs pour informer les dynamiques d'évolution des techniques culturales au cours des trente dernières années. Nous prendrons ici l'exemple des pratiques de fertilisation azotée minérale sur blé et sur betterave.

Sur la culture du blé, la dose totale d'azote apportée n'a cessé de s'accroître, corrélativement aux potentiels de rendement, qui ont notablement augmenté depuis l'arrivée des fongicides au milieu des années 1970 puis avec l'apparition des régulateurs de croissance (fin des années 1970) qui ont limité la verse liée aux excès d'azote dans le sol (Figure 29). Parallèlement, les apports ont été progressivement fractionnés, de manière à ajuster la fourniture d'azote avec les besoins des plantes, passant ainsi de deux dans les années 1970 à trois voire quatre dans la plupart des régions au cours des années 1990¹¹. Plus récemment apparaît une tendance au recul du premier apport et à une diminution de la dose qui y est apportée (qui est reportée sur le deuxième apport). Fractionnement des apports et ajustement de la date et de la dose du premier apport sont des pratiques qui limitent les risques de lessivage des nitrates.

¹¹ Le dernier apport permet d'assurer la teneur en protéine pour la farine panifiable.

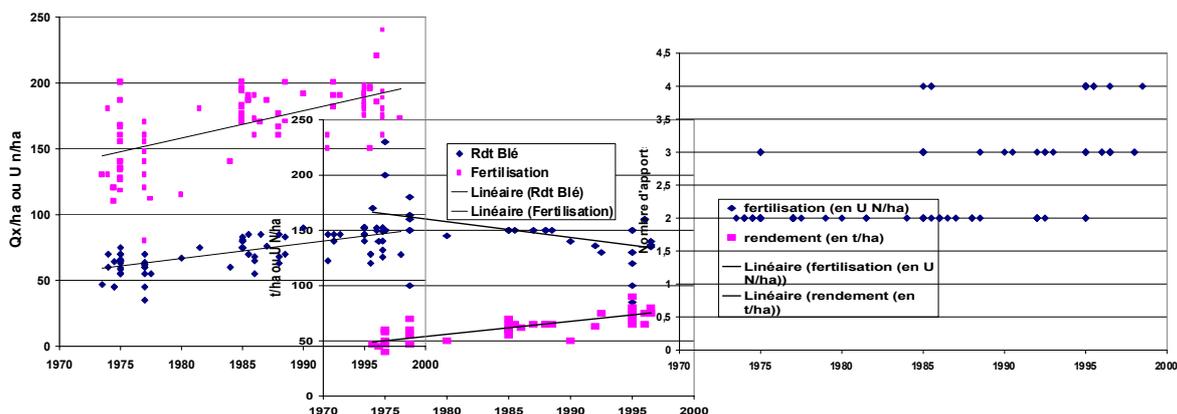


Figure 29 : Evolution comparée de la fertilisation azotée et du rendement, et évolution du nombre d'apports sur blé depuis 1970

Concernant la fertilisation de la betterave, les doses totales apportées ont connu une évolution inverse (Figure 30) : alors que les rendements moyens n'ont cessé d'augmenter (de 50 t/ha à 16% de sucre dans les années 1970 à 74 t/ha à 17% de sucre actuellement¹²), les quantités d'engrais azoté ont diminué régulièrement pendant les trente dernières années, passant de 200 à 120 kg N/ha en moyenne¹³. Cette diminution est due à une forte pression des sucreries qui rencontraient des problèmes de qualité des jus de betterave en raison d'excès d'azote.

Figure 30 : Evolution comparée de la fertilisation azotée et du rendement sur betterave

La cartographie de ces quelques tendances montre que, tout comme les dynamiques observées au niveau des systèmes de production, des assolements et des successions de cultures, les évolutions des techniques de fertilisation sont spatialement différenciées (Figure 31 et Figure 32). Il serait ultérieurement intéressant de croiser les différenciations spatiales mises en évidence à ces quatre niveaux de description des activités agricoles.

Plus généralement sur les pratiques de fertilisation, nous pouvons noter que certaines d'entre elles, qui favorisaient le risque de lessivage des nitrates, ont totalement disparu : c'est le cas de l'apport d'azote réalisé après moisson sur les pailles dans les régions de grandes cultures de 1970 à 1985, pour aider à leur décomposition (entre 20 et 50 kg N/ha sous forme uréique ou d'ammonitrate). En revanche, de nouvelles pratiques sont mises en œuvre qui vont dans le sens d'une meilleure gestion de la fertilisation azotée. A partir de la fin des années 1970, la méthode des bilans d'azote, qui permet de raisonner la fumure azotée, se généralise dans les départements de l'Aisne, de Seine-et-Marne et de l'Oise. Cette méthode est reprise dans les années 1980 par certains agro-industriels, concernés par des problèmes de qualité des produits (betteraves, légumes, pommes de terre) dus à des teneurs excessives en azote, qui la diffusent auprès des agriculteurs sous contrat. Dans les années 1990, la mesure des reliquats d'azote se généralise, principalement dans les départements de l'Oise et de l'Aisne, dans lequel par exemple 30 à 40% des parcelles en betterave en 1997 ont fait l'objet d'une mesure en sortie d'hiver. En termes plus prospectifs, une technique d'avenir citée lors des enquêtes consiste à apporter l'azote de façon localisée au moment du semis. Cette technique permettrait de réduire la dose apportée de 20 à 30% sur betterave.

¹² Source : Institut Technique de la Betterave

¹³ L'augmentation des rendements est dans ce cas expliquée par la sélection variétale et l'amélioration de la technicité des agriculteurs.

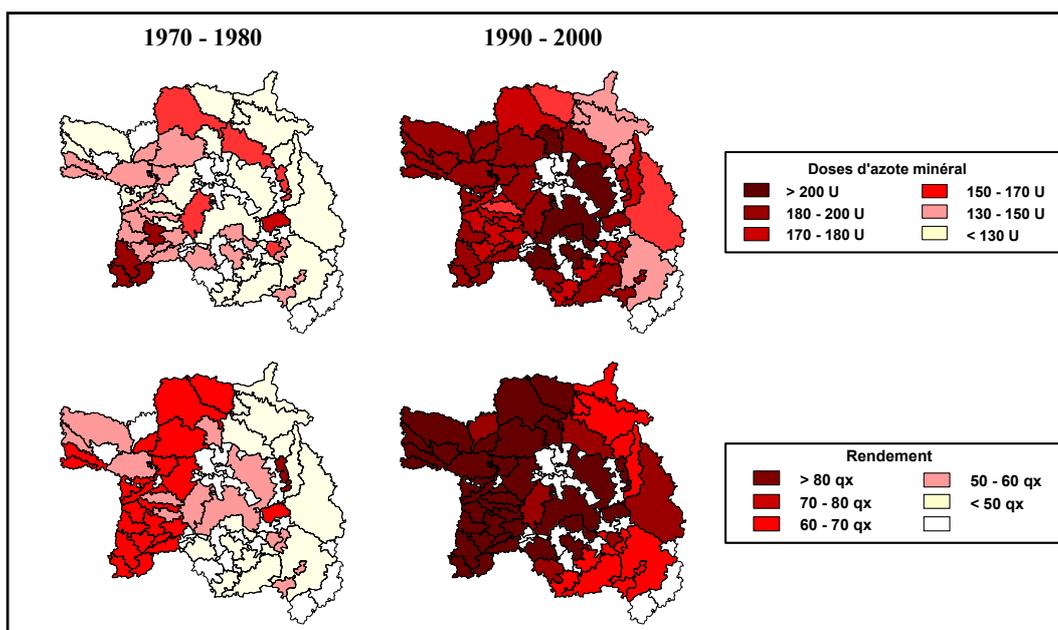


Figure 31 : Cartographie des doses totales d'azote minéral apportées et des rendements sur blé dans les décennies 1970 et 1990, sur les PRA de la zone enquêtée

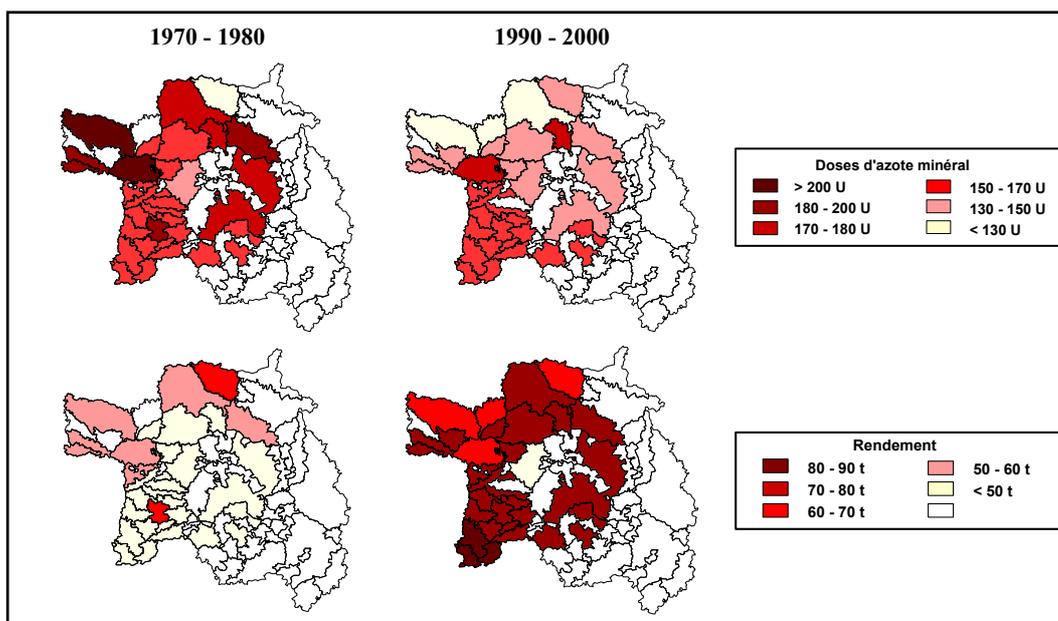
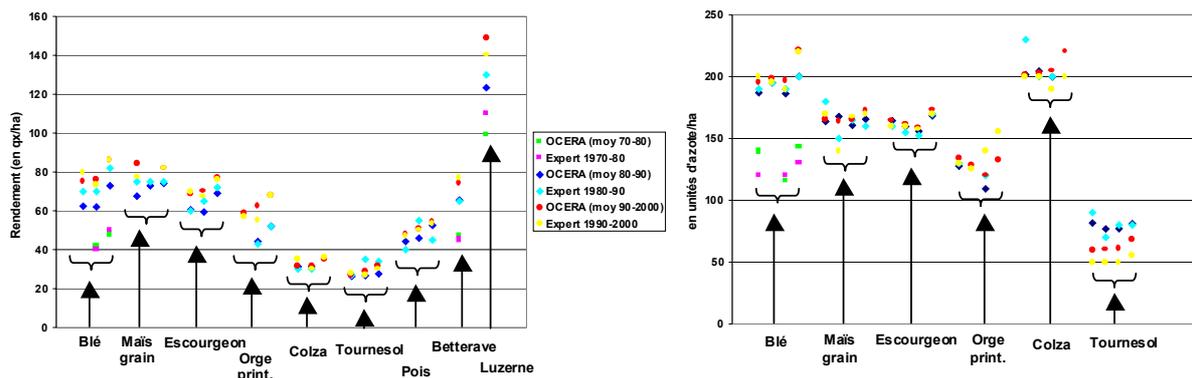


Figure 32 : Cartographie des doses totales d'azote minéral apportées et des rendements sur betterave dans les décennies 1970 et 1990, sur les PRA de la zone enquêtée

Confrontation des dires d'experts avec les enquêtes Cultures de l'OCERA¹⁴ de l'Aube

Nous pouvons bien sûr nous interroger sur la validité des dires d'experts, surtout lorsque nous remontons trente années en arrière. Nous avons pu comparer sur quelques PRA de l'Aube les valeurs moyennes de rendement et de fertilisation azotée minérale pour les cultures de blé, maïs grain, escourgeon, orge de printemps, colza, tournesol, pois, betterave et luzerne, issues des discours d'experts ou d'enquêtes Cultures de l'OCERA, sur les décennies 1970, 1980 et 1990 (Figure 33). Globalement, il s'avère que les valeurs de rendement sont légèrement sur-estimées par les experts : 39% des valeurs sont sur-estimées en moyenne de 10%, alors que 37% sont sous-estimées et 24% sont comprises dans une fourchette de +/- 2%. Les valeurs sur-estimées concernent surtout les années 1980, ce qui indique que l'effort de mémoire des experts est plus difficile quand on remonte dans le temps, surtout pour les cultures à forte variabilité de rendement comme le pois ou le tournesol dans les zones

¹⁴ Office de Comptabilité et d'Economie Rurale de l'Aube



où ils sont assez peu répandus. Par contre, les valeurs de fertilisation azotée à dire d'experts sont plutôt inférieures à celles des enquêtes Cultures : 41% des valeurs à dire d'experts semblent sous-estimées d'environ 8%, contre 23% sur-estimées et 35% comprises dans la fourchette +/- 2%.

Figure 33 : Comparaison des valeurs de rendement et de fertilisation azotée issues des dires d'experts et de l'OCERA

La confrontation des dires d'experts à d'autres sources d'informations constituées à partir d'enquêtes directes en exploitations agricoles, qui ne sont donc pas exhaustives ni sur l'ensemble du bassin de la Seine, ni sur les trente ans étudiés, ni sur les cultures et les variables requises, pourra ponctuellement apporter des éléments d'évaluation de la validité des valeurs de données agricoles qui alimentent le modèle STICS. C'est une voie qu'il nous paraît important de poursuivre à l'avenir.

3.2.6 Constitution du maillage STICS

La simulation des flux d'azote sous-racinaire avec le modèle STICS s'appuie sur trois ensembles de données :

- des données d'occupation des sols et pratiques agricoles, présentées plus haut, réparties sur un maillage qui s'appuie sur les petites régions agricoles (PRA).
- des données pédologiques distribuées sur la carte des sols de France au 1/1 000 000 (King *et al.*, 1995).
- des données météorologiques fournies par Météo France sur une grille d'un pas de 8 km.

L'utilisation de STICS de manière spatialisée nécessite de définir des zones homogènes sur lesquelles auront lieu les simulations. Ainsi, le croisement de la grille météorologique, de la carte des sols (UCS) et de la carte d'occupation des sols (PRA), à l'aide du SIG Arc-Info, aboutit à la définition d'un grand nombre d'unités. Une première limitation de ce nombre consiste à agréger les unités, de surface inférieure à 10 ha, à l'unité adjacente de taille maximale pour aboutir à la définition de 11 600 unités.

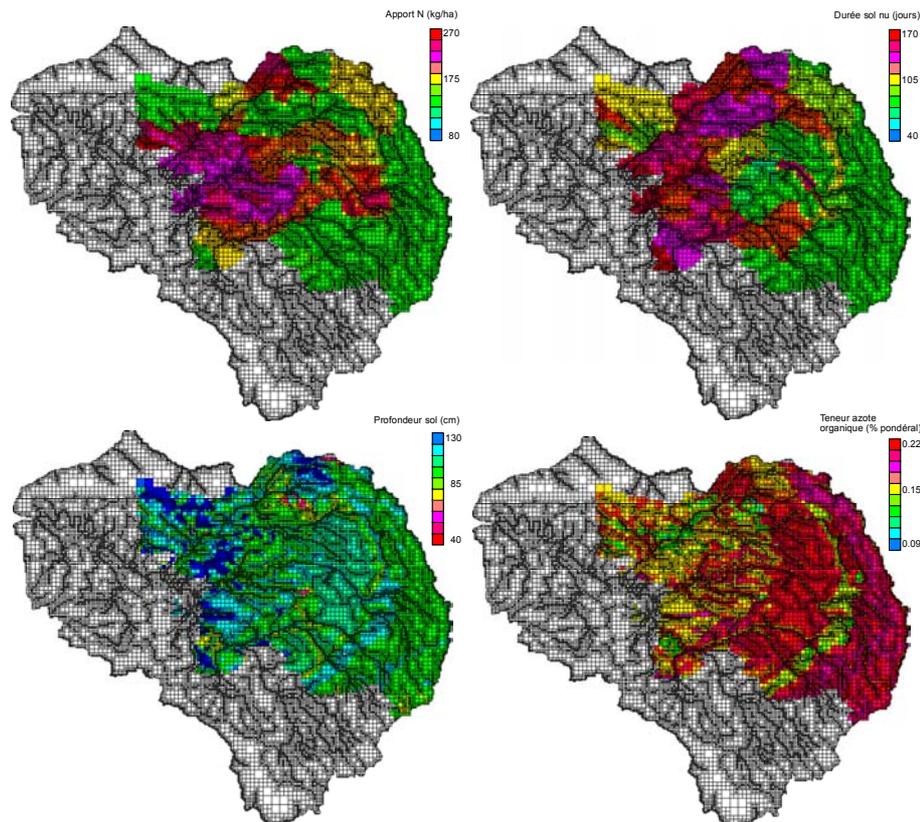
Toutefois, une PRA peut être scindée en plusieurs parties non-connexes sur un couple sol-climat donné. Il en résulte plusieurs unités distinctes spatialement qui ont en fait des caractéristiques identiques. Cette situation se rencontre souvent sur le bassin. Une solution, pour diminuer le nombre de zones, consiste alors à regrouper les unités qui présentent les mêmes caractéristiques climatiques, pédologiques et culturelles. De cette façon, on obtient environ 7900 zones homogènes constituant les mailles sur lesquelles se dérouleront les simulations STICS, et dont on connaît la correspondance avec le maillage MODCOU.

3.2.7 Définition des zones vulnérables en terme de pollution nitrrique

Une étape préalable à la modélisation consiste à définir des zones géographiques susceptibles de présenter des eaux de lessivage avec des concentrations en nitrates élevées, en exploitant les bases de données des sols et des pratiques agricoles. Pour définir ces zones, 4 critères principaux ont été retenus:

- la durée de sol nu entre 2 cultures, favorisant le lessivage des nitrates. Cette durée, rapportée au nombre de cultures constituant une succession culturale, est exprimée en nombre de jours moyen par culture. Elle a été déterminée sur la période 1987-1990 ;
- la quantité d'azote apportée en moyenne sur chaque culture constituant une succession (exprimée en kg/ha). Elle a été déterminée sur la période 1987-1990 ;
- la profondeur de sol qui est une approximation de la réserve utile. Ainsi, moins un sol est épais et plus le lessivage des nitrates sera aisé, pour des teneurs en eau du sol équivalentes ;
- la teneur en azote organique dans l'horizon contribuant à la minéralisation (approximativement la couche labourée), exprimée en % pondéral.

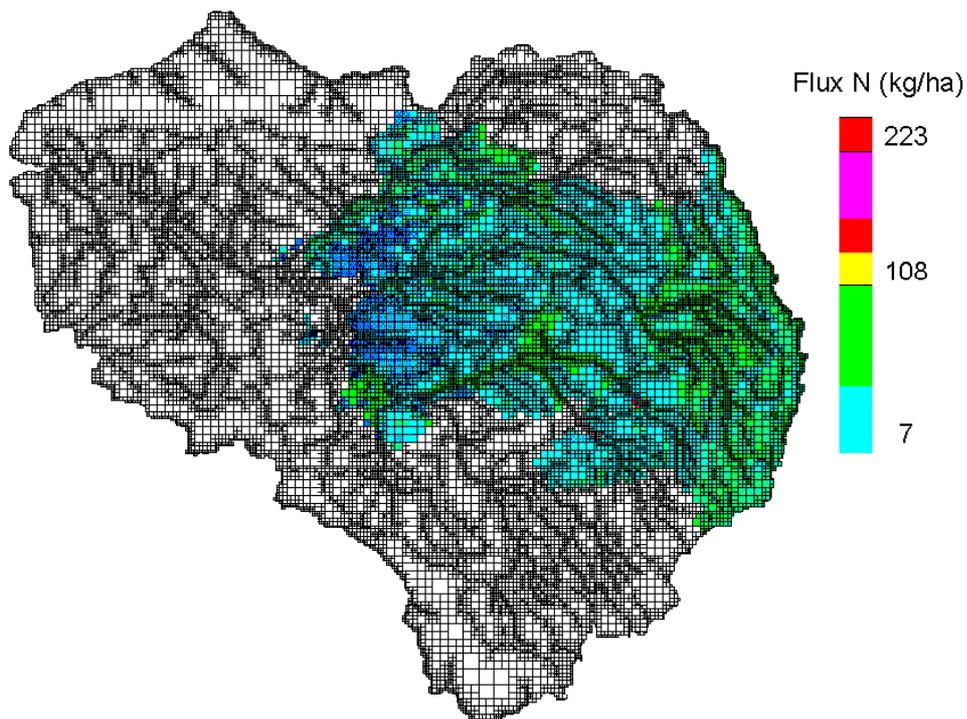
Les données sont présentées sur la zone où l'on dispose des données relatives aux pratiques agricoles, c'est-à-dire essentiellement sur le bassin de la Marne et une partie du bassin de l'Oise (Figure 34).



L'analyse de ces cartes montre une fertilisation minérale globalement plus élevée au centre du bassin et au nord-est que sur le reste du bassin. Cette tendance s'observe également pour la durée de sol nu. Cet examen met en évidence une zone centrale *a priori* plus vulnérable en terme de pollution nitrique mais on y rencontre des sols relativement profonds, associés à la présence de limons, qui offrent une grande capacité de rétention de l'eau au niveau des terrains cultivés. De plus, les teneurs en azote organique de ces sols sont relativement faibles à cause, peut-être, de la présence de sols bruns lessivés sur les limons. Ces quatre critères ne permettent donc pas à eux seuls de définir avec certitude des zones vulnérables.

Figure 34 : Zones vulnérables en fonction de critères agronomiques et pédologiques

3.2.8 Application de STICS sur le bassin de la Marne



Une simulation de STICS régionalisé a été menée sur une zone englobant le bassin souterrain de la Marne. La simulation a lieu sur la période 1977-1999 mais seuls les résultats de la période 1979-1999 sont analysés car les deux premières années servent à l'initialisation du système. Les résultats concernent les flux d'azote ainsi que les rendements des différentes cultures simulées. Le flux moyen de pertes en nitrate est de $43 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$, le flux d'eau percolée est en moyenne de 186 mm, correspondant à une concentration moyenne en nitrates à la base de la zone racinaire d'environ $102 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. La Figure 35 présente la répartition géographique des flux d'azote. De manière générale, ceux-ci se répartissent en auréoles suivant le gradient de la pluie efficace. Les flux relativement faibles se trouvent au centre, où les sols sont profonds et les précipitations faibles. Une cartographie des concentrations moyennes montrerait une tendance inverse compte tenu de la relation entre la pluie efficace et les flux.

Figure 35 : Flux d'azote annuel, moyenne sur la période 1979-1999

Une analyse des flux d'azote en fonction de la réserve utile moyenne des sols (RU) montre une tendance générale à la décroissance des flux sous-racinaires avec l'augmentation de la RU (Figure 36). Ceci s'explique par le fait que plus la RU est élevée, plus la disponibilité en eau est grande, avec pour conséquence, des nitrates plus facilement absorbables par la plante. Les flux d'azote supérieurs à 80 kg N/ha se rencontrent essentiellement sur des sols qui présentent des RU inférieures à 125 mm.

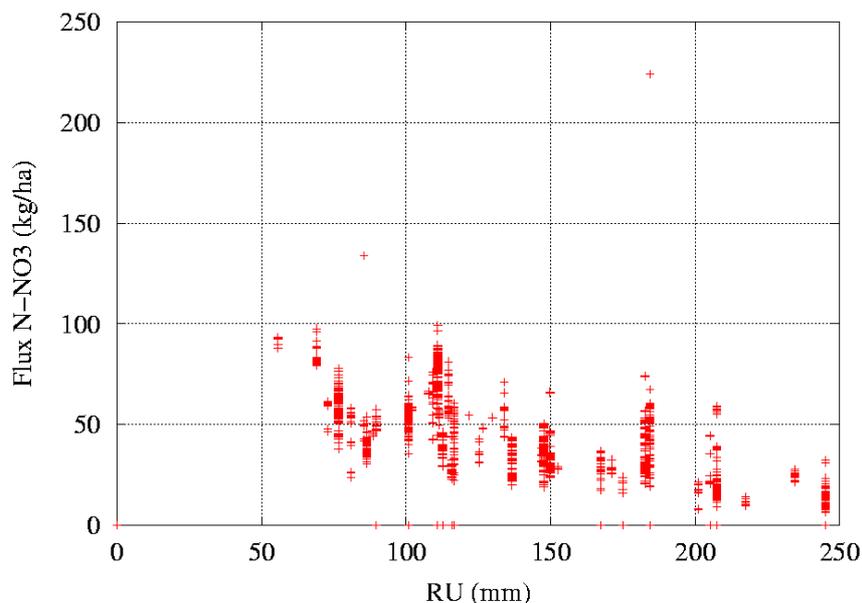


Figure 36 : Flux d'azote annuel (1979-1999) en fonction de la réserve utile du sol (RU)

La Figure 37 présente l'évolution des concentrations en nitrates en fonction du contexte climatique et pédologique par le biais d'un taux de renouvellement du sol (TR) défini de la façon suivante :

$$TR = \frac{Pe}{CC}$$

avec

Pe : pluie efficace calculée par STICS (mm),

CC : stock d'eau à la capacité au champ sur la profondeur du sol (mm).

Ainsi, un taux de renouvellement TR égal à 1 signifie que le volume d'eau traversant un sol est équivalent au volume contenu par ce sol. TR exprime donc la dilution d'après les conditions climatiques et pédologiques rencontrées.

Lorsque TR est supérieur à 1, les valeurs de concentrations en nitrates varient globalement de 50 à 180 mg.L^{-1} , correspondant à la variation de la minéralisation dans les sols. On remarque qu'avec un fort taux de renouvellement, les concentrations sous-racinaires ne dépassent pas 100 mg.L^{-1} . Inversement, lorsque TR est inférieur à 1, les valeurs de concentrations sont plus dispersées et atteignent 360 mg.L^{-1} . Ceci est la conséquence de la variabilité du « reliquat entrée hiver » (REH) qui intègre à la fois les variations de minéralisations ainsi que de fertilisation azotée. Ce graphique montre aussi une concentration très élevée (560 mg.L^{-1}) qui est probablement associée à un type de sol particulier.

Les flux d'azote peuvent aussi être présentés par zones agricoles homogènes (PRA) au cours du temps, de manière à suivre l'effet éventuel de l'évolution des itinéraires techniques d'une période à une autre. La Figure 38 présente le cumul des flux d'azote par année hydrologique sur la période 1979-1999, pour la PRA « Perthois » située à l'est du bassin de la Marne. Cette PRA comporte un changement de pratiques culturales en 1985 avec des conséquences peu marquées sur les flux d'azote qui peuvent s'expliquer par l'effet de l'évolution des précipitations et de l'ETP.

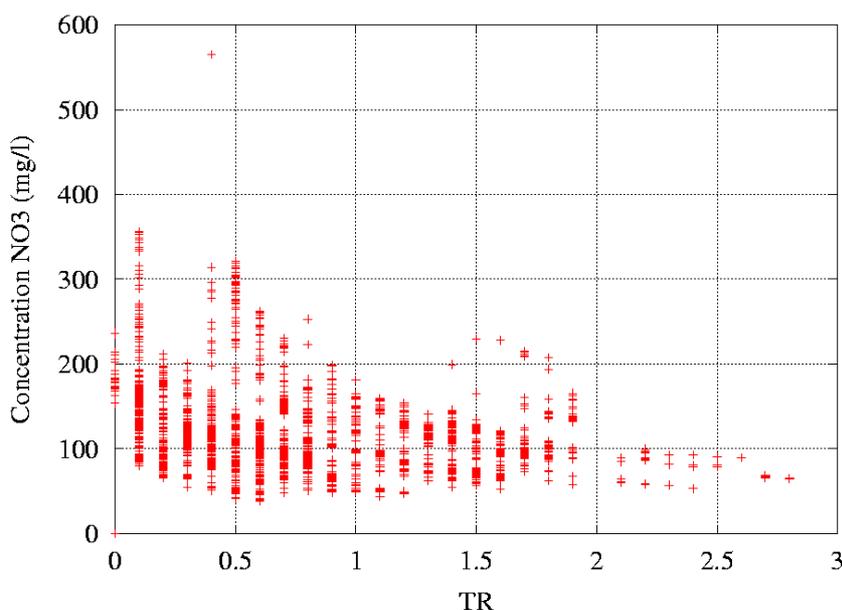


Figure 37 : Concentration moyenne annuelle (1979-1999) en fonction du taux de renouvellement du sol (TR)

3.3. Couplage STICS – MODCOU

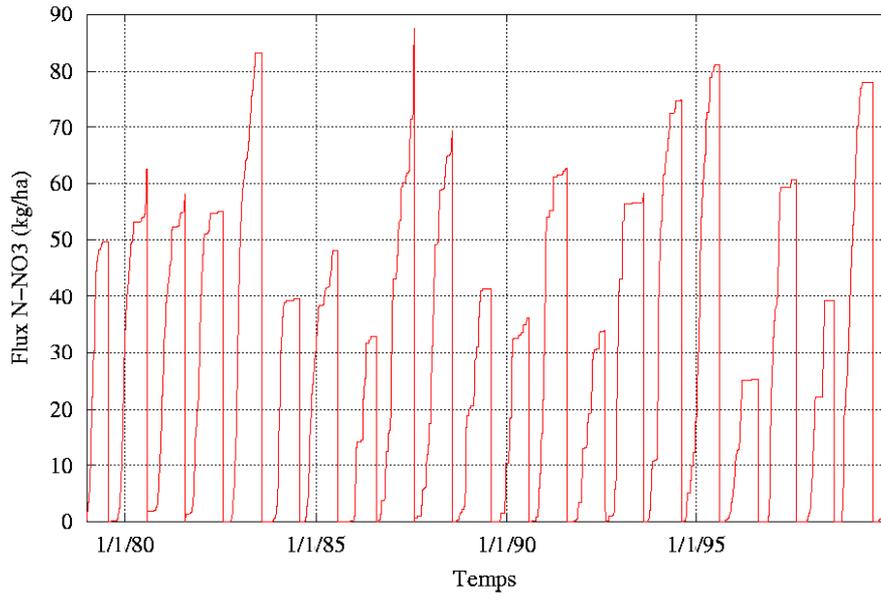
Les deux modèles, agronomique et hydrologique, ont été mis en œuvre et testés séparément sur le bassin de la Marne. Leur association aboutit à la construction d'un modèle intégré.

L'architecture de ce modèle est fondée sur l'association de STICS avec MODCOU-NEWSAM pour permettre la modélisation du transfert des nitrates dans les différents compartiments du système hydrologique depuis les sols agricoles jusqu'aux cours d'eaux en passant par la zone non saturée et les aquifères.

La mise en œuvre de cette chaîne de modèles se déroule en plusieurs étapes (Figure 39). Le calcul du bilan hydrique est effectué par un module du modèle hydrologique couplé (MODSUR) et fournit, sur chacune des mailles de la couche de surface, des débits ruisselés (QR) et infiltrés (QI), suivant le pas de temps des données météo. STICS calcule des flux d'azote (Fn) et des débits lessivés à la base de la zone sous-racinaire (Qs). Ainsi, par correspondance entre le maillage MODCOU et le maillage STICS, et en tenant compte des surfaces agricoles utilisées (SAU), on détermine une concentration en nitrates CN qui sera transférée dans le système hydrologique.

La concentration CN dépend du rapport des volumes d'eau calculés par STICS et MODSUR sur l'ensemble du bassin de la Marne. Ainsi, la Figure 40 présente une comparaison des volumes d'eau calculés sur 4 années par STICS et par MODSUR. On observe une évolution temporelle des volumes similaire pour les deux modèles. Le cumul des volumes montre une erreur relative de 9%. On peut considérer que cette erreur est relativement faible compte tenu du fait que STICS et MODSUR utilisent des formalismes différents pour calculer le bilan hydrique.

PRA : Perthois



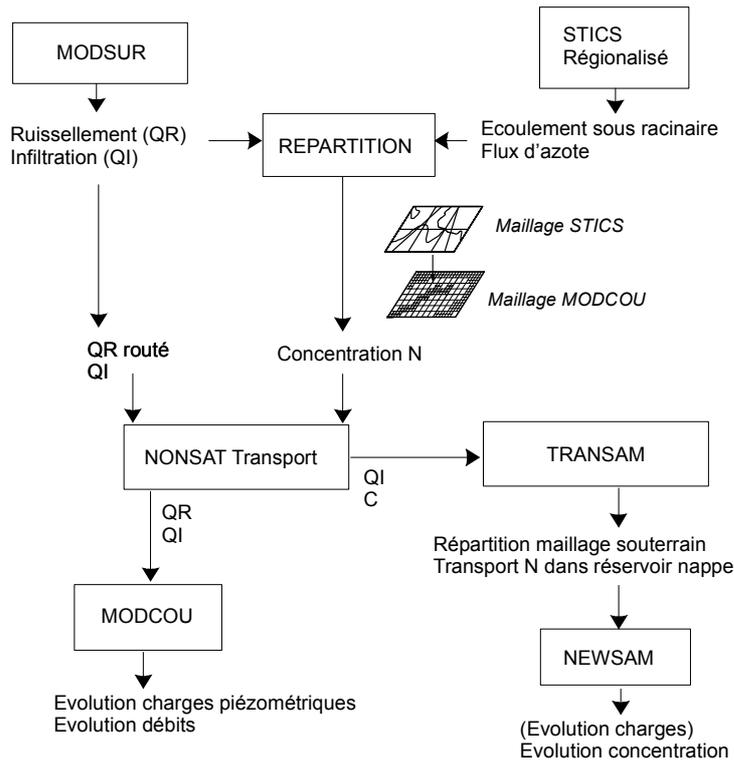


Figure 38 : Evolution des flux d'azote sur la PRA Perthois sur la période 1979-1999

Figure 39 : Représentation schématique du couplage entre STICS et MODCOU-NEWSAM

La concentration CN est déterminée sur plusieurs pas de temps météo, pour s'affranchir des différences ponctuelles éventuelles entre les volumes calculés par MODSUR et par STICS, de la façon suivante :

$$CN = \frac{\sum_{i=1,n} Fn}{\sum_{i=1,n} (QR+QI)}$$

avec F_n : Flux d'azote calculé par STICS

$QR+QI$: volume ruisselé et infiltré calculé par MODSUR

n : nombre de pas de temps météo

L'eau ruisselée (QR) est ensuite routée par isochronisme vers les rivières et en tenant compte éventuellement de l'effet du drainage agricole grâce à un modèle à réservoir.

L'eau d'infiltration (QI) contenant la concentration en nitrates (CN) est acheminée vers les nappes souterraines, à travers la zone non saturée, grâce à un modèle piston, développé à cet effet.

La Figure 41 présente la comparaison entre les flux d'azote qui entrent dans la zone non saturée et ceux qui en sortent, sur la bassin de la Marne. On a globalement un léger déphasage entre l'entrée et la sortie, mais localement des déphasages importants peuvent être observés notamment avec des zones non-saturées très épaisses.

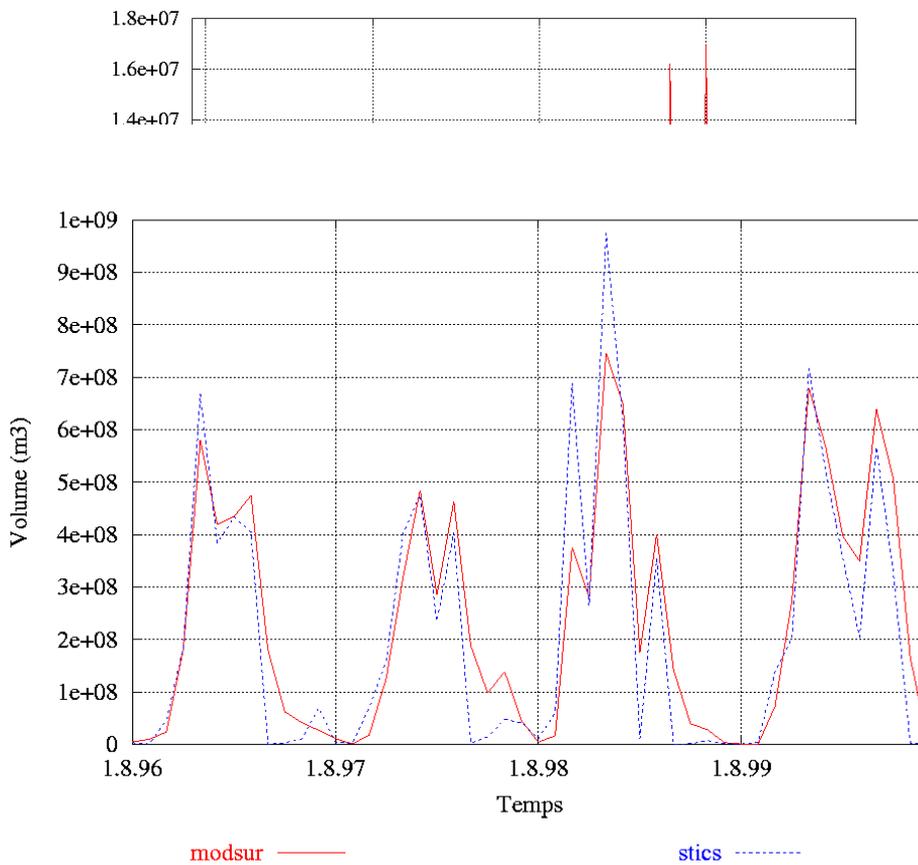
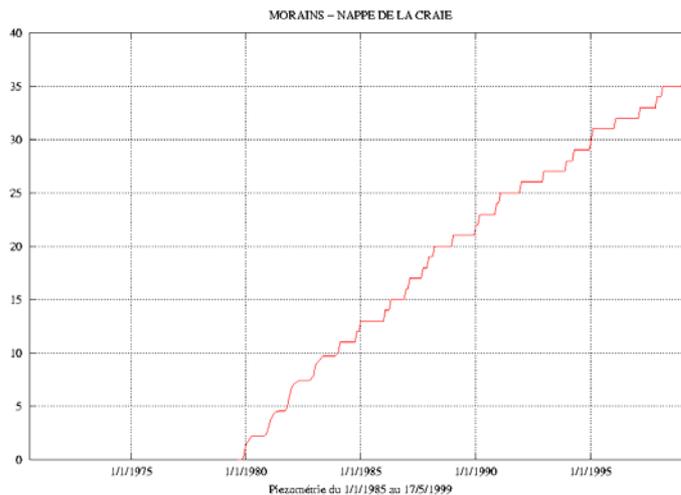


Figure 40 : Comparaison des volumes d'eau calculés par STICS et par MODSUR sur la période 1996-2000

Figure 41 : Comparaison entre les flux de nitrates entrant et sortant de la zone non saturée sur la période 1979-1999

Le module Transam se charge de répartir les flux de nitrates vers les mailles souterraines. Cependant, lorsqu'une maille de surface n'est pas connectée à une maille souterraine, les nitrates sont transportés dans un modèle à réservoir figurant la nappe libre.

Le modèle de transport en milieu souterrain NEWSAM se charge de simuler l'évolution des charges piézométriques et des concentrations nitriques dans les aquifères. Il permet aussi de calculer les échanges de nitrates entre les aquifères et les rivières. Parallèlement à NEWSAM, MODCOU, qui utilise les mêmes paramètres hydrodynamiques que NEWSAM, permet de simuler les charges piézométriques dans les aquifères ainsi que les débits en chaque point du réseau hydrographique.

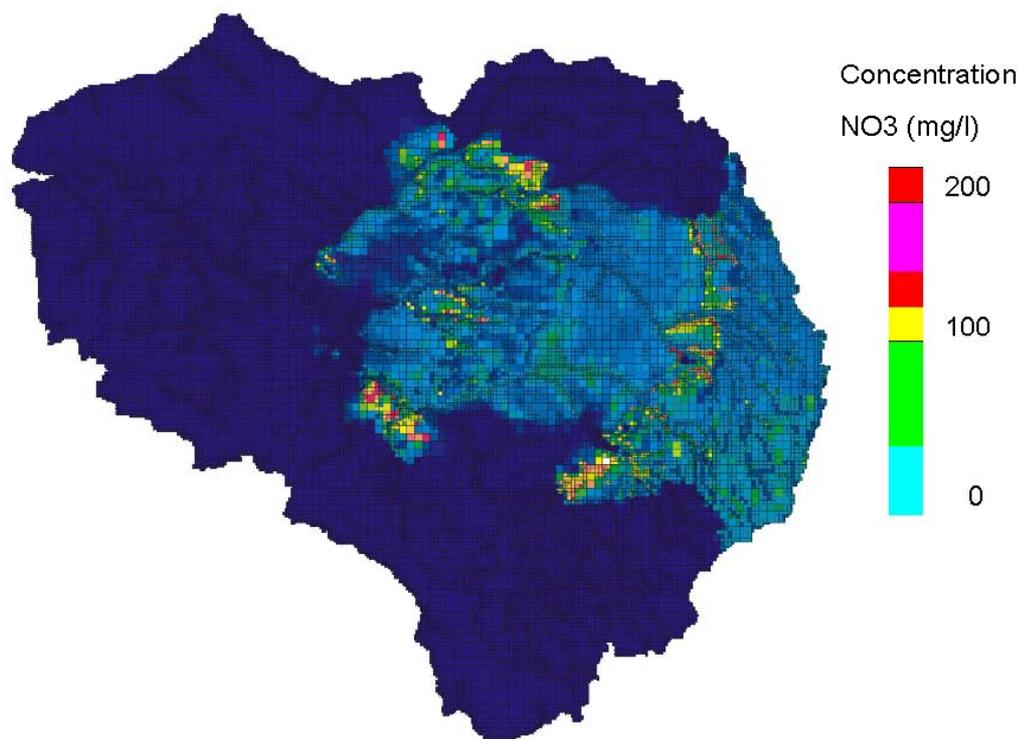


La simulation du transport des nitrates a été menée sur la période 1971-1999 en admettant une concentration initiale en nitrate nulle dans les aquifères. Les flux de nitrates ont ensuite été injectés

dans le domaine souterrain composé de la zone non saturée et des aquifères sur la période 1979-1999. La Figure 42 présente l'évolution de la concentration en nitrates sur le piézomètre de Morains dans la nappe de la Craie. De 1979 à 1980, on observe une concentration nulle, qui exprime le temps de transfert nécessaire aux nitrates pour traverser la zone non saturée. Ensuite, la concentration augmente jusqu'à atteindre la valeur de 36 mg.L⁻¹ en fin de simulation.

Figure 42 : Evolution de la concentration en nitrate simulée dans le piézomètre de Morains (Craie)

La Figure 43 présente une carte des concentrations en mai 1999 dans le domaine souterrain. A l'est du bassin, les nitrates sont transportés dans des modèles à réservoirs. Les fortes concentrations se trouvent où les volumes contenus dans la nappe sont faibles.



Dans les parties libres des aquifères de la craie et du Tertiaire, les concentrations les plus élevées, après vingt années de simulation, se trouvent principalement sur les bassins du Grand et du Petit Morin ainsi qu'en amont du bassin de l'Oise et en aval du bassin de l'Yonne. Cette carte intègre une composante agronomique (carte des flux d'azote sous racinaire) et une composante souterraine qui regroupe, d'une part, les temps de transfert dans la zone non saturée, et d'autre part, les temps de transfert dans les aquifères.

Figure 43 : Concentration en nitrates dans les différents aquifères (parties libres) en mai 1999

La Figure 44 présente l'évolution du bilan des flux de nitrates (en kg NO₃.s⁻¹). Par convention, le flux entrant dans le système souterrain (« Injection ») a un signe négatif.

Le flux de nitrates entrant dans le domaine souterrain est le plus important pour l'aquifère de la craie (environ 5 kg.s⁻¹) car son affleurement se trouve dans des zones où l'infiltration est conséquente (Figure 16). L'Oligocène est l'aquifère qui reçoit le moins de nitrates avec un flux de 0.76 kg.s⁻¹ en moyenne.

L'évolution des différents flux de nitrates est similaire pour les 3 aquifères. Au début de la simulation, les aquifères, dont la concentration initiale a été fixée à 0 mg.L⁻¹, se chargent en nitrates. Le terme de « stockage » est directement fonction des flux injectés. Le terme de « drainage », qui correspond aux flux drainés en rivière, augmente au cours des 20 années de simulation. Toutefois,

compte tenu de la durée de la simulation, il n'atteint pas un régime permanent qui serait figuré par un palier fixé à la valeur moyenne des flux entrants. Cette évolution transitoire des flux de nitrates drainés en rivières, consécutive à un déstockage des nitrates présents dans les aquifères, montre que la dynamique du transfert des nitrates est fortement contrôlée par la vitesse de déstockage de l'azote au sein des aquifères.

Tableau 16 : Bilan des flux de matière par aquifère (t NO₃/an) , moyenne annuelle sur la période 1979-1999.

	apports	drainage par les rivières	drainance vers le haut	drainance vers le bas	stockage en aquifères
Oligocène	-24000	6500	0.00	8000	9500
Eocène	-92500	31500	-8000	2000	67000
craie	-158000	33000	-2000	0.00	127000

Le Tableau 16 présente le bilan des flux de matière (t NO₃/an) en moyenne annuelle pour les 3 aquifères. On remarque que les flux stockés sont relativement importants pour les nappes de l'Eocène et de la craie. Les flux drainés en rivières sont du même ordre de grandeur pour les 3 aquifères comparativement à leurs alimentations en nitrates respectives. On observe par ailleurs une drainance des aquifères Tertiaires vers l'aquifère de la craie. Cependant, ce bilan ne permet pas de conclure par une généralisation d'un flux globalement descendant car les apports en nitrates ne sont renseignés que sur le bassin souterrain de la Marne.

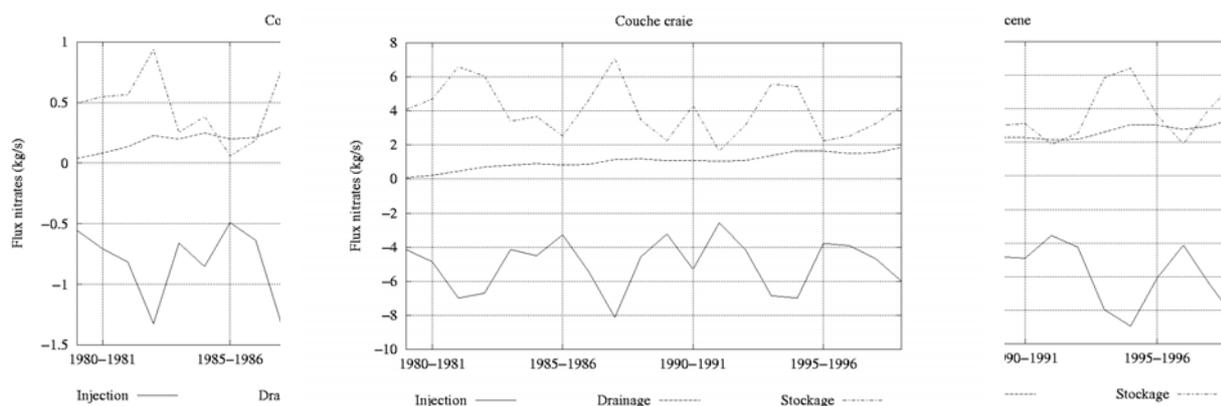


Figure 44 : Evolution du bilan des flux de matière par couche souterraine

4. Conclusions et perspectives

L'objectif de l'étude vise à comprendre le transfert des nitrates sur le bassin de la Seine. Cette question de recherche ambitieuse soulève deux problèmes principaux. Le premier concerne la prise en compte de la dimension spatiale (90 000 km²) et temporelle (30 ans), et le deuxième concerne le degré de phénoménologie que l'on peut y associer. La réponse à ces questions consiste à développer un modèle intégré en couplant un modèle agronomique (STICS) avec un modèle hydrologique (MODCOU-NEWSAM), chacun des modèles permettant une représentation phénoménologique des processus qu'il simule. Le concept de « modèle intégré » se présente à deux niveaux : compartiments et échelles spatio-temporelles.

- du point de vue des compartiments, le modèle est conçu pour représenter les processus qui se déroulent d'une part dans les sols agricoles, avec le modèle agronomique, et d'autre part dans le domaine souterrain qui comprend la zone non saturée et les aquifères, avec le modèle hydrologique. En outre, plusieurs modèles ont été développés pour permettre l'interfaçage de ces deux compartiments. Les échanges de flux d'azote entre la nappe et la rivière sont aussi modélisés.
- du point de vue des échelles spatio-temporelles, la structure du modèle permet de représenter le transfert des nitrates sur des bassins de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de km². Ce modèle permet également de travailler sur de longues périodes de temps (plusieurs dizaines d'années) en intégrant l'évolution des itinéraires techniques et des pratiques agricoles. Il est aussi conçu pour tenir compte des évolutions futures de la base de données des pratiques agricoles.

Pour la première fois, un outil de modélisation couvrant l'ensemble des processus de circulation de l'azote dans un grand bassin versant et sur une grande échelle de temps est ainsi mis en place. Il permet de répondre à deux préoccupations principales : agricoles et météorologiques.

Du point de vue agricole, le modèle intégré permet de tester différents scénarios d'évolution des pratiques agricoles qui auront été définis et validés au préalable. Cependant, avant de tester l'impact de scénarios, plusieurs simulations exploratoires seront menées sur des hypothèses afin de tester la sensibilité du modèle. Trois hypothèses principales ont été retenues : ajout de cultures intermédiaires, modification des doses de fertilisant minéral, variation de la proportion de prairie permanente dans la SAU.

A titre d'exemple, une simulation menée sur une courte période (1987-1990) a permis d'observer une diminution de la concentration en nitrates à la base de la zone racinaire de 96 à 92 mg.L⁻¹ en moyenne par année, soit une baisse de 4 %, consécutive à une réduction de 20 % de la dose de fertilisation minérale. L'impact d'une réduction modérée de la fertilisation semble donc très limité. C'est un résultat cohérent avec des simulations faites antérieurement sur le petit bassin hydrologique tertiaire de Bruyères, près de Laon (Beaudoin *et al.*, 1999) et avec des observations réalisées sur le site expérimental de Thibie, près de Châlons-en-Champagne (Mary et Laurent, 2002). Cependant, ces résultats quantitatifs sont provisoires car il est nécessaire de préciser la pertinence du modèle par rapport à la très grande diversité de conditions de milieu rencontrée sur le bassin de la Marne. Il est également nécessaire de bien apprécier la qualité des données d'entrée. Il faudra poursuivre le test de ce type d'hypothèse sur de longues périodes de temps qui intégreront les conséquences sur la pollution des nappes souterraines. Le taux de renouvellement de l'eau sera aussi calculé dans les différents aquifères modélisés afin de déterminer les temps de résidence des nitrates.

Du point de vue météorologique, le modèle permettra de suivre l'évolution de la ressource en eau ainsi que de sa qualité en fonction de modifications des forçages climatiques, qui restent à déterminer, conjointement à une modification ou non des pratiques agricoles.

A terme le modèle intégré, qui permet également de calculer les flux de nitrates échangés entre la nappe et la rivière, pourra être couplé avec des modèles de qualité des eaux en rivières tels que SENEQUE (Billen *et al.*, 1994 ; Garnier *et al.*, 1995) ou PROSE (Even, 1995).

5. Bibliographie

- Agreste, 1997. Orientations technico-économiques. Classification révisée des exploitations agricoles françaises. *Les Cahiers*, **22-23**. 182 p.
- Arlot M.-P. (1999). Nitrates dans les eaux. Drainage acteur, drainage témoin ? Les enseignements d'une approche hydrologique et hydraulique. *Hydrologie, hydrogéologie, géostatistiques et géochimie des eaux*. Paris, Paris 6 : 373.
- Beaudoin N, Mary B, Parnaudeau V (1999) Impact of agricultural scenarios on nitrate pollution at the catchment scale. Présentation orale, 10th Nitrogen Workshop, Copenhagen (DK) 1999/08/23-26, Abstracts vol.2, IV-6.
- Beaudoin N, Coquet Y, Mary B (2002). Estimation des pertes de nitrate et de pesticides en zone de grande culture. Etude à l'échelle du bassin hydrologique de Bruyères-et-Montbérault. Compte-rendu final de contrat ADEME, n°9701001, 68 pp.
- Benoît M., Le Ber F. et Mari J.F. (2001). Recherche des successions de cultures et de leurs évolutions : analyse des données Ter-Utili en Lorraine. *Agreste, Vision Lorraine-Alsace*, **31** : 23-30.
- Bertin J. (1977). *La graphique et le traitement de l'information*. Paris. Flammarion. 277 p.
- Besbes M. (1978). L'estimation des apports aux nappes souterraines. Un modèle régional d'infiltration efficace. *Thèse de doctorat d'Etat UPMC*, 260 p.
- Billen G., Garnier J., Hansen P. (1994). Modelling phytoplankton development in whole drainage networks : The Riverstrahler model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia*, **289** : 119-137.
- Bouarfa S. et Zimmer D. (2000). Wate-table shapes and drain flow rates in shallow drainage systems. *Journal of Hydrology*, **235** : 264-275.
- Bornerand C. (2000). Dynamique des pratiques culturales dans le bassin de la Marne depuis les années 70. *Mémoire de fin d'études ENSAIA*. 35 p. + annexes.
- Brevé M.A., Skaggs R.W., Parsons J.E. et Gilliam J.W. (1997). DRAINMOD-N, a nitrogen model for artificially drained soils. *Trans. ASAE*, **40**(4) : 1067-1075.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J., Meynard J., Delécolle R. (1998). STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I- theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, **18** : 311-346.
- Brisson N, Ruget F, Gate P, Lorgeou J, Nicoullaud B, Tayot X, Plenet D, Jeuffroy MH, Bouthier A, Ripoche D, Mary B, Justes E (2002) STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. II. Assessment by comparing with experimental reality for wheat and corn. *Agronomie*, sous presse.
- Caty M. (1999). Evolution des pratiques agricoles et lien avec l'évolution de la qualité de l'eau dans le bassin de la Seine. *Mémoire de DEA Systèmes spatiaux et environnement*, Université Louis Pasteur de Strasbourg / diplôme d'ingénieur ENGEES. 56 p. + annexes.
- Certes C., Escalier des Orres P, Goblet P., Levassor A., Marivoet J. (1997). Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final storage of radioactive waste : Everest project. *European Commission*.
- Collectif (1996). *Corine land cover France : un nouvel outil au service de l'environnement et de la gestion de l'espace*. Ministère de l'Environnement.
- Darré J.P. (1994). *Pairs et experts dans l'agriculture, dialogues et production de connaissances pour l'action*. Ed. Eres, collection TIP. 227 p.
- Durand Y., Brun E., Merindol G., Guyomarc'H G., Lessafre B., et Martin E. (1993). A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annuals of glaciology*, **18** : 65-71.
- Ernst L.F. (1973), cité dans RAATS P.A.C. (1978). De Bepaling van de Transporttijd van het Grondwater bij Stroming in de Verzadigde zone. *Nota ICW 755*. 42 p.
- Even S. (1995). Modélisation d'un écosystème fluvial : la Seine. Le modèle PROSE. *Thèse ENSMP*. 344 p.

- Gabrielle B, Mary B, Smith P, Gosse G () Simulation of carbon and nitrogen dynamics in arable soils: a comparison of approaches. Soumis à *European Journal of Agronomy*.
- Garnier J., Billen G. & Coste M. (1995). Seasonal succession of diatoms and chlorophyceae in the drainage network of the River Seine : Observations and modelling. *Limno. & Oceanogr.*, **40** : 750-765.
- Golaz C. (1995). Exploitation d'un modèle numérique de terrain pour l'aide à la mise en place d'un modèle hydrologique distribué. *DEA UPMC*, 71p.
- Gomez E., Ledoux E. (2000). Modélisation intégrée des écoulements et du transfert des nitrates sur le bassin de la Seine. *Rapport d'activité du Programme PIREN-Seine*, UMR CNRS 7619 Sisyphe Paris Jussieu.
- Justes E, Dorsainvil F, Brisson N, Ripoche D, Thiébeau P, Mary B (2001a) Evaluation and improvement of the soil-crop model STICS for predicting water and nitrogen budgets during fallow period between two main crops or under catch crops. 2nd International Symposium "Modelling Cropping Systems", ESA, 16-18/07/01, Firenze (IT), 67-68.
- Justes E, Nicolardot B, Mary B (2001b) C and N mineralisation of catch crop residues: measurements and evaluation of STICS model. 11th Nitrogen Workshop, 9-12/09/01, Reims, 113-114.
- King D., Le Bas C., Jamagne M, Daroussin H.R. et J. (1995). Base de données géographique des sols de France à l'échelle du 1/1000000. Notice générale d'utilisation. *Rapport technique*, INRA. Service d'étude des sols et de la carte pédologique de France.
- Lafolie F, Mary B, de Cockborne AM, Sevenier G, Mohrath D () Water application rate consequences on crop growth, water and nitrogen balances: experiments and modeling. Soumis à *Soil Science Society of America Journal*.
- Leblois E. (1993). De l'hydrologie avec le SIG raster Idrisi. Rapport technique, *Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts*, 75p.
- Ledoux E. (1980). Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. *Thèse ENSMP-UPMC*.
- Ledoux E., Girard G., Villeneuve J.P. (1984). Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. *La Houille Blanche*, 101-110.
- Lesaffre B. et Zimmer D. (1988). Subsurface drainage peaks flows in shallow soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)*, **114** : 387-406.
- Mari J.F., Le Ber F. et Benoît M. (2000). Fouille de données par modèles de Markov cachés. Journées francophones d'ingénierie des connaissances : 197-205.
- Mary B, Beaudoin N, Benoît M (1997) Prévention de la pollution nitrique à l'échelle du bassin d'alimentation en eau. Colloque « *Maîtrise de l'azote dans les écosystèmes cultivés* », Reims, 19-20/11/96, Les Colloques de l'INRA 83, 289-312.
- Mary B, Beaudoin N, Justes E, Machet JM (1999) Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soils using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science* 50: 549-566.
- Mary B, Laurent F (2002) La gestion durable de la fertilisation azotée. Colloque IIRB, Bruxelles, 2002/02/14-16 (sous presse).
- Mégny C. (1970). Atlas des nappes aquifères de la région parisienne. *Editions BRGM*.
- Mignolet C. et Benoît M. (2001). Dynamique spatiale et temporelle de l'activité agricole dans le bassin de la Seine au cours des trente dernières années. *C.R. Acad. Agri.*, **87** (1) : 99-109.
- Mignolet C., Benoît M. et Bornerand C. (2001). Différenciation du bassin de la Seine selon les dynamiques des systèmes de production agricoles depuis les années 70. *Cahiers Agricultures*, **10** : 377-387.
- Nicoulaud B, Couturier A, Beaudoin N, Mary B, Coutadeur C, King D (1999) Modélisation spatiale à l'échelle parcellaire des effets de la variabilité des sols et des pratiques culturales sur la pollution nitrique agricole. CR AIP Ecospace, Les Colloques de l'INRA, sous presse.
- Nikolic N., Zimmer D. et Kao C. (2000). Transfert de nitrates dans les bassins versants ruraux amonts : développement d'un modèle de drainage souterrain dans le modèle STICS. PIREN-Seine.

- Parnaudeau V, Beaudoin N, Mary B, Makowski D, Meynard JM (1999) Simulation de l'impact de différents scénarios agronomiques sur les pertes de nitrate à l'échelle d'un bassin hydrologique. CR AIP Ecospace, Les Colloques de l'INRA, sous presse.
- Ponsardin G. (1999). Test et paramétrisation spatialement distribuée de STICS 4.1. *Mémoire de fin d'étude DAA*.
- Poux X. et Dubien I. (2002). Quelle prospective pour l'agriculture de la Seine amont ? L'enseignement de trois scénarios sur le bassin de la Marne. Rapport de synthèse PIREN-Seine
- Rebière B. (1996). Effet d'un excès d'eau sur la croissance d'une culture de blé d'hiver. Identification d'une variable de stress et analyse de la réponse de la culture. *Sciences pour l'ingénieur : Agrohydrologie*, Université Louis Pasteur, Strasbourg : 214.
- Reboul C (1976). Mode de production et système de culture et d'élevage. *Economie Rurale*, **112** : 55-65.
- Schnebelen N. (2000). Analyse et modélisation de l'impact de la maîtrise des pratiques agricoles sur la pollution diffuse par les nitrates. Application à l'aquifère des Calcaires de Beauce (site de Villamblain). *Thèse de doctorat*.
- Schott C. (2001). Validation des successions à dire d'experts à partir des RGA et de l'enquête Ter-Uti. *Document de travail*.