Télédétection, 2004, vol. 4, n° 3, p. 231–250
© 2004 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*

SPATIALISATION DE SUCCESSIONS CULTURALES À PARTIR D'IMAGES HRV DE SPOT POUR UNE INTÉGRATION DANS UN MODÈLE AGRO-HYDROLOGIQUE

DENIS RUELLAND*, FRANÇOIS LAURENT et ALAIN TRÉBOUET
CNRS, UMR6590 – Espaces géographiques et Sociétés, Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, Cedex 9, France.
Téléphone : +33 (0)2 43 83 38 85 ; télécopieur : +33 (0)2 43 83 31 92
Courriel : denis.ruelland@univ-lemans.fr

(soumis : 1er avril 2004 ; révisé : 10 mai 2004 ; accepté 7 juin 2004)

La spatialisation des successions culturales constitue une des entrées fondamentales du modèle agro-hydrologique SWAT qui est mis en œuvre sur un bassin versant d'étude de 385 km² (La Moine, France). L'objectif de cette étude est d'évaluer le potentiel de l'imagerie satellitaire pour l'identification de ces successions sur deux années consécutives et de tester leur intégration dans le modèle. Pour ce faire, nous avons opté pour une approche diachronique basée sur sept images HRV(XS) de SPOT et combinant différentes méthodes de classifications. La couverture spatiale obtenue est associée aux pratiques agricoles issues d'enquêtes sur le terrain pour être incorporée dans le modèle. L'évaluation de la classification à partir des images HRV s'avère satisfaisante avec une précision globale de 91,2 % concernant la séparation de l'espace agricole et de 84,7 % concernant l'identification des successions. Les résultats de simulations avec le modèle indiquent un indice de Nash de 0,82 entre les écoulements estimés et observés. Quant aux nutriments azotés et phosphorés, malgré une faible fréquence de mesures, les dynamiques de flux dans les cours d'eau sont assez bien reproduites par le modèle. L'estimation des risques de transfert en fonction des différentes successions culturales montre l'intérêt de prendre en compte les successions plutôt qu'une simple cartographie des cultures afin d'améliorer le diagnostic des risques de pollution agricole. Cette expérience invite à une réflexion sur une approche transversale de mobilisation de données agricoles applicable à de grandes surfaces et sur le nécessaire compromis entre la précision de l'information et la faisabilité de son acquisition.

Mots-clefs : successions culturales ; télédétection ; modélisation ; modèle SWAT ; qualité de l'eau ; hydrologie.

SPATIALIZATION OF CROP ROTATIONS BASED ON HRV (XS) SPOT IMAGES FOR AN INTEGRATION IN AGRO-HYDROLOGICAL MODELLING

The spatialization of crop rotations is one of the major inputs for the SWAT agro-hydrological model that we operate on a river basin area of 385 km² (La Moine, France). In this study, we evaluate the potential of satellite imagery to identify those crop rotations for two successive years with a multiseasonal analysis based on seven HRV-XS SPOT images. The spatial layer produced is associated to agricultural practices based on field surveys before being integrated in the model. The classification with the HRV images proves to be satisfactory with a global accuracy of 91,2 % for the separation of agricultural areas and of 84,7 % for the identification of the rotations. Results based on the model simulations provide a Nash index at 0,82 between simulated and observed flows. Beside a low frequency of measurements, the dynamic of nitrogenized and phosphorated nutrients in the river is also rather well simulated by the model. The estimate of the transfer risks according to the various rotations demonstrates the interest to integrate them rather than a simple map of the cultures in order to improve the diagnosis concerning the risks of agricultural pollution. This experience leads us to thing about an operational approach for mobilizing agricultural data at a regional scale. It also highlights the vital compromise between information accuracy and its data availability.

Keywords : crop rotations ; remote sensing ; modelling ; SWAT ; water quality ; hydrology.

1. INTRODUCTION

L'évaluation des effets des activités agricoles sur la qualité des cours d'eau nécessite une représentation des processus qui régissent les interactions entre les activités agricoles et le milieu naturel. La modélisation agro-hydrologique est une voie pour tester ces relations complexes. Au-delà des questions conceptuelles inhérentes à ces modèles, leur mise en œuvre se heurte à la nécessité de disposer de données exprimant la variation spatiale des paramètres qu'ils requièrent. Caractériser et reconnaître ces paramètres à l'échelle de bassins versants est pourtant indispensable à la compréhension des phénomènes de pollution et à la prédiction des risques environnementaux. Ainsi, le risque de pollution diffuse agricole est lié notamment à la nature et à la localisation des successions culturales ainsi qu'aux

* Correspond principal.

pratiques agricoles associées. C'est pourquoi un diagnostic du risque de pollution agricole implique un suivi spatio-temporel des cultures (voire des intercultures) et, par extension, des successions culturales.

Des relevés spatialement exhaustifs et diachroniques de l'occupation du sol seraient de nature à alimenter ces paramètres clef d'entrée des modèles hydrologiques, qui sont de plus en plus largement utilisés. Cependant, l'acquisition de ces paramètres à l'échelle parcellaire sur le terrain est lourde et ne peut être mise en œuvre que sur des zones de taille relativement modeste. Au-delà de quelques kilomètres carrés, des relevés sur le terrain ne sont pas acceptables en coût et en temps ; la forte variabilité temporelle de ce type d'information réduirait d'ailleurs leur intérêt.

Dans ce contexte, les outils de télédétection semblent des moyens d'inventaire et de suivi privilégiés du fait de leur large couverture géographique, du caractère instantané et répété de la mesure, et de l'aspect numérique de l'information. Bien que le recours à l'imagerie radar soit de plus en plus fréquente en matière d'identification des cultures, les capteurs optiques à haute résolution sont encore les plus utilisés avec, notamment, les images des capteurs satellitaires d'observation de la terre, tels TM de Landsat et HRV de SPOT (San-Miguel-Ayanz and Biging, 1997) qui autorisent, pourvu que le couvert nuageux le permette, un suivi diachronique de la variabilité spatio-temporelle de l'occupation du sol.

Pour aborder cette problématique, nous évaluons le potentiel des images HRV pour la spatialisation des successions culturales en vue de leur intégration dans le modèle agro-hydrologique SWAT mis en œuvre sur un bassin versant expérimental de 385 km² situé dans l'ouest de la France. Dans le cadre de cette étude, la volonté d'aboutir à terme à des inventaires couvrant de plus vastes surfaces a amené à privilégier une méthode de détection simple et la plus automatisée possible. L'analyse des résultats permet d'évaluer la qualité de la classification ainsi que l'intérêt de son intégration dans le modèle par la présentation de simulations. Cette expérience conduit à une réflexion sur le nécessaire compromis entre la précision de l'information, la faisabilité de son acquisition et les temps de calcul du modèle.

2. CONTEXTE

Dans cette partie seront abordés la présentation du site d'étude, une synthèse sur la modélisation avec SWAT, un rappel sur l'état de l'art en matière d'identification des cultures par télédétection et, enfin, une description des données sur l'activité agricole rassemblées dans le cadre de ce travail.

2.1. Zone d'étude

La zone d'étude (figure 1) concerne le bassin versant de la Moine, couvrant une surface de 385 km², autour de l'agglomération de Cholet dans l'ouest de la France (département du Maine-et-Loire). Le relief de plateau y est plus ou moins vallonné et incisé de cours d'eau s'écoulant dans des vallées étroites. L'altitude varie entre 180 m et 15 m à l'exutoire du bassin.

Le substratum rocheux est constitué de roches métamorphiques et sédimentaires, d'âge précambrien ou paléozoïque, affectées par la tectonique hercynienne et injectées d'intrusions granitiques. Le fond des vallées principales est couvert d'alluvions peu épaisses sur une faible largeur, étant donné l'encaissement du réseau hydrographique. Les plateaux de la partie occidentale du bassin sont couverts de loess sur une épaisseur comprise généralement entre 1 et 2 m.

Une carte des sols réalisée en 2002 (Euriat et Tritz, 2002) met en évidence une dominance de sols limoneux avec des luvisols rédoxiques ou des rédoxisols sur les plateaux, des brunisols sur les versants ainsi que des luvisols ou des colluviosol dans les fonds de vallée. Dans 75 % des sondages, l'ensemble sol et altérites meubles présente une épaisseur inférieure à 1,10 m et, dans 25 % des sondages, une épaisseur inférieure à 0,45 m.

La moyenne interannuelle des précipitations à Cholet est de 786 mm et la température moyenne est de 12,1°C (entre 1990 et 2001). Ce climat océanique est caractérisé par des précipitations relativement bien réparties sur l'année (allant en moyenne de 36 mm en juillet à 92 mm en janvier) et des températures modérées (s'échelonnant en moyenne de 5,6 °C en janvier et de 20,2 °C en août). Le bilan hydrique annuel moyen présente un excédent d'octobre à février s'élevant à 280 mm dans le cas d'un sol avec une réserve utile de 100 mm.

Le bassin versant est essentiellement rural. Les zones urbaines, les forêts et les plans d'eau représentent respectivement 7 %, 5 % et 1 % de la surface du bassin (par exploitation de la *BD CARTO®* présentée ultérieurement). L'agriculture est centrée sur l'élevage de bovins-viande et sur l'élevage hors-sol de volailles. L'espace agricole est consacré, par ordre d'importance, aux prairies (58 %), au maïs (15 %), au blé-orge (14 %) et au colza (8 %) (SCEES, 2000).

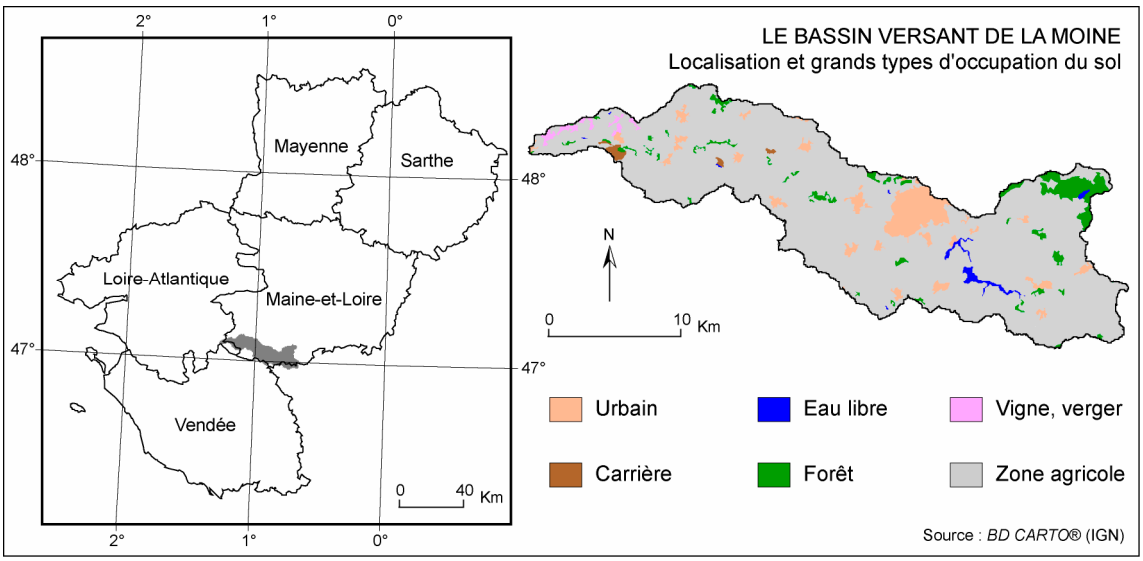


FIGURE 1 Localisation de la zone d'étude. *Study area.*

Les pics de concentration en nitrates ont lieu entre novembre et mars et peuvent dépasser la norme européenne de qualité de l'eau brute pour l'alimentation humaine de 50 mg/l (Calligee, 1998), la concentration moyenne est de 20 mg/l. Les flux de phosphore entraînent par ailleurs des problèmes d'eutrophisation des plans d'eau. Les enjeux sont élevés puisque des barrages alimentent en eau potable l'agglomération de Cholet située au centre du bassin.

2.2. Modélisation agro-hydrologique avec SWAT

Le modèle SWAT (*Soil Water Assesment Tool*), développé par l'Agricultural Research Service de l'USDA (Arnold *et al.*, 1993 ; Arnold *et al.*, 1998 ; Neitsch *et al.*, 2002), a été conçu pour des grands bassins versants de quelques centaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés (Arnold *et al.*, 2000). Ce modèle physique semi-distribué estime les flux d'eau, de nutriments, de pesticides et de sédiments dans la zone racinaire, dans la nappe souterraine et dans les cours d'eau au pas de temps journalier sur des périodes pouvant atteindre plusieurs dizaines d'années. La validité du modèle a été testée pour des bassins versants de tailles variées et aux contextes géologiques différents (Srinavisan *et al.*, 1997 ; Eckhardt and Arnold, 2001 ; Santhi *et al.*, 2001 ; Bioteau *et al.*, 2002). L'accès aux variables et aux paramètres est facilité par le couplage du modèle avec un système d'information géographique (GRASS®, Arc/Info® ou ArcView®).

L'unité spatiale de base au calcul de SWAT est la HRU (*Hydrologic Response Unit*), qui représente le résultat de la combinaison d'un type de sol, d'une classe d'occupation du sol et d'un sous bassin versant. Dans chaque HRU, les volumes représentés sont : le sol, l'aquifère peu profond et l'aquifère profond. Le modèle SWAT suppose que chaque HRU présente un comportement agro-hydrologique homogène. Les flux estimés pour chaque HRU sont alors sommés par sous-bassin de manière à obtenir un flux global transmis entre les sous-bassins.

Les processus actifs dans le sol sont l'infiltration, l'évapotranspiration, le prélèvement par les végétaux, l'écoulement latéral et l'écoulement vers des horizons inférieurs (Neitsch *et al.*, 2002). L'évapotranspiration réelle est calculée en fonction de l'évapotranspiration potentielle, de la surface foliaire, de la teneur en eau du sol et de la profondeur d'enracinement (Neitsch *et al.*, 2002). L'infiltration verticale d'horizon en horizon se produit lorsque la teneur en eau de l'horizon supérieur dépasse la capacité au champ et que l'horizon inférieur n'est pas saturé, le flux est déterminé par la perméabilité des horizons et peut s'inverser (Neitsch *et al.*, 2002).

La percolation à la base du sol alimente ensuite la zone non saturée puis l'aquifère peu profond. Ce dernier contribue alors à l'écoulement du cours d'eau avec une fonction de retard tandis qu'une fraction du flux de cette nappe peut alimenter une nappe profonde. Le flux vers cette nappe profonde correspond à une sortie du système, un retour est néanmoins possible *via* l'irrigation. Les échanges entre la nappe peu profonde et les cours d'eau peuvent s'inverser (par infiltration du cours d'eau dans la nappe), la nappe peut également subir une évaporation à partir du sol (Neitsch *et al.*, 2002). Le ruissellement quotidien est modélisé à partir de la

méthode du *Curve Number* (CN) du Soil Conservation Service de l'United States Departement of Agriculture (USDA, 1972). À chaque catégorie de sol est affecté un CN représentant un potentiel de ruissellement.

Les données spatiales en entrée du modèle sont (figure 2) : les sols, la topographie, la météorologie, l'occupation du sol (avec cultures ou successions culturales sur plusieurs années), les lacs réservoirs, les rejets ponctuels (domestiques ou industriels) et les prélèvements d'eau. À ces entités spatiales sont associées des données descriptives concernant le paramétrage détaillé des cultures, des sols, de l'aquifère peu profond, des chenaux, des prélèvements et rejets ainsi que des réservoirs.

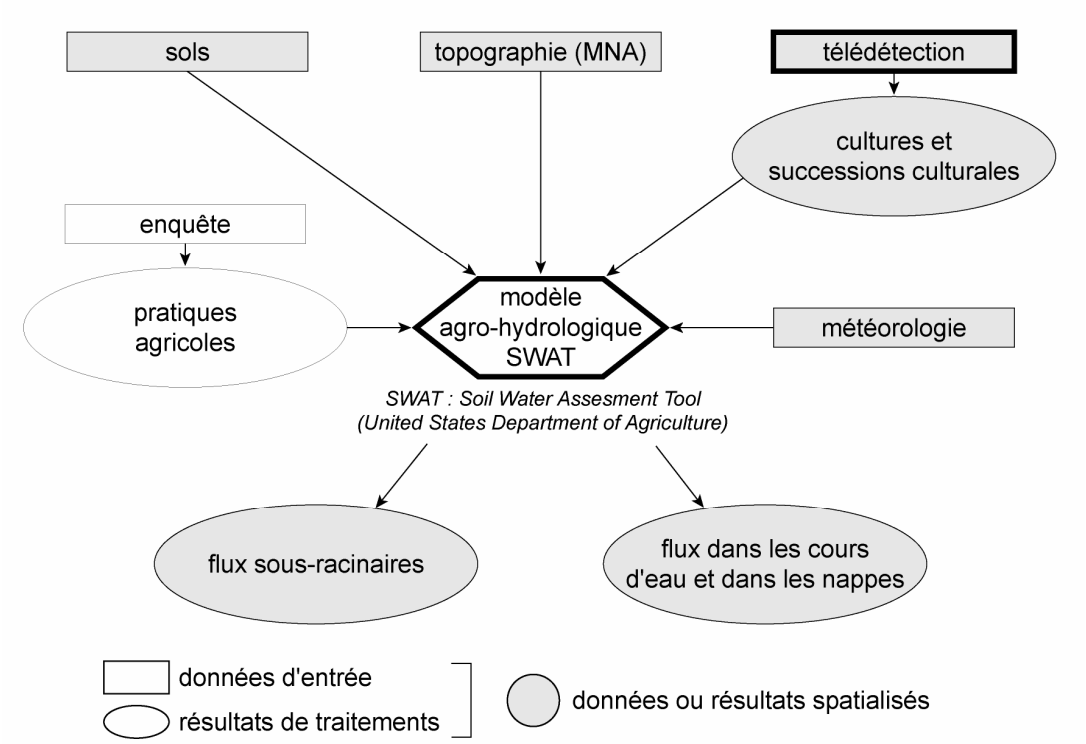


FIGURE 2 Schéma de mise en œuvre de SWAT. *Flowchart of SWAT process.*

2.3. Identification des cultures par télédétection

L'évolution de l'occupation du sol à l'aide d'images de télédétection a été maintes fois analysée pour l'identification des cultures et diverses procédures ont été proposées. L'approche diachronique basée sur le développement phénologique des plantes est privilégiée par plusieurs auteurs (Lo *et al.*, 1986 ; Eerens *et al.*, 1991 ; Civco and Hurd, 1991). En effet, une image unique possède rarement suffisamment de différenciation spectrale entre les cultures pour obtenir une classification exacte et détaillée. Le comportement spectral, évoluant de manière spécifique pour chaque culture depuis le semis jusqu'à la récolte, leur différenciation peut se faire avec plusieurs images. Il s'agit alors de disposer de dates correspondant à divers états physiologiques, ou stades phénologiques, ce qui suppose une bonne connaissance du mode de croissance et de développement des espèces, ainsi que du calendrier agricole local. Les prises de vue doivent être choisies à des stades déterminés du développement des cultures.

L'utilisation d'images diachroniques facilite la séparation des thèmes culturaux en permettant la classification des pixels en fonction de l'évolution de leur signature spectrale pendant l'année (Oetter *et al.*, 2001). Les méthodes traditionnelles de classification par détection de changements (Civco *et al.*, 2002) sont généralement basées sur le suivi d'indices de végétation tels que le *Normalized Differential Vegetation Index (NDVI)* (Rouse *et al.*, 1974) ou le *Soil-Ajusted Vegetation Index (SAVI)* (Huete, 1988). Plusieurs travaux montrent, en effet, que l'utilisation des bandes du rouge et du proche infrarouge sont les moyens les plus simples pour extraire ce genre d'informations sur de grandes surfaces

(Panigrahy and Sharma, 1997 ; Jakubausa *et al.*, 2002 ; Boegh *et al.*, 2004).

La plupart des méthodes reposent sur deux hypothèses : la connaissance de nombreuses zones d'entraînement pour définir les signatures spectrales correspondant à chaque date d'image analysée et la possibilité de procéder à des corrections radiométriques pour éviter toute ambiguïté sur les changements observés d'occupation du sol. Ces hypothèses sont généralement très contraignantes car de nombreuses analyses diachroniques sont basées sur des images d'archive pour lesquelles on ne dispose que de peu d'informations sur la réalité de terrain et de données insuffisantes pour procéder aux corrections radiométriques relatives aux effets atmosphériques. De surcroît, d'autres difficultés peuvent être soulevées en rapport avec la variation de la réponse spectrale qui peut devenir notable pour certains couverts végétaux, d'autant plus confus que des pratiques telles que l'irrigation, le fauchage, l'ensilage ou le pâturage les modifient.

De telles contraintes laissent peu d'espoir de produire des résultats de qualité satisfaisante sauf si d'autres informations peuvent être insérées en cours d'analyse. Exploitant cette dernière possibilité, nous cherchons une procédure simple combinant une approche de traitement numérique (inspirée des méthodes évoquées précédemment) et une phase interprétative de manière à offrir à l'analyste la possibilité d'introduire au moment opportun les connaissances qu'il possède du lieu. Nous souhaitons notamment préserver l'inventaire cultural de la zone d'étude pour l'évaluation finale des résultats.

2.4. Données sur l'activité agricole

Une enquête menée en 2001 par l'École supérieure d'agronomie d'Angers renseigne sur l'activité agricole dans le bassin d'étude (Béziers *et al.*, 2001). Réalisée auprès de 70 exploitations agricoles (soit environ 10 % de la surface du bassin), cette enquête a notamment permis d'élaborer des fiches culturales décrivant, pour chaque culture, les pratiques culturales : dates de semis et de récolte, dates et modes de fertilisation, rendements moyens, *etc.*

Le calendrier agricole (figure 3) est une synthèse des pratiques moyennes annuelles relevées dans l'enquête. Il tend à modéliser le comportement phénologique des cultures sans tenir compte des cultures avant et après la culture en place. La majorité des cultures présente des itinéraires techniques relativement bien identifiables. Néanmoins, les pratiques agricoles associées aux prairies (permanentes ou temporaires) sont très variées. Ainsi, l'enquête montre que les prairies permanentes sont ensilées, fauchées et pâturées pour un tiers, fauchées et pâturées pour un autre tiers et seulement pâturées pour le tiers restant. Les prairies temporaires sont majoritairement ensilées, fauchées et pâturées à des dates variables et, si leur durée de cycle est généralement d'environ 18 mois, il n'est pas rare qu'il atteigne 3 à 4 ans (voire plus) pour certaines espèces. À une date donnée, les cultures sont à différents stades phénologiques. Ainsi, en juin les cultures d'hiver, comme le blé ou l'orge, couvrent largement le sol tandis que des cultures de printemps, comme le maïs, offrent un couvert végétal peu dense. Les surfaces couvertes par la végétation changent beaucoup tout au long de l'année en fonction des choix culturaux et des pratiques (préparation du sol, pâturage, fauchage, récolte, etc.) qui conditionnent la dynamique de l'activité végétale. Cette grande variabilité temporelle implique d'acquérir des images à des périodes clés (maturation des céréales, floraison du colza, *etc.*) pour l'identification diachronique annuelle des cultures. Étant donné la complexité de la variabilité des couverts végétaux et des pratiques, l'identification de l'espace agricole se limitera aux classes suivantes : cultures d'hiver (à dominante de blé), cultures de printemps (à dominante de maïs), prairies temporaires et prairies permanentes.

Sept images HRV (XSi) de SPOT niveau 2B (précision de 10 à 30 m d'après SPOT Image) ont été retenues en vue des traitements : trois pour l'année 2000 (25 janvier, 16 juin et 1er août), trois pour l'année 1999 (28 mai, 24 juillet, 29 août) et une pour l'année 1997 (11 novembre). Lors de ce choix, la disponibilité d'images sans nuages et couvrant la totalité de l'emprise de la zone d'étude a constitué un facteur très limitant. Le choix en a été d'autant réduit qu'aucune image n'a été acquise pour les années 1998 et 2001 aux périodes intéressantes pour l'étude. Étant donné la faible taille de certaines parcelles cultivées, l'acquisition d'images TM de Landsat a été exclue.

D'autres données sont venues compléter la connaissance acquise à partir de l'enquête sur le bassin. L'ensemble des cartes topographiques de l'IGN (Institut géographique national, France) et une série d'orthophotoplans (datant de juillet 1998, à résolution de 50 cm) couvrant environ la moitié orientale de la zone d'étude ont été rassemblées. Ces photographies ont permis de retranscrire précisément, avec l'aide des exploitants, les limites d'une centaine de parcelles de connaissance (soit environ 450 ha) et leur succession en 1999 et 2000. Enfin, la *BD CARTO*® (référentiel de précision décamétrique de l'IGN) a été acquise. Elle contient notamment des éléments généraux d'occupation du sol (bâti, zones industrielles, forêts, plans d'eau, vignes, *etc.*) provenant de traitements d'images HRV de SPOT des années 1990-1991. Ces données serviront à évaluer les traitements présentés dans la méthode concernant l'extraction des éléments stables.

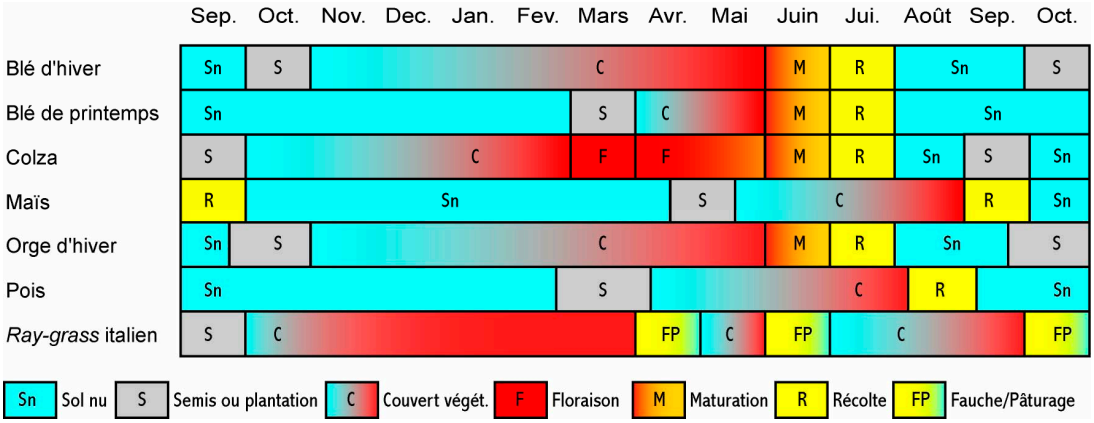


FIGURE 3 Calendrier agricole local. *Local agricultural calendar*

3. MÉTHODE

L'approche méthodologique retenue s'est déroulée en trois temps. Une série de traitements a d'abord été appliquée aux images HRV de manière à constituer une couverture d'occupation du sol et de successions culturales. La classification a ensuite été intégrée dans SWAT, en association avec d'autres données. Enfin, le modèle a fait l'objet d'une calibration.

3.1. Traitements des images HRV de SPOT

3.1.1. Déroulement général

L'ordinogramme des principales phases développées au cours de ce travail rend compte des processus méthodologiques appliqués aux images (figure 4).

Dans un premier temps, la démarche consiste à isoler par étapes hiérarchiques les éléments stables (hors prairies permanentes) à partir des images les plus adaptées (figure 4a). Ainsi, les zones urbaines sont extraites par un traitement morphologique textural. Les plans d'eau et les forêts (feuillus et résineux) sont identifiés en fonction de leurs seules caractéristiques radiométriques par classification dirigée. Les vignes font l'objet d'une analyse sur une petite portion d'image par classification non dirigée du fait de leur difficulté d'identification et de leur caractère très localisé à l'ouest du bassin. Ces éléments stables sont rassemblés au sein d'un masque numérique qui est appliqué aux images de 1999 et 2000 pour n'en retenir que les zones agricoles (hors vignes).

Dans un deuxième temps, le suivi diachronique d'indices de végétation (NDVI) permet de déterminer quatre thèmes principaux pour les années 1999 et 2000 : prairies, cultures d'hiver, cultures de printemps et autres (sols nus ou autres cultures). Les successions culturales résultent de la combinaison des plans de 1999 et de 2000 (figure 4b).

La phase suivante consiste à distinguer les prairies temporaires des prairies considérées comme permanentes (présentes pendant au moins 4 ans) à partir des prairies à la fois existantes en 1999 et 2000, et d'un indice de végétation (NDVI) de l'image de novembre 1997 (figure 4c).

Le plan final représentant l'occupation du sol et les successions culturales 1999/2000 est obtenu par l'addition des différents plans (zones urbaines, plans d'eau, forêts, vignes, successions culturales et prairies) suivie d'un lissage (figure 4d).

3.1.2. Extraction des éléments stables

La méthode retenue pour l'extraction des zones urbaines est fondée sur leurs caractéristiques texturales et s'inspire de plusieurs travaux sur le filtrage morphologique (Flouzat, 1988 ; Weber *et al.*, 1997 ; Assako-Assako et Tonyé, 2000). Elle s'articule autour d'un certain nombre d'opérations algébriques simples (dilatation ou érosion) et combinées (fermeture et ouverture). Si, par leur haute résolution spatiale (10 m), les images HRV(P) se prêtent le mieux aux travaux portant sur la texture des images, il est possible d'utiliser les deux canaux du visible (XS1 et XS2) des images multibandes HRV pour en faire ressortir les caractéristiques texturales en combinant plusieurs techniques de filtrage. Le canal XS1 de l'image HRV de janvier 2000 a donc servi d'image d'entrée pour la chaîne d'extraction des zones morphologiques urbaines (ZMU). Cette chaîne a comporté trois phases (figure 5) : l'extraction des petites structures, la détermination d'un masque urbain et la reconstitution des silhouettes des zones urbaines.

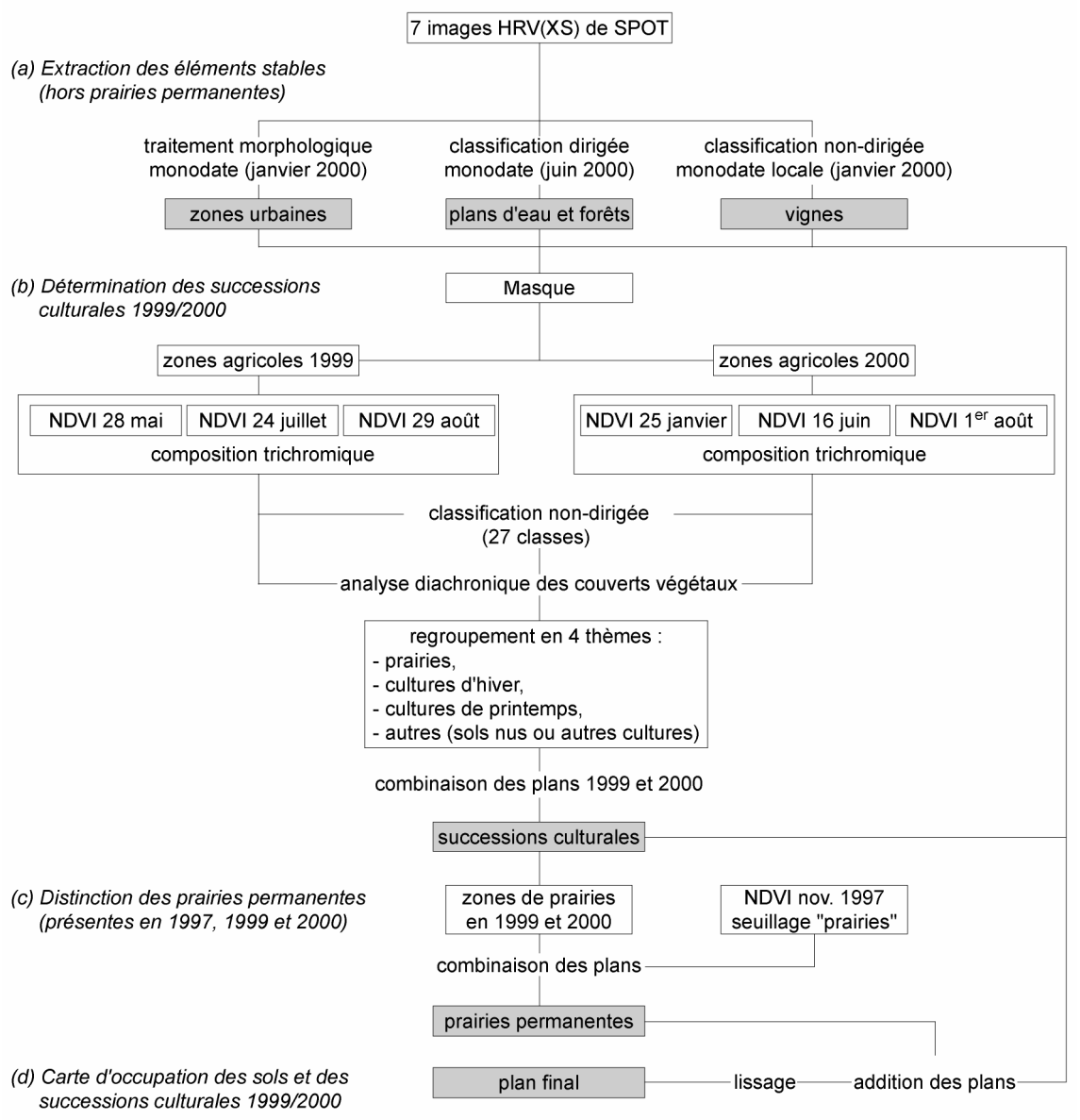


FIGURE 4 Chaîne de traitements pour l'élaboration d'une typologie des successions culturales. *Processing steps for the production of a crop rotation typology.*

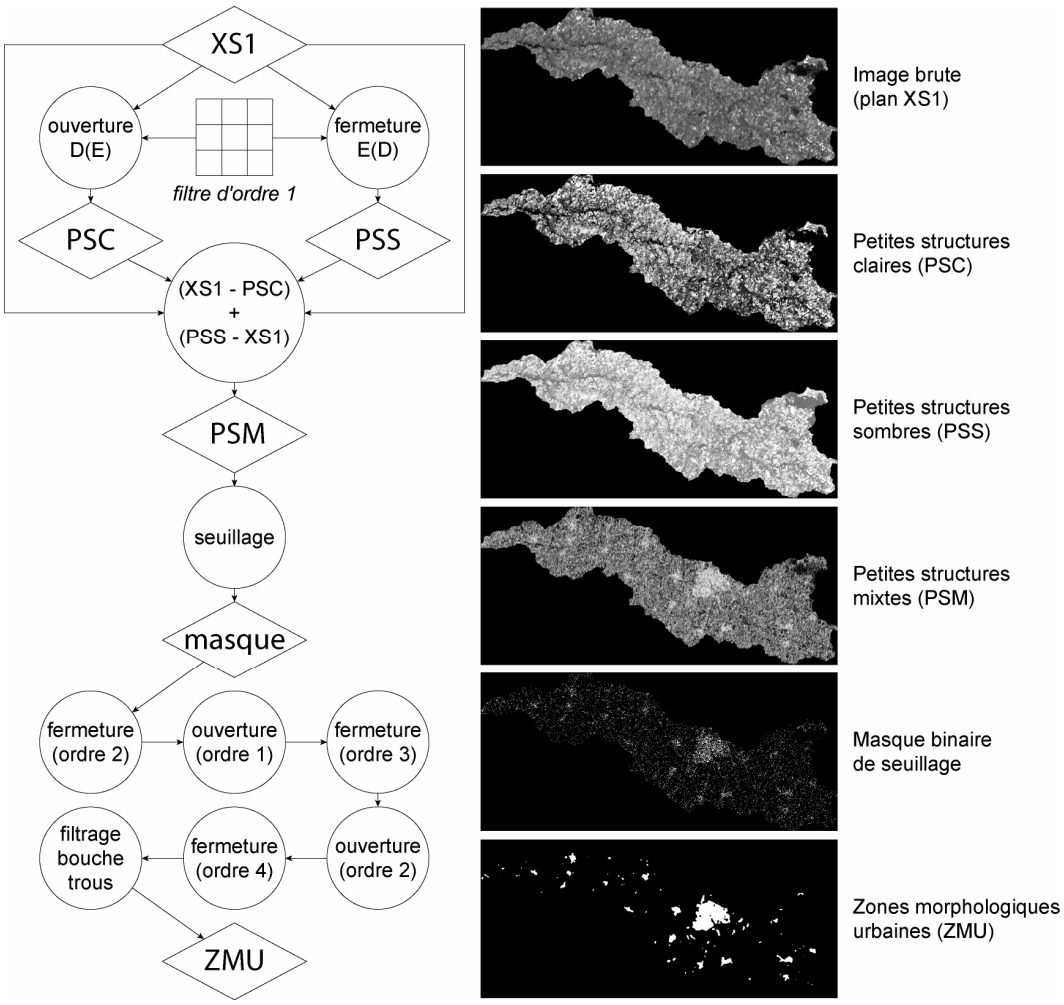


FIGURE 5 Algorithme pour l'extraction des zones urbanisées. *Processings to extract urban areas.*

L'extraction des petites structures a consisté à détecter, dans un premier temps, les petites structures claires (en général le bâti) en appliquant un filtre non linéaire d'ouverture d'ordre 1 (circulaire afin d'optimiser la cohérence des contiguïtés) au plan XS1 ; un premier chapeau haut-de-forme est ainsi obtenu en soustrayant cette ouverture du plan initial. L'étape suivante a permis de détecter les petites structures sombres (le plus souvent les routes dans les agglomérations) par application d'un filtre de fermeture du même ordre que le précédent ; un deuxième chapeau haut-de-forme est ainsi obtenu en soustrayant le plan initial de la fermeture. Les petites structures mixtes (bâti et routes dans les agglomérations) ont résulté de la somme des deux chapeaux haut-de-forme suivie d'un lissage pour obtenir des zones plus homogènes.

Pour la détermination d'un masque urbain, les valeurs numériques de l'image des petites structures ont été analysées pour identifier de manière récursive un seuil de binarisation permettant de distinguer les zones urbaines des objets parasites.

Enfin, pour la reconstitution des silhouettes des zones urbaines, l'image des ZMU a été obtenue par une succession de fermetures et d'ouvertures d'ordres croissants, puis d'un filtre de type « bouche-trous. »

L'extraction des plans d'eau et des forêts (feuillus et résineux) n'a pas posé de problème et a reposé sur l'analyse des caractéristiques spectrales monodates de polygones-test. Elle a été effectuée avec l'image de juin 2000 (de laquelle ont été substituées les zones urbaines) avec des parcelles d'entraînements numérisées sur l'image (135 ha d'eau, 83 ha de feuillus et 30 ha de résineux). Une classification à la volée selon le maximum de vraisemblance a été opérée et sauvegardée.

Les zones viticoles ont été plus difficiles à identifier. Elles sont caractérisées par une grande hétérogénéité de structures spatiales, autant à l'échelle de la parcelle qu'à l'échelle intra-parcellaire (blocs de rangées, motifs de plantations, *etc.*) (Robbez-Masson *et al.*, 2001). D'autre part, la taille des parcelles varie entre environ 0,05 ha et 3 ha, les plus petites étant majoritaires. De ce fait, une résolution spatiale de 20 m est inadaptée pour l'identification des vignes car elle ne permet pas la distinction entre les rangs et interrangs. Sur une image HRV, ces zones sont caractérisées par des mixels se confondant avec d'autres thèmes tels que l'urbain. Cependant, elles sont localisées exclusivement à l'extrême ouest du bassin. Pour leur extraction, seulement une partie de l'image de janvier 2000 (présentant moins de confusion) a été retenue à l'ouest du bassin (75 km^2 contre 385 km^2 pour tout le bassin). Sur cet extrait, une classification non dirigée en 15 classes a été lancée. Au sein de ces 15 classes, les vignes se distinguent assez nettement en une classe mais il subsiste des groupes de pixels isolés ne correspondant pas au thème recherché. Seuls les groupes de pixels représentant plus de 2 ha ont été conservés.

3.1.3. Détermination des successions culturales

Travaillant uniquement dans l'espace spectral pour procéder à la fixation des paramètres de séparation des catégories végétales significatives pour l'étude, il a été nécessaire, dans une première étape, de réduire les images aux seules zones culturales. À cette fin, les zones stables (bâti, eau, forêts, vignes) ont été masquées.

Les traitements ont ensuite été réalisés en utilisant deux images composites à 12 canaux : une image pour l'année 1999 et une image pour l'année 2000. Ces 12 canaux proviennent des trois bandes XS de chaque date dans l'année, ainsi qu'un indice synthétique calculé pour chaque date : le NDVI (*Normalized Differential Vegetation Index*) dont la valeur est représentative de l'intensité de l'activité végétative ainsi que du taux de couverture des plantes.

Une classification non-dirigée utilisant l'algorithme ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data*) sur l'axe principal (10 itérations, critère de convergence : 0,95 %) a été ensuite appliquée sur chacune des deux images de manière à générer 27 classes spectrales. Ces 27 classes expriment les variations diachroniques possibles entre sol nu ou peu couvert, végétation jeune et sol couvert pour chaque année. La phase suivante laisse une large place à l'interprétation visuelle. À partir des profils spectraux des différentes classes (figure 6), une analyse des changements de couverts végétaux a été effectuée. Cette analyse a permis de tester les regroupements se rapportant aux quatre thèmes de cultures à identifier : prairies, cultures d'hiver, cultures de printemps, autres (autres cultures ou sol nu). Le critère de sélection se réfère aux propriétés discriminantes mises en évidence par l'analyse de l'évolution phénologique de la végétation (Lo *et al.*, 1986 ; Eerens *et al.*, 1991).

Les plans thématiques obtenus pour l'année 1999 et l'année 2000 ont alors été combinés de manière à retrouver les successions culturales.

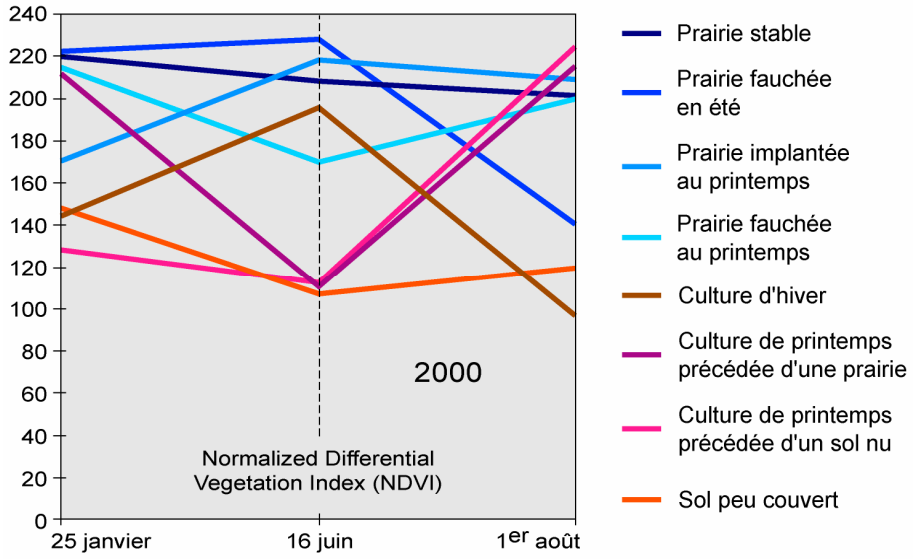


FIGURE 6 Exemples d'évolution du NDVI en 2000. *Examples of NDVI changes in 2000*

3.1.4. Distinction des prairies permanentes

À partir du plan des successions culturales précédent, les zones de prairies en 1999 et en 2000 ont été extraites pour constituer un masque binaire qui a été appliqué à l'image de novembre 1997. Un seuillage a ensuite été opéré sur un indice de végétation calculé à partir de l'image masquée. Le résultat obtenu est un nouveau plan thématique, représentant les prairies considérées comme permanentes identifiées en 1997, 1999 et 2000.

3.1.5. Occupation du sol et successions culturales 1999/2000

L'étape finale des traitements employés a consisté à additionner les différents plans thématiques obtenus lors des étapes précédentes : zones urbaines, plans d'eau, forêts, vignes, successions culturales et prairies. On obtient ainsi un plan thématique représentant l'occupation du sol et les successions culturales 1999/2000 (figure 7). Ce plan est amélioré en phase de post-classification par deux lissages successifs. D'abord, de manière à rendre les champs plus homogènes, un filtre 3×3 de convolution majoritaire a été appliqué uniquement sur les prairies et les successions culturales. Un autre filtre a permis ensuite d'éliminer les groupes de pixels isolés jugés peu significatifs en termes de surface (éléments de moins de 800 m²). Les différents traitements de lissage ont été opérés conjointement avec l'évaluation de la classification et avant son intégration dans le modèle.

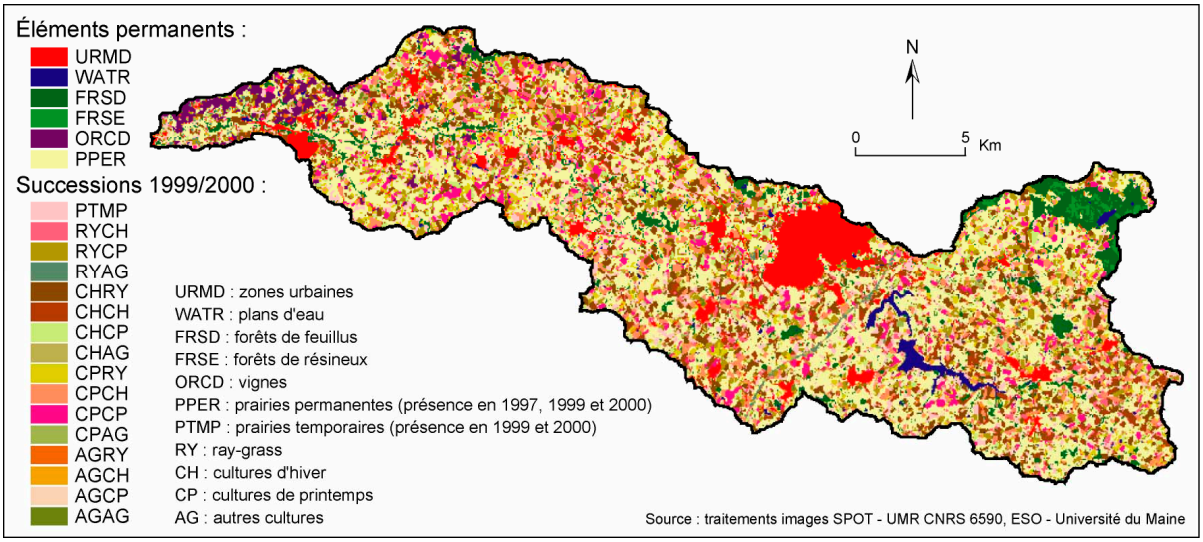


FIGURE 7 Occupation du sol et successions culturales 1999-2000 sur le bassin de la Moine. *Map of landuse and crop turn over (1999-2000) in the Moine Watershed*

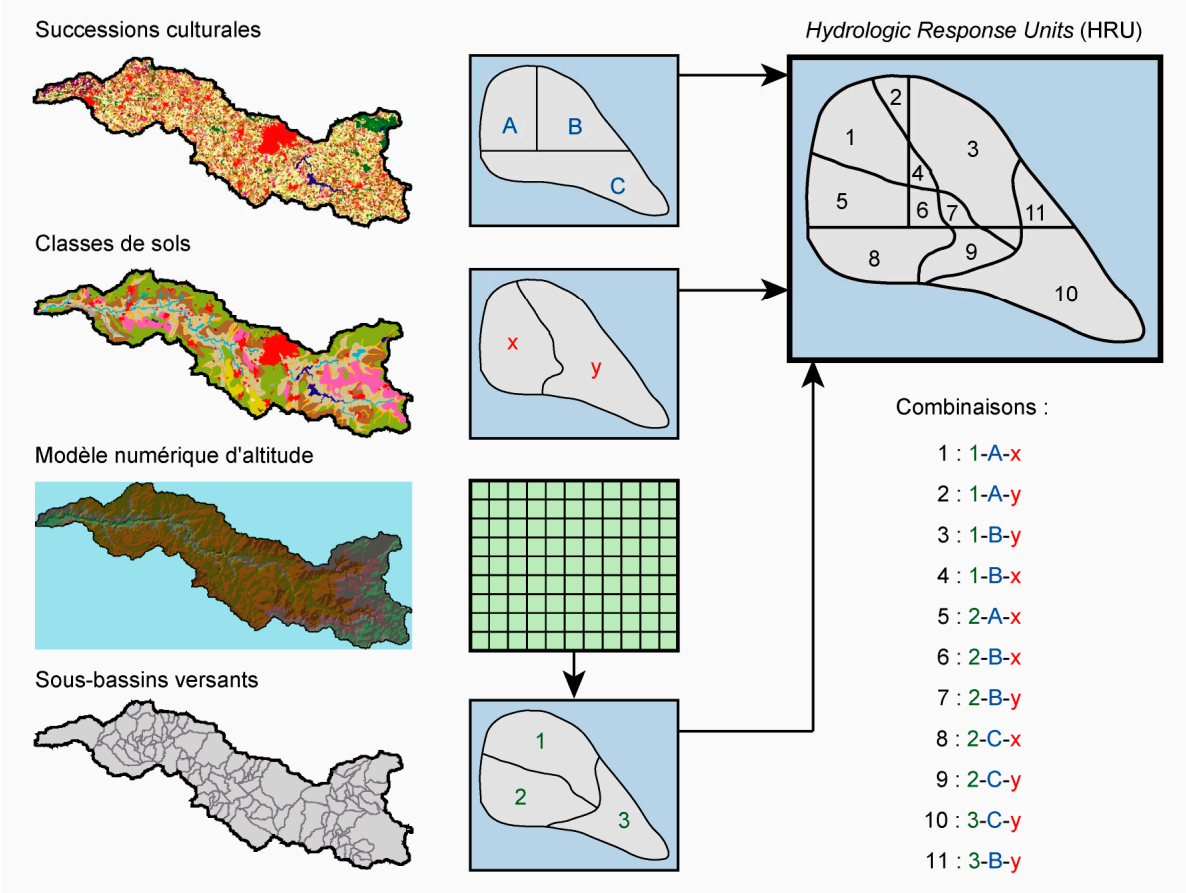
3.2. Intégration de la classification dans SWAT

La couverture spatiale de l'occupation du sol et des successions culturales 1999-2000 a été combinée dans SWAT (version *AVSWAT 2000*) avec un modèle numérique d'altitude de l'IGN (*BD Alti*®, de résolution de 50 m) et une couche cartographique des sols (Euriat et Tritz, 2002), de manière à constituer des unités de réponses hydrologiques (HRU) (figure 8). La résolution des HRU étant fixée par la résolution la plus grande des trois couvertures, nous avons préalablement rééchantillonné le MNA sur la couverture obtenue par télédétection (résolution spatiale de 20 m) pour ne pas dégrader l'information sur l'occupation des sols et assurer la parfaite superposition entre les données. Les sous-bassins d'étude retenus ont, pour exutoire, une station de mesure ou une station d'épuration. Ainsi, nous avons pu définir une vingtaine de sous-bassins représentant une surface moyenne de 18 km². Au sein de ces sous-bassins, toutes les combinaisons de successions et de sols ont été retenues pour la modélisation.

Les couches cartographiques des successions culturales et des sols renvoient à des bases de données contenant des paramètres descriptifs qu'il est possible d'adapter. Ainsi, la base de données sur les cultures renseigne sur des paramètres agronomiques, tels que les températures de base à la croissance, les degrés-jours nécessaires pour atteindre la maturité de la plante, la profondeur d'enracinement, le taux de matière sèche, la part récoltée, *etc.* Les éléments de rotations intégrant cultures d'hiver, cultures de printemps ou autres cultures

font, respectivement, référence à un paramétrage de blé d'hiver, de maïs ensilage et d'agriculture générique. La base de données des sols contient des éléments mesurés comme la granulométrie ou la profondeur et des propriétés hydriques (perméabilité, porosité efficace, réserve utile, *etc.*) renseignées à partir de fonctions de pédotransfert appliquées aux classes de texture (Laurent et Rossignol, 2003).

Les pratiques agricoles associées aux cultures et aux prairies prennent en compte les dates de semis, de récolte, le pâturage, les apports en nutriments sous différentes formes, le travail du sol, le maintien de résidus et les successions. Actuellement, le paramétrage est fondé sur des valeurs moyennes issues de l'échantillon d'agriculteurs enquêtés sur le bassin. D'autres informations nécessaires à la mise en œuvre du modèle ont été intégrées. Ainsi, les pollutions ponctuelles sont aussi prises en compte par l'intégration de rejets annuels moyens des 18 stations d'épurations présentes sur le bassin (Agence de l'Eau Loire-Bretagne). Les données météorologiques (précipitations, températures minimales et maximales journalières, vitesse du vent, température au point de rosée et de radiations solaires en moyennes mensuelles) ont été acquises pour la période 1990-2002 auprès de Météo-France. Enfin, les mesures de débits journaliers utilisées pour le calage du modèle proviennent de trois stations de mesure de la DIREN (Direction Régionale de l'Environnement) et les concentrations mesurées de polluants (nitrates, phosphates, ammonium, *etc.*) sont issues du RNDE (Réseau National de Données sur l'Eau, géré par la DIREN et l'Agence de l'Eau) avec 6 à 8 prélèvements par an. Ces données ont été utilisées pour la calibration et la validation du modèle.



Modifié de Bioteau *et al.*, (2002)

FIGURE 8 Construction des HRU (*Hydrologic Response Units*). *HRU (Hydrologic Response Units) design.*

3.3. Calibration du modèle

SWAT est un modèle à base physique pour le compartiment sol-plante et plus empirique pour la partie nappe souterraine et les transferts de surface. Ainsi de nombreux paramètres sont déterminés par les entrées spatialisées ou correspondent à des grandeurs connues et de valeur générale. Cependant, quelques paramètres restent à caler en fonction du bassin versant étudié. Les valeurs de ces paramètres ont été obtenues par un processus itératif visant à optimiser les réponses du modèle en fonction des mesures. Le calage a porté d'abord sur les rendements des cultures, puis sur les débits et enfin sur les flux de nutriments azotés et phosphorés.

Les rendements des cultures ont été calés à partir d'avis d'experts pour les prairies et des valeurs moyennes des enquêtes pour les cultures. Ainsi, les rendements simulés de cultures d'hiver sur 1999-2000 sont de 5,5 t/ha/an pour une moyenne de 5,6 obtenue par enquête. Les rendements de cultures de printemps sont équivalents à la moyenne des rendements du maïs ensilage révélés par l'enquête (13,6 t(MS)/ha/an).

Les écoulements ont été calibrés en fonction de plusieurs paramètres, parmi lesquels peuvent être mentionnés les plus sensibles sur le bassin versant d'étude : les paramètres de la nappe souterraine, le coefficient de rugosité des versants et du lit des cours d'eau, la capacité d'évaporation du sol en fonction de la profondeur et le CN des cultures. La méthode de calage s'est basée sur l'optimisation de l'indice de Nash (Nash and Suttcliffe, 1970), qui mesure l'efficience de la modélisation des débits, ainsi que sur l'observation de l'hydrogramme journalier des flux modélisés *vs* observés (étiages, pics de crue, phases de tarissement) et des écarts de cumuls.

L'absence de mesures de qualité en 1999 aux diverses stations expérimentales a conduit à retenir la période 2000-2001 pour l'évaluation des simulations en nutriments azotés et phosphorés. Nous avons fait l'hypothèse que les successions observées par télédétection en 1999-2000 étaient reproduites sur les mêmes surfaces pour la période de validation.

4. RÉSULTATS

Les résultats portent, d'une part, sur l'évaluation de la classification obtenue par traitement des images HRV et, d'autre part, sur les simulations mises en oeuvre avec le modèle SWAT.

4.1. Évaluation de la classification

La qualité de la classification est estimée par une analyse globale des surfaces relatives des différents thèmes annuels et par une évaluation locale des classes de la couverture, qui permet de tester les étapes de la méthode proposée, depuis l'extraction des éléments stables, la détermination des successions culturales, jusqu'à la distinction des prairies permanentes.

4.1.1. Analyse des surfaces

Le bassin versant (385 km²) est concerné par 29 communes dont l'emprise représente une surface d'environ 760 km². Pour ces communes, les données du recensement agricole de 2000 sont disponibles. La surface agricole utilisée (SAU) représente 74 % de ces surfaces communales (SCEES, 2000). Sur le territoire strict du bassin, la classification donne environ 83 % de SAU. Les deux zones n'étant pas tout à fait comparables, il apparaît néanmoins que la SAU est surestimée par la classification. Cette surestimation peut s'expliquer en partie par le fait que des thèmes non agricoles, tels les routes et leurs bordures enherbées, n'ont pas été pris en compte pour la classification.

La répartition de la SAU pour les classifications 1999 et 2000 respecte globalement les ordres de grandeur indiqués par le recensement agricole (tableau 1). Cependant, on constate une distinction médiocre entre prairies permanentes et prairies temporaires. On retrouvera ce biais au niveau de l'évaluation locale de la classification.

4.1.2. Analyse de la répartition

Les matrices de confusion (tableaux 2 à 4) permettent de comparer les résultats de la classification avec des données exogènes correspondant à des références issues, d'une part, de la *BD CARTO®* (bâti, eau, forêts, vignes) de l'IGN (tableau 2) et, d'autre part, d'un échantillon d'exploitants sur le terrain (prairies et successions culturales retranscrites à partir des photographies aériennes) (tableaux 3 et 4). Ces matrices de confusion permettent d'évaluer la qualité des résultats obtenus pour les différentes étapes de la méthodologie employée. Elles permettent, d'une part, de quantifier la précision avec laquelle les différents thèmes ont été classifiés et, d'autre part, de définir quels sont les thèmes présentant des confusions thématiques (Girard et Girard, 1999). La précision globale désigne le nombre de pixels bien classés, divisé par le nombre total de pixels. La précision d'utilisation est le pourcentage de pixels d'un groupe issu de la classification, correctement classés vis-à-vis de la référence. La précision de réalisation correspond au pourcentage de pixels d'une classe de référence correctement classés par télédétection.

Sur le tableau 2, on montre une bonne précision de réalisation, soit entre 80,1 % pour les zones urbaines et jusqu'à 93,6 % pour les plans d'eau. En revanche, la précision d'utilisation est très hétérogène : elle est excellente pour les zones agricoles (97,3 %), bonne

pour les zones urbaines (76,8 %), moyenne pour les plans d'eau (59,4 %) et les forêts (55,7 %), et mauvaise pour les vignes (39,1 %). Ces chiffres expriment l'erreur d'excédents de la classification par rapport aux zones agricoles (hors vignes) et s'expliquent principalement par le manque de détails des références de la *BD CARTO*® : on comprend ici pourquoi les différences de valeurs entre la précision de réalisation et la précision d'utilisation ne sont pas symétriques. Si le recours à cette base de données permet une distinction entre éléments permanents et zones agricoles, il n'en reste pas moins qu'elle constitue une référence très lissée : le travail de classification apportant beaucoup plus de détails sur les structures urbaines, les plans d'eau ou les forêts. À la rigueur, l'erreur d'excédents du thème des vignes peut être lié à la difficulté de caractérisation de ce thème ; ce thème constitue de toute façon une surface réelle relativement négligeable (environ 2 % de la SAU). D'ailleurs, l'analyse des cartes topographiques au 1/25 000 de la zone d'étude (révision de 1987) confirme bien une plus grande richesse de détails (présentes aussi sur la classification) par rapport à la *BD CARTO*®. Compte tenu des limites de la référence mais aussi de l'emprise spatiale exhaustive de cette évaluation, l'identification des éléments permanents et des zones agricoles est considérée comme significative : ce résultat est confirmé par une précision totale de 91,2 %, qui indique une évaluation globale très satisfaisante de la première étape de la méthodologie employée (figure 3a).

La matrice de confusion confrontant la classification aux parcelles de contrôle issues d'enquêtes sur le terrain (tableau 3) montre une précision totale de 84,7 %. Ce résultat indique une concordance acceptable entre la classification et les successions observées sur le terrain. Les prairies, majoritaires dans l'échantillon (55 % des surfaces de contrôle) et dans la surface agricole utile (59 %) sont particulièrement bien classées (90,1 %). Leur nature et leur diversité sont aussi sources de confusions. En effet, les prairies temporaires implantées dans l'année, puis fauchées en juillet, peuvent avoir une réponse spectrale proche de celle des céréales, alors qu'une prairie permanente fauchée au printemps puis en pleine croissance pourra être confondue avec du maïs. Par ailleurs, toute surface en herbe a été identifiée comme prairie, qu'elle concerne une parcelle agricole ou un espace enherbé non cultivé (bordure de champs, de route, *etc.*). Ces confusions expriment donc bien la difficulté à retranscrire avec précision les limites du parcellaire sur deux années consécutives. D'une manière générale, les variations intervenant à l'intérieur d'un même thème sont imputables également à l'hétérogénéité du milieu, qu'il s'agisse du sol lui-même ou de la végétation qu'il supporte : dans ce dernier cas, les différences observées peuvent être dues soit à des stades de développement différents du végétal soit à des différences de substrat. Néanmoins, on retrouve dans l'ensemble les successions culturales observées. Sur le tableau 4, on montre que la distinction entre prairies permanentes et prairies temporaires est médiocre. La différence entre précision de réalisation (89,8 %) et d'utilisation (74,9 %) pour les prairies permanentes laisse penser que la méthode employée surestime sensiblement ce thème. Le principal problème réside dans la confusion thématique des prairies temporaires au profit des prairies permanentes. Seulement 45,7 % des zones identifiées par enquête comme prairies temporaires, en 1999 comme en 2000, sont identifiées comme telles par la classification : la majorité restante est affectée en prairie permanente. Ceci s'explique notamment par le fait que de nombreuses prairies déclarées comme temporaires ont une durée de cycle pouvant atteindre 5 à 7 ans et que notre analyse fait l'hypothèse que les prairies présentes plus de 4 ans (de 1997 à 2000) sont des prairies permanentes.

TABLEAU 1 Évaluation de la répartition de la SAU des communes du bassin. *Evaluation of the agricultural land use on the area.*

	Moyenne de la SAU des communes du bassin versant en 2000 (SCEES) (%)	Classification 1999 (%)	Classification 2000 (%)
Vignes/vergers	2	2	2
Prairies permanentes	19	39	39
Prairies temporaires	39	22	26
Cultures d'hiver (blé, triticale, orge, colza)	22	20	15
Cultures de printemps (maïs, tournesol)	15	15	15
Autres cultures ou jachères	3	3	2

TABLEAU 2 Matrice de confusion sur références *BD CARTO*® (IGN). *Confusion matrix using cartographic references (BD CARTO®/IGN).*

	Classification						
BD CARTO®	URMD	WATR	FRMI	ORCD	AGRL	TOTAL	PRE. R. %
URMD	**56 609**	130	277	46	13 567	70 629	80,1
WATR	23	**8 293**	93	0	455	8 864	93,6
FRMI	338	393	**37 238**	25	6 103	44 097	84,4
ORCD	88	26	14	**6 434**	1 229	7 791	82,6
AGRL	16 662	5 108	29 243	9 952	**764 196**	825 161	92,6
TOTAL	73 720	13 950	66 865	16 457	785 550	**956 542**	
PRE. U. (%)	76,8	59,4	55,7	39,1	97,3		**91,2**

URMD : urbain moyenne densité ; WATR : plans d'eau ; FRMI : forêts mixtes ; ORCD : vignes-vergers ; AGRL : agriculture générale (prairies permanentes, temporaires et cultures) ; PRE. R. : précision de réalisation ; PRE. U. : précision d'utilisation.

TABLEAU 3 Matrice de confusion sur parcelles de contrôle avec successions 1999-2000. *Confusion matrix on control parcels with crop rotations classification (1999-2000).*

	Classification																	
Référence	PRAI	RYCH	RYCP	RYAG	CHRY	CHCH	CHCP	CHAG	CPRY	CPCH	CPCP	CPAG	AGRY	AGCH	AGCP	AGAG	TOTAL	PRE. R. (%)
PRAI	**5 382**	35	172	12	111	38	8	0	119	45	24	10	0	10	0	11	5 977	90,0
RYCH	9	**124**	18	2	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	165	75,2
RYCP	62	0	**639**	0	0	0	12	0	34	3	2	0	0	0	0	0	752	85,0
RYAG	0	24	5	**56**	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	90	62,2
CHRY	72	4	15	0	**535**	1	6	0	3	9	1	0	0	0	0	2	648	82,6
CHCH	31	23	0	0	31	**333**	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	443	75,2
CHCP	40	0	4	0	5	0	**120**	0	9	0	0	0	0	0	0	0	178	67,4
CHAG	1	2	0	0	0	0	0	**71**	0	0	1	9	0	0	0	11	95	74,7
CPRY	38	0	0	0	0	0	2	0	**284**	6	0	0	0	0	0	0	330	86,1
CPCH	90	10	12	0	28	0	0	0	92	**682**	0	0	0	0	0	0	914	74,6
CPCP	28	0	5	0	0	4	0	0	24	0	**402**	0	0	0	0	0	463	86,8
CPAG	0	0	16	0	4	14	0	0	0	1	0	**192**	0	0	0	0	227	84,6
AGRY	3	0	1	0	23	0	12	0	0	0	0	0	**78**	0	0	0	117	66,7
AGCH	4	11	0	0	17	15	0	0	0	17	2	0	1	**112**	0	0	179	62,6
AGCP	9	1	0	0	6	2	0	0	0	0	1	0	11	0	**33**	0	63	52,4
AGAG	4	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0	9	29	**150**	209	71,8
TOTAL	5 773	234	887	70	760	436	160	76	565	788	433	211	90	131	62	174	**10 850**	
PRE. U. %	93,2	53,0	72,0	80,0	70,4	76,4	75,0	93,4	50,3	86,5	92,8	91,0	86,7	85,5	53,2	86,2		**84,7**

PRAI : prairies ; RY : *ray-grass* ; CH : cultures d'hiver ; CP : cultures de printemps ; AG : autres cultures ; PRE. R. : précision de réalisation ; PRE. U. : précision d'utilisation

TABLEAU 4 Matrice de confusion pour la distinction des prairies. *Confusion matrix for prairies identification.*

	Classification				
Référence	PPER	PTMP	SUCC	TOTAL	PRE. R. (%)
PPER	**3469**	49	345	3863	89,8
PTMP	770	**860**	250	1880	45,7
SUCC	391	234	**4482**	5107	87,8
TOTAL	4630	1143	5077	**10850**	
PRE. U. (%)	74,9	75,2	88,3		**81,2**

PPER : prairies permanentes ; PTMP : prairies temporaires ; SUCC : ensemble des successions

4.2. Simulations avec SWAT

4.2.1. Modélisation des écoulements

La modélisation de débits sur la période de calage 1997-1999 offre un indice de Nash de 0,78 à un pas de temps journalier entre les données simulées et les mesures. En appliquant les valeurs calées sur les années 2000-2001 (période de validation), les écoulements sont corrélés avec un indice de Nash de 0,82 et un coefficient de détermination R^2 de 0,83. Les crues et les étiages sont assez fidèlement représentés par le modèle (figure 9). Cependant, certains pics de crue sont sous-estimés alors que l'écoulement de base généré par le drainage de la nappe souterraine est surestimé en début de phase de tarissement (par exemple en mars 2000 et en juin et juillet 2001). Sur ces deux ans, le cumul des débits simulés est minoré de 7 % par rapport à celui des débits observés. Ces résultats sont jugés satisfaisants.

Sur la période 2000-2001, les termes annuels du bilan de l'eau présentent des valeurs réalistes avec comme moyenne une évapotranspiration potentielle de 837 mm et une évapotranspiration réelle de 635 mm, pour des précipitations de 927 mm. Sur cette même période, l'évapotranspiration potentielle est estimée à 842 mm et l'évapotranspiration réelle à 669 mm par Météo-France à la station de La Roche-sur-Yon, située à 40 km du centre du bassin versant. L'écoulement dans le réseau hydrographique est de 343 mm. Le ruissellement représente un tiers de l'écoulement (115 mm), ceci est cohérent avec la nature des sols limoneux sur socle où l'infiltration profonde est limitée par la faible perméabilité de la roche mère ou par l'existence d'horizons argileux (Arlot, 1999). Les drains agricoles ont un impact important sur les écoulements simulés puisque la lame d'eau annuelle qui y transite est estimée à 88 mm. Le drainage de la nappe dans le cours d'eau est de 141 mm. Durant cette période, il y a une variation positive des réserves de 51 mm (années particulièrement humides).

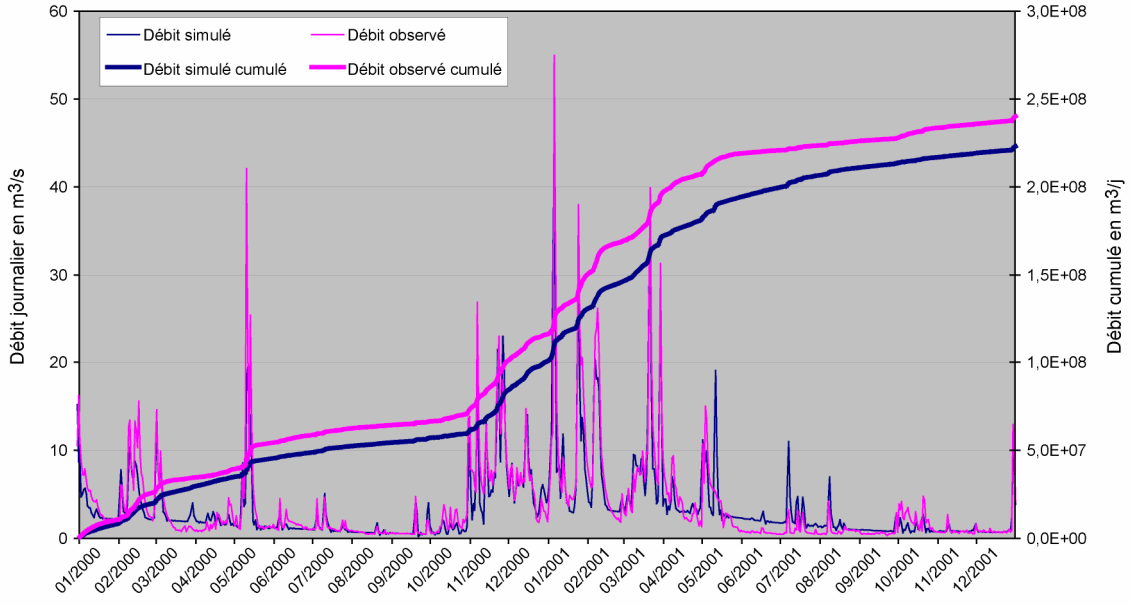


FIGURE 9 Hydrogramme des débits simulés *vs* observés à la station de Roussay-sur-Moine. *Simulated and observed flows at the station of Roussay-sur-Moine*

4.2.3. Nutriments azotés et phosphorés

L'estimation des flux de nitrates et de phosphore minéral s'appuie sur des mesures d'une plus faible fréquence. De plus, SWAT permet de simuler des flux de phosphore minéral dans le chenal alors que seules des mesures de phosphates sont disponibles sur le bassin. L'utilisation de telles mesures est donc délicate d'autant plus qu'elles sont réalisées de façon instantanée sans tenir compte des périodes de crue. Or, les flux de phosphore étant étroitement liés au phénomènes de ruissellement, ils varient très fortement à un pas de temps sub-journalier (Michaud *et al.*, 2002). De ce fait, seules les dynamiques des flux de phosphore peuvent être contrôlées sans pouvoir réellement les valider avec de telles mesures.

Le coefficient de détermination R^2 des flux sur l'année 2000 (l'année 1999 ne possède pas de mesures) s'élève à 0,78 pour les nitrates (figure 10)

et à 0,70 entre les flux de phosphore minéral simulés et les flux de phosphates observés (figure 11). Les dynamiques de transfert d'azote et de phosphore sont assez bien reproduites par les simulations. Les flux d'azote sont surestimés par les simulations en période de tarissement. En ce qui concerne le phosphore, il n'est pas possible de comparer les grandeurs mesurées et simulées.

Le modèle SWAT permet d'estimer par ailleurs une estimation des risques de transfert en fonction des successions culturales et pour les différents types de sols. Hormis les facteurs pédologiques, la variabilité entre successions s'explique par les besoins des cultures, la durée de l'interculture exposant le sol au lessivage et au ruissellement ainsi que par les pratiques de fertilisation associées aux cultures. Par exemple, la différenciation des risques est très nette entre les successions sur des luvisols rédoxiques (tableau 5) :

– pour le nitrate, les prairies présentent les risques les plus faibles avec la succession culture d'hiver/*raygrass* qui réduit la durée d'interculture ; à l'opposé, les successions bénéficiant d'apports importants en azote ou laissant un sol nu sur de longues périodes sont défavorables ;

– pour le phosphore soluble, les successions comportant des cultures d'hiver présentent des risques moindres car la fertilisation de ces cultures (le blé en l'occurrence) est minérale et ne contient pas de phosphore ; sous les successions intégrant des cultures de printemps (à dominante de maïs), l'important lessivage s'explique par une fertilisation organique riche en phosphore et, dans certaines successions, par la durée du sol nu favorisant le ruissellement.

Il est possible de noter que l'identification des successions est particulièrement importante comparativement à une prise en compte des cultures sur une seule année : les cultures de printemps (à dominante de maïs), par exemple, se retrouvent dans des successions présentant un risque faible comme un risque élevé (du simple au triple pour les fuites de nitrates).

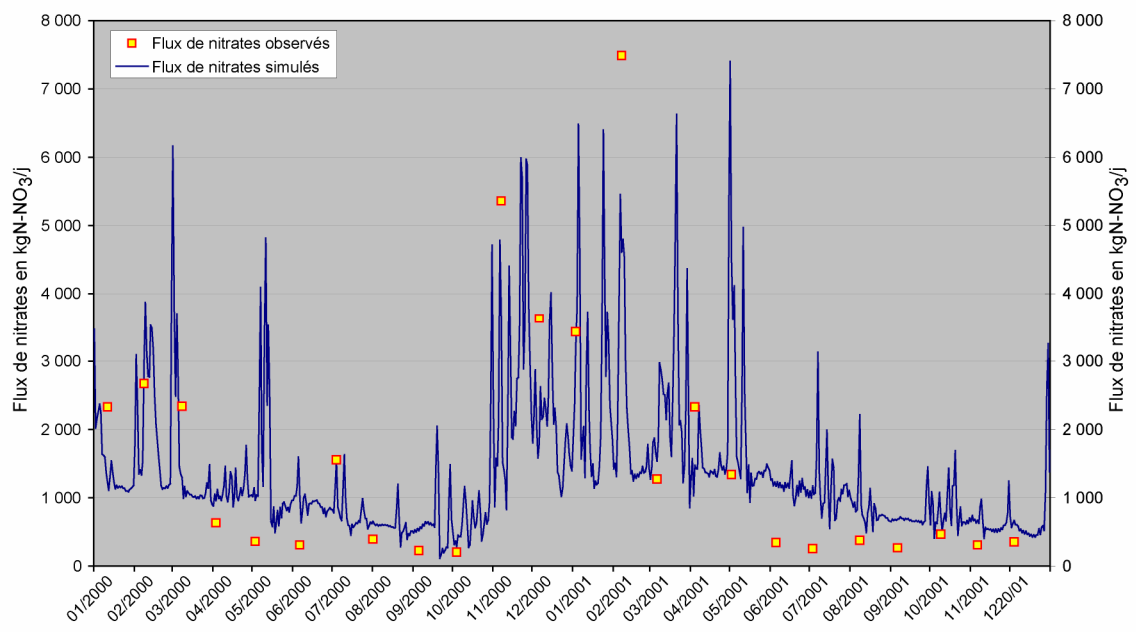


FIGURE 10 Simulation des flux d'azote dans SWAT à la station de Roussay-sur-Moine. *Nitrogen fluxes simulated with SWAT at the station of Roussay-sur-Moine.*

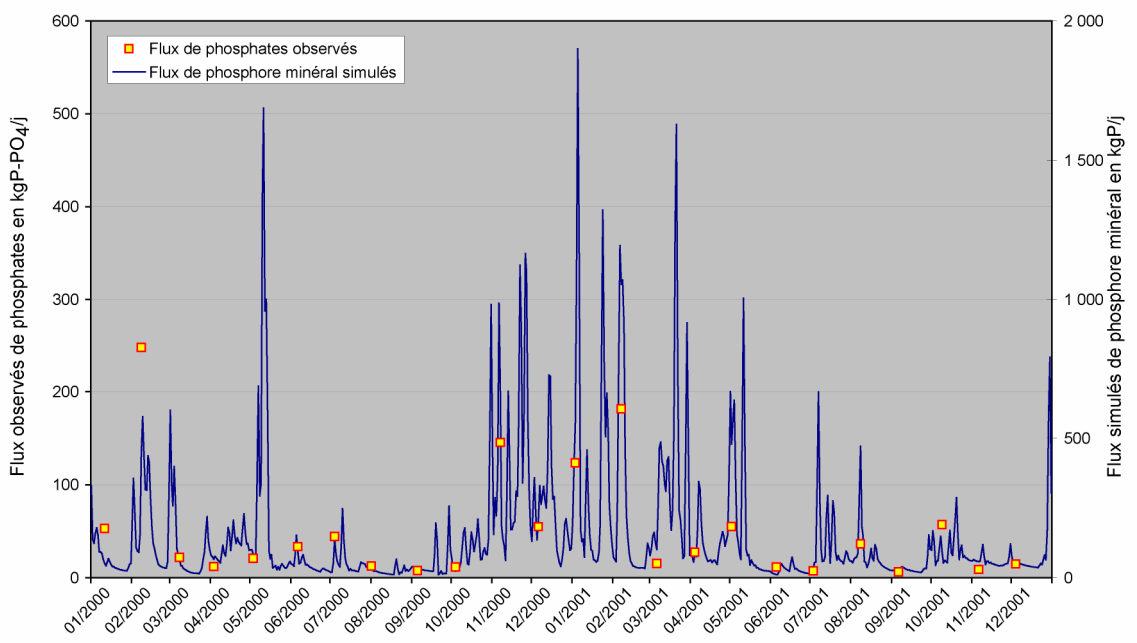


FIGURE 11 Simulation des flux de phosphore à la station de Roussay-sur-Moine. *Phosphorus fluxes simulated with SWAT at the station of Roussay-sur-Moine.*

TABLEAU 5 Fuites hors de la zone racinaire des successions sur luvisols rédoxiques, moyennes annuelles d'une simulation sur deux ans avec SWAT. *Leaching from the root zone for different crop rotations on luvisols redox, annual average of a two-years simulation with SWAT*

Successions	NO_3 lessivé (kgN/ha)	Phosphore soluble lessivé (kgP/ha)
Prairie permanente	2,4	0,17
CHRY	5,6	0,10
Prairie temp. (2 ans)	7,6	0,25
CHCP	8,9	0,14
CHCH	14,3	0,01
RYCH	18,7	0,18
CPCH	19,2	0,16
CPRY	20,2	0,26
RYCP	20,6	0,39
CPCP	26,0	0,53

RY : *ray-grass* ; CH : cultures d'hiver ; CP : cultures de printemps

5. DISCUSSION

5.1. Classification des successions

La pertinence globale de la classification à partir des images HRV s'avère satisfaisante avec 7,4 % d'erreurs de confusion concernant la séparation de l'espace agricole et 15,3 % concernant l'identification des successions culturales. Ces résultats soulignent l'intérêt de l'approche méthodologique retenue d'autant plus que les études en télédétection intègrent rarement les successions culturales à la fois dans leurs méthodes et dans l'évaluation de leurs résultats.

Néanmoins, l'amélioration de la classification thématique est encore possible et passe avant tout par une amélioration de l'échantillonnage *in situ*, qui pourrait être plus représentatif et plus équilibré, mais également dans le choix des images, notamment pour l'année 1999 (pas d'image en hiver). Un plus grand nombre d'échantillons aurait aussi permis d'employer des méthodes plus classiques telles des classifications dirigées selon le maximum

de vraisemblance (Panigrahy and Sharma, 1997 ; San Miguel-Ayanz and Biging, 1997), en introduisant une partie des échantillons comme parcelles d'entraînement et l'autre pour la validation.

Par ailleurs, on peut regretter que les successions sur trois années consécutives n'aient pu être déterminées, notamment à cause des difficultés à acquérir des images HRV sans couvert nuageux pour l'année 2001. En effet, cette identification des successions sur trois ans permettrait de représenter avec un plus grand réalisme les successions du secteur. Pour ce faire, l'acquisition d'autres sources d'images telles que TM ou ETM+ de Landsat pourrait être envisagée pour l'année 2001. Par souci d'uniformité de l'information, il conviendrait alors de rééchantillonner ces nouvelles images sur la résolution spatiale des images HRV de 1999 et 2000.

5.2. Successions et modélisation avec SWAT

La cartographie des successions culturales résultante est un élément important de l'identification des risques de pollution agricole. L'analyse des résultats de simulation avec le modèle SWAT montre l'intérêt de prendre en compte les successions plutôt qu'une simple cartographie des cultures afin d'améliorer le diagnostic des risques de pollution agricole à l'échelle de bassins versants.

En contrepartie, l'amélioration descriptive apportée par les successions culturales conduit à multiplier le nombre d'unités de simulation (HRU) et alourdit donc considérablement les temps de calcul du modèle. En effet, le nombre de HRU varie en fonction du nombre de thèmes culturaux distingués chaque année, mais aussi de la série d'années consécutives introduites dans l'analyse des successions culturales. La précision de l'information se heurte donc aussi bien à la faisabilité de son acquisition qu'à la nécessité d'obtenir des temps de réponse acceptables lors des simulations avec le modèle. La simple discrimination annuelle de l'espace agricole, en cultures d'hiver, cultures de printemps, prairies temporaires et prairies permanentes, peut alors se justifier aussi bien par la difficulté à discriminer plus précisément les thèmes agricoles que par le souci de limiter les combinaisons possibles de successions et donc les temps de calcul des simulations.

6. CONCLUSION

Les modèles hydrologiques distribués à base physique requièrent une analyse spatiale des composants du cycle de l'eau pour leur paramétrage. Dans ce cadre, les caractéristiques d'occupation du sol et de végétation mais aussi leurs changements dynamiques dans le temps et dans l'espace sont des éléments déterminants pour la modélisation hydrologique des bassins versants

Dans cette étude, le traitement de données issues de capteurs optiques à haute résolution a été utilisé avec succès pour la spatialisation de tels paramètres pour le modèle agro-hydrologique SWAT. Ainsi, des données images HRV SPOT de 1997 à 2000 ont été traitées pour la détermination spatiale de l'occupation du sol et des cultures et leur dynamique temporelle à l'intérieur du bassin. La méthode et les outils proposés permettent d'intégrer la variabilité spatiale des successions culturales et de représenter leurs impacts sur la qualité des eaux à l'échelle d'un bassin versant de plusieurs centaines de kilomètres carrés. Cette expérience confirme l'intérêt d'une approche par traitement d'images satellitaires pour mobiliser des données d'entrée qui soient : *1)* représentatives de la réalité, *2)* sur de grandes surfaces (souci d'opérationnalité) et *3)* avec une précision spatio-temporelle en adéquation avec le modèle utilisé.

Cette étude pose aussi le problème de la relation entre les incertitudes sur les données et celles sur les résultats de la modélisation. La qualité de la modélisation dépend certes du modèle utilisé mais également de la disponibilité et de la qualité des données d'entrée et de validation. En pratique il est tentant d'utiliser toute donnée existante et la question de la pertinence de l'information ne se pose souvent que devant les difficultés d'interprétation des résultats. Chercher la meilleure adéquation entre l'échelle d'acquisition des données, l'échelle d'étude, et les besoins du modèle constitue donc un enjeu important, qui a intéressé plusieurs recherches récentes en télédétection (Puech *et al.* 2003 ; Castaings *et al.*, 2003). Les approches intégrées semblent les plus à même d'appréhender cette adéquation pour orienter de façon plus pertinente les stratégies d'acquisition et de pré-traitement des données spatialisées. Aussi, la transposition d'une telle méthode sur de plus vastes territoires nécessiterait d'analyser la sensibilité du modèle à la résolution des données d'entrée. Cette question a déjà été abordée concernant le comportement du modèle en fonction de la taille des sous-bassins définis pour les simulations (FitzHugh and Mackay, 2000) mais des incertitudes demeurent au sujet des résultats de flux d'eau et de nutriments en fonction de la résolution spatiale de la couverture cartographique des successions culturales et/ou de l'exclusion de HRU minoritaires avant la modélisation. Enfin, après la spatialisation des successions culturales traitée dans ce papier, des méthodes restent à élaborer pour représenter la diversité spatiale des pratiques culturales sur de grands territoires.

Remerciements

Ce travail a été financé dans le cadre du projet INRA-DADP ARPENT (Institut national de la recherche agronomique ; Délégation permanente à l'agriculture, au développement et à la prospective ; Agroalimentaire régionale, politique publique, entreprises et territoires ruraux) soutenu par le contrat de plan État-Région Pays de la Loire.

Références

Arlot, M.P. (1999) Nitrates dans les eaux : drainage acteur, drainage témoin. Thèse de doctorat, Université de Paris VI, 446 p.

Arnold, J.G., Srinavisan, R., Muttiah, R.S. and Williams, J. R. (1988) Large area hydrologic modeling and assessment, Part 1: Model Development. Journal of the American Water Resources Association, vol. 34, n° 1, p. 73-90.

Arnold, J.G., Allen, P.M. and Bernhardt, G.A. (1993) A comprehensive surface-groundwater flow model. Journal of Hydrology, n° 142, p. 47-69.

Arnold, J.G., Muttiah, R.S., Srinavisan, R. and Allen, P.M. (2000) Regional Estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. Journal of Hydrology, n° 227, p. 47-69.

Assako Assako, R.-J. et Tonyé, E. (2000) Évaluation comparative des méthodes pour la délimitation d'un périmètre urbain par télédétection. Télédétection, vol. 1, p. 305-325.

Beziers La Fosse, A., Canon, H., Crespo, J.C., Jezegou, A., Liu, Q., Nivet, D., Paepegaey, J.C., Picault, S., Rocheteau, E., Sauvage, R. et Viau, P.H. (2001) Étude des pratiques de fertilisation sur le bassin versant de la Moine. Rapport de synthèse, École Supérieure d'Agronomie d'Angers, 65 p.

Bioteau, T., Bordenave, P., Laurent, F. et Ruelland, D. (2002) Evaluation des risques de pollution diffuse par l'azote d'origine agricole à l'échelle de bassins versants : intérêts d'une approche par modélisation avec SWAT. Ingénieries, n° 32, p. 3-13.

Boegh, E., Thorsen, M., Butts, M.B., Hansen, S., Christiansen, J.S., Abrahamsen, P., Hasager, C.B., Jensen, N.O., Van der Keur, P., Refsgaard, J.C., Schelde, K., Soegaard, H. and Thomsen, A. (2004) Incorporating remote sensing data in physically based distributed agro-hydrological modelling. Journal of Hydrology, n° 287, p. 279-299.

Calligee (1998) Etude préalable à l'instauration des périmètres de protection – prise d'eau du Ribou, Maine et Loire. Ville de Cholet, Nantes, vol. B., part. 1, 35 p.

Castaings, W., Le Dimet, F.-X. et Dartus, D. (2003) Assimilation de données in situ et télédétection pour la modélisation hydrologique. Bulletin de la Société française de photogrammétrie et télédétection, n° 172, p. 11-21.

Civco, D.L. and Hurd, J.D. (1991) Multitemporal multisource land cover mapping for the State of Connecticut. Proceedings of the 1991 Fall Meeting of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Atlanta (GA), p. 141-151.

Civco, D.L., Hurd, J.D., Wilson, E.H., Song, M. and Zhang, Z. (2002) A comparison of land use and land cover change detection methods. Proceedings of the American Society for Photogrammetry & Remote Sensing Annual Convention, 22-26 avril 2002, Washington, D.C., p. 24-36.

Eckhardt, K. and Arnold J.G. (2001) Automatic calibration of a distributed catchment model. Journal of Hydrology, n° 251, p.103-109.

Eerens, H., Hemelings, T. and Gombeer, R. (1991) An integrated modelling approach for the spectral identification of crops. Proceedings of the 5th international Colloquium Physical measurements and Signatures in Remote Sensing, Courchevel, France, 14-18 January 1991, Edition ESA SP-319, p. 565-568.

Euriat, A. et Tritz, F. (2002) Cartographie des sols et de leur vulnérabilité aux pollutions agricoles, bassin versant de la Moine. Mémoire de maîtrise, Université Poincaré, Nancy, 63 p.

FitzHugh, T.W. and Mackay D.S. (2000) Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model. Journal of Hydrology, n° 236, p. 35-53.

Flouzat, G. (1988) Morphologie mathématique et analyse des images de télédétection. Photo-interprétation, n° 88-5, p. 1-16.

Girard, M-C. et Girard, C. (1999) Traitement des données de télédétection. Dunod, Paris, 529 p.

Huete, A.R. (1988) A soil-adjusted végétation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, vol. 25, p. 295-309.

Jakubauska, M.E., Legates, D.R. and Kastens, J. H (2002) Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. Computers and Electronics in Agriculture, n° 37, p. 127-139.

Laurent, F. et Rossignol, J.-P. (2003) Cartographie des propriétés hydriques des sols à partir de la lithologie et des pentes – Application au bassin versant de la Moine (France, Maine-et-Lore). Étude et Gestion des Sols, vol. 10, n° 3, p. 155-172.

Lo, T.H.C., Scarpace, F.L. and Lillesand T.M. (1986) Use of multi-temporal spectral profiles in agricultural land-cover classification. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 52, p. 535-544.

Michaud, A.R., Lauzier, R. et Laverdière, M.R. (2002) Description du système de transport du phosphore dans le bassin versant du ruisseau au Castor. Agrosol, vol. 13, n° 2, p. 124-139.

Nash, J.E. and Suttcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models, a discussion of principles. Journal of Hydrology, n° 10, p. 282-290.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R. and Williams, J.R. (2002) Soil and Water Assessment Tool User's Manual: Version 2000. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Blackland Research Center, Temple, 438 p.

Oetter, D.R., Cohen, W.B., Berterretche, M., Maiersperger, T.K. and Kennedy, R.E. (2000) Land cover mapping in agricultural setting using multiseasonal Thematic Mapper data. Remote Sensing of Environment, n° 76, p. 139-155.

Panigrahy, S. and Sharma, S.A. (1997) Mapping of crop rotation using multidate Indian Remote Sensing Satellite digital data. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, vol. 52, p. 85-91.

Puech, C., Dartus, D., Bailly, J.-S. et Estupina-Borell, V. (2003) Hydrologie distribuée, télédétection et problèmes d'échelle. Bulletin de la Société française de photogrammétrie et télédétection, n° 172, p. 11-21.

Robbez-Masson, J.-M., Wassenaar, T., Andrieux, P. et Baret, F. (2001) Reconnaissance par télédétection rapprochée des vignes et analyse de leur structure spatiale à l'aide d'une analyse fréquentielle intra-parcellaire : Application au suivi des effets des pratiques culturales. Ingénieries, n° 27, p. 59-67.

Rouse, J.W., Hass, R.H., Schell, J.A., Deering D.W. and Harlan J.C. (1974) Monitoring the vernal advancement (greenwave effect) of natural vegetation. NASA, Goddard Space Fight Center, Type III, final report, Greenbelt (MD), 371 p.

San Miguel-Ayanz, J. and Biging, G.S. (1997) Comparison of single-Stage and multi-Stage classification approaches for cover type mapping with TM and SPOT data. Remote Sensing of Environment, n° 59, p. 92-104.

Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinavisan, R. and Hauck, L.M. (2001) Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. Journal of the American Water Resources Association, vol. 37, n° 5, p. 1169-1188.

SCEES (Service central des enquêtes et des études statistiques) (2000) Agreste, Recencement Agricole 2000. Ministère de l'Agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales, http://www.agreste.agriculture.gouv.fr

Srinavisan, R., Ramanarayanan, T., Wang, H. and Jayakrishnan, R. (1997) Hydrologic modeling of the Rio Grande/Rio Bravo basin. Final report, Texas Agricultural Experiment station, Blackland Research Center, Temple, 38 p.

USDA (United States Department of Agriculture) (1972) National Engineering Handbook, section 4, hydrology. Soil Conservation Service, Washington, D.C.

Weber, C., Hirsh, J. et Serradj, A. (1997) Pour une autre approche de la délimitation urbaine : application à Strasbourg (France). P. 225-237, *in* Dubois, J.-M.M., Donnay, J.-P., Ozer, A., Boivin, F. et Lavoie, A. (réd.) Télédétection des milieux urbains et périurbains. Universités francophones, AUPELF, Montréal, 361 p.