

Zonage prédictif des terroirs viticoles à partir de secteurs pris comme référence

S. Salvador₍₁₎* , P. Lagacherie₍₁₎ et R. Morlat₍₂₎

(1) INRA - Centre de recherches de Montpellier - Laboratoire de science du sol - 2, place P. Viala, 34060 Montpellier CEDEX 1

(2) INRA - Centre de recherches d'Angers - Unité de Recherches sur la Vigne et le Vin - 49, rue G. Morel, BP 57, 49071 Beaucozoué CEDEX

* adresse actuelle : INRA - Centre de recherches d'Orléans - SESCPF - Ardon - 45160 Olivet

RÉSUMÉ

Dans un contexte concurrentiel croissant sur le marché des vins, de nombreuses méthodes de caractérisation des terroirs viticoles ont été développées. Parmi celles-ci, une méthode synthétique, prenant en compte plusieurs caractéristiques du milieu, est actuellement testée dans l'Anjou. Cependant, la phase de cartographie est relativement lourde et est un frein à sa généralisation. Une méthode d'automatisation et d'allègement de la cartographie des terroirs viticoles, basée sur les corrélations spatiales entre ces derniers, est proposée dans cet article. Cette méthode consiste en l'apprentissage des lois de répartition des terroirs sur un secteur déjà cartographié, puis en l'application de celles-ci sur des zones non prospectées, afin de prédire l'extension spatiale des unités de terroir. Quatre grands ensembles de terroirs, de complexité différente, sont testés indépendamment. La prédiction obtenue peut prendre deux formes : établissement d'une carte des terroirs viticoles, ou bien prédiction des terroirs à l'échelle parcellaire. Les résultats obtenus montrent que la qualité de la prédiction et l'allègement éventuel sont fortement corrélés à la complexité du milieu étudié. Une automatisation et un allègement conséquent de la cartographie des terroirs sont manifestes dans le cas de milieux de complexité relativement faible, c'est-à-dire dont la taille moyenne de la plage cartographique est de l'ordre d'une dizaine d'hectares.

Mots clés

Terroirs viticoles, secteurs de référence, zonage, Systèmes d'Information Géographique.

SUMMARY

PREDICTIVE ZONING OF VINE-GROWING "TERROIRS" TAKEN FROM RÉFÉRENCE SECTORS

Many ways of characterising the vine-growing "terroir" have been developed in the recent years. A synthetic method takes into account several characteristics of the environment. However, this method requires much observations of the geology and the soil. A method of automatization of soil survey using mapping-laws based on neighbourhood relationships and established in a reference area is being tested in the Anjou region (figure 1) to reduce this constraint. This method can only be applied on a homogenous geomorphologic environment called Small Natural Region. Four Small Natural Regions (maps 1 and 2, table 1) with different complexities (table 2) are tested. Two types of prediction can be made : the setting up of a map of the vine-growing "terroir", or the prediction at the plot scale. The results show that the quality of the prediction is generally related to the complexity of the Small Natural Region as the laws are applied either in the reference (table 3) or in the validation areas (table 4). A large part of this error is due to delimitation errors, so that the real prediction error (position error above 35 meters) is always less than 20 % for a density of one soil sample/ha. The density of

soil samples can be reduced to 55 % with regard to the density of soil samples really done for the simplest Small Natural Region (table 6). The map 3 shows prediction-maps for this Small Natural Region for different densities of soil samples. For the prediction at the plot scale, our first approach was to consider it at 50 x 50 meter pixel. The figures 3a to 3d and 4a to 4d present the omission and commission errors, according to the average number of "terroir" units predicted per pixel. The best prediction is considered to be obtained for a minimum average of the two errors. This is got in every Small Natural Region for 70 to 80 % of the real average number of "terroir" units per pixel (table 7 and figure 5).

Key-words

Vine-growing "terroir", reference areas, zoning, Geographical Information Systems

RESUMEN

DELIMITACIÓN PREDICHA DE LOS TERRUÑOS VITÍCOLAS A PARTIR DE SECTORES DE REFERENCIA

En el contexto concurrencial creciente sobre los mercados de vinos, numerosos métodos de caracterización de los terruños vitícolas se han desarrollado. Entre estos, un método sintético, que toma en cuenta varias características del medio, está actualmente probándose en Anjou. Sin embargo, la fase de cartografía es relativamente pesada y resulta un freno a su generalización. Un método de automatización y de aligeramiento de la cartografía de los terruños vitícolas, basado sobre las correlaciones espaciales entre estos está propuesto en este artículo. Este método consiste en el aprendizaje de las leyes de repartición de los terruños en un sector ya cartografiado, y después en la aplicación de estas en las zonas no prospectadas, afín de predecir la extensión espacial de las unidades de terruño. Cuatro grandes conjuntos de terruños, de complejidad diferente han sido probados independientemente. La predicción obtenida puede tomar dos formas: establecimiento de una carta de los terruños vitícolas, o bien predicción del terruño al nivel parcelario. Los resultados obtenidos muestran que la calidad de la predicción y el aligeramiento eventual están fuertemente correlacionados a la complejidad del medio estudiado. Una automatización y un aligeramiento consecuente de la cartografía de los terruños son manifiestos en el caso de los medios de complejidad relativamente pequeña, es decir cuyo tamaño mediano de la unidad cartográfica es del orden de una decena de hectáreas.

Palabras claves

Terruños vitícolas, sectores de referencia, sistemas de información geográfica.

La viticulture française s'est orientée depuis de nombreuses années vers une politique de qualité avec la mise en place du système des Appellations d'Origine Contrôlée (A.O.C.), permettant d'exprimer la spécificité de la production d'un vignoble. Il existe au sein même d'une appellation une variabilité des facteurs naturels (géologiques, pédologiques, paysagers), dont l'effet sur la vigne peut conférer au vin une certaine typicité. Cet ensemble constitue les facteurs naturels du terroir (Asselin *et al.*, 1992). Face à une standardisation du vin liée à la mondialisation, la prise en compte des facteurs du terroir peut permettre de personnaliser et d'authentifier les vins, afin de mieux les valoriser.

Diverses méthodes de caractérisation des terroirs viticoles ont été développées. Les approches visant à rechercher des liaisons simples entre certaines caractéristiques des sols (pH, granulométrie, teneur en calcaire,...) et la qualité de la vendange se sont souvent soldées par des échecs (Noble, 1979) ou des résultats contradictoires suivant les régions (Gadille, 1967; Seguin, 1983). L'effet du terroir sur la qualité du vin serait donc le produit d'une interaction complexe entre plusieurs caractéristiques du milieu. Dès lors, en l'absence de modèles suffisamment fins permettant de rendre compte de ces interactions, des méthodes de caractérisation synthétiques des terroirs viticoles ont été développées. En particulier, l'Unité de Recherches sur la Vigne et le Vin du centre INRA d'Angers a développé une méthode de caractérisation intégrée (Morlat, 1989; Morlat et Asselin, 1993), où la région viticole est considérée comme un ensemble fini de terroirs élémentaires (Unité Terroir de Base, UTB), constituant des entités homogènes vis-à-vis de la géologie, du sol, et de l'environnement paysager. Le zonage des terroirs viticoles constitue une des étapes de leur caractérisation. Il s'effectue par le biais d'une cartographie détaillée de la zone étudiée (environ 1 sondage / ha). Cette phase de terrain demande un investissement important tant en moyens qu'en temps, qui limite actuellement sa généralisation sur les zones potentiellement intéressées par une approche de caractérisation des terroirs. Pour diminuer cette contrainte, il convient de mettre au point des techniques susceptibles de l'alléger. C'est dans cette perspective que s'inscrit l'étude présentée dans cet article.

Si les tentatives de définition du terroir sont nombreuses, peu d'auteurs se sont intéressés à des techniques permettant de formaliser et d'alléger le volet du zonage. Certains auteurs ont tenté de réaliser conjointement définition et zonage. Ainsi, Doledec (1995) a défini le terroir comme étant la combinaison de facteurs pédologiques et de facteurs exogènes (pente et orientation), dont elle a réalisé une classification. Cependant, cette méthode nécessite la connaissance de la couverture pédologique à une échelle suffisamment précise. Or, celle-ci n'est pas toujours disponible. Laville (1990) a utilisé des méthodes statistiques pour délimiter les terroirs définis par les viticulteurs, en les corrélant à des

variables exogènes et lithologiques (altitude, pente, exposition, géologie...). L'application d'une méthode similaire à la cartographie des UTB dans l'Anjou n'a toutefois pas donné de résultats suffisamment précis.

Dans cet article, on se propose de tester la méthode des secteurs de référence développée par Favrot (1989). Cette méthode est appliquée à quatre types de milieux différents, représentatifs des terroirs viticoles rencontrés dans le vignoble angevin. Elle consiste à réaliser une cartographie détaillée des sols sur une aire échantillon (le secteur de référence), puis à réaliser une prospection allégée sur d'autres secteurs (les secteurs de validation) en s'appuyant sur les connaissances (nature et mode de distribution des sols) acquises au sein du secteur de référence. Elle n'est applicable qu'au sein d'une Petite Région Naturelle (PRN), dont le secteur de référence doit être représentatif. Cependant, les lois de distribution des sols dégagées à l'occasion de l'étude du secteur de référence ne sont connues que des pédologues l'ayant cartographié. Souvent, seuls ces derniers pourront réaliser une prospection allégée sur d'autres secteurs, ce qui limite l'intérêt de la méthode. Afin de permettre une utilisation plus large du savoir-faire cartographique acquis sur le secteur de référence, Lagacherie (1992) a proposé une méthode permettant de le formaliser mathématiquement, et de le simuler au moyen d'un outil informatique. Les résultats obtenus pour la délimitation d'unités de sols dans la moyenne vallée de l'Hérault montrent que les cartes de prédiction obtenues atteignent la qualité d'une prospection classique. Cette méthode est donc potentiellement applicable pour alléger la délimitation des terroirs viticoles.

Il est cependant nécessaire de savoir si de tels résultats sont transposables dans une autre région. En effet, la qualité des résultats dépend fortement de l'organisation pédologique caractérisant chaque région (mode d'assemblage des sols - ou ici de terroir - tel qu'il ressort sur une carte détaillée). Ce mode d'organisation est plus ou moins complexe, et conditionne l'aptitude des lois à reproduire la carte réelle. Il est également plus ou moins répétitif, attestant ainsi de la représentativité du secteur de référence. Il est donc nécessaire de savoir dans quelle mesure la complexité et la répétitivité du milieu abordé ont un impact sur la qualité des prédictions, et s'il existe des indicateurs pertinents permettant d'évaluer cette qualité.

SITE DE L'ÉTUDE

Description du site

La méthode de caractérisation des terroirs viticoles développée par l'URVV du centre INRA d'Angers est actuellement testée à l'échelle régionale sur une surface d'environ 40 000 hectares, au sud d'Angers. 12 000 hectares ont déjà été cartographiés, principalement dans la zone d'appellation Coteaux

du Layon. Ceci constitue un jeu de données suffisant pour tester les méthodes d'allégement envisagées. La zone d'étude recoupe principalement trois communes situées de part et d'autre d'un affluent de la Loire, le Layon (figure 1).

Quatre grands ensembles topogéologiques, de nature et de complexité très différentes, la composent (carte 1) :

- les formations schisteuses du Précambrien (Série des Mauges) en rive gauche du Layon, au sein desquelles deux milieux de topographie différente sont distingués : une zone en bordure des cours d'eau ("Briovérien 2"), recouverte de placages cénomaniens, et une zone plus élevée au sud, au relief plus tabulaire, éloignée du Layon ("Briovérien 1"),

- les formations schisteuses et volcaniques de l'Ordovicien (complexe de Saint-Georges-sur-Loire) au nord-est de la zone ("Ordovicien"),

- les formations complexes du Carbonifère (Namurien) en rive droite du Layon ("Houiller").

Il existe également d'autres ensembles, de taille nettement plus réduite : complexe du château de Montaigu et Eocène, dans la partie sud-ouest de la zone.

Secteurs de référence et de validation

Les quatre grands ensembles topogéologiques évoqués sont considérés comme quatre Petites Régions Naturelles, possédant chacun leur propre logique de distribution des terroirs.

Les secteurs de référence et de validation sont établis sur chacune des PRN (carte 2). Les secteurs de référence devant

être représentatifs de la PRN, ils sont établis dans une zone dont on estime les conditions topographiques et géologiques caractéristiques de la PRN.

La taille des secteurs de référence (tableau 1) est d'environ 425 hectares, sauf pour le secteur de référence de la PRN Briovérien 1 (155 ha), car cette dernière occupe une surface trop réduite. Les secteurs de validation sont situés à une distance inférieure à 7 km des secteurs de référence, et ont une surface variable, dépendant de la surface cartographiée au sein de chacune des 4 PRN.

MÉTHODE D'ÉTUDE

La méthode proposée par Lagacherie (1992) repose sur les corrélations spatiales existant entre les unités de sols d'un secteur de référence précédemment cartographié. Elle permet la prédiction d'unités de sols sur un secteur non cartographié à partir de quelques points de sondage. Nous utilisons donc cette méthode pour prédire des unités de terroir.

Formalisation des lois de voisinage

On considère deux étapes dans la formalisation des lois de voisinage (Favrot et Lagacherie, 1993) : une première étape d'extraction des lois sur le secteur de référence, et dans un second temps, une utilisation de ces lois pour prédire les sols à l'extérieur du secteur de référence.

Figure 1 : Localisation géographique de la zone d'étude.

Figure 1 : Location of the study area.

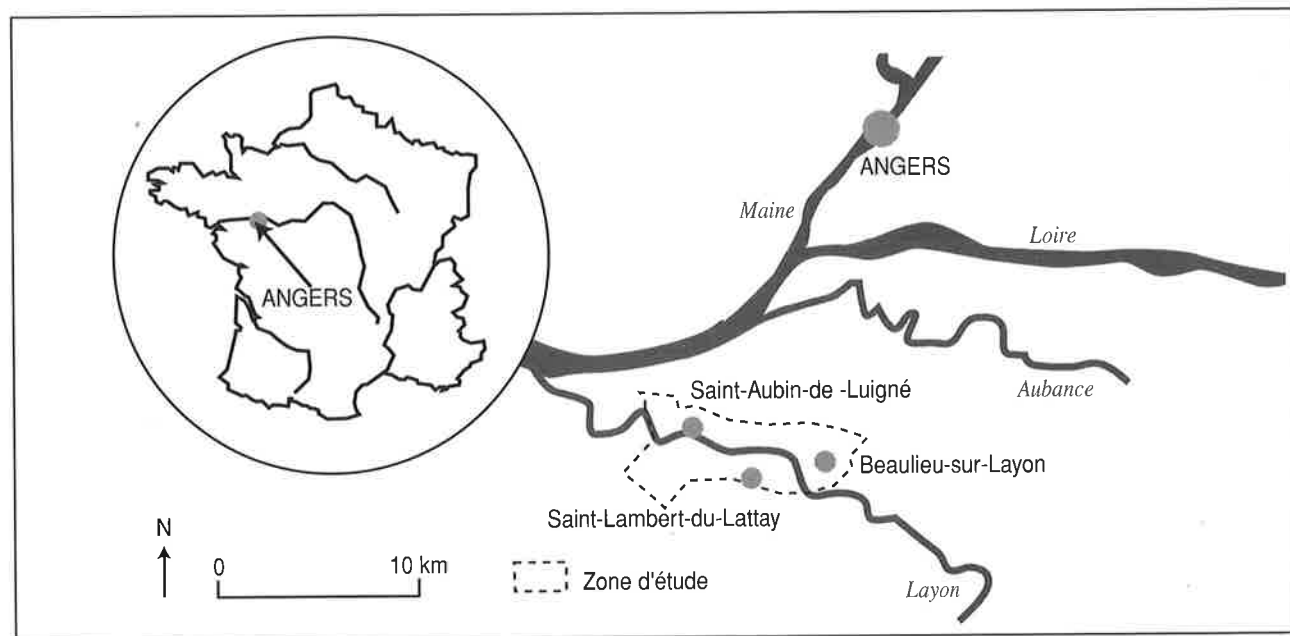


Tableau 1 : Caractéristiques des secteurs de référence et de validation.**Table 1** : Characteristics of the reference and validation areas.

	Petite Région Naturelle			
	Briovérien 1	Briovérien 2	Ordovicien	Houiller
Taille (ha) du secteur de référence	155	429	424	425
Taille (ha) du secteur de validation	287	679	566	136
Eloignement moyen (km) au centre du secteur de référence	1,2	2,6	2,7	6,8

Extraction des lois de voisinage

L'extraction des lois de voisinage est réalisée à partir d'un algorithme (Lagacherie *et al.*, 1995) fonctionnant selon le principe suivant. La carte des terroirs viticoles est transformée en une grille de points. Chacun des points du secteur de référence est tour à tour considéré comme un point de sondage.

Pour chacun des points de sondage, les autres points du secteur de référence sont alors affectés à des "zones d'isoprédiction" (figure 2). Celles-ci sont définies en fonction de la distance par rapport au point de sondage, définissant ainsi des couronnes concentriques, et de la position relative en altitude des autres points par rapport à ce point de sondage (plus haut, plus bas, même altitude).

Les points sont ensuite dénombrés par unité de terroir du secteur de référence à laquelle ils appartiennent, et par zone d'isoprédiction. En répétant ce processus à partir de tous les points du secteur de référence, il est ainsi possible d'obtenir les probabilités d'apparition d'unités de terroir en un point, sachant, d'une part, que l'unité de sol est reconnue sur le sondage, et connaissant, d'autre part, la zone d'isoprédiction dans laquelle se trouve le point en question.

Prédiction des sols à l'extérieur du secteur de référence

L'utilisation des lois de voisinage pour cartographier les terroirs à l'extérieur du secteur de référence est un processus à étapes. Une succession de sondages est réalisée sur le terrain. Chaque sondage suscite à son tour la mobilisation des lois de voisinage qui modifient ou affinent les choix précédemment établis. Les prédictions d'unités de sols prennent la forme, en tout point de l'espace, d'une série de probabilités de présence des différentes unités de sol du secteur de référence.

Afin d'obtenir une prédiction finale qui tienne compte de chaque sondage, les probabilités sont combinées entre elles avec une pondération tenant compte de la distance du point considéré à chaque point de sondage, de façon à privilégier les sondages les plus proches.

Ainsi, la probabilité p d'apparition d'une UTB j au point à estimer x est donnée par la formule suivante :

$$p_j(x, f) = \sum_{(k=2 \dots f)} [w_k \pi_{jk}(x)]$$

π_{jk} : probabilité d'apparition de la j ème unité de sol lors du k ème sondage

w_k : coefficient de pondération du sondage k .

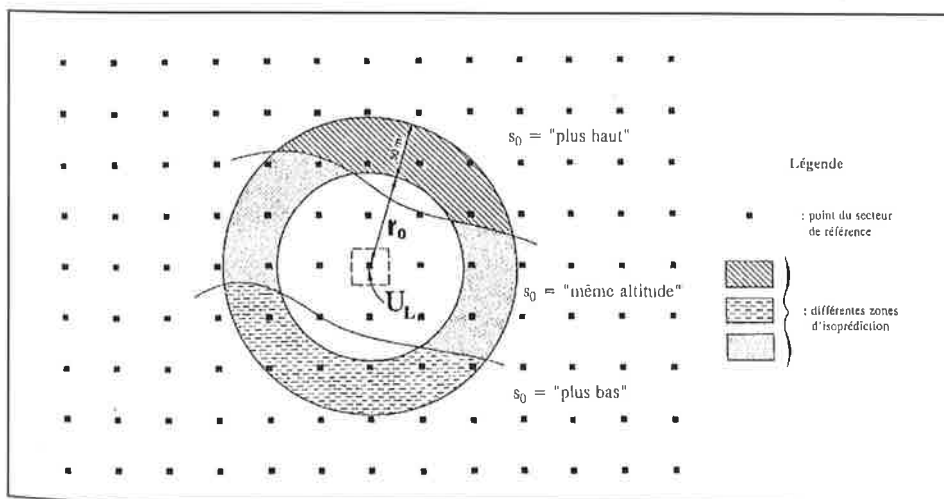


Figure 2 : Formalisation des lois de voisinage : définition des zones d'isoprédiction (d'après Favrot et Lagacherie, 1993).

Figure 2 : Formulation of the laws based on neighbourhood relationships of soil units : definition of iso-prediction areas (from Favrot and Lagacherie, 1993).

Le coefficient de pondération w_k est fonction inverse de la distance du point à prédire au sondage. Il permet de rendre plus ou moins compte de l'influence des règles déclenchées par les observations en fonction de leur distance par rapport au point prédit.

Interprétation des distributions de probabilités

L'interprétation des distributions de probabilités fournies par les lois de voisinage peut prendre deux formes différentes :

- Une prédiction d'unité de sol sur le point considéré ("*prédiction ponctuelle*"). Dans ce cas, l'unité choisie est celle qui obtient la probabilité maximum d'apparition. Le résultat final est une carte "raster" dont le pas est égal à celui choisi pour la densité de points. Le degré de confiance de la prédiction est alors égal à la probabilité d'apparition de l'unité choisie.

- Une prédiction des différentes unités de sol présentes sur le pixel ("*prédiction surfacique*"). Le pixel représente la surface carrée dont le point de prédiction est le centre. Nous l'utilisons ici comme parcelle théorique afin d'explorer la possibilité de délivrer une prédiction globale à l'échelle de la parcelle, plus conforme à l'attente des viticulteurs que la prédiction ponctuelle précédemment évoquée. Dans ce cas, on considère que la distribution de probabilités au point de prédiction peut être une estimation des unités présentes dans le pixel représenté par le point. Cette estimation est réalisée en choisissant un seuil de probabilité au-dessous duquel on considère l'apparition de l'unité comme non significative. Seules les unités dont la probabilité d'apparition est supérieure au seuil seront retenues dans la prédiction. Par exemple, si, en un pixel, l'unité de terroir 1 est assortie d'une probabilité d'apparition de 55 %, l'unité de terroir 3 de 30 %, et l'unité de terroir 4 de 15 %, et si le seuil est fixé à 20 %, seules les unités de terroir 1 et 3 sont retenues dans la prédiction des unités présentes dans le pixel étudié.

Choix d'une stratégie d'échantillonnage des sondages

La connaissance du degré de confiance de la prédiction réalisée permet, à la suite d'une première série de sondages, d'orienter les sondages suivants. Ainsi, ceux-ci seront effectués sur les points présentant le degré de confiance le plus faible. Cette méthode peut ainsi permettre d'alléger le travail par rapport à une stratégie d'échantillonnage systématique. En effet, si des sondages sont effectués dans un premier temps à une densité lâche, et les unités de sols ainsi que le degré de confiance déterminés, une seconde série de sondages évitera les points dont le degré de confiance est supérieur à un seuil fixé. On obtient ainsi une répartition irrégulière des points de sondage similaire à celle mise en œuvre dans une prospection classique (technique "free-survey").

Deux stratégies d'implantation des sondages sont donc testées :

- Une stratégie d'implantation systématique : les sondages sont disposés régulièrement et uniformément sur le périmètre à étudier, à différentes densités : sous-échantillonnage systématique tous les 400, 200 et 100 mètres.

- Une stratégie raisonnée d'implantation des sondages. Dans un premier temps, un sous-échantillonnage systématique est effectué tous les 400 mètres. Les points sondés au cours de la deuxième phase doivent répondre à deux conditions : avoir un niveau de confiance inférieur à un seuil fixé à 50 %, et être situés sur une grille dont la distance minimale entre les points est de 200 mètres. Cette opération est renouvelée au cours de la 3ème phase pour une distance minimale entre sondages de 100 mètres.

Application des méthodes de prédiction des terroirs

Afin d'extraire les lois de voisinage à partir des secteurs de référence choisis, une grille de points au pas de 50 mètres est construite sur les périmètres des secteurs. Les points sont renseignés quant à l'UTB présente par croisement avec la carte des terroirs viticoles. Leur altitude est déterminée par interpolation linéaire des courbes de niveau de la carte topographique de l'IGN au 1/25 000e. L'application des lois de voisinage sur les secteurs de validation s'effectue en simulant les sondages : les unités de terroir de la carte réelle sont affectées aux points de sondage.

Le SIG ARC/Info est utilisé pour manipuler l'information géographique nécessaire (altitude, carte des unités de terroir), et pour visualiser les résultats. L'extraction des lois de voisinage sur les secteurs de référence, et l'application sur les secteurs de validation sont réalisées par des programmes spécifiques, écrits en langage FORTRAN.

Méthode de validation retenue

Afin d'apprécier la qualité des résultats obtenus, les prédictions d'UTB sont comparées aux cartes issues de la prospection classique. Plusieurs modes d'estimation des erreurs sont évalués :

- l'erreur totale : la carte obtenue par prédiction des unités de sol sur le point considéré est comparée à la carte des terroirs établie sur le terrain. L'erreur de prédiction totale correspond alors à la fraction des points mal prédits, les points de sondage étant bien entendu exclus de l'évaluation.

Cette erreur totale recouvre deux types de situations de gravité différente que nous avons individualisées en décomposant l'erreur totale en deux types d'erreurs complémentaires :

- les erreurs de délimitation (notées e_d), qui dénombrent les cas où l'unité prédite correspond à l'une des UTB réellement présente au sein du pixel, mais pas en son centre. Il s'agit par conséquent d'erreurs de positionnement des limites avec la carte réelle qui sont inférieures à 35 m (soit environ la demi-diagonale d'un pixel de 50 m de côté). Or, les limites de sol (et

donc d'unités de terroir) sont souvent progressives et difficile à positionner sur le terrain (Baize, 1986; Lagacherie *et al.*, 1996). Il s'ensuit une tolérance couramment admise de 5 mm sur la carte (Legros, 1978), soit 50 m dans le cas présent, où les cartes d'UTB sont au 1/10 000e. Dès lors, les différences de positionnement ne peuvent pas être interprétées comme des erreurs significatives incombant à la méthode de prédiction,

- l'erreur de prédiction vraie évalue la fréquence des cas où l'unité prédite ne se retrouve pas dans le pixel. Il s'agit dans ce cas d'une différence significative avec la carte servant de validation, qui peut être interprétée sans ambiguïté comme une erreur de prédiction.

Afin d'évaluer la qualité des prédictions données par le pixel selon la méthode présentée dans le paragraphe "Interprétation des distributions de probabilités", deux indicateurs (Legros, 1996) sont calculés. Le premier évalue la proportion moyenne des unités "oubliées" par la prédiction, il s'agit de l'erreur par défaut (omission error). Elle est obtenue en calculant la moyenne des surfaces (exprimée en pourcentage du pixel) occupées par les unités ne figurant pas dans la prédiction mais présentes dans le pixel. Le second s'intéresse à l'erreur complémentaire de la première citée, soit la prédiction d'unités qui ne figurent pas en réalité dans le pixel. C'est l'erreur par excès (commission error). Cette erreur complémentaire est mesurée en calculant le pourcentage, par pixel, d'unités prédites mais non présentes dans le pixel.

On recherche alors le seuil de probabilité optimal, de telle manière que la prédiction obtenue présente une erreur minima-

le. Pour cela, on recherche la prédiction qui minimise la moyenne des deux erreurs précédemment décrites. Plusieurs seuils de probabilité sont testés (de 0 à 90 %). A un seuil de probabilité de prédiction fixé correspond un nombre moyen d'UTB prédites par pixel. Le nombre moyen d'UTB à prédire par pixel est plus appréhendable par le viticulteur ou le cartographe que le seuil de probabilité de prédiction. C'est donc ce nombre moyen d'UTB à prédire par pixel qui est déterminé.

RÉSULTATS

L'examen des résultats traite successivement de l'influence de la complexité des PRN sur la qualité des prédictions, des erreurs obtenues sur les secteurs de validation, de la possibilité d'allègement, et enfin de la prédiction à l'échelle parcellaire.

Influence de la complexité des PRN sur la qualité des prédictions

Des indicateurs classiques permettant de quantifier la complexité d'une carte sont calculés sur chacun des secteurs de référence (tableau 2) : nombre moyen d'unités de terroir, surface moyenne d'une unité cartographique, et quantité de limites à l'hectare. Ils permettent de rendre compte de la grande variabilité de la complexité des PRN étudiées. La PRN *Briovérien 1* est ainsi la PRN la moins complexe, la PRN *Houiller* la plus complexe, tandis que les PRN *Briovérien 2* et *Ordovicien* ont une complexité intermédiaire et voisine.

Tableau 2 : Indicateurs de complexité des secteurs de référence

Table 2 : Complexity indicators of the reference area

	Petite Région Naturelle			
	<i>Briovérien 1</i>	<i>Briovérien 2</i>	<i>Ordovicien</i>	<i>Houiller</i>
Nombre d'unités de terroir	6	11	14	15
Surface moy. des plages carto. (ha)	14	4,7	4,4	2,2
Ecart-type, ha	26	7	7	2,5
Limites (m/ha)	103	153	134	205

Tableau 3 : Erreurs de prédiction sur les secteurs de référence

Table 3 : Prediction error on reference areas

	Petite Région Naturelle				
	Nbre sond./100 ha	<i>Briovérien 1</i>	<i>Briovérien 2</i>	<i>Ordovicien</i>	<i>Houiller</i>
Erreur totale (%)	6,25	36,8	68,7	55	67,5
	25	30,5	55	41,7	53,1
	100	22,1	34,5	29	36,2

L'erreur de prédiction commise lorsque les lois de voisinage sont appliquées sur le secteur de référence lui-même est un autre indicateur de complexité, plus lié à la méthode utilisée. Il traduit la netteté d'une organisation des sols en séquences étagées selon un critère de milieu (ici toposéquence ordonnée selon l'altitude), ce que ne reflètent pas les autres indicateurs de complexité. Les résultats de l'application des lois de voisinage sur le secteur de référence lui-même sont présentés dans le *tableau 3*. Ils montrent que la qualité de la prédiction est d'autant meilleure que la PRN étudiée est simple. Néanmoins, l'application des lois sur la PRN *Briovérien 2*, dont la complexité est proche de la PRN *Ordovicien*, montre des résultats de qualité aussi faible que pour la PRN *Houiller*. Le degré d'organisation en toposéquence de la PRN *Briovérien 2* est donc a priori plus faible que celui de la PRN *Ordovicien*, à complexité égale.

Étude de l'erreur sur les secteurs de validation

L'application des lois de voisinage sur les secteurs de validation aboutit à des erreurs de prédiction totales proches de celles obtenues sur les secteurs de référence (*tableau 4*). La représentativité du secteur de référence est donc apparemment bien assurée, et reflète donc a priori une relative répétitivité du milieu sur toute l'étendue de chacune des PRN. La hiérarchie des performances selon la complexité de la PRN étudiée est respectée. Toutefois, alors que l'augmentation de l'erreur est sensible sur les autres secteurs de validation, le secteur de validation de la PRN *Briovérien 1* présente une baisse non négligeable de l'erreur de prédiction (de l'ordre de 6 à 10 %). Celle-ci peut s'expliquer en particulier par une complexité moindre du secteur de validation par rapport au secteur de référence.

Un examen de la valeur de l'erreur de prédiction totale montre qu'elle reste tout de même relativement élevée, même

pour une densité de un sondage par hectare (plus de 30 %, sauf sur la PRN *Briovérien 1*).

Cependant, l'examen du *tableau 4* montre que les erreurs de délimitation représentent une part non négligeable de cette erreur, de l'ordre de 10 à 30 % de l'ensemble des points prédits. L'erreur de délimitation est d'autant plus forte que la PRN considérée est complexe. Comme cela a été observé dans d'autres régions (Lagacherie, 1992), elle semble peu influencée par la densité des sondages. La baisse de l'erreur de prédiction totale en relation avec l'augmentation de la densité de sondages est donc à mettre à l'actif de la baisse de l'erreur de prédiction vraie. Toutefois, la densité de sondages semble avoir une influence sur la valeur de l'erreur de délimitation pour la PRN *Houiller*. Cependant dans ce cas, compte tenu de la taille réduite des plages cartographiques, les erreurs de délimitation peuvent être difficilement distinguées des erreurs de prédiction vraie.

L'erreur de délimitation pouvant a priori être considérée comme négligeable, l'examen du *tableau 4* montre que l'on peut obtenir des erreurs de prédiction vraies comprises entre 10 et 20 %, pour une densité de un sondage/ha, selon la PRN étudiée. L'erreur de prédiction vraie au sein de la PRN *Briovérien 2* est plus forte que sur la PRN *Ordovicien* pour une complexité voisine, et confirme ainsi l'hypothèse de degré d'organisation en toposéquence moins marqué.

Allègement

Afin de répondre à l'objectif d'allègement de la phase de cartographie, la stratégie d'échantillonnage raisonné est testée. L'examen du *tableau 5* montre que pour un allègement parfois conséquent (jusqu'à 55 %), l'accroissement de l'erreur de prédiction est très faible. L'allègement effectué altère donc très peu la précision de la prédiction (3 % au maximum). La complexité du secteur étudié compte pour beaucoup dans la possibilité ou non

Tableau 4 : Erreurs de prédiction sur les secteurs de validation : erreur totale, erreur de délimitation (e_d), et erreur de prédiction vraie (e_{pv}).
Table 4 : Prediction errors on validation areas : total error, delimitation error (e_d), and real prediction error (e_{pv}).

Petite Région Naturelle					
	Nbre sond./100 ha.	<i>Briovérien 1</i>	<i>Briovérien 2</i>	<i>Ordovicien</i>	<i>Houiller</i>
erreur totale (%)	6,25	30,1	66,4	61,6	67,3
	25	19,9	54,7	47,7	58,3
	100	15,9	40	35,9	45,5
e_d (%)	6,25	10	15,1	16,2	17,5
	25	9,5	18,1	19,6	20,4
	100	9,1	19,5	23	31,1
e_{pv} (%)	6,25	20,1	51,3	45,4	49,8
	25	10,4	36,6	28,1	37,9
	100	6,8	20,5	12,9	14,4

Tableau 5 : Allègement (a) réalisé par utilisation d'une stratégie de sondages raisonnée, (b) augmentation de l'erreur de prédiction totale en fonction de la distance minimum d'échantillonnage.

Table 5 : (a) Reduction obtained by the use of rational sampling strategy and (b) increase of the total prediction error according to the minimum distance between the soil samples.

PRN	distance mini. entre sondages = 200 m		distance mini. entre sondages = 100 m	
	a	b	a	b
Briovérien 1	- 31 %	- 0,3 %	- 55 %	+ 0,5 %
Briovérien 2	- 7 %	+ 1,1 %	- 22 %	+ 3,1 %
Ordovicien	0 %	-	- 13 %	+ 0,7 %
Houiller	0 %	-	0 %	-

Tableau 6 : Densité de sondages réalisée sur le terrain, densité de sondages nécessaire pour la méthode de prédiction et erreurs de prédiction totale et de prédiction vraie.

Table 6 : Density of soil samples really done, density of soil samples necessary for the prediction method, and total and real prediction errors.

PRN	Densité de sondages réalisés sur le terrain (nbre ha./sond.)	Densité de sondages nécessaires (nbre ha./sond.)	Erreur de prédiction totale et de prédiction vraie (%)
Briovérien 1	2,7	6	19,6 / 9,8
Briovérien 2	1,3	1,3	43,1 / 23,7
Ordovicien	1,1	1,2	36,6 / 12,9
Houiller	0,8	1	45,5 / 14,4

de diminuer le nombre d'échantillons. L'allègement est très important sur la PRN *Briovérien 1*, tandis qu'il est quasiment nul sur la PRN *Houiller*. Le critère de complexité "taille moyenne de la plage cartographique au sein de chaque PRN" semble le meilleur indicateur de l'allègement réalisable.

Cet allègement par rapport à une stratégie systématique de sondages est ensuite comparé avec la densité de sondages effectivement réalisé sur le terrain pour établir la carte. Si l'on prend en compte l'allègement réalisé pour une distance minimum de 100 mètres entre les sondages, on remarque à l'examen du *tableau 6* que la densité de sondages simulée se rapproche de la densité de sondages effectuée sur le terrain. L'erreur de prédiction totale est fonction de la complexité de la PRN considérée : elle varie de 20 % environ pour la PRN *Briovérien 1* à plus de 45 % pour la PRN *Houiller*. L'erreur de prédiction vraie varie de 10 à 24 %. Dans les deux cas, on remarque de nouveau que les erreurs au sein de la PRN *Briovérien 2* sont plus importantes qu'au sein de la PRN *Ordovicien*. Pour la PRN *Briovérien 1*, il est possible de diminuer de manière significative le nombre de sondages pour une baisse très faible de la qualité de la prédiction. Ainsi, un échantillonnage d'un sondage pour 6 ha, beaucoup plus faible que celui réalisé sur le terrain (1 sondage pour 2,7 ha), n'altère la précision de la prédiction que de 3 % environ. Par conséquent,

un allègement d'environ 55 % par rapport au nombre de sondages observés est réalisable au sein de cette PRN. Il n'est pas possible sur les autres PRN sans une forte augmentation de l'erreur de prédiction. Un exemple d'évolution de la précision des cartes obtenues est donné en *carte 3* pour la PRN *Briovérien 1*, pour différentes densités de sondages, en stratégie d'échantillonnage raisonné.

Prediction à l'échelle parcellaire

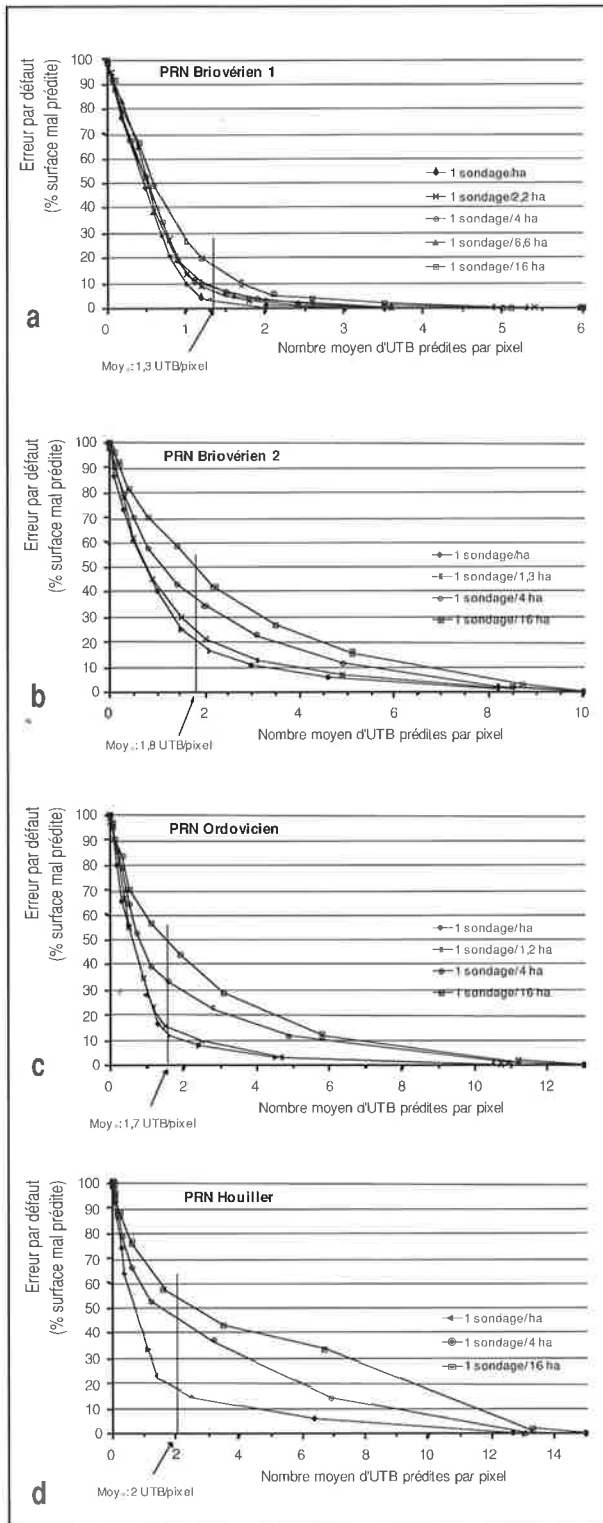
Les courbes présentées en *figures 3a à 3d* et *4a à 4d* présentent respectivement l'évolution des erreurs par défaut et par excès en fonction du nombre moyen d'UTB prédites par pixel.

L'examen de ces figures permet de voir que la complexité de la PRN a un impact direct sur la forme des courbes. Pour l'erreur par défaut, la forme exponentielle inverse est d'autant plus marquée que la PRN considérée est simple. Pour l'erreur par excès, la PRN la plus simple (*Briovérien 1*) présente une forme sigmoïde que l'on ne retrouve pas sur les autres PRN. Les formes observées traduisent une erreur d'autant plus élevée que la PRN considérée est complexe.

Afin de poursuivre l'interprétation des résultats, nous ne considérerons par la suite que les courbes correspondant, pour chaque PRN, à la densité de sondage optimale. Au vu des courbes présentées, celle-ci correspond aux densités précé-

Figures 3a à 3d : Erreur par défaut en fonction du nombre moyen d'UTB prédites par pixel.

Figure 3a to 3d : Omission error according to the average number of "UTB" predicted per pixel.



Figures 4a à 4d : Erreur par excès en fonction du nombre moyen d'UTB prédites par pixel (UTB prédites mais non présentes au sein du pixel).

Figure 4a to 4d : Commission error according to the average number of "UTB" predicted per pixel. ("UTB" predicted but not present within the pixel).

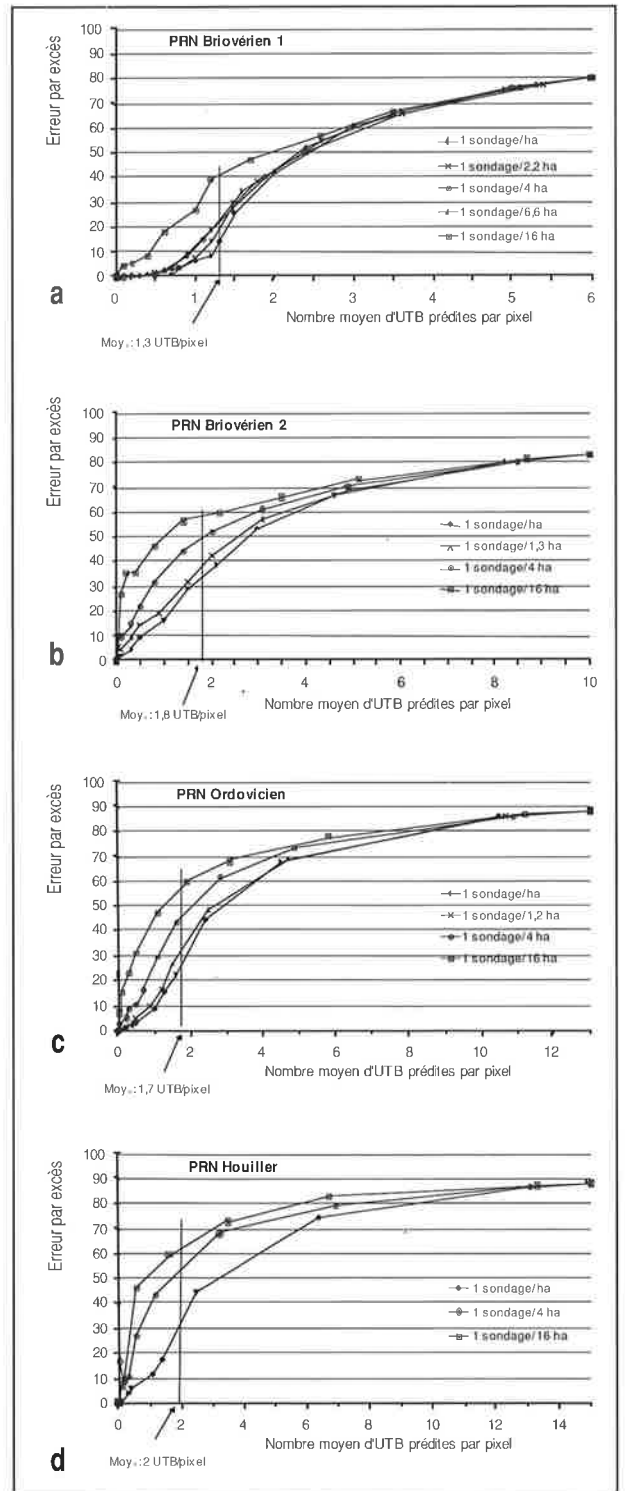


Tableau 7 : Principaux indicateurs pour une prédiction considérée comme optimale (minimisation de la moyenne des erreurs par défaut et par excès).

Table 7 : Main performance indicators for a prediction considered as optimal (minimum sum of the omission and commission errors).

PRN	Nbre moyen unités prédites/pixel	Surf./sondage (ha)	Erreur par défaut (%)	Erreur par excès (%)
Briovérien 1	1,1 (1,3*)	6	12,6	12,3
Briovérien 2	1,4 (1,8*)	1,3	31,3	30,3
Ordovicien	1,2 (1,7*)	1,2	24	15,9
Houiller	1,4 (2*)	1	22,9	17,3

* : nombre moyen réel d'UTB par pixel.

demment sélectionnées, soit : 1 sondage/ha pour la PRN *Houiller*, 1 sondage/1,2 ha pour la PRN *Ordovicien*, 1 sondage/1,3 ha pour la PRN *Briovérien 2*, et 1 sondage/ 6 ha pour la PRN *Briovérien 1*.

La figure 5 donne, pour chacune des courbes retenues, l'évolution de la moyenne des deux erreurs (par défaut et par excès) en fonction du nombre moyen d'UTB prédites. Le tableau 7 donne alors pour chacune des PRN la valeur du nombre moyen d'UTB prédites par pixel, la densité de sondages, ainsi que la valeur de chacune des erreurs, pour la valeur minimale de cette moyenne. La valeur de la moyenne des deux erreurs est variable selon la PRN considérée, on remarque néanmoins qu'elle est beaucoup plus élevée sur la PRN *Briovérien 2* que sur les PRN *Houiller* et *Ordovicien*. Cette tendance était déjà observée dans une moindre mesure pour une prédiction ponctuelle. Une prédiction optimale semble être obtenue pour un nombre moyen d'UTB prédites de l'ordre de 0,7 à 0,8 fois le nombre moyen réel d'UTB par pixel, quelle que soit la PRN. Il semble donc que l'on puisse raisonner de manière globale, et établir un nombre moyen optimal d'UTB à prédire par pixel dès lors que le nombre moyen réel d'UTB par pixel est connu.

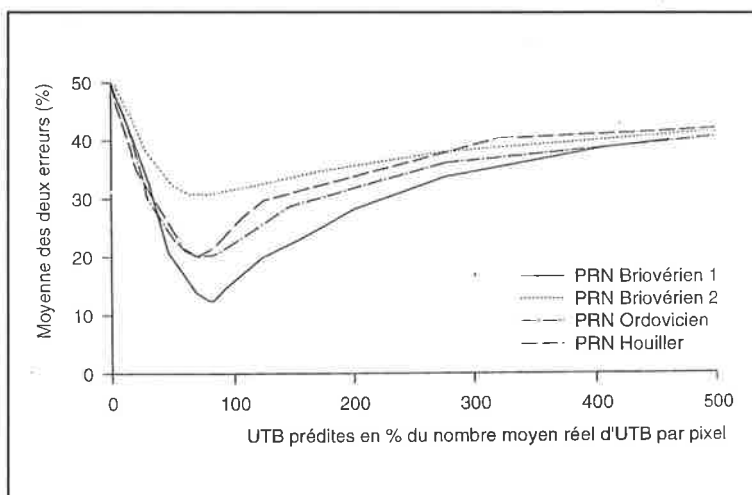
CONCLUSION

L'objectif de ce travail était de tester la méthode des secteurs de référence pour tenter de modéliser l'extension spatiale des terroirs dans le vignoble de l'Anjou. Les principaux résultats obtenus montrent que :

- la prédiction peut être fournie de façon variable en fonction des besoins : établissement d'une carte des terroirs viticoles de l'ensemble

Figure 5 : Moyenne des erreurs par excès et par défaut en fonction du nombre moyen d'UTB prédites par pixel (en % du nombre moyen réel d'UTB par pixel).

Figure 5 : Average of the omission and commission errors according to the average number of "UTB" predicted per pixel (in % of the real mean number of "UTB" per pixel).



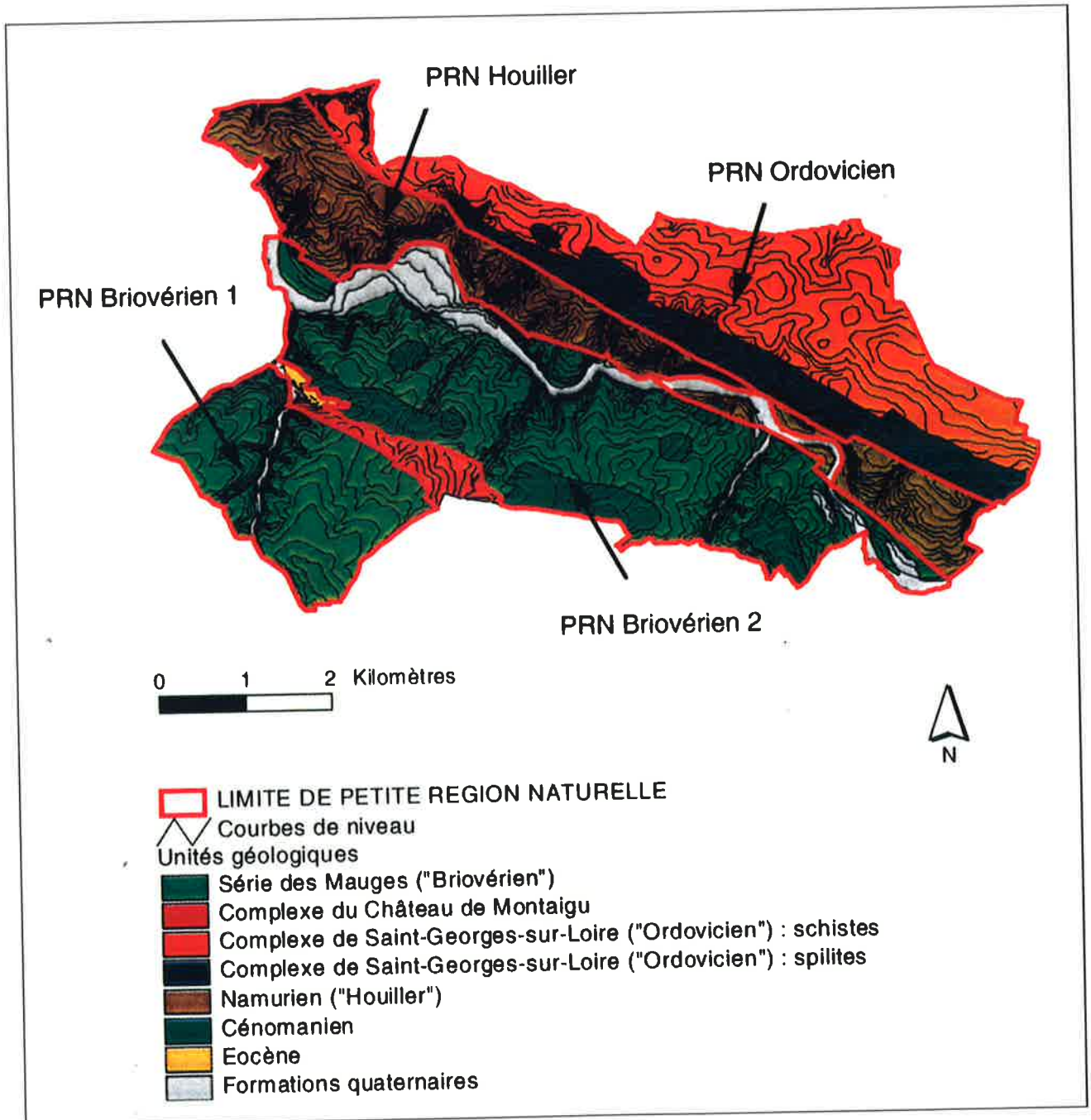
de la zone étudiée, ou prédiction au niveau de l'ensemble du pixel, simulant ainsi une prédiction à l'échelle parcellaire. Pour cette dernière, la fixation d'un nombre moyen d'UTB à prédire par pixel de l'ordre de 70 à 80 % du nombre moyen réel d'UTB par pixel semble fournir les meilleurs résultats, quelle que soit la PRN considérée ;

- la méthode s'adapte à des milieux de complexité différente, tout comme le fait le pédologue : la densité optimale de sondages à réaliser est d'autant plus élevée que le milieu étudié est complexe ;

- la complexité de la PRN a un impact direct sur la qualité des résultats. On obtient des résultats intéressants sur la PRN *Briovérien 1* (que ce soit en prédictions ponctuelle ou à l'échelle parcellaire, des erreurs comprises entre 10 et 20 % au maximum pour une densité de sondages environ deux fois plus faible que celle réalisée sur le terrain). Ils sont moins bons sur les PRN *Houiller* et *Briovérien 2* (erreurs assez élevées pour une densité de sondages équivalente à celle réalisée sur le terrain), et intermédiaires sur la PRN *Ordovicien*, notamment en prédiction ponctuelle ;

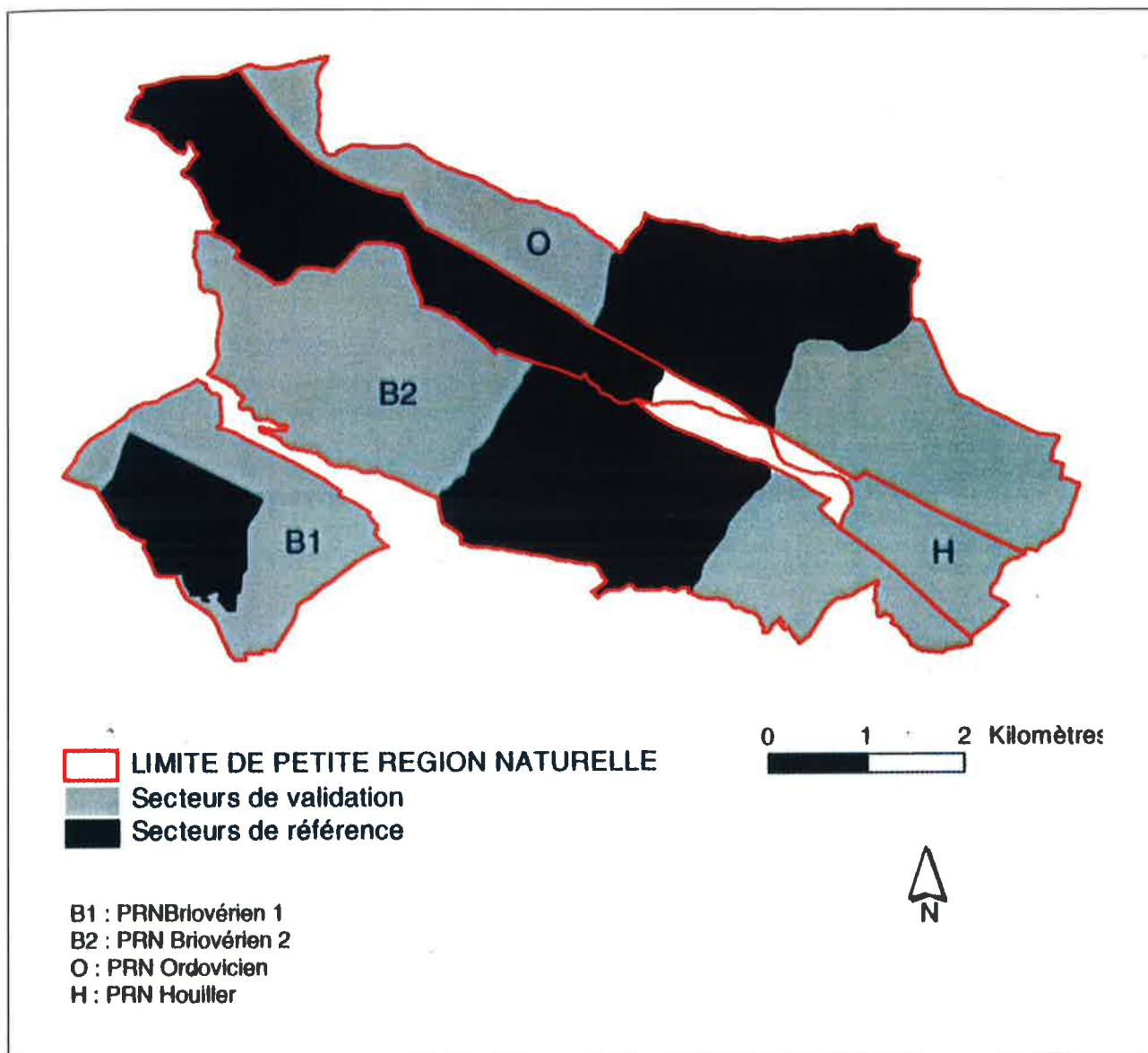
Carte 1 : Géologie de la zone d'étude (d'après BRGM, 1976, 1986, et IGN, 1986, 1989).

Map 1 : Geology of the study area (from BRGM, 1976, 1986, and IGN, 1986, 1989).



Carte 2 : Localisation des secteurs de référence et de validation.

Map 2 : Location of the reference and validation areas.



- il semble possible d'anticiper sur la qualité des prédictions en calculant certains indicateurs de complexité du secteur observé. Ainsi, l'indicateur "taillé moyenne de la plage cartographique" peut généralement permettre d'apprécier si la méthode sera applicable. Néanmoins, cet indicateur doit être complété, car il ne préjuge pas de la représentativité du secteur de référence, qui doit être appréciée avec d'autres indicateurs.

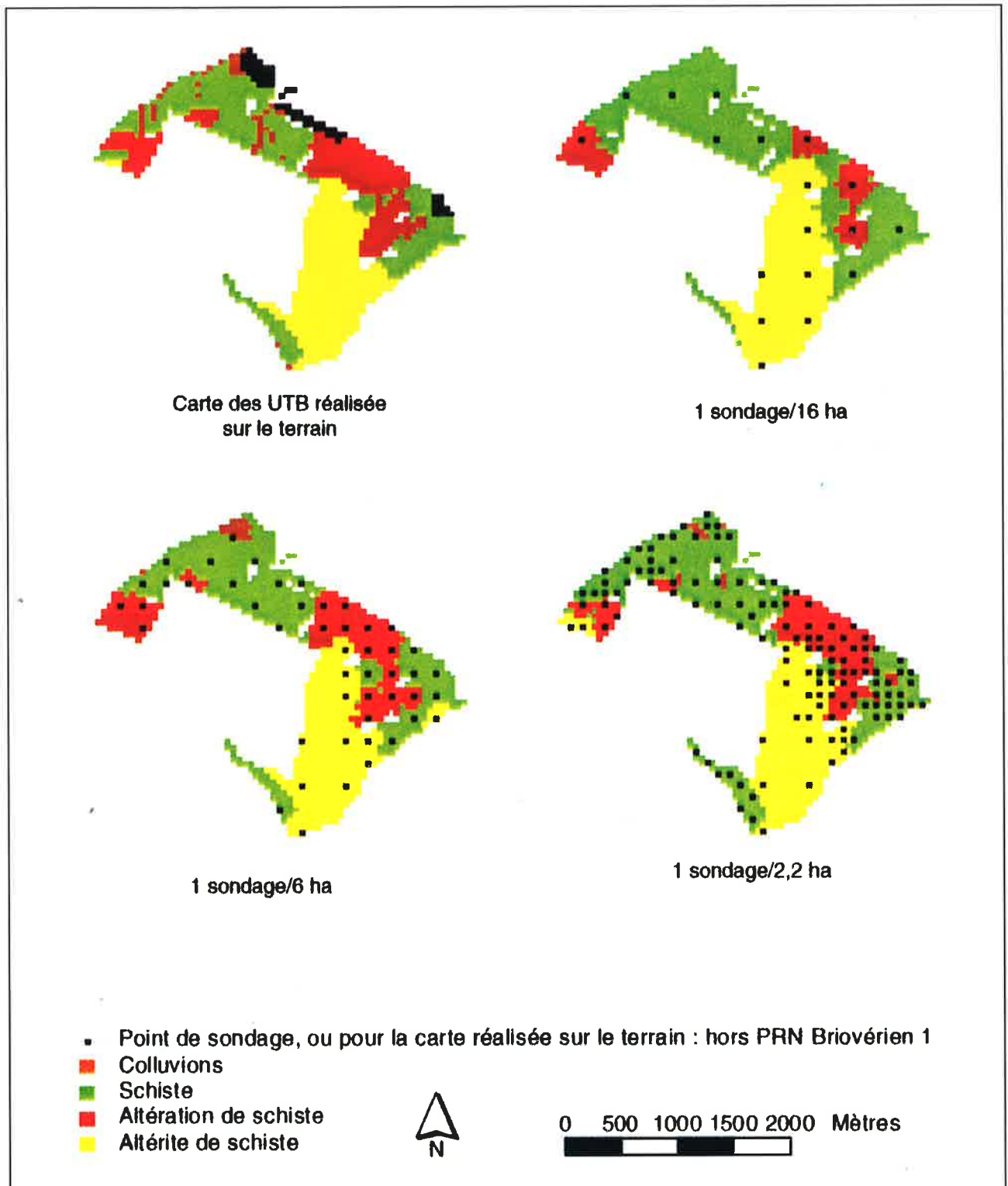
Afin d'améliorer l'applicabilité de la méthode des secteurs de référence à la cartographie des UTB, il convient d'explorer diverses voies :

Les terroirs doivent être raisonnés au niveau de la parcelle. Une esquisse de ce raisonnement a été menée en faisant une prédiction au niveau du pixel, il convient d'intégrer l'information au niveau de la parcelle culturale afin d'avoir une information au niveau de l'unité d'intervention du viticulteur.

Un outil informatique opérationnel permettant de mettre en application les lois étudiées doit être développé. En effet, leur établissement et leur application ont nécessité beaucoup de temps et un matériel informatique lourd. Des essais ont été menés en ce sens (Ledreux *et al.*, 1994).

Carte 3 : Application des lois de voisinage sur le secteur de validation de la PRN *Briovérien 1* en stratégie d'échantillonnage raisonnée.

Map 3 : Map obtained by using neighbourhood relationships on the "PRN *Briovérien 1*" validation area, with a free-survey sampling strategy.



La zone dans laquelle les lois ont été établies et testées est relativement complexe (plusieurs dizaines d'UTB). On peut penser que la connaissance des terroirs et de l'impact de ceux-ci sur la vigne progressant, des regroupements de terroirs seront peut-être possibles, les méthodes étant d'autant plus efficaces que les milieux sont simplifiés. D'autre part, la méthodologie de caractérisation des terroirs viticoles visant à être étendue à d'autres vignobles, il conviendra de tester l'indicateur de complexité mis en place afin d'évaluer la proportion de territoire susceptible de bénéficier de résultats comparables à ceux obtenus sur le secteur le plus simple de cette étude.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier vivement H. Bourennane et C. Van Leeuwen pour leurs remarques constructives apportées à la lecture d'une première version de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- Asselin C., Morlat R., Jacquet A., 1992 - Connaissance des terroirs : méthode de caractérisation, influence sur la maturité et la potentialité anthocyanique du cabernet franc. VIIème symposium des ateliers universitaires et vigneron : 37-52.
- Baize D., 1986 - Couvertures pédologiques, cartographie et taxonomie. *Science du Sol* 24 (3) : 227-243.
- Doledec A-F., 1995 - Recherche des composantes principales des terroirs viticoles afin d'élaborer un outil d'aide à la gestion au moyen d'observatoires et de traitements statistiques de données spatialisées. Thèse de doctorat. Inst. Nat. Agron. Paris-Grignon. 160 p. + annexes.
- Favrot J.C., 1989 - Une stratégie d'inventaire cartographique à grande échelle : la méthode des secteurs de référence. *Science du Sol*. 27 (4) : 351-368.
- Favrot J.C., Lagacherie P., 1993 - La cartographie informatisée des sols : une aide à la gestion écologique des paysages ruraux. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 79 (5) : 61-76.
- Gadille J., 1967 - Le vignoble de la côte bourguignonne : fondements physiques et humains d'une viticulture de haute qualité. Thèse de doctorat. Univ. Dijon.
- Lagacherie P., 1992 - Formalisation des lois de distribution des sols pour automatiser la cartographie pédologique à partir d'un secteur pris comme référence. Thèse de doctorat. Univ. Montpellier II. INRA Science du Sol. 175 p. + annexes.
- Lagacherie P., Andrieux P., Bouzigues R., 1996 - Fuzziness and uncertainty of soil boundaries : from reality to coding in GIS. *Spatial Conceptual Models for Geographic Objects with undetermined boundaries*, Baden, Austria, 8-12 June 1994, ed. P. Burrough, A. Frank, pp. 275-287.
- Lagacherie P., Legros J.P., Burrough P.A., 1995. - A soil survey procedure using the knowledge of soil pattern established on a previously mapped reference area. *Geoderma*. 65 : 283-301.
- Laville P., 1990 - Le terroir, un concept indispensable à l'élaboration et à la protection des appellations d'origine comme à la gestion des vignobles : le cas de la France. *Bulletin OIV*. 63 : 217-241.
- Ledreux C., Lagacherie P., Jeansoulin R., 1994 - Le projet SAPRISTI version 2 : Système d'Aide à la Prédiction Intelligente des Sols par Traitement Informatique. *Revue Internationale de Géomatique*. 4 (1) : 9-37.
- Legros J.P., 1978 - Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. I Précision dans la délimitation des sols. *Annales agronomiques*. 29 (5) : 499-519.
- Legros J-P., 1996 - Cartographies des sols. De l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Presses polytechniques et universitaires romandes. 321 p.
- Morlat R., 1989 - Le terroir viticole : contribution à l'étude de sa caractérisation et de son influence sur les vins. Application aux vignobles rouges de la moyenne vallée de la Loire. Thèse de doctorat d'Etat. Univ. Bordeaux II, 289 p. + annexes.
- Morlat R., Asselin C., 1993 - Une approche objective des terroirs et typologie des vins en Val-de-Loire. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 79 (3) : 199-212.
- Noble A.C., 1979 - Evaluation of chardonnay wines from sites with different soil compositions. *Am. J. Enol. Vitic.* 30 (3) : 214-217.
- Seguin G., 1983 - Influence des terroirs sur la constitution et la qualité des vendanges. *Bulletin OIV*. 56 : 3-18.

Documents consultés

- BRGM, 1976 - Angers, n°454. Carte géologique au 1/50 000e et notice.
- 1986 - Thouarcé, n°484. Carte géologique au 1/50 000e et notice.
- IGN, 1989 - Angers, 1522 Ouest. Carte topographique au 1/25 000e.
- 1986 - Valanjou, 1523 Ouest. Carte topographique au 1/25 000e.