

Is it possible to apply the concept of precision farming to vine growing ?

Bruno Tisseyre

▶ **To cite this version:**

Bruno Tisseyre. Is it possible to apply the concept of precision farming to vine growing ?. Environmental Sciences. HDR, 2012. tel-02598392

HAL Id: tel-02598392
https://hal.inrae.fr/tel-02598392

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MEMOIRE D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES
CNECA n°3

PEUT-ON APPLIQUER LE CONCEPT D'AGRICULTURE DE PRECISION A LA VITICULTURE ?

Bruno TISSEYRE
Maître de conférence Montpellier SupAgro

Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire - CNECA N°3

Jury

Pr Chistelle GEE, HDR, AgroSup Dijon (Rapporteur)
Pr Christian GERMAIN, HDR, Laboratoire de l'intégration du matériau et système, Talence (rapporteur)
Pr J. Bernardo ROYO DIAZ, Université Publique de Navarre, Pampelune, Espagne (Rapporteur)
Pr Kees VAN LEEUWEN, HDR, Institut des Sciences de la vigne et du vin, ENITA (examinateur)
Dr Agnès BEGUE, HDR, Cirad Montpellier (examinatrice)
Dr Véronique BELLON-MAUREL, HDR, Cemagref Montpellier (examinatrice).

Table des matières

1. Introduction 3

2. Contexte 4

2.1. L'agriculture de précision 4

2.2. Pourquoi un thème de recherche sur l'application de l'AP à la viticulture ? 8

3. Problématique liée à la viticulture de précision 13

3.1. Questions de recherche liées aux hypothèses fondatrices de la VP 13

3.2. Question de recherche liée à l'observation de la variabilité spatiale 14

3.3. Questions de recherche liée à la caractérisation 14

3.4. Questions de recherche liées à la préconisation 15

4. Principaux résultats 16

4.1. Y a-t-il une variabilité spatiale importante et structurée en viticulture ? 16

4.2. La variabilité spatiale en viticulture est-elle stable dans le temps ? 20

4.3 Les observations utilisées en AP sont-elles transposables à la viticulture ? 25

4.4. La caractérisation : de la donnée à l'information agronomique 29

4.5. Quels Indices pour estimer l'opportunité technique de gérer la variabilité spatiale ... 35

5. Conclusions - Perspectives : 44

5.1. Bilan des recherches 44

5.2. Perspectives 45

5.3. La VP va-t-elle bouleverser la viticulture ? 58

6. Curriculum Vitae 61

a. Etat Civil 61
b. Cursus académique 61

7. Références bibliographiques 62

8. Annexe 71

1. Introduction

Après une formation initiale d'ingénieur en techniques Agricoles, les recherches que j'ai menées au cours de ma thèse m'ont conduit à explorer de nouveaux champs scientifiques dans les domaines de la mesure embarquée sur machine agricole, du traitement d'images, mais aussi de la logique floue que j'ai mise en œuvre pour modéliser les connaissances expertes.
Ces recherches, appliquées à la question de l'automatisation de la taille de la vigne, m'ont permis de percevoir la pertinence d'associer ces champs scientifiques de l'acquisition et du traitement de données aux sciences agronomiques et plus particulièrement à la viticulture. J'ai pu, à cette occasion, mesurer l'intérêt d'un travail d'investigation se situant à l'interface de plusieurs champs scientifiques. Un tel positionnement permet en effet :

- d'aborder des questions scientifiques que les agronomes ou les écophysiologistes ne peuvent pas explorer avec des méthodes classiques,
- d'identifier des verrous scientifiques originaux dans les domaines de la mesure, du traitement de l'information et de la représentation des connaissances. Notons que le secteur de la production agricole présente des spécificités notables telles que la forte variabilité inhérente aux objets biologiques, le travail en environnement extérieur en conditions mal maîtrisées, des contraintes économiques fortes, une connaissance experte forte mais dont la pertinence est très localisée dans l'espace, etc. Autant de spécificités qui, cumulées, génèrent des problèmes scientifiques originaux.
- de répondre à des questions socialement importantes pour le maintien d'une activité agricole -et plus particulièrement viticole- compétitive.

La fin de ma thèse a coïncidé avec l'avènement du GPS (Global Positioning System). Il était certain, bien que très peu répandue à cette époque, que cette technique de positionnement, qui permettait de localiser facilement n'importe quelle information (mesure, connaissance, observation) où que l'on soit à la surface du globe, allait constituer une véritable révolution pour la gestion de la production agricole. Dès 1996, nous avions perçu que le développement du GPS en agriculture et en viticulture entraînerait une utilisation intensive de l'information spatialisée, de la cartographie, de la localisation des machines et des opérateurs. L'adoption de cette innovation par les professionnels et les équipementiers soulèverait nécessairement de nouvelles questions scientifiques. En association avec les champs disciplinaires déjà abordés dans le cadre de mon doctorat, il m'est apparu déterminant d'investir le champ de l'information spatialisée appliquée à l'agriculture. Ce champ de recherche correspond à une véritable communauté scientifique qui a émergé à partir du milieu des années 90, celui de l'agriculture de précision (AP). Un journal scientifique international a vu le jour en 1999, il s'agit du « Journal of Precision Agriculture ». Deux congrès internationaux réunissent cette communauté tous les deux ans :

- European Conference on Precision Agriculture (ECPA), toutes les années impaires,
- International Conference on Precision Agriculture (ICPA), toutes les années paires,

La communauté scientifique « agriculture de précision » effectue une recherche qui se situe à l'interface de plusieurs champs disciplinaires. Elle s'intéresse notamment :

- à la mesure et au développement de nouveaux capteurs embarqués,
- au développement de méthodes de traitement du signal ou de la donnée adaptées aux conditions spécifiques de l'agriculture,

- au traitement de l'information spatialisée c'est à dire la géostatistique mais aussi la fusion de données spatialisées et la segmentation de données spatiales.

C'est dans cette communauté scientifique récente que ma recherche s'est inscrite à la suite de ma thèse de doctorat.

2. Contexte

2.1. L'agriculture de précision

a. Définition

L'agriculture de précision (AP) a pour origine le développement récent de technologies dont la mise en œuvre modifie considérablement la connaissance et la gestion des systèmes de production agricole. Ces technologies se caractérisent par :

(i) le développement massif de systèmes automatiques de mesure, qu'ils soient fixes (station météorologique, capteurs sur la plante, etc.), embarqués sur machine, piéton, animaux ou machines (capteurs de rendement, capteurs de biomasse, capteurs de chlorophylle, etc.), ou aéroportés (drônes, avions, satellites, etc.) ;

(ii) la géolocalisation systématique de ces informations grâce à l'utilisation de système de positionnement absolu (Global Positioning System) ;

(iii) le développement de systèmes permettant de stocker, de visualiser, de manipuler et d'échanger de gros volumes d'information.

L'apport majeur de ces technologies est ainsi la connaissance de la variabilité spatiale et temporelle du système de production.

De nombreux auteurs ont proposé une définition formelle de l'AP (Searcy, 1994[1]; Godwin et al., 2003[2]; Taylor et Whelan, 2005[3]). Nous retiendrons Robert (2000)[4], qui définit l'AP comme l'application d'une stratégie holistique de gestion agricole, qui utilise les technologies de l'information pour profiter de données de sources multiples, afin d'optimiser les décisions relevant de la gestion agronomique des cultures, du marketing, du financement, de la gestion du matériel et du personnel. En des termes similaires, McBratney et al. (2005)[5] proposent de considérer l'AP, à l'échelle de l'exploitation, comme un type de conduite visant à augmenter le nombre de (bonnes) décisions par unité d'espace et de temps, ainsi que les bénéfices nets qui y sont associés. En pratique, l'AP est ainsi un ensemble de méthodes basées sur l'information et visant à optimiser les performances d'une exploitation agricole sur plusieurs plans :

- technique (maximiser les performances agronomiques de l'exploitation),

---

1 Searcy, S. (1994). Engineering systems for site-specific management : opportunities and limitations.In Proceedings of Site-Specific Management for Agricultural Systems - 2nd International Conference, 603-612, Madison, WI, USA, American Society of Agronomy.

2 Godwin, R., Wood, G., Taylor, J., Knight, S., and Welsh, J. (2003). Precision farming of cereal crops : a review of a six year experiment to develop management guidelines. Biosystems Engineering, 84(4) : 375-391.

3 Taylor, J. and Whelan, B. (2005). A general introduction to precision agriculture. Part of GRDC Strategic Initiative on PA (SIP09). Disponible sur ttp://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa/ au 02/03/2006.

4 Robert, P. (2000). L'agriculture de précision : les verrous liés à la technologie et à la gestion agronomique. In Agriculture de précision : Avancées de la recherche technologique et industrielle, 11-29, Dijon, France. Educagri éditions.

5 McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T., and Bouma, J. (2005). Future directions of precision agriculture. Precision Agriculture, 6 :7-23.

- économique (optimiser le gain économique de l'exploitation),
- environnemental (limiter les impacts des pratiques de l'exploitation).

Les pratiques agricoles de l'exploitation ont vocation à être optimisées selon chacun de ces plans en se basant sur la prise en compte des variabilités spatiale et temporelle que peut présenter l'outil de production. La détection de ces variabilités est assurée par les moyens issus des sciences de l'information (capteurs, au sens large du terme). Cette définition de l'AP concerne toutes les productions agricoles qu'elles soient animales ou végétales.

Nous nous focaliserons sur l'application des concepts de l'AP à la production végétale que nous dénommerons «culture de précision». Dans la suite de ce document, le terme AP sera donc utilisé exclusivement pour désigner la culture de précision.
En production végétale, la prise en compte des variabilités spatiales de l'outil de production s'est traduite par l'émergence du concept de gestion modulée des cultures (Site-Specific Management) (Plant, 2001)[6]. Cette dernière désigne la gestion d'une culture à une échelle spatiale plus fine que la parcelle, unité de gestion habituelle. Remarquons qu'en AP, la gestion modulée n'est pas la seule approche permettant d'optimiser les performances d'une exploitation. L'aide au guidage des machines avec, par exemple la mise en œuvre de Controlled Traffic Farming (Tullberg et al., 2007[7]), constitue une autre approche possible. Toutefois, l'AP est souvent associée à la gestion modulée car elle permet d'envisager des marges d'amélioration sans précédent dans l'histoire de l'agriculture mécanisée sur tous les plans précédemment évoqués :

- techniquement, adapter l'itinéraire cultural à une échelle intra-parcellaire peut permettre d'optimiser le rendement et ou la qualité d'une culture sur la parcelle (Stoorvogel et Bouma, 2005[8]),
- économiquement, une dose variable d'intrants peut permettre une économie sur ce poste d'achat (Bachmaier et Gandorfer, 2008[9]),
- du point de vue environnemental, c'est un moyen de limiter certains risques, comme l'érosion des sols ou les phénomènes de lessivage (Bongiovanni et Lowenberg-Deboer, 2004[10]; Stoorvogel et Bouma, 2005[8]).

b. La variabilité intra-parcellaire : une hypothèse de base de l'AP

L'intérêt de gérer indépendamment différentes parties d'une parcelle à travers une stratégie de gestion modulée dépend de l'importance de la variabilité intra-parcellaire. En agriculture, les phénomènes de variabilité au sein d'une même parcelle sont connus et étudiés depuis

6 Plant R.E., 2001. Site-specific management: the application of information technology to crop production, Computers and Electronics in Agriculture,30, 1, p. 9-29.

7 Tullberg J.N., Yule D.F., McGarry D., 2007. Controlled traffic farming—From research to adoption in Australia, Soil and Tillage Research, 97, 2, p. 272-281.

8 Stoorvogel, J. and Bouma, J. 2005. Precision agriculture : the solution to control nutrient emissions ? In Stafford, J., editor, Precision agriculture '05 : Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture, p. 47-55, Uppsala, Sweden. Wageningen Academic Publishers.

9 Bachmaier, M. and Gandorfer, M. (2008). A conceptual framework for judging the precision agriculture hypothesis with regard to site-specific nitrogen application. Precision Agriculture.

10 Bongiovanni, B. and Lowenberg-Deboer, J. (2004). Precision agriculture and sustainability. Precision Agriculture, 5, p. 359-387.

longtemps (Fairfield Smith, 1938[11]). Leur prise en compte a longtemps été intuitive : avant la mécanisation de l'agriculture, la petite taille des parcelles permettait une modulation manuelle des apports, basée sur des observations et une connaissance experte du terrain. La mécanisation du secteur agricole a vu les surfaces des parcelles augmenter. Les phénomènes de variabilité intra-parcellaire ont alors été négligés au profit d'un mode de gestion parcellaire uniforme permettant de tirer parti d'un matériel plus gros et plus puissant.
Le concept de gestion modulée permet de prendre en compte cette variabilité intra-parcellaire tout en maintenant des itinéraires mécanisés. Sa mise en œuvre est aujourd'hui possible grâce aux technologies de l'information qui permettent :

- de développer des systèmes de mesure capable d'observer la variabilité spatiale des cultures ou du milieu,
- de localiser les observations, les préconisations et les actions sur la parcelle.

c. Les fonctions nécessaires à la gestion modulée

McBratney et Taylor[12] (2000) ont identifié les 5 fonctions nécessaires à la gestion modulée des cultures. (Figure 1) :

- l'observation : Étape d'acquisition de données sur le végétal (état du couvert), sur la production, sur le sol, etc. C'est à partir de ces données, généralement indirectes mais acquises avec une résolution spatiale importante qu'il est possible de construire une démarche de gestion spatialisée. De nombreux capteurs (Plant, 2001)[13] sont disponibles pour mesurer la variabilité intra-parcellaire des paramètres physiques du couvert végétal, du sol ou de l'environnement (résistivité électrique du sol, imagerie, etc.). Ces capteurs proposent la mesure d'une grandeur physique ou chimique corrélée plus ou moins directement à une ou plusieurs caractéristiques de la plante, du couvert végétal, du sol ou de son environnement. Un exemple de donnée obtenue à l'issue d'une observation : la température de feuille mesurée par imagerie thermique. Cette donnée est reliée à l'état hydrique des plantes, toutefois elle ne peut pas être utilisée directement pour prendre une décision.

- La caractérisation : Étape permettant de transformer en information agronomique les données obtenues lors de la phase précédente. Une variable est considérée comme information agronomique lorsqu'elle permet à un professionnel de construire une préconisation ou de prendre une décision sur le système agricole. Il s'agit, par exemple, du niveau d'infestation sanitaire, de la surface foliaire, du niveau de contrainte hydrique, de la teneur du grain en protéine, etc. La caractérisation peut se révéler plus ou moins complexe et peut nécessiter le recours à des informations expertes, des modèles, des pré-traitements des observations tels que classification ou zonage, ainsi que l'acquisition de données complémentaires.

- La préconisation : Étape destinée à produire un conseil technique explicite en se basant sur les informations agronomiques élaborées lors de la caractérisation. Exemples de préconisation : une carte d'application d'azote exprimée en unités

[11] Fairfield Smith, H. (1938). An empirical law describing heterogeneity in the fields of agricultural crops. Journal of Agricultural Science, 28, p.1-23.
[12] McBratney, A. and Taylor, J. (2000). PV or not PV? In Proceedings of the 5th International Symposium on Cool Climate Viticulture and Oenology, Melbourne, Australia.
[13] Plant R.E., 2001. Site-specific management: the application of information technology to crop production, Computers and Electronics in Agriculture,30, 1, p. 9-29.

d'azote/ha, une carte de préconisation d'irrigation exprimée en mm d'eau, une carte de vendange sélective etc.

- L'application : Traitement par lequel un conseil agronomique produit est appliqué *in fine* sur la parcelle par l'opérateur.

- Le géogéoréférencement : Processus central, le géoréférencement a pour objectif de spatialiser les données récoltées, les informations agronomiques ainsi que l'application des préconisations définies.

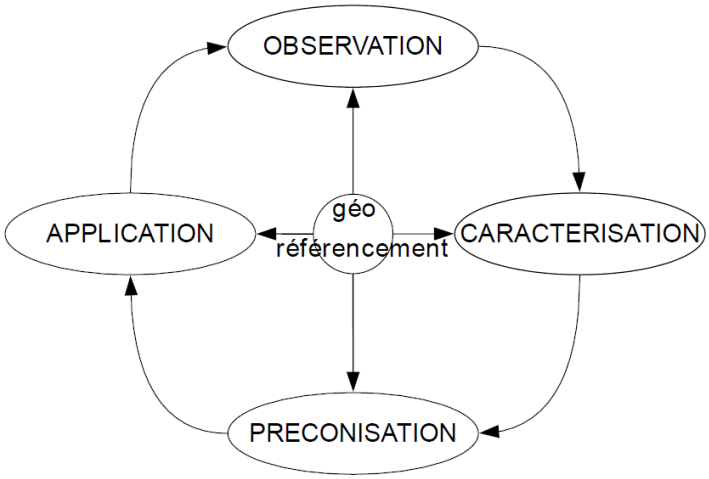


Figure 1: Diagramme fonctionnel d'une démarche de gestion modulée, d'après McBratney et Taylor (2000). Ce schéma met l'accent sur l'importance du géoréférencement, au cœur des quatre étapes fondamentales du processus de gestion de la variabilité.

d. Les questions de recherches associées à la gestion modulée des cultures

La mise en œuvre des fonctions présentées dans le paragraphe précédent soulève des questions scientifiques dans différents domaines :

- le développement ou l'adaptation de nouveaux capteurs permettant de générer des données utiles à l'élaboration d'une information agronomique (Moran *et al.*, 1997[14], Samouellian *et al.*, 2005[15]),
- le développement d'outils et de méthodes permettant de représenter et d'analyser les données spatialisées (Jaynes et al., 2005[16], Pringle et al.,2003[17]),
- le développement d'actionneurs et de systèmes de contrôle permettant d'appliquer les préconisations proposées(Villette et al., 2008 [18]),

[14] Moran, M., Inoue, Y., and Barnes, E., 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. Remote Sensing of Environment, 61 : 319- 346.

[15] Samouellan A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A. and Richard G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science : a review. Soil and Tillage research ,83, 173-193.

[16] Jaynes, D., Colvin, T., and Kaspar, T., 2005. Identifying potential soybean management zones from multi-year yield data. Computers and Electronics in Agriculture, 46 :309-327.

[17] Pringle M. J., McBratney A. B., Whelan B. M., and Taylor J. A., 2003. A preliminary approach to assessing the opportunity for site-specific crop management in a field, using yield monitor data, Agricultural Systems, 76, 273-292.

[18] Villette S., Piron E., Cointault F., Chopinet B., 2008. Centrifugal spreading of fertiliser: Deducing three-dimensional velocities from horizontal outlet angles using computer vision. Biosystems Engineering. 99 (4), 496-507.

- le développement de connaissances permettant d'évaluer l'intérêt agronomique, économique et/ou environnemental d'une telle pratique (Godwin et al., 2003)[19].

Les questions scientifiques relatives à la préconisation dépassent le cadre de l'AP. Elles sont inhérentes à la recherche en agronomie, ce qui explique qu'elles ne soient pas listées ici.
Depuis le début des années 90, les questions de recherche associées à la gestion modulée ont été largement explorées en grandes cultures (blé, maïs, orge, colza, soja, coton, etc.). Cette orientation s'explique essentiellement par l'importance économique et territoriale de ces cultures pour les principaux pays occidentaux.

2.2. Pourquoi un thème de recherche sur l'application de l'AP à la viticulture ?

a. Un champ d'investigation vierge

A la fin des années 90, paradoxalement, aucune activité de recherche ne concernait l'application des concepts de l'AP à la viticulture, ce que l'on désignera dans le reste du document par le terme « Viticulture de Précision » (VP). Lorsque nous avons investi ce thème de recherche, aucun autre centre de recherche ou université ne travaillait sur ce domaine. Depuis, d'autres équipes se sont intéressées à la VP. C'est le cas, entre autres du CSIRO (R. Bramley), de la NASA (L. Johnson), de l'université de Talca (S. Ortega), de l'université de Lérida (J. Arno), de l'université publique de Navarre (B. Royo) et de l'INRA de Bordeaux (J.P. Goutouly). Leur nombre reste toutefois assez restreint, ce qui permet de former un réseau particulièrement actif dont les membres sont parfaitement identifiés.

b. Des questions scientifiques intéressantes

La viticulture de précision (VP) nous a semblé un thème intéressant à explorer. En effet, à la différence des grandes cultures, la viticulture présente des particularités susceptibles de générer des questions scientifiques originales :

(i) il s'agit d'une culture qui met en œuvre une connaissance experte de terrain très marquée par rapport aux grandes cultures. Cette connaissance experte s'explique par la proximité de l'agriculteur avec la vigne lors d'interventions manuelles réalisées au pied de vigne comme la taille d'hiver;

(ii) il s'agit d'une culture pérenne pour laquelle les rotations se raisonnent sur des périodes de plus de 30 ans. Un pied de vigne intègre donc les paramètres environnementaux liés au sol, aux pratiques et au climat depuis sa plantation. Il s'agit d'une originalité notable par rapport aux cultures annuelles pour lesquelles les conditions de semis, la qualité du travail du sol, le précédent cultural, etc. peuvent également avoir une influence déterminante, allant parfois jusqu'à occulter les effets environnementaux. Cette particularité de la viticulture confère certainement une stabilité temporelle à certaines caractéristiques de la plante et en particulier sa réponse à l'hétérogénéité spatiale de l'environnement. Dans ce contexte, en viticulture, la cartographie intra-parcellaire des paramètres de production peut revêtir une importance déterminante pour la gestion du vignoble.

(iii) Enfin, il s'agit d'une culture qui a donné naissance au concept d'appellation d'origine contrôlée et à la notion de terroir. L'hétérogénéité spatiale du sol et du climat est donc un concept admis et utilisé depuis longtemps par les professionnels de la viticulture.

[19] Godwin, R., Wood, G., Taylor, J., Knight, S., and Welsh, J., 2003. Precision farming of cereal crops : a review of a six year experiment to develop management guidelines. Biosystems Engineering, 84(4), 375-391.

c. Une demande sociale pour la viticulture de précision

Un premier projet (projet européen Eurêka VI-TIS, 2001-2003) mené en collaboration avec un équipementier (Pellenc S.A.), nous a permis d'identifier les besoins potentiels des professionnels en matière de VP. Le projet VI-TIS avait pour objectif de définir les bases d'un système d'information intégré pour l'exploitation viticole. L'analyse effectuée dans le cadre de ce projet a depuis été confirmée par l'émergence de projets de recherche visant à répondre à des besoins similaires dans d'autres régions du monde. On pourra se reporter à Tisseyre et al. (2007) pour un état de l'art dans ce domaine. Une rapide synthèse est proposée ci-dessous. Quatre approches possibles de valorisation de la variabilité spatiale ont été identifiées en viticulture :

- la première approche consiste à valoriser les hétérogénéités spatiales en proposant des vendanges sélectives et des vinifications adaptées à la qualité des produits recherchés. Dans ce cas, une fois connue, la variabilité spatiale est perçue comme une richesse. La matière première est vendangée par lots de qualité homogène qui seront vinifiés de manière optimale en fonction des objectifs du marché ou de la typicité recherchée par le domaine. Cette approche s'inspire largement des pratiques mises en œuvre dans certains domaines prestigieux où l'histoire et l'expérience assurent une connaissance du milieu et de sa variabilité. A une autre échelle spatiale, cette approche correspond également aux sélections parcellaires pratiquées par les caves coopératives ou les wineries. Il s'agit d'une approche spécifique à la viticulture.
- la deuxième approche consiste à utiliser la connaissance de la variabilité spatiale pour rationaliser les opérations et/ou minimiser leur coût économique ou leur impact environnemental. L'exemple emblématique de cette approche est la modulation des doses de produits phytosanitaires en fonction des caractéristiques du couvert végétal.
- la troisième approche consiste à moduler les opérations culturales de manière à limiter voire gommer la variabilité spatiale. Ici, l'objectif est de tendre vers une production de qualité définie et homogène sur chacune des parcelles. La modulation des opérations culturales telles que la taille, l'éclaircissage, l'effeuillage, la fertilisation, l'enherbement ou l'irrigation, constitue un levier permettant de s'approcher de l'homogénéité parcellaire recherchée.
- la dernière approche, plus anecdotique, consiste à mettre en œuvre une démarche expérimentale en ligne. L'objectif est de procéder à des essais géoréférencés (niveaux de fertilisation, changement de conduite, porte-greffe, etc.). La réponse de la plante en termes de vigueur, de production et de qualité de la récolte est mesurée et positionnée de manière automatique grâce aux outils issus de la VP. Cette approche permet d'acquérir de nombreuses références à moindre coût dans des conditions pédo-climatiques locales. Elle est adoptée par les centres de recherche où elle est de plus en plus utilisée par exemple au sein de plates-formes de phénotypage.

D'un point de vue pratique, ces approches ne sont pas exclusives et toutes peuvent être utilisées simultanément sur une même exploitation. La coexistence de l'approche 3 (modulation des intrants) avec l'approche 1 (vendange sélective) semble moins naturelle mais pourrait s'envisager dans le cas d'un échec de l'approche 3.

Bien que différentes dans leur principe et leurs objectifs finaux, toutes les approches identifiées pour le contexte de la viticulture s'inscrivent dans la démarche générale de gestion modulée formalisée par McBratney et Taylor[20] (2000) pour les grandes cultures (Figure 1).

[20] McBratney, A. and Taylor, J. (2000). PV or not PV? In Proceedings of the 5th International Symposium on Cool Climate Viticulture and Oenology, Melbourne, Australia.

d. Un environnement géographique favorable

Mon orientation vers la VP s'explique également par un contexte géographique favorable. En effet mon unité de recherche se situe à Montpellier, au cœur du vignoble du Languedoc Roussillon, considéré comme le plus grand bassin viticole du monde. Cette situation privilégiée nous place à proximité des acteurs de la filière et plus à l'écoute de leurs problèmes. Cette proximité constitue un atout pour définir des axes de recherche qui répondent à des questions sociales pertinentes. Mais surtout, le site de Montpellier héberge de nombreuses équipes dont l'objet de recherche est la vigne dans le cadre de disciplines telles que l'écophysiologie, la génétique, la biochimie, la transformation de la matière première, la pédologie, etc. Cette proximité permet de générer des interactions, de bénéficier de centres expérimentaux, mais aussi d'être en mesure de mobiliser facilement et rapidement une expertise sur un objet qui ne se situe pas au cœur de nos compétences.

e. Un thème de recherche stimulant pour un enseignant chercheur

Un tel positionnement présente plusieurs intérêts pour un enseignant-chercheur. Il permet de conserver un cadre de recherche assez large. Il permet aussi de rester proche des professionnels. Ces relations étroites sont sources de stages, de projets, d'emplois et de thèses en contrat CIFRE pour les étudiants, que ce soit avec des équipementiers (Pellenc S.A., John Deere, Force A), des organisations agricoles (Coopératives d'Utilisation de Matériel Agricole, Arvalis) ou des prestataires de services (Institut Coopératif du Vin, Infoterra, etc.).

Ce cadre de recherche permet également de maintenir une bonne connaissance des nouvelles technologies dans toute leur diversité, de leur évolution et de leur adéquation avec les besoins des professionnels, et ainsi de mettre à jour de manière quasi-permanente le contenu des enseignements délivrés, d'en améliorer l'organisation, en particulier pour l'option AgroTIC de troisième année (www.agrotic.org) dont je suis co-responsable depuis 1997 (option gérée en collaboration avec l'ENITA de Bordeaux). Cette capacité à enseigner de nouvelles méthodes et à en analyser la pertinence pour le secteur d'emploi de nos étudiants s'est aussi concrétisée par l'accompagnement d'étudiants dans la création de plusieurs entreprises et/ou activités innovantes (société Néotic -créée en 2001-, société Envilys -créée en 2004-, société 3Liz – créée en 2006-).

Cette recherche présente naturellement des contraintes. Pour valider de manière opérationnelle l'acquisition de résultats en VP, il faut des dispositifs expérimentaux coûteux ainsi que des bases de données conséquentes élaborées sur plusieurs années. Cette particularité nécessite des collaborations durables et des financements adaptés à la durée des expérimentations. La publication des travaux à caractère multidisciplinaires est parfois plus difficile à effectuer compte tenu de la spécialisation thématique de la plupart des journaux scientifiques. En revanche, le domaine de recherche se situant nécessairement à l'interface de plusieurs champs scientifiques, il présente l'avantage d'explorer des questions originales.

f. Un thème de recherche porteur de collaborations scientifiques

Le caractère multi-disciplinaire des questions posées a nécessité de nombreuses collaborations scientifiques au niveau local, national et international. De même, certaines questions ont nécessité la mise en place de dispositifs expérimentaux ambitieux qui ont fait appel à des ressources techniques et scientifiques conséquentes. L'objectif de ce paragraphe est de

souligner les collaborations qui ont été initiées tout en mettant en évidence leur nécessité pour répondre aux questions identifiées.

Contexte Institutionnel et collaborations locales : ma recherche s'est effectuée au sein de l'équipe Imagerie Optique et DEcision de l'UMR ITAP (Information et Technologie pour les Agro-procédés), Cemagref/Montpellier SupAgro. Au sein de l'équipe, la thématique VP a permis d'identifier des verrous scientifiques forts liés à l'incertitude des données spatiales. Ces questions scientifiques ont permis d'initier des dynamiques communes, en particulier des co-encadrements de thèse. Elles ont également nécessité d'associer le LIRMM (Laboratoire d'Informatique de Robotique de Montpellier) en co-encadrement de thèse, sur des questions relatives à la définition de fonctions d'agrégation spécifiques aux données spatialisées dans le cadre de la théorie des possibilités.
Sur des aspects plus thématiques, des collaborations étroites ont été établies avec l'UMR Lisah (géophysique des sols et pédologie, projet de collaboration financé dans le cadre de l'IFR Ilee), l'UMR SPO (Sciences Pour l'Oenologie) et naturellement avec la station expérimentale de Pech-Rouge (écophysiologie), collaboration indispensable sur laquelle je reviendrai à propos des aspects expérimentaux.

Collaborations internationales : Ces travaux m'ont amené à interagir avec un réseau d'équipes scientifiques sur plusieurs continents avec lesquelles j'ai entretenu des collaborations durables. Les collaborations étroites avec l'Université de Sydney et le Centre Australien d'Agriculture de Précision (ACPA) au sein duquel j'ai réalisé une année en délégation m'ont permis d'initier des travaux de recherche originaux relatifs à l'opportunité technique de la gestion de la variabilité spatiale. Ce laboratoire de recherche renommé en géostatistiques, était à l'origine d'un premier indice d'opportunité technique (Pringle et al., 2003). Cette collaboration m'a donné l'occasion d'appréhender cette question avec de nouvelles approches (morphologie mathématique et théorie des possibilités).
Cette collaboration a aussi été à l'origine d'une base de données internationale de mesures intra-parcellaires de rendement unique au niveau mondial. Elle regroupe les données acquises par l'ACPA, le CSIRO d'Adélaïde, Montpellier SupAgro, les sociétés Pellenc S.A. et J. Chivite en Espagne. L'analyse, avec des méthodes géostatistiques, des 146 parcelles concernées par cette base a donné lieu à la publication de résultats originaux sur la variabilité intra-parcellaire du rendement en viticulture (Taylor et al, 2005). La collaboration entreprise avec l'ACPA a perduré avec l'accueil d'un post-doctorant (James Taylor) financé dans le cadre du Réseau Thématique de Recherche en Agronomie (RTRA).
Des collaborations scientifiques ont également été établies i) avec l'Université de Talca (Chili), en particulier sur les méthodes d'extrapolation de l'état hydrique des plantes (encadrement d'un chercheur -César Acevedo Opazo- de l'Université de Talca en Master, puis en Thèse) et ii) avec les Universités de Lérida et de Pampelune dans le cadre de la communauté de travail des Pyrénées (CTP) au sein d'un réseau ayant pour thème la viticulture de précision.

Collaborations avec les professionnels :
Les objectifs opérationnels de mes recherches ont nécessité la mise en œuvre de collaborations importantes avec des entreprises privées (équipementiers et sociétés de conseil). Ces collaborations ont permis i) l'accès à des données issues de prototypes, ii) l'accès à des dispositifs expérimentaux situés sur des vignobles commerciaux, iii) l'identification des verrous techniques et scientifiques relatifs à la mise en œuvre de la VP en situation réelle et iv) le financement de nos actions de recherche.

Ces collaborations se sont inscrites dans le cadre de projets i) financés en propre par les entreprises (société Verdtech, Espagne et Institut Coopératif du Vin, France), ii) soutenus au niveau européen (projet Eurêka Vi-TIS avec la société Pellenc S.A.) ou iii) au niveau régional et national (projet Vinnotec-Oenoview en partenariat avec l'ICV et l'Avion Jaune dans le cadre du projet FUI Vinnotec labellisé par le pôle de compétitivité Qualimed, financement d'un thésard CIFRE, société Infoterra, Toulouse, France).

Sites expérimentaux

Certaines des questions posées nécessitaient la mise en place de dispositifs expérimentaux pérennes. Ces expérimentations ont été réalisées sur l'unité expérimentale INRA de Pech Rouge (Gruissan-Aude). Ce vignoble expérimental est particulièrement intéressant car il est représentatif des vignobles méditerranéens (petites parcelles, densité moyenne, grande diversité de cépages conduits de manière non-irriguée). Son autre intérêt est l'existence de trois unités pédologiques marquées présentant des caractéristiques très variables sur lesquelles nous reviendrons plus tard.

Nos approches spatialisées ont été à l'origine de nouvelles méthodes expérimentales sur le domaine. En particulier, la caractérisation de la variabilité intra-parcellaire nous a poussés à concevoir, de manière rigoureuse, des expérimentations recouvrant des conditions très différentes de sol et de contrainte hydrique qui en résulte. Cette approche a permis de multiplier les références sur une seule et même parcelle au lieu de positionner des placettes d'observation sur des sites éloignés. Cette démarche s'inscrit typiquement dans l'expérimentation en ligne présentée comme l'une des applications de la VP.

Grâce à nos collaborations industrielles et scientifiques, il a été possible d'effectuer des expérimentations sur plusieurs vignobles commerciaux (site de Pagos de Araiz, Navarre, Espagne, site de Tavel, Gard, France; site de Talca, région VII, Chili). La diversité de ces sites a été un atout indiscutable pour valider le caractère général des approches proposées.

Tout au long du document, les articles et communications issus des travaux de recherche en lien avec le chapitre traité seront indiqués dans un cadre gris comme celui-ci. La codification utilisée pour les publications et les productions est celle proposée par l'AERES (annexe 1). Les communications à des conférences, en dehors des communications invitées ne sont pas mentionnées.

1 ACL : TISSEYRE B., OJEDA H., TAYLOR J., 2007. New technologies and methodologies for site-specific viticulture. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 41, n°2, 63-76.

1 ACLN : TISSEYRE B., TAYLOR J., 2005. Viticulture de précision : variabilité spatiale et stabilité temporelle des paramètres quantitatifs à un niveau intra-parcellaire. Le progrès agricole et viticole, 22, 481-487.

1 ACTI : TAYLOR J., TISSEYRE B., PRAAT J.P., 2005. Bottling good information : mixing tradition and technology in vineyardsss. . Proceedings of the Fruits and nuts and vegetable production engineering TIC (Frutic05) Conférence, Montpellier, 19-37.

3 INV :

TISSEYRE B., TAYLOR J., 2008. An overview of methodologies and technologies for implementing precision agriculture in viticulture. Actes des XII congresso Brasileiro de viticultura e enologia, 45-54

TISSEYRE B., 2005. Precision viticulture : within vineyard variability and temporal stability in yield and harvest quality. actes des 14 émes journées du Groupe d'Etude des Systèmes de Conduite de la vigne, 1, 18-29.

TISSEYRE B., TAYLOR J., OJEDA H., 2006. New technologies to characterize spatial variability in viticulture. Proceedings of the VI international congress on terroir, 204-217.

1 ASCL :

TISSEYRE B., SEVILA F., 1997. La viticulture de précision, La Vigne, 83, 52-53.

3. Problématique liée à la viticulture de précision

La VP s'inscrit dans un contexte « technology push ». En effet, l'innovation n'est pas portée par les professionnels de la production viticole, mais par les équipementiers et les fournisseurs de services qui perçoivent les potentialités offertes par ces nouvelles technologies. Les débuts de la VP, au milieu des années 90, correspondent aux premiers prototypes réalisés par des équipementiers tels que Pellenc S.A. (Pertuis-France), Avidor (Weedseeker, Villars Sainte Croix, Suisse), Farmscan (Bentley, WA, Australie).

Ce contexte a des répercussions sur l'orientation de mes investigations puisque celles-ci visent à proposer des axes de recherche répondant à une demande sociale qui n'est pas encore clairement formulée par les professionnels de la viticulture (producteurs, transformateurs, conseillers).

Mes travaux de recherche ont été définis de manière à répondre aux interrogations et aux besoins en outils et méthodes que les données issues de la VP allaient générer chez les professionnels de la viticulture. Dans ce contexte, ma démarche s'est adressée à l'ensemble de la chaîne de l'information en VP. Je me suis donc intéressé aux différentes étapes de la mise en œuvre de la VP afin de produire, pour chacune d'elles des connaissances et/ou des outils et des méthodes destinés aux professionnels de la viticulture.

Ma démarche générale a donc consisté, pour chaque étape, à répondre aux questions suivantes :

- quelles connaissances produire ?
- quelles hypothèses valider ?
- quelles méthodes développer ?

pour que l'offre technologique s'intègre dans une démarche de VP adoptée.

L'objectif de cette partie est de montrer comment, à partir de questions opérationnelles sur l'ensemble de la chaîne de l'information, j'ai identifié des axes de recherches originaux. Pour ce faire, j'ai repris les questions de recherche en les structurant selon les grandes étapes du diagramme fonctionnel de l'AP présenté Figure 1. Pour chacune d'elles, j'ai tâché de mettre en exergue les spécificités et l'originalité liées au contexte viticole.

3.1. Questions de recherche liées aux hypothèses fondatrices de la VP

Pour justifier leur mise en œuvre, la modulation des opérations culturales et/ou la vendange sélective supposent la présence :

- d'une variabilité intra-parcellaire importante,
- d'une structuration spatiale,
- et d'une stabilité temporelle de la variabilité intra-parcellaire.

D'où les deux questions suivantes :

Y a-t-il une variabilité spatiale importante et structurée en viticulture ?

Au début de nos recherches, aucune référence n'avait été clairement publiée en la matière. La spécificité de la viticulture est que la variabilité intra-parcellaire peut être atténuée du fait d'un parcellaire de taille plus petite qu'en grandes cultures ou du fait de la présence

d’opérations manuelles raisonnées au pied de vigne. Cette spécificité justifiait l’acquisition de références dans ce domaine.

Si une variabilité spatiale est observée, est-elle stable dans le temps ?

La vendange sélective ou la modulation d’opérations est facilitée par l’utilisation d’informations historiques collectées au cours du cycle de l'année ou au cours des années précédentes. La maîtrise de la qualité de la vendange constitue un enjeu majeur en viticulture. Dans ce contexte, les cartes de qualité réalisées les années précédentes sont susceptibles de présenter un grand intérêt pour aider à mieux gérer la variabilité de la qualité de l’année en cours. Une telle démarche pose naturellement la question de la stabilité temporelle de la variabilité spatiale. La vigne étant une culture pérenne, cette question méritait d’être étudiée spécifiquement.

3.2. Question de recherche liée à l’observation de la variabilité spatiale

Toutes les approches développées en grandes cultures supposent la disponibilité de données (observations) à haute résolution permettant de mettre en évidence, de manière pertinente et à faible coût, la variabilité spatiale du système de production (sol, état de la plante, production). Les questions relatives à la phase d’observation ont trait à la pertinence des méthodes d’observation actuelles pour la viticulture, questions que l’on pourrait formuler par :

Les sources d’information utilisées en AP sont-elles transposables à la viticulture ?

La spécificité liée à l’architecture de la canopée et à la conduite de la vigne nécessite d’étudier la pertinence de ces informations en viticulture.

3.3. Questions de recherche liée à la caractérisation

Rappelons que la caractérisation est l’étape qui permet d’élaborer une information agronomique à partir d’une ou plusieurs données obtenues lors de l’observation. L’étape de caractérisation passe donc par l’élaboration d’un modèle prédictif qui permet d’estimer l’information agronomique à partir d’une ou plusieurs données mesurées.
En fonction des connaissances disponibles, des données mesurées et de l’information agronomique à prédire, cette étape de modélisation peut revêtir différentes formes. Idéalement, le modèle descriptif est privilégié. En AP, l’exemple emblématique d’une telle approche est l’ensemble des modèles utilisés dans le cadre du service Farmstar® (Spot-Image, Toulouse, France). Ce service permet l’estimation de variables utiles pour la décision agronomique (densité de plantes, statut azoté de la plante) à partir de données radiométriques mesurées par télédétection. Une telle approche met en œuvre une succession de modèles (Prospect, Lowtran, Sail, etc.) permettant de représenter et de prendre en compte toutes les variables susceptibles d’affecter la qualité de la prédiction (réponse spectrale du capteur utilisé, état de l’atmosphère, réponse spectrale des feuilles, densité de semis, variété semée, etc.).
En agriculture, il est généralement difficile de mesurer toutes les données nécessaires à la mise en œuvre d’un modèle descriptif. Cette difficulté est liée à la complexité des systèmes de production agricole et de leur environnement mais aussi à la difficulté de mesurer certaines variables avec une haute résolution spatiale. Dans ce contexte, une autre approche possible est de proposer un modèle stochastique local. Elle suppose que la plupart des variables d’influence sont localement homogènes et que la variation de la donnée mesurée est

principalement influencée par une variation de l'information agronomique. Il est ainsi possible de déterminer la relation entre donnée mesurée et information agronomique par apprentissage. Ce type d'approche est largement développé en sciences du sol (McBratney et al., 2003)[21]. Il fait appel à des modèles d'interpolation utilisant des données auxiliaires à haute résolution spatiale. Ces modèles permettent de prédire une ou plusieurs informations agronomiques sur un domaine spatial fini. C'est cette démarche que nous avons privilégiée dans notre travail. Elle nous semblait intéressante à explorer en viticulture, en particulier pour produire une information déterminante pour la conduite de la vigne : l'état hydrique des plantes. La question de recherche qui en émane est la suivante :

Est-il possible d'extrapoler l'état hydrique de la vigne sur la base d'observations auxiliaires à haute résolution spatiale ?

Cet axe de recherche présente une originalité scientifique puisque l'état hydrique est une information agronomique qui varie dans le temps et dans l'espace. Cette question scientifique conduit nécessairement à rechercher des méthodes originales basées sur une collaboration entre un modèle spatial et une ou plusieurs informations permettant de prendre en compte l'évolution temporelle.

Une approche très différente, mais complémentaire de la démarche de modélisation présentée précédemment peut également être envisagée. Elle est fondée sur le fait que l'expertise de terrain est particulièrement développée en viticulture. Sur la base de cette expertise et de données d'observations, le professionnel est ainsi capable d'élaborer un diagnostic sur l'origine de la variabilité spatiale observée pour proposer ensuite des actions correctives, si nécessaires. La mise en œuvre d'une telle démarche en relation avec le professionnel de la viticulture nécessite des outils et des méthodes spécifiques.

Quels outils et méthodes pour analyser les données spatialisées en viticulture ?

Cet axe de recherche présente une originalité scientifique. En effet, il s'agit d'introduire des fonctions difficiles (voire impossibles) à mettre en œuvre de manière rigoureuse avec les méthodes de traitement de données spatialisées classiques. En particulier, l'approche doit permettre :

- le recueil de l'expertise à partir de cartes en prenant en compte l'imprécision dans la localisation des objets spatiaux définis,
- la possibilité de manipuler simultanément des données quantitatives et des informations qualitatives,
- la possibilité de croiser des informations/données dont la résolution spatiale et/ou le support spatial est très différent sans avoir de pré-traitement particulier à effectuer.
- un rendu simple et compréhensible par le professionnel.

La mise en œuvre de cette étape de caractérisation nécessite donc la recherche de méthodes originales capables d'associer des données quantitatives avec des données expertes (souvent qualitatives et imprécises) et adaptées aux données spatialisées.

3.4. Questions de recherche liées à la préconisation

Cette fonction requiert un haut niveau d'expertise agronomique capable d'intégrer i) les spécificités locales (conduite, variétés, contraintes réglementaires, objectifs de production

[21] McBratney A. B., Mendonça Santos M.L. and Minasny B., 2003. On digital soil mapping, Geoderma,117, 1, p. 3-52.

etc.), ii) les caractéristiques climatiques de l'année en cours et iii) des connaissances relatives à la plante, au sol et à leurs interactions.
Il existe toutefois des cas spécifiques pour lesquels des outils de préconisation automatisés ou partiellement automatisés sont utilisables. C'est par exemple le cas de la modulation du troisième apport d'azote en grande culture (Farmstar, Infoterra-Arvalis, France). Dans cette situation, la préconisation « automatique » est possible parce qu'une loi de commande « universelle » existe entre l'information agronomique et la préconisation.

Des exemples de ce type sont rares en agriculture. La préconisation nécessite généralement une expertise agronomique complexe. Ce champ de recherche n'étant pas le mien, mes investigations se sont focalisées sur la recherche d'outils d'aide à la décision destinés à évaluer si une préconisation établie par un conseiller technique ou par un chef de culture, peut-être appliquée de manière réaliste à une échelle intra-parcellaire.

Est-il possible de gérer la préconisation à l'échelle intra-parcellaire ?

En VP, comme en AP, la préconisation se traduit par un traitement variable en fonction des caractéristiques de chaque point à traiter au niveau intra-parcellaire. L'adaptation localisée de certaines opérations ne peut se faire qu'en respectant les contraintes associées au matériel ou à l'organisation du chantier. Ainsi, si la préconisation doit être mise en œuvre sur des unités de gestion dont la surface est inférieure à la surface minimale de traitement possible, il devient inopportun d'envisager une gestion modulée.
Cette question n'est pas spécifique à la vigne. Toutefois, elle n'a été que très peu abordée dans la littérature.

4. Principaux résultats

4.1. Y a-t-il une variabilité spatiale importante et structurée en viticulture ?

Il s'agit d'une question fondamentale puisque la présence d'une variabilité spatiale est l'hypothèse qui justifie l'adoption de la VP et la mise en œuvre d'une gestion modulée. Diverses références en matière de variabilité spatiale ont été publiées au milieu des années 2000 (Bramley, 2005[22] ; Ortega et al, 2003[23] ; Arno et al, 2005[24]). Ces travaux font état d'une variabilité intra-parcellaire importante en viticulture que ce soit pour les paramètres quantitatifs (rendement et expression végétative) ou pour les paramètres de la qualité de la vendange. Toutes ces références ont été établies sur des vignobles irrigués du « nouveau monde » caractérisés par des parcelles de grande taille.

Mes travaux ont cherché à établir des références dans la situation particulière des vignobles méditerranéens, caractérisés par des petites parcelles (env. 1 ha.) sans irrigation. Ils ont eu pour objectif de produire des connaissances sur la variabilité spatiale des principaux

[22] BRAMLEY R.G.V., 2005. Understanding variability in winegrape production systems 2. Within vineyard variation in quality over several vintages, Australian Journal of Grape and Wine Research 11, 33-45.

[23] ORTEGA R., ESSER, A., and SANTIBANES O., 2003. Spatial variability of wine grape yield and quality in Chilean vineyards : economic and environmental impacts. Proceedings of the 4th European Conference on Precision Agriculture, Berlin, 499-506.

[24] ARNO J., BORDES X., RIBES-DASI M., BLANCO R., ROSELL J.R. and ESTEVE J., 2005. Obtaining grape yield maps and analysis of within field variability in Raimat (Spain). Proceedings of 5th European Conference on Precision Agriculture, 899-906.

paramètres en viticulture au niveau intra-parcellaire. Nous nous sommes intéressés à la variabilité spatiale :

- des principaux paramètres quantitatifs (l'expression végétative[25] [26]et le rendement) et qualitatifs de la vendange (taux de sucre, acidité, pH),
- de l'état hydrique des plantes qui constitue une information agronomique déterminante pour la conduite du vignoble en condition méditerranéenne.

a. Les paramètres quantitatifs et de qualité de la vendange

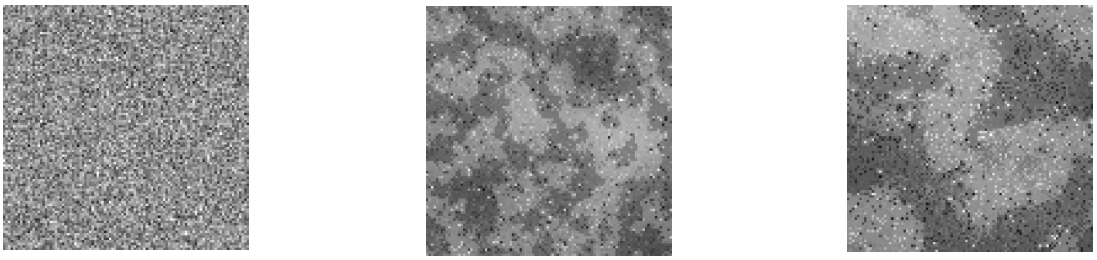
Cette question a nécessité la mise en place d'une expérimentation dédiée qui nous a permis de confirmer l'existence, dans nos conditions particulières, d'une variabilité intra-parcellaire importante des paramètres de la qualité et de la production (Tisseyre et al, 2008). L'observation de cette variabilité justifie la mise en œuvre de pratiques modulées, en particulier pour valoriser les différences de qualité observées sur une même parcelle (Tisseyre et al, 2001).

Nous avons également mené une analyse plus ambitieuse de la variabilité intra-parcellaire en viticulture à l'échelle mondiale (Taylor et al, 2005). Il s'agit d'une démarche originale par son exhaustivité puisqu'elle repose sur l'analyse de la variabilité intra-parcellaire du rendement de 146 parcelles. Les données provenaient de machines à vendanger munies de capteurs embarqués (systèmes Farmscan, Harvestmaster et Pellenc S.A.) et localisées par DGPS. Elles ont été obtenues dans différentes régions d'Australie et dans deux pays d'Europe - la France et l'Espagne. La résolution moyenne d'échantillonnage, de l'ordre de 2000 mesures par ha, a permis d'analyser finement la variabilité du rendement pour chaque parcelle.

Outre les références qu'il a générées, ce travail a permis de développer des méthodes communes d'analyse de la variabilité spatiale. Attardons-nous sur ce problème qui n'est pas trivial. La figure 2 présente trois parcelles sur lesquelles des données simulées ont été spatialisées (Tisseyre et McBratney, 2008). Les données issues de chacune de ces trois parcelles présentent la même distribution - distribution normale de même espérance et de même variance - d'une variable. Toutefois, la répartition des valeurs dans l'espace est différente d'une parcelle à l'autre. La parcelle a) présente une répartition aléatoire, aucun motif n'y apparaît. La parcelle c) présente des motifs clairs, ce que nous qualifierons dans le reste du document par la présence d'une « structure spatiale » où, malgré la persistance d'un phénomène aléatoire, deux sites de mesure auront des valeurs d'autant plus similaires qu'ils sont proches. La parcelle b) présente des caractéristiques intermédiaires avec la présence d'une structure spatiale caractérisée par de motifs de plus petite taille.

[25] L'expression végétative est considérée comme le résultat principal des multiples activités métaboliques de la plante qui s'exprime à travers l'édification du végétal (sarments, feuilles, fruits, l'accroissement annuel des racines et du tronc et l'accumulation des glucides) (Champagnol, 1984). L'expression végétative permet d'estimer le potentiel offert par le milieu (eau, minéraux, éclairement). Dans nos travaux, elle est estimée par le poids de sarment ou, nous le verrons plus tard, par des indices de végétation obtenus par télédétection. Nous n'utiliserons pas le terme vigueur qui traduit l'intensité d'une activité métabolique et qui est couramment estimée par le poids moyen d'un sarment (Champagnol, 1984).

[26] CHAMPAGNOL F., 1984. Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale, Ed. F. Champagnol, ISBN 2-95000614-0-0.



a) b) c)

Figure 2 : Trois parcelles simulées de 1 ha présentant la même distribution d'une variable (distribution normale de même espérance et de même variance), mais caractérisées par une structure spatiale croissante de a) vers b).

Cet exemple met en évidence les limites de la statistique classique et la nécessité de mettre en œuvre des méthodes plus complètes, fondées sur la géostatistique, pour caractériser la variabilité spatiale d'une variable. Pringle et al. (2003)[27] ont proposé l'utilisation d'un Indice d'Opportunité (O_i) combinant l'estimation de la structure spatiale $S(z)$ pour une variable z et l'amplitude de variation $M(z)$ d'un phénomène structuré spatialement pour cette variable. Ces deux termes sont calculés par un modèle de tendance et la modélisation du semi-variogramme des résidus.

Nous avons appliqué cette approche à l'ensemble des parcelles de la base de données pour mettre en évidence l'existence d'une structure spatiale sur toutes les parcelles, quels que soient le cépage et le pays d'origine. Ce travail a montré que les parcelles françaises se distinguaient par des valeurs de *S(z)* significativement plus faibles et des valeurs de *M(z)* élevées. Les conclusions de cette étude internationale sont que la petite dimension des parcelles françaises (env. 1,5 ha en moyenne contre 5 ha pour les autres pays) conduit à des structures spatiales moins importantes. Toutefois, l'absence d'irrigation sur l'ensemble des parcelles françaises de la base de données expliquerait une amplitude de variation plus importante du rendement. L'origine même de la délimitation des parcelles pourrait expliquer une amplitude de variation plus importante du rendement. En effet, la définition des parcelles, en France, provient davantage des contraintes historiques ou sociales (succession), que des critères environnementaux liés aux caractéristiques du sol, d'exposition ou d'altitude. Ces critères environnementaux seraient mieux pris en compte dans les pays du « nouveau monde » où les contraintes foncières sont moins fortes. La définition de parcelles plus homogènes relativement aux caractéristiques du milieu expliquerait ainsi que l'amplitude de variation du rendement observée soit plus faible sur ces parcelles.

[27] PRINGLE M. J., McBRATNEY A. B., WHELAN B. M., and TAYLOR J. A., 2003. A preliminary approach to assessing the opportunity for site-specific crop management in a field, using yield monitor data, Agricultural Systems, 76, 273-292.

3 ACTI :

TAYLOR J., TISSEYRE B., BRAMLEY R., REID A., 2005. A comparison of the spatial variability of vineyard yield in European and Australian production systems. Proceedings of Fifth European Conference on Precision Agriculture, 907-915.

TISSEYRE B., MAZZONI C., ARDOIN N., CLIPET C., 2001. Yield and harvest quality measurement in precision viticulture – application for a selective vintage, Proceedings of Third European Conference on Precision Agriculture, 133-138.

TISSEYRE B., ARDOIN N.,SEVILA F., 1999, Precision viticulture : precise location and vigour mapping aspects, 2 nd European Conference on Precision Agriculture, Odense, Denmark, 319-330.

1 COM :

TISSEYRE B., ARDOIN N., CLIPET C., MAZZONI C., 2001. Mesure des paramètres de rendement et de qualité en viticulture de précision – application en vue d'une récolte sélective, actes des 12 émes journées du Groupe d'Etude des Systèmes de Conduite de la vigne, 639-643.

b. L'état hydrique de la vigne

Dans tous nos travaux, l'état hydrique des plantes est estimé par le potentiel hydrique de base. S'agissant d'une grandeur particulièrement contraignante à mesurer et qui varie dans le temps en fonction des caractéristiques climatiques, il nous a été difficile de mettre en œuvre des dispositifs expérimentaux basés sur des mesures à haute résolution spatiale et temporelle.
Nos expérimentations se sont donc concentrées sur des échantillonnages stratifiés permettant d'étudier l'amplitude de variation, à plusieurs échelles spatiales et à plusieurs dates, au sein du vignoble de la station expérimentale de Pech-Rouge. Comme précédemment, ces observations avaient pour objectif de vérifier si la variabilité spatiale de l'état hydrique était aléatoire ou structurée spatialement. Il s'agissait aussi d'identifier les principaux facteurs déterminant la structure spatiale lorsqu'elle était observée.

Le dispositif expérimental ne sera pas décrit dans ce document. Il est largement détaillé dans Taylor et al, (2010). Il est localisé sur le site de Pech Rouge ; l'évolution de l'état hydrique de 405 pieds de vignes répartis sur 27 placettes, 9 parcelles et 3 unités pédologiques a été suivi sur deux années consécutives. A chaque date de mesure, la base de données nous a permis d'analyser i) la variance entre plantes voisines (σ^2_P) au sein d'une placette, ii) la variance intra-placette (σ^2_S), iii) la variance intra-parcelle (σ^2_B) et iv) la variance intra-unité pédologique (σ^2_V). Cette analyse permet d'identifier la part de la variance correspondant à un phénomène aléatoire (non structuré dans l'espace). Un algorithme de partitionnement récursif (arbre de régression) a été utilisé pour hiérarchiser les facteurs de variation pour chacune des dates de mesure.

Ce travail nous a permis de montrer que :

- la variabilité spatiale de l'état hydrique augmente lorsque la contrainte hydrique moyenne sur l'ensemble du vignoble augmente,
- la part du phénomène aléatoire (non structuré dans l'espace) diminue avec l'augmentation de la contrainte hydrique sur l'ensemble du vignoble.

Ce travail a démontré l'intérêt de prendre en compte la variabilité de l'état hydrique des plantes, surtout lorsque la contrainte hydrique devient importante. A la mi-saison (floraison), lorsque la contrainte hydrique est faible (>-0.4 Mpa), le partitionnement récursif a identifié les variables liées à la parcelle (cépage, porte-greffe, mode de conduite) comme principal facteur discriminant. Pour des contraintes hydriques modérées, la variabilité spatiale de l'expression végétative explique la variabilité spatiale de l'état hydrique des plantes. Enfin, en fin de

saison (mois d'août), lorsque la contrainte hydrique devient importante, le principal facteur discriminant devient l'unité pédologique, suivi de l'expression végétative.

D'un point de vue pratique, les résultats de cette expérimentation contribuent à l'aide à la décision pour définir un schéma d'échantillonnage spatial de l'état hydrique des plantes. Lorsque la contrainte hydrique est faible, un échantillonnage peu dense est suffisant. La répartition des échantillons au niveau des parcelles peut être aléatoire. Lorsque la contrainte hydrique augmente, la variabilité spatiale augmente également, cette variabilité tend à se structurer en fonction des zones de vigueur identifiées au sein de chaque parcelle. L'échantillonnage doit alors être raisonné en conséquence. Lorsque la contrainte hydrique devient très importante, la variabilité spatiale est structurée en fonction des grandes unités pédologiques puis au sein de chacune de ces unités, en fonction des zones de vigueur. Un échantillonnage basé sur les unités pédologiques, puis au sein de chaque unité pédologique, en fonction des niveaux de vigueur observés devra être proposé.

1 ACL : TAYLOR J., ACEVEDO-OPAZO C., OJEDA H., TISSEYRE B., 2010, Identification and significance of sources of spatial variation in grapevine water status, Australian Journal of vine and wine research, 16, 218-226.

c. Conclusion

Ces recherches, basées sur l'expérimentation, ont permis d'apporter des connaissances et des références en matière de variabilité spatiale en viticulture. Elles montrent que dans un contexte dominé par des parcelles de petite taille, les principales variables relatives à l'expression végétative de la plante, à l'état hydrique de la plante et à la qualité de la vendange présentent une variabilité spatiale importante et structurée. Ce résultat constitue une condition nécessaire à l'adoption de la VP.

4.2. La variabilité spatiale en viticulture est-elle stable dans le temps ?

L'étude de cette question nous a amenée à concevoir plusieurs dispositifs expérimentaux sur la station expérimentale de Pech-Rouge. Le plus conséquent d'entre eux a nécessité le suivi des principaux paramètres de la plante et de la vendange sur un réseau de 30 placettes pendant 7 années consécutives (de 1999 à 2006). Ces expérimentations se sont focalisées sur les principales variables de caractérisation susceptibles d'asseoir une préconisation. Les données obtenues nous ont permis d'étudier la stabilité temporelle de la variabilité spatiale pour :

- les principaux paramètres quantitatifs (l'expression végétative, la surface de la canopée exposée, le rendement et le poids des baies) et de qualité de la vendange (concentration en sucre, pH, acidité totale, anthocyanes),
- et l'état hydrique des plantes.

a. Stabilité de la structure spatiale pour les paramètres quantitatifs et qualitatifs

Grâce à ces expérimentations, nous avons mis en évidence une variabilité inter-annuelle de la moyenne parcellaire pour tous les paramètres considérés (Tisseyre et al., 2008), due aux différences climatiques entre millésimes. Ce constat nous a amenés à introduire la notion de TSWFV (Temporal Stability of the Within Field Variability) qui représente la stabilité temporelle de la structure spatiale de la parcelle pour une variable donnée. Cette notion permet de caractériser le fait que les valeurs observées sont systématiquement plus élevées, moyennes ou faibles sur les mêmes sites de la parcelle, indépendamment de la moyenne parcellaire et donc du millésime.

L'analyse de la stabilité de la structure spatiale nous a conduits à proposer une approche originale reposant sur des tests de rangs. Cette approche a permis de quantifier la TSWFV, de comparer les années deux à deux, mais aussi sur l'ensemble de la période d'étude (indice de concordance de rang de Kendall).

Cette étude a permis de mettre en évidence deux familles de variables :

- les variables quantitatives qui présentent une structure spatiale stable avec, par ordre décroissant de stabilité : l'expression végétative, la surface de la canopée et le rendement,
- les variables de qualité de la récolte qui ne présentent pas de stabilité de la TSWFV : le sucre, l'acidité totale et le pH.

Ces résultats montrent l'intérêt de mesurer l'expression végétative, la surface de la canopée et dans une moindre mesure le rendement avec une haute résolution à un niveau intra-parcellaire. La structure spatiale de ces variables est stable dans le temps et peut être utilisée d'une année à l'autre pour préconiser des actions intra-parcellaires ou orienter les mesures complémentaires à effectuer pour prendre en compte l'effet du millésime.
En revanche, les paramètres de la qualité ne présentent pas de structure spatiale stable dans le temps. Une carte de la qualité effectuée l'année n pour préconiser une vendange sélective l'année n+1 semble donc d'un intérêt limité.

2 ACL :
KAZMIERSKI M., GLEMAS P., ROUSSEAU J., TISSEYRE B., 2011. Temporal stability of within-field patterns of NDVI in non irrigated Mediterranean vineyards, Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 45,2, 61-73.
TISSEYRE B., MAZZONI C., FONTA H., 2008. Whithin-field temporal stability of some parameters in viticulture : potential toward a site specific management. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 42, n°1, 27-39.

b. Stabilité de la structure spatiale de l'état hydrique des plantes

L'analyse de la variabilité intra-parcellaire de l'état hydrique de la vigne a permis de mettre en évidence une TSWFV très marquée. Une démarche originale a été proposée par Acevedo-Opazo et al. (2008) afin de modéliser la TSWFV pour ce paramètre. Cette approche fait collaborer un modèle de la structure spatiale, préalablement déterminé par une base de données de mesures, et une mesure de référence qui caractérise l'état du système (la parcelle) à l'instant t. L'approche proposée est résumée par l'équation 1. Elle consiste, sur une parcelle D, à effectuer une estimation $\hat{z}(s_i, t_j)$ de l'état hydrique des plantes en un site s_i et à une date t_j à partir d'une mesure de référence $z(s_{re}, t_j)$ réalisée sur un site de référence s_{re} à la même date t_j. L'estimation est basée sur un ensemble de coefficients a_{s_i} locaux et spécifiques pour chaque site s_i.

$$\hat{z}(s_i, t_j) = a_{s_i} \times z_{re}(s_{re}, t_j);\ s_{re} \in D,\ \forall s_i \in D,\ a_{s_i} \in \Re \quad \text{(Equation 1)}$$

Cette approche a été mise en œuvre avec succès sur deux parcelles et sur plusieurs années avec des cépages différents. La figure 3 présente les résultats obtenus pour l'une des parcelles et une date donnée. On pourra se référer à Acevedo-Opazo et al (2008) pour consulter l'ensemble des résultats obtenus.
La méthode proposée s'est avérée peu sensible au choix du site de référence et permet d'expliquer une part de la variabilité spatiale d'autant plus importante que le niveau de contrainte hydrique est élevé.

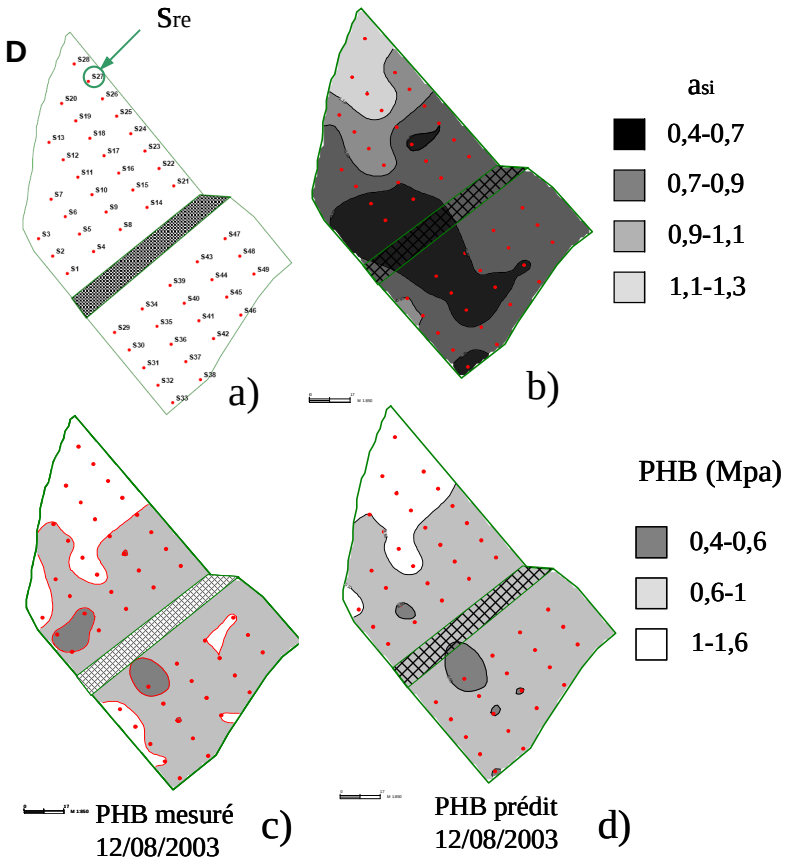


Figure 3 : Cartes de la parcelle Syrah-Villa (INRA de Pech-Rouge) représentant le potentiel hydrique de base (PHB) mesuré c) et prédit d) sur la base d'une collection de coefficients a_{si} b) et d'une mesure de référence réalisée sur le site s_{re} a).

2 ACL :
ACEVEDO-OPAZO C., TISSEYRE B., GUILLAUME S., OJEDA H. and ORTEGA FARIAS S., 2008. Is it possible to assess the spatial variability of vine water status, International Journal of wine and vine research. 42, n°4, 203-219.
ACEVEDO-OPAZO C., TISSEYRE B., GUILLAUME S. and OJEDA H., 2010. Spatial extrapolation of the vine (Vitis vinifera L.) water status: a first step towards a spatial prediction model, Irrigation science. 28,2, 143-155.
1 COM : ACEVEDO-OPAZO C., TISSEYRE B., GUILLAUME S. and OJEDA H., 2007. Modelling the spatial variability of the vine water status at a within field scale. actes des 15 émes journées du Groupe d'Etude des Systèmes de Conduite de la vigne, 1, 237-245.

c. Intérêt d'identifier la structure spatiale de l'état hydrique

L'approche représentée par l'équation 1 repose sur la détermination d'une structure spatiale stable définie par une collection de coefficients locaux. Ces coefficients sont donc uniquement dépendants des caractéristiques du site (s_i) considéré. Ils intègrent toutes les variables du milieu (réserve utile du sol, texture du sol, profondeur du sol, volume de sol exploré par les racines, topographie, etc.) susceptibles d'expliquer les différences d'état hydrique entre le site considéré et le site de référence (s_{re}). La collection de coefficients (a_{si}) est un modèle spatial de l'accès à l'eau défini de manière relative.

Sur notre site d'étude, l'ensemble des coefficients (a_{si}) a été utilisée pour définir des classes de fonctionnement hydrique. Celles-ci ont permis d'expliquer la variabilité intra-parcellaire des variables quantitatives (expression végétative, surface de canopée et dans une moindre mesure du rendement) (Ojeda et al, 2005). Il a également été observé que ces classes expliquaient la variabilité intra-parcellaire de la circonférence des souches (Tisseyre et al, 2005), un paramètre relatif à la partie pérenne de la plante qui intègre les conditions du milieu depuis sa plantation.
Les classes de fonctionnement proposées ont également été utilisées pour étudier la variabilité spatiale des paramètres de qualité de la vendange (sucre, pH, acidité totale, phénols, anthocyanes) (Ojeda et al. 2005).

Ces résultats mettent en évidence une interaction entre la structure spatiale de l'état hydrique et le climat de l'année. Le paragraphe suivant propose d'expliquer ce phénomène à travers un exemple simple. L'eau y est considérée comme le principal facteur limitant. Il s'agit d'une hypothèse raisonnable dans un contexte méditerranéen non-irrigué.

a) Considérons deux sites sur une parcelle, le site s_1 et le site s_2 tels que $a_{s1} << a_{s2}$. Cette inégalité des coefficients indique que quelle que soit la date d'observation t, la contrainte hydrique mesurée sur les plantes du site s_1 est toujours plus faible que sur le site s_2 ($z(s_1,t) < z(s_2,t) \ \forall \ t$). Ainsi, l'accès à l'eau sera toujours plus limitant sur le site s_2, ce qui explique que tous les paramètres quantitatifs y soient plus faibles que sur le site s_1. Ce phénomène se reproduit année après année tout au long du cycle végétatif et affecte au final la croissance de la partie pérenne de la plante (circonférence de la souche).
b) Toutefois, le niveau de contrainte hydrique observé sur chacun des sites dépend des caractéristiques climatiques qui ont précédé la date de mesure. Le niveau de contrainte observé sur un site est fonction du climat de l'année. L'eau y sera plus ou moins limitante ce qui explique en partie la variabilité interannuelle observée sur l'ensemble des paramètres quantitatifs.
c) Supposons qu'au stade phénologique considéré, il existe un niveau de contrainte optimal (z_{opt}) qui détermine en partie la qualité de la vendange. Si cette contrainte optimale est observée sur le site 1 l'année 1 ($z(s_1,t_1) \approx z_{opt}$), la contrainte hydrique sera nécessairement trop élevée sur le site s_2 ($z(s_2,t_1) > z_{opt}$). A l'inverse, si le climat de l'année suivante (année 2) entraîne une contrainte hydrique optimale sur le site s_2 ($z(s_2,t_2) \approx z_{opt}$), cela implique nécessairement une contrainte hydrique trop faible en s_1 ($z(s_1,t_2) < z_{opt}$). Cet exemple montre que les conditions favorables à la qualité peuvent être présentes sur chacun des sites en fonction du climat de l'année. En AP, ce phénomène porte le nom d'effet « flip-flop » (Florin[28] et al., 2009). Il désigne, l'inversion de la structure spatiale d'un paramètre. Cet effet 'flip-flop' mis en évidence à travers la contrainte hydrique est en partie à l'origine de l'instabilité temporelle observée pour les zones de qualité.

L'exemple présenté précédemment est volontairement simpliste. La contrainte hydrique affecte les paramètres de qualité de la vendange tout au long de la maturation, ainsi Ojeda H. (2007)[29] a proposé une succession d'états hydriques optimaux sur l'ensemble du cycle végétatif de la vigne : on parle de trajectoire hydrique optimale. En fonction du cépage considéré et de la qualité recherchée, différentes trajectoires hydriques optimales ont été proposées.

[28] Florin M.J., McBratney A.B., Whelan B.M., 2009. Quantification and comparison of wheat yield variation across space and time, European Journal of Agronomy, 30, 3, 212-219.
[29] Ojeda H., 2007. Irrigation qualitative de précision de la vigne. Le Progrès Agricole et Viticole. 7, 133-141.

Remarquons aussi que dans nos expérimentations, la mesure des paramètres de la qualité a toujours été effectuée à la vendange. Les motifs spatiaux des paramètres de qualité sont donc observés à une date choisie par le responsable du domaine. La maturation du raisin étant un phénomène dynamique, le choix de la date peut conduire à l'observation de motifs spatiaux différents en fonction des millésimes. Ce phénomène a été mis en évidence en condition irriguée par les travaux très récents de Trough et al. (2011)[30].

d. Conclusion

Dans un contexte méditerranéen non-irrigué, nos recherches ont mis en évidence le rôle important du modèle spatial de l'état hydrique et de son interaction avec le climat de l'année pour expliquer la variabilité intra-parcellaire des paramètres quantitatifs et de qualité de la vendange :

- le climat de l'année génère des contraintes hydriques plus ou moins sévères qui expliquent la variabilité inter-annuelle des paramètres quantitatifs. Toutefois, la stabilité du modèle spatial de l'état hydrique est élevé (forte TSWFV),
- en revanche, certains paramètres de la qualité sont dépendants de "la trajectoire hydrique" de la plante. En fonction du climat de l'année, cette trajectoire sera optimale sur des sites différents de la parcelle, ce qui explique en partie la forte instabilité temporelle observée pour ces paramètres.

D'un point de vue opérationnel, la structure spatiale de l'état hydrique d'une parcelle constitue une information déterminante pour définir des zones de gestion intra-parcellaires. En effet, de telles zones permettraient de mieux raisonner la localisation des mesures d'état hydrique (localisation des capteurs fixes et des observations) et les observations relatives à la plante, à la vendange et à sa qualité. Un tel zonage permettrait également d'envisager des préconisations et des pratiques modulées. Malheureusement, il n'existe pas de capteur simple susceptible de fournir cette information avec une haute résolution spatiale et un coût raisonnable. L'approche utilisée sur nos parcelles expérimentales n'est pas réaliste pour un vignoble commercial. Nous verrons, dans la suite de ce document, que nous nous sommes intéressés à ce problème en proposant l'utilisation d'informations auxiliaires à haute résolution pour définir des zones de fonctionnement hydrique au niveau intra-parcellaire.

1 ACTI : TISSEYRE B., OJEDA H., CARILLO N., DEIS L., HEYWANG M., 2005. Precision viticulture and water status: mapping the predawn water potential to define within vineyard zones. Proceedings of the Fruits and nuts and vegetable production engineering TIC (Frutic05) Conference, Montpellier, 719-736. On line on http://cemadoc.cemagref.fr/exl-doc/colloque/ART-00001663.pdf.

1 ACLN : TISSEYRE B., OJEDA H., CARRILLO N., DEIS L., HEYWANG M. 2006. Viticultura de precisión y estado hídrico. I: Cartografía del potencial hídrico e interés para la zonificación a nivel intra-parcelario. Enología, 2, 1-10.

2 COM :

TISSEYRE B., OJEDA H., CARRILLO N., DEIS L., HEYWANG M., 2005. Precision viticulture and water status I : mapping the predawn water potentiel and utility to define within vineyard zones. actes des 14 émes journées du Groupe d'Etude des Systèmes de Conduite de la vigne, 1, 18-29.

OJEDA H., CARILLO N., DEIS L., TISSEYRE B., HEYWANG M., CARBONNEAU A., 2005. Precision viticulture and water status II : quantitative and qualitative performance of different within field zones, defined from water

[30] Trought M.C.T and Bramley R.G.V. 2011. Vineyard variability in Marlborough, New Zealand: characterising spatial and temporal changes in fruit composition and juice quality in the vineyard, Australian journal of grape and wine research, 17, 1, 79–89

potential mapping. actes des 14 émes journées du Groupe d'Etude des Systèmes de Conduite de la vigne, 2, 741-748.

4.3 Les observations utilisées en AP sont-elles transposables à la viticulture ?

Notre questionnement s'est focalisé sur des données issues de capteurs déjà utilisés en grandes cultures et susceptibles d'être rapidement adoptés en viticulture. C'est le cas en particulier de l'imagerie multispectrale et de la mesure des propriétés électriques des sols, que ce soit la résistivité électrique apparente (ERa) ou la conductivité électrique apparente (ECa).

La télédétection multispectrale appliquée à la viticulture a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. On pourra se référer à Tisseyre et al., (2008) pour un état de l'art sur ces aspects. Ces travaux concernent aussi bien les traitements d'images à mettre en œuvre afin de prendre en compte le caractère discontinu du couvert de la vigne que l'interprétation d'indices de végétation classiques tels que le NDVI (normalised difference vegetative index) ou le SR (Simple Ratio) estimés par télédétection (satellites, avion, drône). Ces travaux se sont focalisés sur l'estimation, au niveau intra-parcellaire, de l'expression végétative ou de l'indice foliaire (Leaf Area Index).
Dans un contexte méditerranéen, ces approches présentent un grand intérêt. En effet, nos travaux précédents (cf. chapitre 3.2) ont mis en évidence une correspondance étroite entre la structure spatiale de l'expression végétative et celle de l'état hydrique des plantes. Dans le cas où le principal facteur limitant est l'eau, la mesure d'un indice de végétation tel que le NDVI, avec une haute résolution devrait permettre d'identifier des zones de fonctionnement hydrique au niveau intra-parcellaire. Cette question n'a jamais été explorée en viticulture.

La mesure des propriétés électriques (ERa ou ECa) a fait l'objet de plusieurs travaux y compris en viticulture (Dabas et al, 2001[31], Corwin and Lesch, 2005[32]). Cette information est utilisée pour orienter les observations de sol et/ou extrapoler des observations ponctuelles (McBratney et al., 2003)[33]. En VP, l'utilisation de ces données (ERa ou ECa) pour définir des unités de gestion en relation avec les caractéristiques du sol présente un grand intérêt. Dans un contexte méditerranéen, ces données devraient permettre d'identifier des zones de fonctionnement hydrique en relation avec les caractéristiques du sol.
Toutefois, les capteurs actuellement utilisés présentent des caractéristiques susceptibles de restreindre la pertinence de cette donnée en viticulture. En effet, de conception, les capteurs utilisés de manière commerciale sont limités à des profondeurs d'investigation allant de 1,5 à 2 m, ce qui peut s'avérer insuffisant pour décrire le volume de sol exploré par les racines d'une plante pérenne comme la vigne. Cette question n'a jamais été abordée dans la littérature.

Nos recherches décrites ci-après, se sont attachées à tester la pertinence de ces deux sources d'information pour définir des zones de fonctionnement hydrique au niveau intra-parcellaire.

[31] Dabas M., Tabbagh J. and Boisgontier D., 2001. Multi-depth continuous electrical profiling (MuCep) for characterization of in-field variability. Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture. June 18-20, 2001, Montpellier, France. 361-366.
[32] Corwin D.L. and Lesch S.M., 2005. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity I. soil survey. Computers and Electronics in Agriculture,46, 32-45.

[33] McBratney A. B., Mendonça Santos M.L. and Minasny B., 2003. On digital soil mapping, Geoderma,117, 1, p. 3-52.

a. Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental a été conçu afin d'étudier l'intérêt des observations précédemment citées. Ce dispositif se situe sur l'unité expérimentale de Pech-Rouge. Les expérimentations ont été conduites sur 9 parcelles regroupant des cépages, des porte-greffes et des densités de plantation différentes. Trois unités pédologiques différentes ont été considérées et 27 placettes regroupant 135 plantes ont été définies. Ces placettes ont fait l'objet d'un suivi sur deux années consécutives pour l'état hydrique des plantes, l'expression végétative, le rendement et les paramètres de qualité de la vendange. Parallèlement, les observations (images multispectrales, sondages conductifs et résistifs) à haute et moyenne résolution spatiale ont été effectuées.

b. Résultats relatifs aux images multispectrales

Les résultats de cette expérimentation ont permis de confirmer, dans nos conditions, la pertinence d'un indice de végétation tel que le NDVI pour caractériser la variabilité intra-parcellaire des paramètres quantitatifs. Nous avons également mis en évidence une corrélation entre l'état hydrique des plantes (estimé par le potentiel hydrique de base) et l'ensemble des paramètres en relation avec la canopée des plantes (NDVI, épaisseur et hauteur de la canopée, diamètre des troncs). Sur l'ensemble des unités pédologiques du dispositif expérimental, l'indice de végétation (NDVI) est pertinent pour identifier les placettes correspondant à des états hydriques différents.
Des observations complémentaires ont permis de valider la stabilité de ces relations dans le temps. En effet, ce résultat a été obtenu en considérant plusieurs mesures de potentiel hydrique de base à des dates différentes dans la saison et plusieurs acquisitions d'images réparties sur trois années différentes (1999, 2006, 2007). De plus, une corrélation entre les mesures de NDVI et un paramètre intégratif comme la circonférence des ceps a été mise en évidence.
Une analyse plus fine des résultats à l'aide de l'analyse de la variance montre toutefois que l'utilisation d'un indice de biomasse, comme le NDVI, n'est pertinente que si la variabilité spatiale est importante. En effet, cet indice s'est avéré moins discriminant sur l'une des unités pédologiques caractérisée par un sol plus homogène et surtout par des contraintes hydriques moins marquées.

2 ACL :
ACEVEDO-OPAZO C., TISSEYRE B., GUILLAUME S. and OJEDA H., 2008. The potential of high spatial resolution information to define within-vineyard zones related to vine water status. Journal of Precision Agriculture, 9, 285-302.
SANTESTEBAN L. G., MIRANDA C., JIMENEZ C., FUENTEMILLAM., URRETAVIZCAYA I., TISSEYRE B., GUILLAUME S., ROYO J.B., 2010. Evaluation of the interest of NDVI to identify distinct management units in vineyards. Revista de teledeteccion. 3, 11-16.
3 ACTI :
ROUSSEAU J., DUPIN S., ACEVEDO-OPAZO C., B. TISSEYRE, H. OJEDA., 2008. L'imagerie aérienne : application à la caractérisation des potentiels viticoles et oenoligiques, Bulletin de l'organisation internationale de la vigne et du vin. 81, 507-517.
SANTESTEBAN, L. G., TISSEYRE, B., ROYO, J. B., and GUILLAUME, S. 2008. Is it relevant to consider remote sensing information for targeted plant monitoring ? Proceedings of the VIIth International terroir Congress, Nyon, Suisse, 469-474.
ACEVEDO-OPAZO C., TISSEYRE B., GUILLAUME S. and OJEDA H., 2007. Test of NDVI information for a relevant vineyard zoning related to vine water status, Proceedings of Sixth European Conference on Precision Agriculture, 547-554.
1 OS :

JOHNSON L. F., NEMANI R., HORNBUCKLE J., BASTIAANSSEN W., THORESON B., TISSEYRE B., PIERCE L., 2011. Remote Sensing for Viticultural Research and Production, Chapter 3, In: The Geography of Wine: Eds. P. H. Dougherty, Springer, Germany (In press) ISBN 978-94-007-0463-3. Details can be found at http://www.springer.com/earth+sciences+and+geography/geography/book/978-94-007-0463-3
3 ASCL :
ROUSSEAU J., HALLEREAU C., TISSEYRE B., 2009. La télédétection pour caractériser des potentialités viticoles. Revue de viticulture et d'œnologie de la vallée du Rhône. 4, 10-14.
TISSEYRE B., 2007. La télédétection en viticulture, La vigne, 187, 48-49.
TISSEYRE B., 2006. L'imagerie aérienne pour une vendange sélective, Réussir vigne, 121, 28.

c. Résultats relatifs aux propriétés électriques des sols

En ce qui concerne les propriétés électriques des sols, nos expérimentations mettent en évidence, comme il était attendu, un effet marqué des unités pédologiques. Par exemple, pour l'unité pédologique située sur le plateau calcaire de La Clape, les alternances de calcaire et de marnes entraînent une amplitude de variation très importante de la conductivité électrique apparente (ECa) entre des zones à forte (marnes) et à faible (calcaire)[34] contrainte hydrique. Cette amplitude de variation est beaucoup moins importante sur d'autres unités pédologiques.

Afin de mieux analyser l'intérêt de l'ECa pour définir des zones de gestion liées à l'expression végétative de la vigne et à son état hydrique, une étude plus approfondie (Coulouma et al., 2009) a été conduite sur deux parcelles appartenant à deux unités pédologiques différentes (figure 4). Sur la base des résultats précédents, le NDVI à la véraison a été choisi comme référence pour mettre en évidence des zones de gestion potentielles (Figure 4). Nos travaux ont étudié l'effet de différentes conditions d'acquisition sur la qualité de la mesure. Ils ont montré que la variabilité causée par différents protocole d'acquisition était négligeable devant la variabilité causée par la nature du sol sur les deux parcelles étudiées. A l'issue de ces travaux, les observations à haute résolution fournies par le capteur de conductivité embarqué ont été considérées pertinentes dans la suite de l'étude.

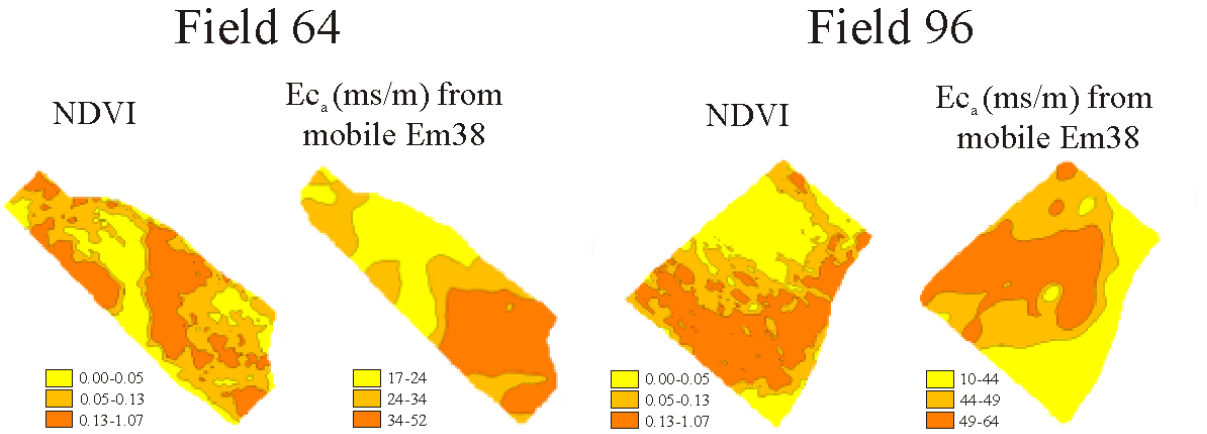


Figure 4 : Cartographie du NDVI et de la conductivité apparente (ECa) du sol pour deux parcelles situées sur des unités pédologiques différentes. La parcelle 64 située sur un plateau calcaire présente des alternances de calcaire et de marnes. La parcelle 96 est située dans une zone de colluvions avec affleurement de calcaire.

[34] Sur notre site expérimental, la fissuration du calcaire entraîne l'accumulation d'argile. Le système racinaire de la vigne est capable d'y mobiliser l'eau en profondeur. A l'inverse, la marne est uniformément compacte, ce qui limite la profondeur d'enracinement de la vigne et la réserve utile qui en résulte.

Les motifs spatiaux mis en évidence par les deux sources d'information (NDVI et ECa) différent fortement sur une parcelle (P96) et de manière moins nette pour l'autre parcelle (P64) (Figure 4). Ce résultat met en évidence la faible pertinence des propriétés électriques des sols, intégré sur une profondeur de 1 à 2 m, pour définir des zones de gestion. Afin de comprendre ce phénomène, plusieurs profils résistifs ont été réalisés jusqu'à des profondeurs plus représentatives du système racinaire de la vigne - 5 mètres -. Ces profils résistifs ont été utilisés pour déterminer la résistivité réelle pour différente profondeur de sol. Une caractérisation pédologique détaillée du sol pour chaque profondeur a permis d'associer une valeur de résistivité à chaque type de matériaux observé. Ces observations complémentaires ont mis en évidence les limites relatives des sondages conductifs ou résistifs dans nos conditions. La profondeur d'investigation des capteurs habituellement utilisés en AP (1 à 2 m) est certainement insuffisante pour appréhender la variabilité du sol réellement exploré par le système racinaire de la vigne. D'autre part, certains matériaux qui présentent des capacités de rétention en eau différentes peuvent, malgré cela, présenter des valeurs de résistivité ou de conductivité similaires.

Ces résultats n'excluent pas systématiquement l'intérêt des propriétés électriques des sols pour définir des zones de gestion. En effet :

- sur certaines unités pédologiques, les variations d'ECa ou d'ERa peuvent s'avérer pertinentes,
- sur vignoble irrigué, la profondeur du système racinaire des plantes peut correspondre à la profondeur d'investigation des capteurs. D'ailleurs, la pertinence de cette information pour définir des zones de gestion dans ces conditions a été mise en évidence par certains auteurs (Bramley, 2002[35]),
- il est possible d'effectuer plusieurs sondages ; l'analyse des différences entre un sondage en condition humide et un sondage effectué en condition sèche pourrait mettre en évidence des matériaux présentant des propriétés différentes par rapport à l'eau, ce qu'il serait impossible de déterminer avec un seul sondage.
- Enfin, un sondage conductif ou résistif constitue une source d'information intéressante pour déterminer l'unité pédologique d'appartenance d'une parcelle (Tisseyre et al., 2010).

1 ACL : TISSEYRE B., TAYLOR J., COULOUMA G., LAGACHERIE P., 2009. Mapping soil units within a vineyard using statistics associated with spatial data and factorial discriminant analysis, Geoderma, 153, 278-284.
1 OS : COULOUMA, G., TISSEYRE, B., and LAGACHERIE, P., 2009. Is a systematic two dimensional EMI soil survey always relevant for vineyard production management? A test on two pedologically contrasting Mediterranean :vineyards. Chapter 24 In: Proximal soil sensing: Eds. R.A. Viscarra Rossel, A.B. McBratney and B. Minasny. Progress in Soil Science series. Springer. Heidelburg, Germany (In press) ISBN 978-90-481-8858-1 details can be found at http://www.springer.com/environment/soil+science/book/978-90-481-8858-1.
1 ACTI : COULOUMA G., TISSEYRE B., LAGACHERIE P., 2008. Is systematic EMI two dimensional soil survey suitable for vineyard production management? A test on two pedologically-contrasted Mediterranean vineyards, Proceedings of first global workshop on high resolution digital soil sensing and mapping,

[35] BRAMLEY R.G.V, 2002. Precision viticulture - tools to optimise winegrape production in a difficult landscape. Proceedings of the 6th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management, Minneapolis, MN, USA, 14-17 July, 2002, 648-657.

d. Conclusion

Mes travaux ont montré que parmi les capteurs déjà utilisés en grandes cultures, l'imagerie multispectrale et les indices de végétation qui en découlent présentent un grand intérêt en viticulture. Cette observation à haute résolution met en évidence la structure spatiale des principaux paramètres quantitatifs et les zones de gestion pérennes susceptibles d'en résulter. Dans un contexte méditerranéen non-irrigué, ces zones correspondent à des zones d'état hydrique. L'imagerie multispectrale à haute résolution est une observation qui offre donc des perspectives intéressantes pour la gestion modulée en viticulture. Ces résultats ont abouti à la création d'un service d'acquisition et de traitement d'images multispectrales spécifique pour la viticulture (Oenoview®, ICV, Spot-Image).
Nos travaux montrent qu'en conditions non-irriguées, les propriétés électriques du sol doivent être utilisées avec précaution. Des études préalables associées à une expertise pédologique et à une connaissance des principes physiques de la mesure doivent nécessairement accompagner l'utilisation de cette source d'information en viticulture.

4.4. La caractérisation : de la donnée à l'information agronomique

Rappelons que la caractérisation permet d'élaborer une information agronomique à partir d'une ou plusieurs observations. C'est sur la base de cette information agronomique que le professionnel de la viticulture pourra élaborer une préconisation.

Dans le domaine de la caractérisation, j'ai exploré deux axes de recherche :

- l'élaboration d'une information agronomique spatialisée grâce à un modèle défini et étalonné localement. L'objectif du modèle est d'estimer une information agronomique à partir d'informations ponctuelles et de données à haute résolution. Nos travaux se sont focalisés sur une information déterminante pour l'aide à la décision en viticulture : l'état hydrique des plantes.
- le développement d'une méthode générale de fusion de données capable de prendre en compte l'expertise des professionnels. L'objectif est de proposer une approche permettant aux professionnels de produire un diagnostic sur les origines de la variabilité observée.

a. L'extrapolation spatiale de l'état hydrique des plantes

D'un point de vue scientifique, il s'agit d'un objet d'étude original puisque l'état hydrique des plantes présente une grande variabilité à la fois dans l'espace et dans le temps. Cette spécificité nous a conduits à proposer une approche originale qui consiste à faire collaborer un modèle spatial avec une mesure de référence ponctuelle :

- le modèle spatial permet de prendre en compte la variabilité spatiale de l'état hydrique des plantes sur le domaine d'étude considéré,
- la mesure de référence réalisée ponctuellement à la date *t* est extrapolée grâce au modèle spatial et permet de mettre à jour l'estimation de l'état hydrique sur l'ensemble du domaine d'étude considéré.

L'approche que nous avons proposée reprend le formalisme utilisé pour décrire la structure spatiale de l'état hydrique des plantes à l'équation 1. La collection de coefficients locaux a_{s_i} permet de modéliser les paramètres du milieu qui expliquent les différences d'état hydrique entre un site de référence et un site quelconque du domaine d'étude. La démarche adoptée consiste à estimer ces coefficients par des données auxiliaires. Afin de rester dans un cadre linéaire, nous avons proposé d'utiliser une combinaison linéaire des variables auxiliaires.

L'approche testée est présentée dans l'équation 2. Chaque site s_i est décrit par un vecteur $\boldsymbol{q}^i$, $\boldsymbol{q}^i=[q_1(s_i),q_2(s_i),...,q_K(s_i)]$, correspondant aux valeurs des informations auxiliaires mesurées en ce site. *K* est le nombre d'informations auxiliaires disponibles.

$$\hat{z}(s_i,t_j) = \left(b_0 + b_1 \times q_1(s_i) + b_2 \times q_2(s_i) + ... + b_K \times q_K(s_i)\right) x\ z_{re}(s_{re},t_j) \quad \text{(Equation 2)}$$
$$avec \quad s_{re} \in D,\ \forall s_i \in D,\ q_k(s_i), k = 1,...,K \in \Re \text{ et } b_k, k = 0,...,K \in \Re ,$$

Les coefficients b_0, b_1, b_2, b_3,…, b_K représentent les coefficients à étalonner. Ces coefficients ne sont pas spécifiques du site considéré mais du domaine D qui, dans notre cas, correspond à la parcelle. Ainsi, l'étalonnage de la fonction présentée par l'équation 2 revient à déterminer un vecteur $\boldsymbol{b}$= [b_0, b_1, b_2, b_3,…, b_K] sur D.

Cette méthode a été mise en œuvre et validée sur deux parcelles (Acevedo-Opazo et al, 2010). Comparée à une approche classique similaire à l'estimation de la moyenne, elle permet d'expliquer une part importante de la variabilité spatiale de l'état hydrique des plantes (r^2 = 0.7) lorsque la contrainte hydrique est élevée. Les variables auxiliaires les plus pertinentes, sélectionnées par une méthode pas à pas, sont relatives à l'expression végétative de l'année (Surface Foliaire Exposée, NDVI) et à l'expression végétative de la plante intégrée depuis sa plantation (circonférence des ceps). Lorsqu'on utilise des données auxiliaires facilement accessibles avec une haute résolution spatiale telles que le NDVI, les résultats restent pertinents même si le modèle est de moindre qualité (r^2 = 0.55). Ainsi on peut utiliser un modèle relativement simple nécessitant, pour chaque domaine D (parcelle), la détermination de seulement trois paramètres b_0, b_1, b_2, voire seulement deux paramètres (b_0, b_1) si l'on ne considère qu'une donnée auxiliaire comme le NDVI. En théorie, l'étalonnage d'un tel modèle peut donc être conduit avec seulement 2 ou 3 mesures d'état hydrique, réalisées sur des sites différents et à des dates différentes. Cet étalonnage pourrait tout à fait s'inscrire dans une campagne classique de suivi de l'état hydrique des plantes. Un tel protocole d'échantillonnage simplifié a été testé. Il a permis d'étalonner un modèle dont la pertinence est tout à fait similaire au modèle précédent (r^2 = 0.7).

Cette approche est difficilement transposable à l'ensemble d'un vignoble ou à tout un bassin versant. En effet, elle suppose que les différences observées au niveau des données auxiliaires expliquent les différences d'état hydrique. Cette hypothèse reste acceptable au niveau intra-parcellaire puisque toutes les plantes ont le même âge et y sont conduites de manière similaire. En revanche, elle devient difficilement acceptable au niveau inter-parcellaire si l'âge des plantes ou le mode de conduite (et les valeurs de NDVI qui en résultent) changent d'une parcelle à l'autre. Nous verrons, dans la suite de ce document que le changement d'échelle constitue une perspective intéressante pour la poursuite de cette recherche.

Conclusion

D'un point de vue opérationnel, notre approche est originale car elle propose un modèle :

- qui permet de représenter la variabilité spatiale de l'état hydrique des plantes à chaque fois qu'une mesure de référence est effectuée,
- qui est facile à étalonner puisqu'il ne nécessite que des mesures de référence habituellement réalisées et des données auxiliaires accessibles avec une haute résolution spatiale.

Notre approche présente toutefois des limites opérationnelles essentiellement liées :

- au domaine de validité du modèle, restreint à la parcelle,

- à l'existence d'une ou plusieurs données à haute ou moyenne résolution liées indirectement à l'état hydrique des plantes. Nos expérimentations se sont déroulées dans un contexte méditerranéen caractérisé par de fortes contraintes hydriques. Dans un autre contexte, le lien entre la structure spatiale de l'état hydrique des plantes et les données auxiliaires relatives à la croissance de la canopée peut être moins direct.

1 ACL : ACEVEDO-OPAZO C., TISSEYRE B., TAYLOR J., OJEDA H., GUILLAUME S. 2010. Spatial prediction model of the vine (Vitis vinifera L.) water status using high resolution ancillary information, Journal of Precision Agriculture, 11, 4, 358-378.
1 ACTI : TAYLOR J., TISSEYRE B., ACEVEDO-OPAZO C., LAGACHERIE P., 2009. Field-scale model of the spatio-temporal vine water status in a viticulture system. Proceedings of Sixth European Conference on Precision Agriculture, 537-544.

b. La fusion de données spatialisée

Bien qu'intéressante d'un point de vue opérationnel, l'extrapolation d'une information agronomique reste nécessairement une approche spécifique et limitée puisqu'elle suppose i) la disponibilité d'observations (données auxiliaires) étroitement reliées à la variable d'intérêt et ii) l'étalonnage d'un modèle spécifique au domaine spatial considéré.
Les données d'observation peuvent aussi être utilisées pour décrire l'hétérogénéité spatiale afin de mettre en évidence des zones générales de fonctionnement. Elles peuvent être associées à d'autres informations agronomiques et à une expertise locale afin de produire un diagnostic ou une information agronomique. Cette approche n'est pas une caractérisation à proprement parler. Il s'agit de fusionner l'ensemble des informations spatialisées de manière guidée afin de mettre en évidence des zones générales de fonctionnement. L'origine de ces zones de fonctionnement fera l'objet d'hypothèses qui pourront être validées ou invalidées grâce à la prise en compte de l'expertise du chef de culture ou par l'observation de données complémentaires. Il s'agit d'une approche très générale qui suppose la disponibilité d'outils et de méthodes de fusion de données spatialisées adaptées.

Dans la littérature, un schéma classique d'analyse des données spatialisées a été proposé dans le cadre de l'agriculture de précision (Ping and Dobermann, 2005[36]). Lorsque les mesures sont irrégulièrement distribuées dans l'espace, ce schéma introduit une phase d'interpolation spatiale pour s'affranchir du caractère hétérotopique des mesures (réorganisation de chaque couche de données selon une grille régulière commune). Chaque couche de donnée devient ainsi parfaitement superposable. Considérant p couches de données et n sites (individus) définis par les nœuds de la grille d'interpolation utilisée, cette approche permet de revenir à l'analyse d'une matrice n,p et ainsi d'utiliser des outils classiques d'analyse multivariées (ACP, CAH, FDA, etc.). L'analyse variographique et le krigeage sont au cœur de cette approche ce qui explique le nombre important de travaux qui portent sur l'utilisation de méthodes géostatistiques telles que le krigegage ou le co-krigeage en agriculture.

Ce schéma classique présente toutefois des limites :

- les méthodes utilisées nécessitent une bonne connaissance des géostatistiques et des hypothèses de base nécessaires à leur utilisation rigoureuse. Elles restent donc difficilement transférables à la grande majorité des professionnels.
- paradoxalement, le caractère spatialisé des données est rarement utilisé dans l'analyse. L'analyse multivariée subséquente à l'interpolation est souvent conduite dans l'espace des variables, l'espace géographique n'y est généralement pas pris en compte. Ces

[36] Ping J.l. and Dobermann A., 2005. Processing of yield map, Journal of precision agriculture, 6, 193-212.

analyses conduisent à simplifier la représentation des données (de la parcelle ou de l'ilôt de parcelles) et à identifier des classes susceptibles de correspondre à des zones de fonctionnement. Ce schéma d'analyse introduit une grande confusion entre classe et zone géographique qui se retrouve dans la littérature. Notons également que les classes obtenues doivent ensuite être interprétées (création d'étiquettes qualitatives telles que « fort », « moyen », « faible ») pour être compréhensibles par les professionnels.

- l'imprécision associée à la mesure, à sa localisation et/ou à son empreinte spatiale peut difficilement être intégrée dans l'analyse. Lorsque le krigeage est rigoureusement réalisé, la variance de krigeage rend compte de la qualité des estimations, toutefois, cette variance n'est jamais utilisée dans les analyses multivariées.
- enfin, l'expertise et la connaissance du terrain se traduisent par la définition de zones aux contours imprécis auxquelles sont associées des étiquettes qualitatives (« faible », « moyen », « fort » ou « sol superficiel », « sol profond »). Le schéma d'analyse présenté précédemment ne permet pas de considérer ce type d'information de manière rigoureuse.

Ce constat nous a conduits à proposer une approche originale de fusion de données spatialisées capable de pallier ces limites. Nous avons proposé un formalisme permettant de fusionner des données spatiales :

- qualitatives et quantitatives,
- imprécises et incertaines,
- hétérotopes,
- de résolution spatiale variable.

En traitement de l'information, on est souvent amené à différentier l'incertitude, qui caractérise un défaut de relation entre la valeur mesurée et la valeur vraie, de l'imprécision qui est attachée à la limite de l'outil employé pour mesurer cette valeur. Toutefois, ces deux grandeurs sont liées puisque l'incertitude décroît lorsque l'imprécision croît. Pour l'illustrer, prenons un exemple proposé par O. Strauss[37] (2009) : « …si je vous affirme que la température du jour où vous lirez cette page est de 25°37, la valeur que je donne est très précise, mais sa relation avec la réalité a de grande chance d'être défectueuse. Si je vous affirme que cette température sera comprise entre -10° et 40°, ma prédiction est très imprécise, mais ses chances de réalisations sont très élevées. » Le cadre probabiliste peut représenter facilement chacun de ces deux défauts mais il ne permet pas de manipuler simultanément l'imprécision et l'incertitude attachée à une information (O. Strauss, 2009). Les paragraphes suivants décrivent la méthode de fusion de données spatialisées que nous avons proposée. Ils montrent comment, le cadre de la théorie des possibilités a été utilisé pour :

- décrire l'information spatiale,
- définir une fonction d'agrégation permettant de fusionner différentes couches d'information spatiales,

Description de l'information spatiale

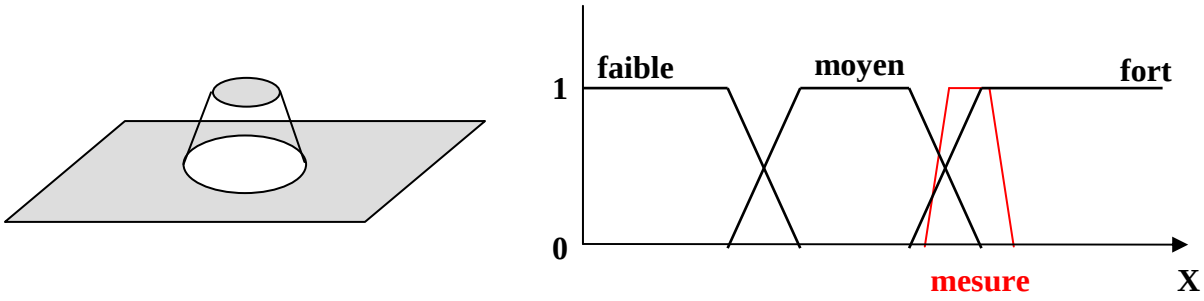
Une donnée spatiale est définie par deux composantes distinctes : la « localisation » et la « valeur ». La composante localisation désigne l'extension spatiale de la donnée, c'est à dire

[37] Strauss O., 2009. Nouvelles représentations des mesures de confiances, 7éme journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR 2009), Neuvy sur Barangeon, France. En ligne à l'adresse http://jnrr09.lms.sp2mi.univ-poitiers.fr/IMG/pdf/Strauss-JNRR09.pdf.

la zone où elle peut être prise en compte. La composante valeur désigne la mesure effectuée par un capteur ou l'avis exprimé par un expert. Chaque composante est définie de manière indépendante.

La description de la composante « valeur » nécessite de disposer d'un formalisme permettant de traiter indifféremment des données qualitatives et quantitatives. C'est pourquoi nous avons proposé de traduire l'ensemble des données, quelle que soit leur nature, sous une forme qualitative. La traduction des données quantitatives sous une forme qualitative repose sur l'expertise des professionnels. Il est en effet possible à des experts de définir une équivalence entre des termes linguistique d'une part, et des valeurs d'autre part. Par exemple, un exploitant peut considérer que le rendement d'une parcelle est « moyen » si la mesure se situe « entre 5 et 7 Mg par hectare ». Les données et les avis issus des experts présentent un caractère imprécis et incertain. Pour prendre en compte cet aspect, un formalisme basé sur la théorie des possibilités a été adopté.

Des sous-ensembles flous sont utilisés pour la description :
- de la composante localisation, nous parlons alors de région floue (figure 5.a),
- de la valeur mesurée (figure 5.b),
- de la correspondance entre donnée mesurée et étiquette qualitative (figure 5.b).



a) Position b) Mesure

Figure 5 : Description d'une information spatiale

La position d'un sous-ensemble flou décrivant une valeur relativement à un sous-ensemble flou décrivant une étiquette qualitative permet d'associer à l'étiquette deux degrés de confiance (compris entre 0 et 1) :
- la possibilité, donnée par le degré maximal d'intersection entre les deux sous-ensembles,
- la nécessité, donnée par le degré minimal d'inclusion entre les deux sous-ensembles.
Ce degré traduit une notion de certitude.

La fusion des informations spatiales

La fusion de l'ensemble des données disponibles nécessite de résoudre le problème de l'hétérotopie. Pour cela, nous avons proposé une méthode d'estimation spatiale adaptée aux données décrites à l'aide de notre formalisme. Cette méthode permet, à partir des données disponibles :
- d'estimer la composante « valeur » de n'importe quelle zone intra-parcellaire que nous désignerons par le terme « zone de requête »,
- d'associer un degré de certitude à l'estimation.

C'est au niveau de l'estimation spatiale que se situe notre principal apport scientifique. Nous avons proposé un opérateur permettant de caractériser une zone de requête quelconque, définie par un sous ensemble flou géographique. Cela signifie que nous utilisons les données disponibles pour associer une composante « valeur » à la zone de requête, autrement dit pour estimer la possibilité et la nécessité de chacune des étiquettes.

L'opérateur généralement utilisé pour agréger les degrés de possibilité est le maximum – alors que le minimum est utilisé pour les degrés de nécessité. Dans le cadre du traitement de données spatiales, cet opérateur ne peut pas être appliqué car l'importance de chaque donnée dans le processus d'estimation dépend de sa position relative par rapport à la zone de requête. De plus, lorsque le nombre de données est important, l'opérateur doit permettre de filtrer les valeurs extrêmes (considérées comme « atypiques », et non représentatives de la zone de requête).
L'opérateur d'agrégation que nous proposons est basé sur une intégrale de Choquet. Cet opérateur :
- sélectionne les données spatialement pertinentes pour estimer la zone de requête,
- élimine les valeurs les plus extrêmes (la quantité de données éliminée est désignée par un coefficient β compris entre 0 et 1 ; il s'agit de l'unique paramètre réglé par l'utilisateur),
- puis sélectionne la valeur maximale parmi les informations restantes.

Exemple d'application

Cette méthode d'analyse des données a été testée en 2004, avec un chef de culture sur le domaine Chivite (Navarre, Espagne). Sur ce domaine, une campagne de mesure a été réalisée avec une machine à vendanger munie d'un capteur de rendement (prototype Pellenc S.A.), ce qui a permis de cartographier le rendement sur la majorité des parcelles du domaine. Ces cartes ont mis en évidence de fortes différences de rendement à l'intérieur des parcelles. La méthode d'analyse a été utilisée par le chef de domaine pour identifier l'origine des différences de rendement observées.
Cette application nous a permis de valider la pertinence de notre approche à toutes les étapes de l'analyse. En particulier, nous avons pu vérifier la possibilité :

- de définir des étiquettes de rendement (« faible », « moyen », « fort ») en fonction des objectifs de production du domaine,
- de définir des zones de rendement « faible », « moyen » ou « fort » par contourage des cartes et de produire la certitude avec laquelle ces zones correspondent aux étiquettes souhaitées,
- de prendre en compte la connaissance du chef de culture qui a représenté les zones correspondant à des « sols superficiels », des « sols profond », des zones « gélives », des zones d' « excès d'eau », etc.
- d'utiliser les zones de rendement identifiées par le responsable de domaine comme zone de requête et, de fusionner, au sein de ces zones, l'ensemble des sources d'information disponibles afin d'associer une composante valeur à chaque zone de rendement.

Cette application s'inscrit tout à fait dans une démarche de caractérisation du système de production (cf. figure 1). En effet, elle a permis de mettre en évidence que les zones de faible rendement correspondent aux zones les moins qualitatives (en sucre), où la résistivité du sol est la plus forte et le sol superficiel. Ce résultat a permis de faire l'hypothèse d'un problème récurrent d'accès à l'eau sur ces zones. Suite à cette étude, le responsable du domaine Chivite a planifié un suivi de l'état hydrique des plantes pour confirmer le phénomène avant

d'envisager, spécifiquement sur ces zones, la mise en place d'une irrigation destinée à lutter contre d'éventuels blocages de maturité provoqués par des contraintes hydriques trop fortes.

3 ACL :
PEDROSO M., TAYLOR J., TISSEYRE B., CHARNOMORDIC B., GUILLAUME S., 2010. A segmentation algorithm for the delineation of management zones, Computer and electronics in agriculture, 70, 199-208.
PAOLI J. N., STRAUSS O., TISSEYRE B., ROGER J. M., GUILLAUME S., 2007. Spatial data fusion for qualitative estimation of fuzzy request zones: Application on precision viticulture. Fuzzy Sets and Systems, 158, 5, 535-554.
GRELIER M., GUILLAUME S., TISSEYRE B., SCHOLASCH T., 2007. Precision viticulture data analysis using fuzzy inference systems. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 41 (1), 19-31.
3 ACTI :
PAOLI J.N., TISSEYRE B., STRAUSS O., ROGER J.M., GUILLAUME S., 2005. Combination of heterogeneous datasets in precision viticulture. Proceedings of Fith European Conference on Precision Agriculture, 915-923.
TISSEYRE B., PAOLI J.N., MAZZONI C., ARDOIN N., 2003. Data fusion for winegrape yield data analysis, Proceedings of Fourth European Conference on Precision Agriculture, 133.
PAOLI J.N., TISSEYRE B., STRAUSS O., ROGER J.M., 2003. Method to define confidence intervals for kriged values : application to precision viticulture, Proceedings of Fourth European Conference on Precision Agriculture, 521-526.
1 ACTN :
PAOLI J.N., STRAUSS O., TISSEYRE B., ROGER J.M., GUILLAUME S., 2004. Aggregation of georeferenced data, LFA 2004, 77-84.
1 ASCL :
PAOLI J.-N., TISSEYRE B. , ZEBIC O. , GUILLAUME S. 2005. Détermination et cartographie des potentialités viticoles : Une approche experte. Le Progrès agricole et viticole. 23, 508-511.

c. Conclusion

Dans le domaine de la caractérisation, nos recherches ont exploré deux approches différentes et ont abouti à deux apports méthodologiques originaux :

- une méthode d'extrapolation spatiale de l'état hydrique des plantes. L'originalité de l'approche proposée est de faire collaborer un modèle spatial, défini par des données « historiques » ou par des données d'observation, et une mesure de référence,
- une méthode de fusion de données spatialisées basée sur la théorie des possibilités. Ce cadre théorique a permis de représenter l'ensemble des informations en prenant en compte l'imprécision et l'incertitude associées aux composantes « valeur » et « localisation ». L'opérateur d'agrégation proposé considère les différentes informations disponibles en tenant compte de leur pertinence. L'ensemble constitue un concept original et présente des perspectives intéressantes pour le traitement des données spatiales en général et des données de Viticulture de Précision en particulier**.**

4.5. Quels Indices pour estimer l'opportunité technique de gérer la variabilité spatiale

La mise en œuvre d'un traitement modulé à l'échelle intra-parcellaire ne peut se faire qu'en respectant les contraintes associées au matériel utilisé. Il convient donc de proposer des méthodes permettant, sur la base d'informations spatialisées, de savoir si une parcelle est apte ou non à recevoir un traitement modulé en fonction des caractéristiques des machines qui seront utilisées ou des opérations qui seront effectuées.

A notre connaissance, seuls les travaux de Pringle et al[1]. (2003) se sont intéressés à cette question. Le principe général de l'approche proposée par Pringle et al., (2003) a été décrit précédemment dans ce document. Il consiste à analyser la structure spatiale *S(z)* et

l'amplitude de variation *M(z)* d'une variable régionalisée *Z(s)* afin de produire un indice (*Oi*) synthétisant l'aptitude d'une parcelle à recevoir un traitement modulé. Bien qu'efficace pour ordonner un ensemble de parcelles, l'approche présente des inconvénients qui en limitent l'utilisation pratique :

- elle est difficilement automatisable et requiert un haut niveau d'expertise en géostatistique, ce qui constitue un frein pour son adoption par les professionnels de la viticulture,
- elle ne tient pas compte des caractéristiques de la machine pour déterminer la manière dont la préconisation doit être mise en œuvre sur la parcelle. En particulier, elle ne génère pas i) de cartes permettant de visualiser et de guider les différents traitements qui doivent être appliqués, ii) d'informations sur les risques d'erreurs et la localisation des erreurs que le traitement modulé est susceptible d'introduire.

Sur la base de ce constat, nous avons orienté nos travaux de recherche afin de proposer un indice d'opportunité technique i) reposant sur une méthode automatisable, ii) ne nécessitant pas de connaissances autres que celles liées à l'application considérée (caractéristiques de la machine et/ou du traitement), et iii) capable de générer des éléments d'aide à la décision tels que cartes d'application et carte d'erreurs.

En fonction du contexte décisionnel et de la qualité des informations utilisées pour produire la préconisation, plusieurs approches ont été proposées.

a. Approches par seuillage

L'approche par seuillage s'impose lorsque certaines préconisations se traduisent par la mise en œuvre de deux traitements. C'est le cas par exemple de l'enherbement où, pour induire une concurrence et limiter la vigueur, certaines parties de la parcelle seront enherbées et d'autres pas. C'est aussi le cas de la vendange sélective où, pour des raisons logistiques et organisationnelles, seulement deux niveaux de qualité sont généralement considérés au niveau d'une parcelle.

La décision d'effectuer un traitement *A* ou un traitement *B* repose sur l'analyse d'une variable *Z(s)* qui apporte une information *z(s)* sur chacun des sites $s = s(x,y)$ de la parcelle. Précisons que :

- les caractéristiques des traitements *A* ou *B* ont fait l'objet d'une expertise préalable. Par exemple, si l'un des traitements se réfère à un enherbement semé, le choix des espèces à mettre en place ainsi que leur densité aura fait l'objet d'une expertise agronomique préalable.
- La variable *Z(s)* est une préconisation issue d'une information agronomique.

Dans ce contexte, la loi de commande *h(s)* à appliquer sur chaque site de la parcelle est résumée par la relation 3.

$$\begin{aligned} &Si\ z(s) \leq \alpha, h(s) = A_\alpha \\ &Si\ z(s) > \alpha, h(s) = B_\alpha \end{aligned} \quad \text{[Equation 3]}$$

$$\text{avec } \alpha \in \Re$$

Le seuil α correspond à une valeur définie par l'utilisateur et intègre des considérations agronomiques ou pratiques. Par exemple, dans le cas d'une vendange sélective, il peut être augmenté ou diminué de manière à vendanger un volume de raisin adapté aux contraintes de la cave.

Dans la pratique, la mise en oeuvre de la loi de commande est effectuée par une machine (semoir, machine à vendanger, épandeur, etc.) caractérisée par une empreinte spatiale *K*. *K* est rectangulaire et définie par β, sa largeur d'application, v, sa vitesse d'avancement, τ, le temps nécessaire pour changer de traitement ainsi que d l'imprécision associée au système de positionnement utilisé.

$$K = (\beta + d).(v.\tau + d) \quad \text{[Equation 4]}$$

Le traitement d'une parcelle par une machine revient donc à considérer l'ensemble des positions *k* parcourues par *K*. Dans un contexte de VP, la surface de *K* est supposée supérieure à la résolution de Z(s). Pour chaque position, la surface de *K* est donc supposée inclure plusieurs informations (Figure 6). Il est donc nécessaire d'élaborer une nouvelle loi de commande *h(k)* prenant en compte l'ensemble des traitements possibles sur *K*. Elaborer une loi de commande *h(k)* revient donc à considérer une fonction F^K permettant de prendre en compte, au mieux, l'ensemble des traitements à effectuer sur la surface *K* (relation 5).

$$\forall\, s_i \in K, h(k) = F^K(h(s_1), h(s_2), \ldots, h(s_i)) \quad \text{[Equation 5]}$$

Deux approches ont été considérées pour modéliser F^K .

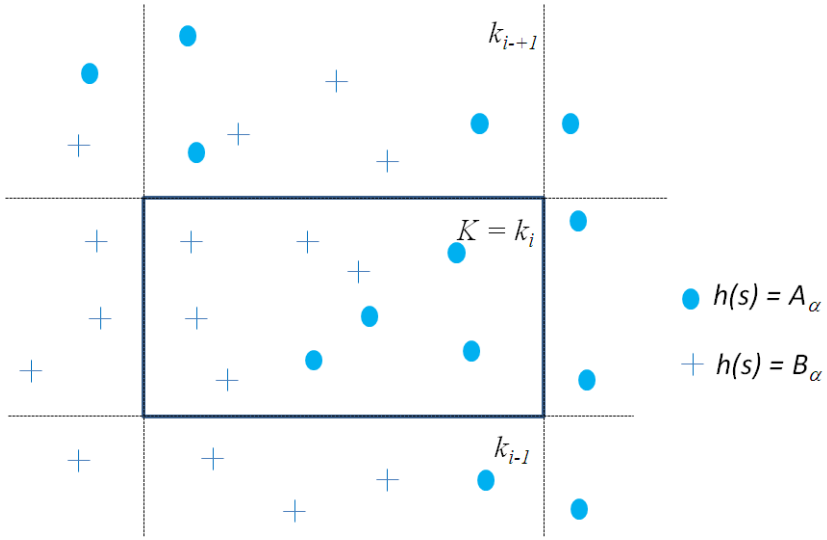


Figure 6 : empreinte spatiale d'une machine *K* à la position k_i et les traitements A_α ou B_α à effectuer en fonction des informations disponibles.

Utilisation de la morphologie mathématique

Cette approche suppose que la variable *Z(s)* est renseignée selon une grille régulière sur la parcelle. Dans ce cas, le résultat de la loi de commande *h(s)* (équation 3) est une image binaire ($A_\alpha = 1$, $B_\alpha = 0$ ou inversement). *K* est considérée comme un élément structurant et la fonction F^K est modélisée par une dilatation-érosion.
Pour chaque site *s* de la parcelle, il devient possible de déterminer si une erreur *E(s)* est réalisée par la machine ou si les traitements A_α et B_α sont appliqués correctement (relation 6)

$$\forall s \in K, \quad \begin{array}{l} si\ h(s) \neq h(k), E(s)=1, C_A(s)=0, C_B(s)=0 \\ si\ h(s)=h(k)=A_\alpha, E(s)=0, C_A(s)=1 \\ si\ h(s)=h(k)=B_\alpha, E(s)=0, C_B(s)=1 \end{array} \quad \text{[Equation 6]}$$

Où $C_A(s)$ (resp. $C_B(s)$) prend la valeur 1 si le site *s* est correctement traité en *A* (resp. *B*), il prend la valeur 0 dans le cas contraire.
La mise en œuvre d'un traitement modulé se justifie si la proportion P_A de sites correctement traités en *A* est importante et la proportion P_B de sites correctement traités en *B* est importante et si la proportion P_E de sites faisant l'objet d'une erreur est minimale. On définit alors un indice d'opportunité technique (*TOI*) par la relation 7.

$$TOI_\alpha = \min\left(P_{A_\alpha}, P_{B_\alpha}, 1 - P_{E_\alpha}\right) \quad \text{[Equation 7]}$$

Utilisation de la théorie des possibilités

Dans le cas où *Z(s)* n'est pas renseignée selon une grille régulière, l'approche précédente peut toujours être utilisée à condition d'interpoler les données. Outre les contraintes relatives à l'automatisation de cette opération, l'interpolation entraîne une modification de la distribution des données (lissage) susceptible de sous-estimer P_E et de surestimer la valeur du *TOI* qui en résulte.

Nous proposons une méthode alternative qui conserve le principe général de l'approche précédente tout en y associant le formalisme défini dans le chapitre relatif à la fusion de données spatiales (Chapitre 3.4). Nous considérons l'empreinte spatiale *K* de la machine comme une zone de requête floue appliquée sur chaque position *k* parcourue par la machine (Figure 7). *d*, l'imprécision associée au système de positionnement est utilisé pour définir le support de cette zone de requête floue.

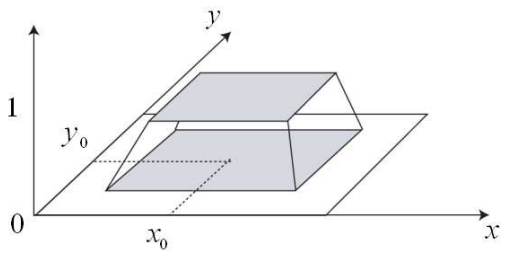


Figure 7 : Représentation de *K*, la région floue correspondant à l'empreinte spatiale de la machine à la position $k(x_o,y_o)$

Les traitements A_α et B_α sont définis comme deux sous-ensembles flous. Ainsi, pour chaque site de mesure (source d'information spatiale), il est possible de définir la possibilité de traiter ce site en A_α ou en B_α. L'utilisation de l'intégrale de Choquet permet d'agréger l'ensemble des sources d'information sur *K* et de produire une estimation des possibilités relatives à chacun des traitements, A_α ou B_α, ainsi que la possibilité de faire une erreur. Dans le cas où, sur une position *k*, aucune source d'information n'est disponible, l'approche considère que les deux traitements A_α ou B_α sont tout à fait possibles. L'incertitude sur le traitement à effectuer est alors totale ce qui se traduit par une possibilité de faire une erreur qui est maximale. Dans ce cas, l'utilisateur final reste libre de choisir le meilleur traitement à appliquer en fonction de

l'opération considérée et du contexte décisionnel (choix du traitement qui minimise les coûts, qui minimise l'impact environnemental de l'opération, etc.).

L'approche utilisée permet de considérer des situations très différentes allant de nombreuses sources d'information en contradiction les unes avec les autres à l'absence totale d'information.
Lorsque les possibilités relatives à chacun des traitements (A_α et B_α) sont estimées pour chaque position de la machine (figure 8), elles sont ensuite agrégées à l'échelle de la parcelle. Il est ainsi possible de définir $\hat{\Pi}(A_\alpha)$ (resp $\hat{\Pi}(B_\alpha)$) qui représente la possibilité de traiter correctement la parcelle A_α (resp. B_α) et $\hat{\Pi}(E_\alpha)$ qui représente la possibilité d'effectuer une erreur en effectuant le traitement module.

Comme précédemment, la mise en œuvre d'un traitement modulé se justifie si la possibilité de traiter correctement la parcelle en A_α et en B_α est importante et si la possibilité de faire une erreur en appliquant ce traitement est faible. Sur cette base, on définit un indice technique d'opportunité flou, *FTOI* par la relation 8.

$$FTOI_\alpha = \min\left(\hat{\Pi}(A_\alpha); \hat{\Pi}(B_\alpha); 1-\hat{\Pi}(E_\alpha)\right) \text{ [Equation 8]}$$

Validation du *TOI* et du *FTOI*

Pour un seuil α donné, ces approches permettent de fournir à l'utilisateur :

- un indice permettant de caractériser l'aptitude de la parcelle à recevoir le traitement envisagé,
- une carte du traitement à réaliser sur la parcelle (Figure 8),
- une carte d'erreur (Figure 8).

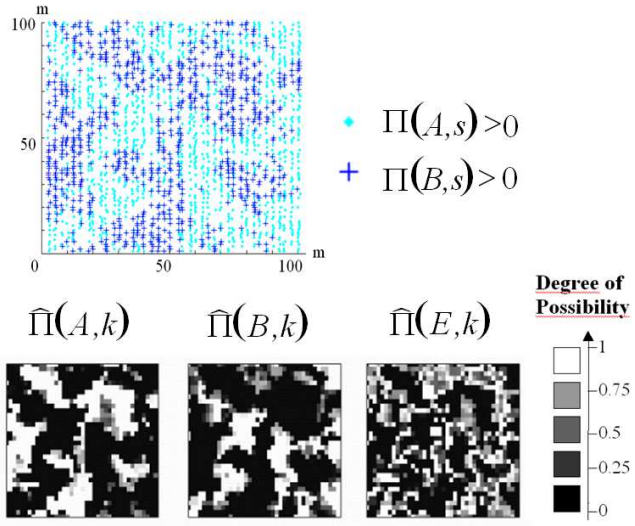


Figure 8 : (en haut) Carte de préconisation représentant, pour chaque site de mesure *s* et le seuil α considéré, les possibilités de traiter en *A* ($\Pi(A,s)$) et en *B* ($\Pi(B,s)$. (en bas, de gauche à droite) Cartes d'application des traitements représentant, pour chaque position machine k, la possibilité d'appliquer correctement le traitement *A* ($\hat{\Pi}(A,k)$), et *B* ($\hat{\Pi}(B,k)$) ainsi que la possibilité d'effectuer une erreur ($\hat{\Pi}(E,k)$). Résultats obtenus sur une parcelle simulée.

Ces approches permettent également de calculer le seuil α_{opt} , considéré comme optimal. α_{opt} correspond à la valeur de seuil permettant de maximiser les indices *TOI* et *FTOI*. Les valeurs $TOI_{\alpha opt}$ ou $FTOI_{\alpha opt}$ qui en résultent peuvent être utilisées pour comparer les parcelles.
La mise en œuvre de ces deux approches sur une base de données de parcelles simulées ainsi que sur des données réelles a permis d'en valider la pertinence. Ces méthodes s'avèrent accessibles pour un professionnel puisque seules les caractéristiques de la machine (largeur, vitesse, etc.) sont nécessaires pour les mettre en œuvre.

Conclusion

Selon l'organisation spatiale des informations spatialisées (distribution spatiale régulière ou irrégulière), nous avons proposé deux méthodes permettant d'évaluer l'opportunité d'une préconisation en agriculture de précision. Il s'agit de méthodes parfaitement automatisables qui sont capables de traiter un grand nombre de parcelles sans l'intervention d'un opérateur humain. Elles ne nécessitent pas de connaissances particulières en traitement du signal ou en géostatistiques, en effet, les paramètres requis pour leur mise en œuvre, sont relatifs aux caractéristiques des machines utilisées pour effectuer les opérations à la parcelle. Enfin, ces méthodes génèrent des éléments d'aide à la décision tels que cartes d'application, carte d'erreurs et un indice (*TOI* ou *FTOI*) résumant l'aptitude de la parcelle à recevoir la préconisation envisagée. Le *TOI* et le *FTOI* ont été proposés pour évaluer le cas particulier, mais fréquent, d'une modulation intra-parcellaire où deux traitements sont envisagés. La prise en compte d'opérations nécessitant plusieurs niveaux de traitement comme la fertilisation, nous a conduits à adapter ces méthodes.

2 ACL :
PAOLI J. N., TISSEYRE B., STRAUSS O., McBRATNEY A.B., 2010. A technical opportunity index based on a fuzzy footprint of the machine for site-specific management: application to viticulture, Journal of Precision Agriculture, 11, 4 , 379-396.
TISSEYRE B., McBRATNEY A.B., 2008. A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management using yield monitor data : application to viticulture, Journal of Precision Agriculture, 9, n°1-2, 101-113.
2 ACTI :
PAOLI J-N., TISSEYRE B. , STRAUSS O. , McBRATNEY A.B., 2009. A technical opportunity index based on a fuzzy footprint of the machine for site-specific management: application to viticulture. Proceedings of the 7th EFITA Conference, 6-8 July 2009, Wageningen, the Netherlands, 73-80.
TISSEYRE B., McBRATNEY A.B., 2007. A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management using yield monitor data : application to viticulture, Proceedings of Sixth European Conference on Precision Agriculture, 249-256.

b. Approche par zonage

Dans le cas où la loi de commande consiste à appliquer plusieurs niveaux de traitement sur une même parcelle, l'adaptation du *TOI* ou du *FTOI* nécessite de considérer de multiples seuils correspondant aux différents niveaux de traitement à appliquer. Chaque position machine correspond alors à un niveau de traitement particulier ce qui présente le risque i) de générer des erreurs d'application si la chaîne d'application localisée n'est pas fiable et ii) d'être incompris (et rejeté) par le professionnel qui ne reconnaîtra pas la structure spatiale de sa parcelle.
Dans ce cas particulier, l'inconvénient des méthodes que nous avons proposées réside dans l'élaboration d'une décision pour chaque position machine. Le traitement proposé sur une

position machine est indépendant du traitement choisi sur les positions voisines, ce qui entraîne des changements de consigne presque systématiques d'une position à une autre.

Ce constat nous a conduits à proposer une démarche différente qui consiste à minimiser le nombre de changements de niveaux de traitement à l'échelle de la parcelle. Il s'agit donc d'identifier les transitions spatiales qui imposent des changements de consignes. L'approche que nous avons proposée est fondée sur le zonage. Afin de prendre en compte les contraintes d'application liées au matériel agricole utilisé, deux étapes (Figure 9) ont été considérées :
- une première étape (dite de segmentation) partitionne la parcelle en zones élémentaires sur la base des informations disponibles,
- une seconde étape (dite de fusion de régions) est destinée à fusionner les zones élémentaires en prenant en compte les contraintes d'applications : gestion des régions trop petites, prise en compte de la morphologie des zones générées, etc. Cette étape constitue la « régularisation » du résultat de segmentation.

L'objectif de la première étape est la création de régions très homogènes qui serviront de base à un raisonnement objet. Chacune de ces régions pourra être caractérisée dans l'espace des attributs et dans l'espace géographique (complexité de contour). La seconde étape doit intégrer les différentes contraintes d'application pour proposer à l'utilisateur un résultat agronomiquement cohérent et techniquement applicable.

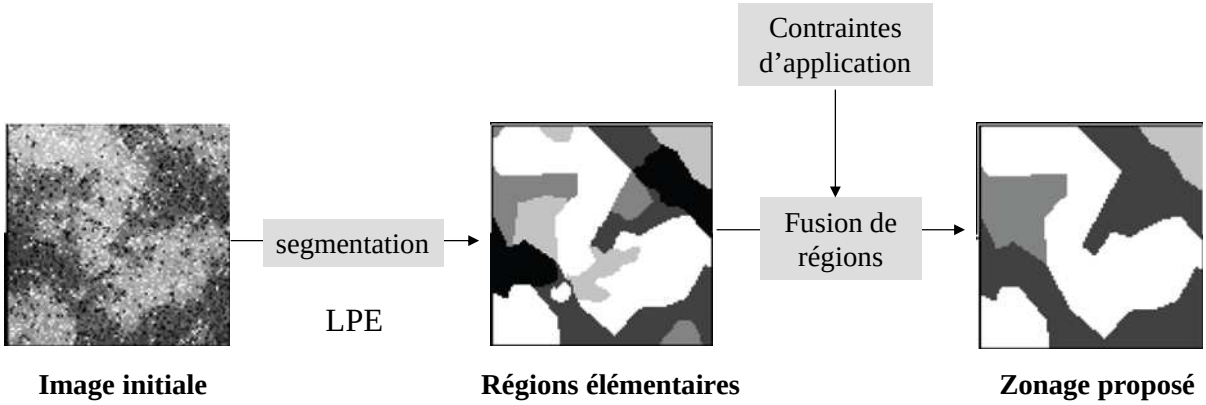


Figure 9 : Illustration de la démarche de zonage mise en œuvre sur une parcelle simulée, présentation des étapes de segmentation et de régularisation.

Le contexte opérationnel a nécessité la mise en œuvre de méthodes simples, automatisables et paramétrables avec des données techniques compréhensibles par les professionnels.

L'étape de segmentation a été conduite par une approche issue de la morphologie mathématique : l'algorithme de ligne de partage des eaux (LPE). L'originalité scientifique de notre contribution repose sur la définition d'un décalage « d'inondation de bassin » permettant d'adapter la LPE aux données agricoles qui présentent classiquement un bruit important. Ce « décalage d'inondation » est défini par une analyse préalable de la semi-variance à petite distance et à grande distance, ce qui permet d'envisager une application automatisée.

L'étape de régularisation (fusion) est basée sur la maximisation d'un indice d'opportunité de zonage (*ZOI*). Le *ZOI* permet de quantifier l'intérêt d'un itinéraire technique par zonage par rapport à un itinéraire de référence défini comme un traitement uniforme (moyen) sur l'ensemble de la parcelle. Il fait intervenir le calcul de deux erreurs (somme des écarts quadratiques) :

- I_0, l'erreur entre la consigne correspondant à un traitement uniforme (moyenne) et la préconisation idéale,
- I_1 , l'erreur entre la consigne correspondant à un traitement par zones et la préconisation idéale,

Le *ZOI* est défini par l'équation 9.

$$ZOI = 1 - \frac{I_0}{I_1} \text{ [Equation 9]}$$

Au cours du processus de régularisation (fusion), deux régions sont fusionnées si et seulement si, elles sont connexes et le résultat de cette fusion se traduit par une amélioration du *ZOI*.

En théorie, une telle approche devrait systématiquement favoriser une segmentation de la parcelle en zones de la plus petite taille possible. En effet, I_1, l'erreur entre la loi de commande correspondant aux zones et la préconisation idéale est minimale lorsque la zone correspond au point de mesure. Pour un partitionnement trop fin et techniquement inapplicable, le processus de fusion est guidé par des contraintes relatives aux caractéristiques de la machine. Ces contraintes techniques sont basées sur l'introduction des risques d'erreurs liées :

- à l'empreinte spatiale *K* de la machine sur laquelle nous ne reviendrons pas, la considération de *K*, permet de prendre en compte l'erreur générée par des zones trop petites et/ou des contours trop complexes ingérables avec la machine considérée,
- au pas de discrétisation des consignes des machines ; en effet, les contrôleurs acceptent une gamme restreinte de consignes discrètes (par exemple par pas de 10 unités dans le cas d'un épandeur d'engrais). Cette caractéristique est importante pour justifier la pertinence d'une zone. Prenons le cas de deux zones connexes *Za* et *Zb*, de préconisations moyennes de 40,5 et 39,7 unités d'azote respectivement. Les doses réellement apportées seront de 40 unités d'azote sur chacune d'elles. Ainsi, d'un point de vue opérationnel *Za* et *Zb* ne sont pas justifiées et peuvent être fusionnée en une seule zone.

Ces deux sources d'erreurs sont introduites dans le calcul de I_0 et I_1 de la relation 9, ce qui permet d'introduire les contraintes techniques d'application dans le calcul du *ZOI*. La pertinence du *ZOI* a été mise en évidence grâce à des tests effectués sur la même base donnée que pour les *FTOI* et le *TOI*.

2 ACL :
ROUDIER P., TISSEYRE B., POILVE H., ROGER J.M., 2010. A technical opportunity index adapted to zone-specific management Management zone delineation using a modified watershed algorithm, Journal of Precision Agriculture, DOI 10./1007/s 11119-008-9067-z.
ROUDIER P., TISSEYRE B., POILVE H., ROGER J.M., 2008. Management zone delineation using a modified watershed algorithm, Journal of Precision Agriculture, 9, 233-250.
1 ACTI :
ROUDIER P., TISSEYRE B., POILVE H., ROGER J.M., 2007. Management zone delineation base on remotely sensed data. Proceedings of Sixth European Conference on Precision Agriculture, 625-632.

c. Transfert de ces approches

Ces indices correspondent à un besoin social important, ce qui a motivé un transfert rapide vers des partenaires industriels.

Le *ZOI* a été introduit dans la chaîne de production d'images de Farmstar (Spot-Image) qui couvrait plus de 500 000 ha de grande culture en 2010 en France. Il constitue une plus value importante pour l'agriculteur qui peut ainsi visualiser une parcelle découpée en grandes unités de gestion cohérentes, ce qu'il percevait mal lorsqu'il était confronté à une image « pixelisée ».
Le *TOI* est maintenant utilisé dans la chaîne de production d'images d'Oenoview (Spot-image-ICV). A l'échelle d'une coopérative viticole, il permet de catégoriser rapidement les parcelles en trois classes (hétérogènes, homogènes et intermédiaires). Cette information constitue une aide à la décision lors des contrôles effectués dans le cadre d'une sélection parcellaire. En effet, elle permet de savoir si une observation peut-être considérée comme représentative de la parcelle ou d'identifier les parcelles homogènes à haut niveau qualitatif qui seront vinifiées de manière spécifique. A terme cet indice devrait être utilisé pour identifier les parcelles devant faire l'objet d'observations orientées en fonction de la variabilité spatiale observée.

5. Conclusions - Perspectives :

5.1. Bilan des recherches

Etant convaincu de l'intérêt de la VP pour le maintien d'une filière viticole compétitive et durable, j'ai orienté mes travaux vers des recherches à finalité opérationnelle destinées à en faciliter l'utilisation et la diffusion. Ce positionnement m'a amené à identifier les questions scientifiques pour lever des verrous susceptibles de freiner l'adoption de ces technologies par les professionnels. Mes investigations concernent l'ensemble de la chaîne de l'information en VP. Pour chacune de ces étapes, elles ont produit des connaissances et/ou des outils et des méthodes destinés aux professionnels de la viticulture. La figure 10 présente une synthèse des travaux effectués.

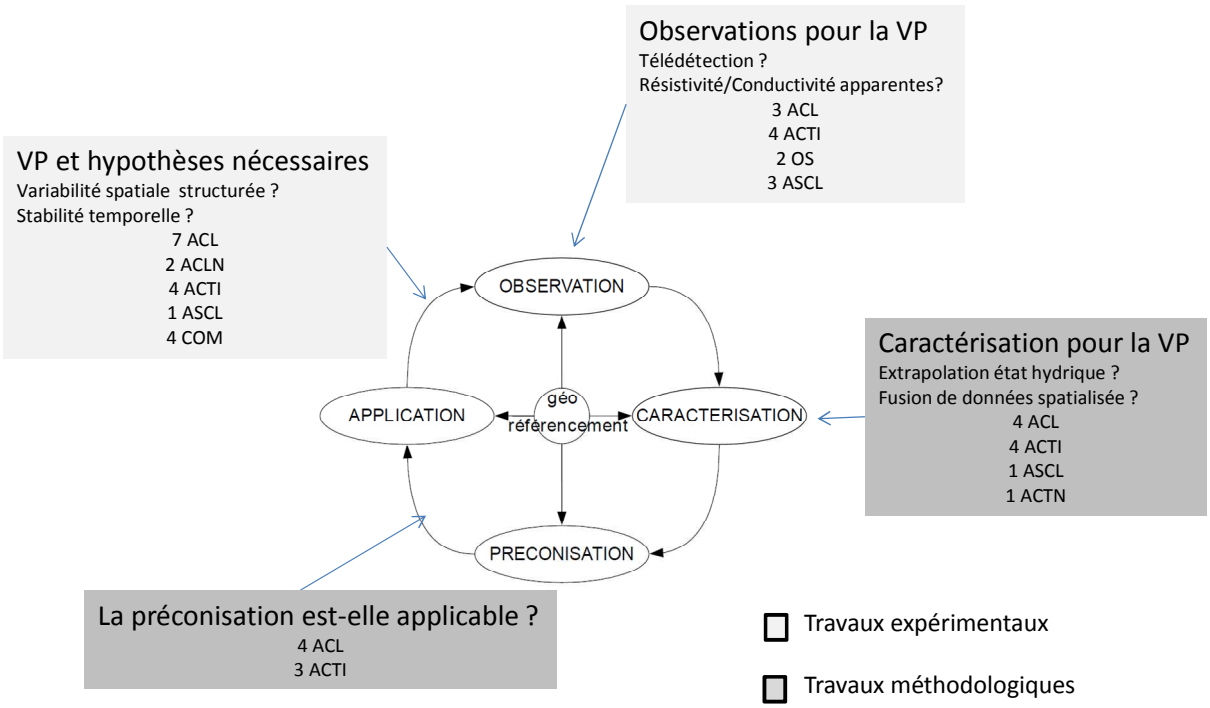


Figure 10 : Positionnement de mes productions scientifiques sur les différentes étapes de la chaîne d'information en AP et synthèse de mes productions scientifiques (ACL : Articles dans des revues internationales avec comité de lecture, ACLN : Articles dans des revues avec comité de lecture non répertoriées dans des bases de données internationales, INV : Conférences données à l'invitation du Comité d'organisation dans un congrès national ou international. ACTI : Communications avec actes dans un congrès international. ACTN : Communications avec actes dans un congrès national. COM : Communications orales sans actes dans un congrès international ou national. OS : Ouvrages scientifiques ou chapitres de ces ouvrages).

Ces travaux de recherche ont comporté :

- des travaux expérimentaux souvent menés en collaboration avec des écophysiologistes ou des pédologues,
- des travaux méthodologiques, associant plusieurs disciplines comme le traitement d'images, la géostatistique ou la théorie de l'incertain.

Ces recherches ont permis d'apporter des réponses, des outils et des méthodes qui seront déterminants pour le développement futur de la VP. Mes apports se situent :

- au niveau des connaissances et des références en matière de variabilité spatiale en viticulture,
- mais aussi au niveau des méthodes permettant d'utiliser et valoriser cette variabilité spatiale. Une rapide synthèse est proposée dans les paragraphes suivants.

En terme de connaissance, mes travaux ont montré que :

- la variabilité intra-parcellaire des principales variables agronomiques était importante et structurée, justifiant l'intérêt de pratiques modulées en viticulture,
- la structure spatiale des principaux paramètres quantitatifs était stable dans le temps ; dans un contexte méditerranéen, cette structure spatiale est déterminée par l'accès à l'eau et la contrainte hydrique qui en résulte,
- la structure spatiale de la contrainte hydrique est très stable dans le temps, cette stabilité temporelle permet de définir un modèle spatial de l'état hydrique des plantes,
- la structure spatiale des principaux paramètres quantitatifs et les zones de gestion pérennes qui en résultent, peuvent être mises en évidence grâce à des variables d'observation (indirectes) issues des systèmes de mesure utilisés en agriculture de précision. En particulier, nous avons pu montrer l'intérêt des indices de végétation dérivés d'images multispectrales,
- le rôle déterminant du modèle spatial de l'état hydrique et de son interaction avec le climat de l'année explique l'instabilité de la structure spatiale des principaux paramètres de la qualité de la vendange.

En termes d'outils et de méthodes mes travaux ont proposé :

- une méthode d'extrapolation spatiale de l'état hydrique des plantes. L'originalité de l'approche proposée est de faire collaborer un modèle spatial, défini par des données historiques ou par des données d'observation, et une mesure de référence,
- une approche originale d'analyse des données spatialisées permettant d'intégrer l'expertise des professionnels. Cette méthode est basée sur un formalisme permettant de fusionner des données spatiales, qualitatives et quantitatives, imprécises et incertaines, hétérotopes et de résolution variable.
- trois méthodes destinées à évaluer l'opportunité d'une préconisation en agriculture de précision. Elles permettent de prendre en compte les contraintes opérationnelles, et produisent un indice résumant l'aptitude de la parcelle à recevoir la préconisation envisagée. Toutes les méthodes proposées fournissent également une aide à la décision sous la forme d'une carte d'erreur et d'une ou plusieurs cartes d'application optimale. Ces méthodes ont été transférées à des partenaires industriels.

Le caractère multidisciplinaire ainsi que la prise en compte des contraintes opérationnelles ont constitué l'originalité scientifique de mes recherches. Dans le futur, je souhaite continuer à inscrire mes investigations dans cette démarche. Fort des expériences et des connaissances acquises, aujourd'hui je suis en mesure d'identifier les questions auxquelles il sera nécessaire de répondre pour faciliter la diffusion de la VP auprès des professionnels de la viticulture.

5.2. Perspectives

Ce chapitre a pour objectif de présenter le contexte qui motivera mes actions de recherche dans les prochaines années et les différentes questions de recherche qui en émanent. Pour chacune d'elles je tâcherai également de présenter les connaissances et/ou les méthodes que je souhaite produire, ainsi que la démarche que je souhaite utiliser.

5.2.1. Le changement d'échelle, une nécessité pour la VP à court terme

Jusqu'à ce jour, mes travaux se sont focalisés sur l'échelle intra-parcellaire. Ils ont mis en évidence l'intérêt de certaines sources de données (en particulier, les images multispectrales) pour définir des zones de gestion et pour extrapoler l'état hydrique des plantes. Ces données sont d'ores et déjà utilisées par certains domaines prestigieux qui peuvent investir dans cette technologie et recruter les compétences nécessaires en géomatique pour les valoriser.

Bien que très informatives, ces observations ont un coût d'acquisition et de traitement élevé, ce qui constitue l'un des freins à leur diffusion auprès de la majorité des viticulteurs. Dans ce contexte, la mutualisation des investissements est un point de passage obligé afin de rendre la VP accessible au plus grand nombre. Cette mutualisation ne peut s'effectuer qu'au niveau de structures de coopérations telles que les caves coopératives, les syndicats de cru, les coopératives d'utilisation de matériel agricoles, etc.
Ainsi, pour être adoptée, la VP devra nécessairement satisfaire des besoins opérationnels à l'échelle de la parcelle, mais aussi à l'échelle du bassin de production. A cette échelle de travail, la VP devra donc répondre à des objectifs de gestion et de maîtrise de la qualité tels que la gestion des apports, la sélection parcellaire, la préconisation auprès des adhérents pour améliorer la qualité des apports, la gestion des chantiers de pulvérisation ou de récolte, etc. Ces besoins seront à satisfaire sur un territoire plus ou moins vaste constitué de plusieurs centaines de parcelles présentant une grande variété de cépages, de modes de conduite, de densités de plantation, etc.

Notons que certains de nos travaux offrent déjà des réponses adaptées à cette échelle de travail, en particulier les indices d'opportunité techniques (*TOI*, *FTOI* et *ZOI*) qui permettent de caractériser rapidement et de manière automatique une base de données importante de parcelles. Toutefois, cette échelle de travail pose de nouvelles questions qui méritent d'être étudiées.

Fidèle à ma démarche, j'ai organisé les questions de recherche soulevées par ce changement d'échelle selon le diagramme fonctionnel présenté figure 1. Cette partie structure donc les questions de recherche relatives à i) l'observation, ii) la caractérisation puis iii) la préconisation.

5.2.2. Les questions de recherche relatives à l'observation

a. Comment corriger les observations des effets des facteurs d'influence à l'échelle d'un bassin de production ?

A l'échelle intra-parcellaire, l'utilisation de l'imagerie multispectrale s'est montrée particulièrement pertinente. Toutefois, il s'agit d'une échelle de travail idéale puisque les facteurs susceptibles d'altérer le signal reçu par le capteur y sont uniformes. Comme l'indique l'équation 10, il est possible d'y travailler de manière relative ; les écarts observés au niveau des indices de végétation (ΔIV) traduisent des différences au niveau du développement végétatif de la plante (ΔV) déterminé par l'accès à l'eau ($\Delta\psi$), (équation 10)

$$\Delta IV \approx \Delta V \approx \Delta\Psi \quad \text{[Equation 10]}$$

Le changement d'échelle va nécessairement introduire de nouveaux facteurs qui devront être pris en compte afin de proposer une mesure absolue correspondant à un paramètre de la plante.

A l'échelle d'un bassin de production, l'indice de végétation *IV*, reste un estimateur du développement végétatif *V* de la plante, toutefois, il va aussi être affecté par deux grandes catégories de facteurs :

- *A*, les facteurs liés aux conditions d'acquisition tels que la position du soleil et l'orientation du capteur qui sont susceptibles de varier lorsque l'étendue du territoire à couvrir nécessite plusieurs acquisitions,
- *T*, les facteurs liés aux différences entre les parcelles tels que la densité de plantation, l'orientation des rangs, le mode de conduite etc. Remarquons que l'architecture particulière de la vigne entraîne nécessairement une interaction entre certains facteurs, c'est le cas par exemple de l'orientation des rangs et de l'angle de prise de vue.

Les facteurs *A* peuvent être mesurés lors de l'acquisition. Les facteurs *T* sont relativement stables d'une année à l'autre et peuvent être supposés renseignés. L'estimation d'un paramètre relatif au développement végétatif de la plante suppose donc de proposer un modèle *f* permettant de corriger l'indice de végétation des effets de *A* et de *T* (relation 11).

$$V = f(A,T,IV) \quad [11]$$

Dans une première phase, l'approche que nous envisageons (équation 11) suppose d'identifier :

- les paramètres de *T* et de *A* qui affectent le plus *IV*,
- le paramètre de *V* qui sera le mieux estimé,

Dans une deuxième phase, nous envisageons de proposer un modèle de correction *f*.

Compte tenu du nombre important de paramètres à considérer et de la difficulté de réaliser un plan d'expérience exhaustif pour certains d'entre eux, l'approche envisagée passe par la simulation et l'utilisation de modèles. La première phase de cet axe de recherche implique donc de travailler avec :

- un modèle d'architecture de la vigne en 3 dimensions, ce modèle permettra de simuler de manière exhaustive toutes les réalisations possibles de *T* (densité de plantation, hauteur de palissage, largeur, etc.). Ce modèle permettra également de produire une estimation des paramètres *V* (Leaf Area Index, Surface foliaire exposée, Surface foliaire totale, etc.) pour l'ensemble des cas simulés.
- un modèle de lancer de rayon permettant de simuler la réflexion des feuilles de vignes dans le rouge, le vert et le proche infra-rouge. Ce modèle permettra de simuler plusieurs réalisations de *A* (position du soleil, position du capteur) et son interaction avec les modalités de *T* simulées.

Une telle approche n'a jamais été envisagée sur une plante comme la vigne. Elle devrait nous permettre d'identifier de manière rigoureuse :

- les paramètres de conduite ainsi que les conditions d'acquisition qui affectent les indices de végétation,
- les paramètres relatifs à la végétation qui sont le mieux estimés.

A terme, cette approche permettra d'identifier les conditions *A* les plus adaptées pour produire une estimation pertinente de *V*.

Compte tenu de l'exhaustivité de la base de données qui sera générée à l'issue de cette première phase, une approche par analogie (look up table) est envisagée pour le modèle *f* de correction.

b. Comment améliorer les méthodes d'échantillonnage ?

La question générique en VP est classiquement de caractériser la variabilité spatiale du système de production, ce qui se fait par l'observation. Cette observation peut être réalisée via des mesures exhaustives mais aussi par des échantillonnages. Ces derniers mettent en œuvre des mesures plus coûteuses en moyens techniques et humains. Cette contrainte explique qu'elles ne soient pas réalisées de manière exhaustive, bien qu'elles soient très informatives. D'un point de vue opérationnel, la connaissance de la variabilité spatiale apportée par des données d'observation à haute résolution pourrait être utilisée pour orienter l'échantillonnage afin d'économiser les ressources humaines et financières. A l'échelle d'un bassin de production, une telle approche présente un intérêt certain pour répondre à des questions de caractérisation comme :

i) rationaliser des observations sanitaires afin d'améliorer l'estimation du risque et les décisions de traitement qui en résultent,
ii) estimer le rendement et la qualité de la récolte de chaque parcelle afin d'optimiser l'organisation et la logistique des vendanges (transport, organisation de la cave etc.).

Améliorer les méthodes d'échantillonnage sur la base d'une connaissance de la structure spatiale des parcelles

Les méthodes d'échantillonnage utilisées aujourd'hui reposent sur la statistique classique. Dans ce cadre, les hypothèses généralement admises consistent à considérer qu'en chaque site de la parcelle, la valeur x(s) observée à la localisation « s » est la réalisation d'une variable aléatoire X(s) normalement distribuée, d'espérance E(s) et de variance V(s). Ces hypothèses supposent, sur l'ensemble des sites de la parcelle, l'existence d'une collection de variables aléatoires indépendantes de même Espérance E et de même variance V (hypothèse d'ergodicité). L'avantage pratique de ces hypothèses est de revenir à un cadre statistique classique permettant de produire une estimation de E et une incertitude (intervalle de confiance) associée à cette estimation sur la base d'un échantillonnage aléatoire.
Notre objectif de recherche consistera à utiliser la connaissance de la structure spatiale apportée par des données d'observation à haute résolution pour :

i) valider ou invalider la pertinence des hypothèses pour chaque parcelle considérée,
ii) proposer une approche d'échantillonnage adaptée à la structure spatiale observée.

Une observation à haute résolution peut être considérée comme une variable auxiliaire *q* (indice de végétation, résistivité électrique apparente du sol) qui est reliée plus ou moins à la variable d'intérêt *x* (rendement par exemple) sur la parcelle. La relation *h* qui associe *x* à *q* ($x = h(q)$) est inconnue localement. Toutefois, la forme générale de *h* est supposée connue grâce à des références bibliographiques ou par expertise.
La structure spatiale de *q* est connue. Cette connaissance va permettre de remettre en cause les hypothèses d'ergodicité habituellement réalisées par manque de connaissance et/ou pour des raisons pratiques. L'objectif de nos recherches sera donc de proposer, sur la base d'une information auxiliaire *q,* un plan d'échantillonnage permettant d'estimer simultanément :

- la relation *h* locale,
- certaines statistiques (moyenne, min, max, variance) de la variable *x* sur la parcelle.

D’un point de vue opérationnel, l’approche est intéressante puisqu’en fonction de la structure spatiale de la variable auxiliaire *q* (stationnarité d’ordre deux avec ou sans dépendance spatiale, cadre non stationnaire), il sera possible de proposer, de tester et de valider une procédure permettant, pour chaque parcelle, d'identifier le cas rencontré et de définir des règles simples visant à définir un plan d'échantillonnage optimal. Dans un premier temps, les méthodes d'analyse issues de la géostatistique pourront constituer une base de travail.

J’envisage d’appliquer cette recherche à l’estimation du rendement des parcelles de vignes. Il s’agit d’une question où la demande sociale est forte. Le rendement des parcelles de vigne est estimé avec une grande incertitude (15 % - source : Institut coopératif du vin) ce qui se traduit par des problèmes organisationnels importants. En effet, une prévision de récolte incertaine entraîne naturellement un surdimensionnement et un surcoût des besoins de transport, de stockage et de traitement de la récolte. Pour ces raisons, les coopératives souhaitent disposer d'outils permettant d'améliorer l’estimation des volumes apportés par chaque parcelle. Il s'agit d'un besoin d'autant plus important que les coopératives sont dans un contexte de fusion qui génère un nombre de parcelles d'apport de plus en plus grand.

L’approche que nous proposons d’appliquer à l’estimation du rendement moyen au niveau de la parcelle est tout à fait généralisable à l’estimation d’autres variables d’intérêt comme l’estimation du niveau moyen d’infestation ou l’état hydrique moyen d’une parcelle à condition de disposer d’une observation (variable auxiliaire) pertinente.

Intégrer les contraintes opérationnelles dans les méthodes d’échantillonnage

L’observation par échantillonnage nécessite l’utilisation de ressources humaines et matérielles coûteuses. Pour être applicable, tout plan d’échantillonnage doit intégrer les limites relatives à l’utilisation de ces ressources. En viticulture, l’intégration des contraintes opérationnelles dans un plan d’échantillonnage au niveau intra-parcellaire se caractérise par :

- une direction à privilégier lors de la réalisation des mesures ; cette particularité est liée à l’organisation spatiale de la culture qui, dans la majorité des cas, est conduite en rangs palissés. Cette organisation contraint les trajectoires au sein de la parcelle. Ainsi, pour un temps donné, un opérateur produira un nombre plus important de mesures en suivant la direction des rangs plutôt que dans une direction autre nécessitant de sortir de la parcelle pour passer d’un rang à l’autre.
- un faible nombre de mesures ; cette contrainte est liée au temps disponible pour effectuer les mesures. En effet, l’inspection d’une parcelle est réalisée par un technicien qui doit visiter plusieurs dizaines de parcelles par jour.

L’intégration des contraintes opérationnelles dans un plan d’échantillonnage se traduit par le choix :

- d’une trajectoire optimale pour l’opérateur,
- de sites d’observation en nombre le plus faible possible et situés le long de la trajectoire sélectionnée.

Ce problème soulève des questions scientifiques originales relatives :

- au choix de la trajectoire optimale sur la base de la structure spatiale de la parcelle mise en évidence par les données d’observation à haute résolution et des contraintes liées l’environnement structuré de la culture.
- au choix des sites de mesure le long de la trajectoire identifiée. Cette partie reposera en partie sur les développements méthodologiques qui seront obtenus à l’issue du travail

présentés dans la partie précédente. Le choix des sites sera guidé par la structure spatiale de la variable auxiliaire. Dans le cas d'une structure spatiale importante la distance des points d'observation pourra par exemple être fonction de la portée du semi-variogramme.

5.2.3. Questions de recherche liées à la caractérisation

Mes recherches s'axeront sur l'extrapolation spatiale de l'état hydrique de la vigne à l'échelle d'un bassin de production. L'approche d'extrapolation que nous avons proposée à l'échelle intra-parcellaire pose des questions de recherche auxquelles il sera nécessaire de répondre pour valider son intérêt et sa pertinence à une échelle plus vaste. Ces questions sont relatives :
- aux facteurs susceptibles d'affecter la linéarité du modèle d'extrapolation,
- à l'incomplétude des bases de données de référence,
- à l'élaboration de règles opérationnelles d'échantillonnage,
- aux données auxiliaires possibles.

Les paragraphes suivants détaillent ces questions de recherche.

Comment identifier et corriger l'effet des facteurs susceptibles d'affecter la linéarité du modèle d'extrapolation à l'échelle d'un bassin de production ?

Rappelons que la méthode d'extrapolation que nous proposons est basée sur une relation linéaire entre l'évolution de l'état hydrique d'une plante mesuré sur un site de référence et l'évolution de l'état hydrique d'une plante située sur un autre site du domaine. A l'échelle d'un bassin de production plusieurs facteurs sont susceptibles d'affecter la linéarité de cette relation :
- la diversité des cépages et des porte-greffes,
- la diversité des modes de conduite,
- la présence de plusieurs unités pédologiques,
- la présence d'une topographie marquée susceptible d'introduire des micro-climats, etc.

A cette échelle spatiale, la pertinence de notre approche mérite donc d'être étudiée. Nous nous proposons de répondre à cette question par l'expérimentation. Il s'agira de définir un site expérimental correspondant à une coopérative ou une appellation d'origine qui présente une grande diversité des facteurs mentionnés. L'acquisition d'une base de données adaptée nous permettra de vérifier :
- la linéarité de la relation entre site de référence et chaque site à estimer,
- la stabilité temporelle de cette relation,
- l'effet éventuel des facteurs d'influence que nous avons identifiés,
- la pertinence d'une approche permettant d'en corriger les effets si nécessaire.

Il s'agit d'un dispositif particulièrement lourd à mettre en place et qui nécessitera des collaborations avec l'institut Français de la vigne et du vin et une coopérative ou un syndicat de cru. Si l'existence d'un modèle spatial est démontré à cette échelle, le site expérimental choisi constituera un site pilote sur lequel des actions de transferts auprès des professionnels pourront être entreprises.

Comment utiliser le modèle spatial pour pallier l'incomplétude des bases de données d'apprentissage ?

L'étalonnage du modèle d'extrapolation nécessite l'acquisition d'informations relatives à l'état hydrique des plantes. Ces informations constituent la base d'apprentissage. Jusqu'à présent, notre approche suppose la disponibilité d'une base d'apprentissage complète, c'est à dire qu'à chaque date considérée, la valeur de l'état hydrique des plantes est disponible simultanément sur chaque site du domaine d'étude ainsi que sur le site de référence. L'acquisition d'une telle base d'apprentissage ne pose pas de problème tant que les sites à mesurer sont proches (échelle de la parcelle ou de l'îlot de parcelles). A l'échelle d'un territoire plus vaste, les contraintes opérationnelles liées au temps de déplacement des personnes et/ou au nombre de personnes disponibles pour effectuer les mesures rendent difficile l'acquisition d'une base d'apprentissage complète.
Cette contrainte opérationnelle pose le problème de l'étalonnage du modèle spatial avec une base d'apprentissage incomplète.

Pour répondre à cette question, l'approche que nous envisageons repose sur l'hypothèse d'un modèle linéaire d'extrapolation spatiale qui, si nécessaire, sera corrigé des facteurs mentionnés lors de la question précédente. Notre recherche visera à proposer et valider un protocole d'échantillonnage adapté aux contraintes liées à l'étendue des territoires considérés. L'hypothèse du modèle spatial permettra de définir un protocole d'acquisition des données simplifié. En particulier, l'introduction d'un ou plusieurs sites de référence sur lesquels la mesure de l'état hydrique sera systématiquement réalisée à toutes les dates permet d'envisager l'acquisition des informations de manière asynchrone.

Quelles informations auxiliaires pertinentes pour améliorer la résolution spatiale du modèle ?

Nos travaux précédents ont montré qu'il était possible d'utiliser des données auxiliaires faciles à acquérir pour améliorer la résolution spatiale du modèle d'extrapolation. Cette approche a été validée au niveau de la parcelle. Dans un contexte méditerranéen non irrigué, l'imagerie multispectrale fournit des données auxiliaires pertinentes. Toutefois, à l'échelle d'un bassin de production, l'utilisation de cette donnée exige d'apporter des corrections relatives aux facteurs d'influence (recherche décrite à la section 5.2.2.a.). D'autres données auxiliaires plus directement reliées à l'état hydrique des plantes peuvent être envisagées, en particulier :

- le $\delta^{13}C$, c'est à dire la mesure du rapport isotopique C^{12}/C^{13} sur les sucres du moût à maturité[38],
- l'infra-rouge thermique.

[38] Dans le carbone du CO_2 atmosphérique, les proportions des isotopes C^{12} et C^{13} sont respectivement de 98,9 % et de 1,1 %. La photosynthèse discrimine ces isotopes stables du carbone : la plante incorpore préférentiellement l'isotope C^{12} qui est plus léger. Une contrainte hydrique provoque la fermeture momentanée des stomates, ce qui diminue la vitesse des échanges de CO_2 entre les feuilles et l'atmosphère. La discrimination isotopique s'en trouve limitée et le $\delta^{13}C$ diminue, devenant très proche de celui du CO_2 atmosphérique. Le $\delta^{13}C$ des produits primaires de la photosynthèse s'avère donc être fonction du régime hydrique subi par la vigne lors de leur synthèse, c'est-à-dire pendant la maturation des baies. La mesure du rapport isotopique C^{12}/C^{13}, nommé $\delta^{13}C$, sur les sucres du moût à maturité est un indicateur global de la contrainte hydrique de la vigne lors de la période de synthèse des sucres (période véraison/maturité).

Nos travaux de recherche porteront sur l'utilisation de ces deux données auxiliaires. Notons que l'intégration de ces données dans notre modèle d'extrapolation n'implique pas le même effort de recherche.

En ce qui concerne le $\delta^{13}C$, l'approche que nous développerons sera essentiellement une approche expérimentale. Il s'agira de vérifier, sur un site pilote, la qualité de prédiction d'un modèle d'extrapolation de l'état hydrique des plantes obtenu avec cette donnée auxiliaire[39]. Reprenant le formalisme de l'équation 2, le modèle que nous envisageons dans un premier temps est présenté Equation 12 :

$$\hat{z}(s_i, t_j) = \left(b_0 + b_1 \times \delta^{13}C(s_i)\right)_x \, z_{re}(s_{re}, t_j) \qquad \text{[Equation 12]}$$

Un échantillonnage de 1 à 2 sites par hectare semble réaliste à l'échelle d'un bassin de production. Cette donnée, relativement simple à mesurer pourrait constituer une donnée auxiliaire avec une résolution spatiale « intermédiaire» avant de considérer d'autres données auxiliaires.

L'infra-rouge thermique, permet d'estimer la température de la canopée et constitue donc une variable d'observation directement reliée à l'état hydrique des plantes[40]. Dans le cadre du projet Vinnotec, nous avons déjà initié quelques expérimentations qui nous ont permis d'identifier les verrous scientifiques relatifs à l'intégration des données thermiques dans notre modèle. Deux questions de recherches ont été identifiées :

i) Le développement de méthodes simples et spécifiques pour corriger les effets de l'atmosphère sur les mesures réalisées.

ii) Le développement de méthodes pour corriger l'effet relatif à la discontinuité du couvert végétal de la vigne. La présence de pixels mixtes (végétation/sol) entraîne nécessairement une sur-estimation de la température de la canopée. Cette correction n'est pas triviale et passe par une estimation de la proportion de sol nu et de sa température. Une approche de démixage (unmixing) peut être envisagée sur la base de données auxiliaires (images multispectrales) permettant d'estimer la proportion de canopée et de sol au niveau de chaque pixel.

Comment produire des règles d'échantillonnage optimales, intelligibles et transposables à d'autres domaines pour l'étalonnage du modèle spatial ?

Les approches proposées équation 1 ou équation 2 permettent de définir un modèle d'extrapolation spatial de l'état hydrique des plantes sur la base d'informations auxiliaires. Ce modèle repose sur la détermination de seulement 2 voire 3 inconnues pour l'ensemble du domaine d'étude. Ce résultat est intéressant dans la mesure où, en théorie, le modèle spatial pourrait être étalonné par seulement 3 mesures correctement positionnées dans le temps et dans l'espace.

D'un point de vue opérationnel, ce résultat pose deux questions :

---

[39] Gaudillière J.P., Van leeuwen C., Ollat N., 2002. Carbon isotop composition of sugars in grape vine, an integrated indicator of vineyard water status. Journal of Experimental Botany. 53, 369, 757-763.

40 Jones, H.G., Stoll M., Santos T., Sousa C.D., Chaves M.M., Grant O.M., 2002. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: Application to grapevine. Journal of Experimental Botany 53 (378), 2249-2260.

- comment positionner les mesures dans l'espace et dans le temps afin de maximiser la qualité du modèle ?
- comment élaborer une règle simple qui constituerait une procédure intelligible et applicable sur le terrain ?

Dans un premier temps, nos recherches se focaliseront sur une échelle intra-parcellaire. La méthode mise en œuvre sera ensuite adaptée à une échelle plus large si le modèle d'extrapolation spatiale s'avère transposable à l'échelle du bassin de production.
La démarche que nous envisageons repose sur plusieurs étapes :
- constituer une base de données d'échantillons,
- identifier les échantillons qui permettent d'obtenir les meilleurs modèles,
- identifier les caractéristiques communes à ces échantillons,
- inférer des règles simples et générales à partir des caractéristiques communes identifiées.

Le principe général de la démarche que nous proposons est illustré figure 11.
Sur un certain nombre de parcelles, nous disposons d'une base de données d'état hydrique $z(s_i,t_j)$ mesurées sur les localisations s_i et aux dates t_j. Nous proposons de générer N échantillons Ech_n (n=1,2,…, N) à partir de cette base de données. Chaque échantillons Ech_n est constitué de k (k = 3,4,…,K) mesures (k = 3 sur la figure 11) et permet d'étalonner un modèle d'extrapolation spatial M_n. Ce modèle est utilisé pour calculer l'erreur de prédiction $\mathbf{e_n}$, sur l'ensemble des données de la base (excepté les n mesures utilisées pour l'étalonnage de M_n).

La génération des N modèles ne peut être exhaustive puisqu'à l'échelle de la parcelle notre base de données est constituée de 49 sites mesurés à 13 dates différentes, soit 637 mesures d'état hydrique. Tester tous les modèles possibles avec les mesures disponibles revient à évaluer plus d'un milliard de modèles (plus d'une année de calcul). Des heuristiques devront être utilisées afin de répondre à ce problème.

L'objectif de notre approche est d'identifier i) le nombre de mesures (k) nécessaire par échantillon, ii) les combinaisons de localisations s_i et de dates de mesure t_j qui permettent de minimiser **e**. Les localisations correspondent à un couple de coordonnées géographiques et les dates correspondent à un jour de l'année. Ces informations sont spécifiques au domaine et au millésime étudié et ne sont donc pas transposables à d'autres situations. Afin de proposer des régles généralisables, il sera nécessaire de transformer les localisations et les dates en informations intelligibles.

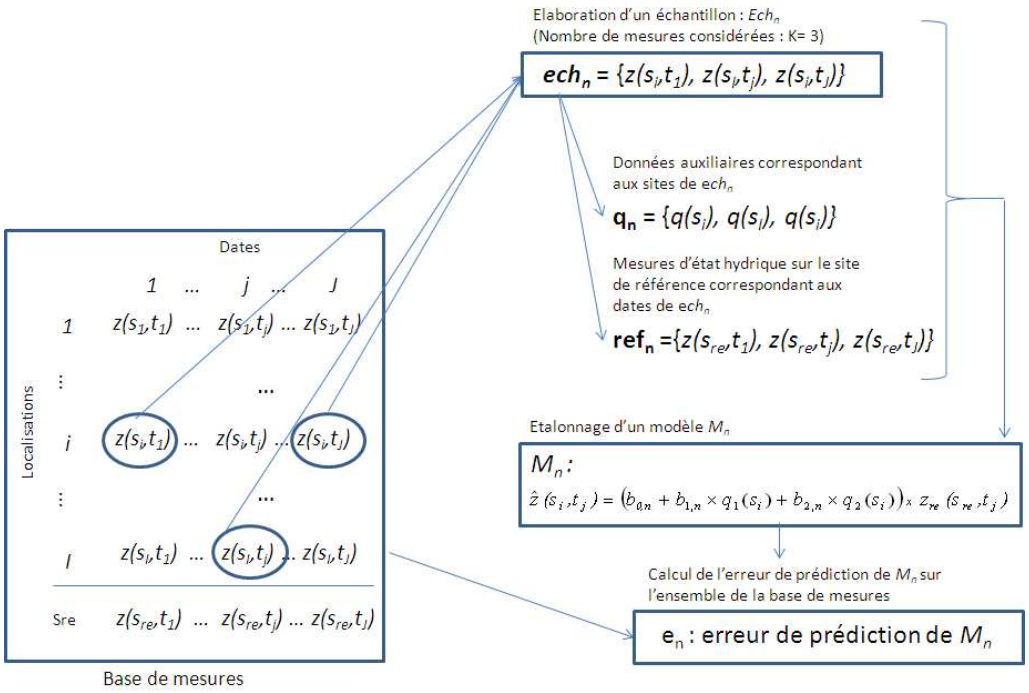


Figure 11 : principe général de génération d'un échantillon (Ech_n), d'un modèle d'extrapolation (M_n) associé à cet échantillon et de son erreur de prédiction $\mathbf{e_n}$.

La génération de ces règles pourra passer par une méthode d'inférence à partir des Ech_n produisant les meilleurs modèles possibles. Notons qu'une méthode d'inférence classique ne peut pas être directement appliquée puisque notre problème n'est pas de la forme *n,p* (*n* individus, *p* attributs). A l'heure où j'écris ce mémoire, aucun choix méthodologique n'a encore été effectué. Ce travail fera l'objet d'un travail de postdoctorant commandité et financé par la société Fruition Sciences.

Comment intégrer la dimension temporelle dans le modèle d'extrapolation spatial ? Vers un modèle spatio-temporel ?

Une fois le modèle étalonné sur un bassin de production, la fréquence avec laquelle l'information est réactualisée est déterminée par la fréquence avec laquelle les mesures seront réalisées sur le site de référence. La figure 12 illustre cette caractéristique.

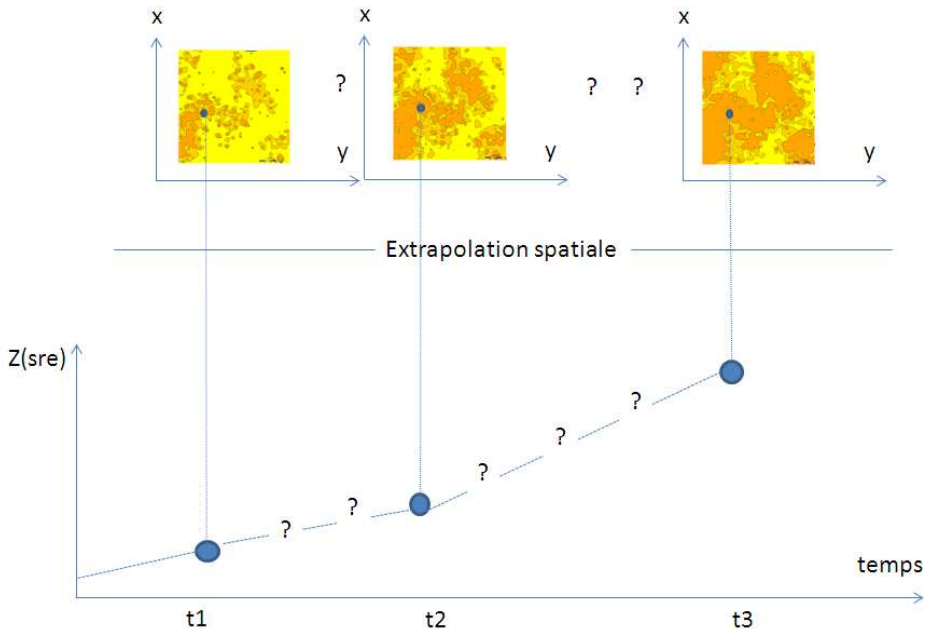


Figure 12 : Représentation schématique du principe de notre modèle spatial (extrapolation d'une mesure *z* effectuée sur le site de référence (s_{re}) à la date *t* sur le domaine spatial considéré) où la réactualisation des cartes dépend de l'acquisition d'une mesure sur le site de référence.

Si aucune mesure n'est effectuée sur le site de référence, il n'est pas possible de réactualiser les cartes. En ce sens, il s'agit bien d'un modèle spatial et non d'un modèle spatio-temporel. Notre effort de recherche consistera à proposer une méthode permettant d'améliorer la fréquence d'actualisation des cartes d'état hydrique.

L'approche que nous envisageons (relation 13) consiste à estimer l'état hydrique $\hat{z}(s_{re},t+1)$ à la date $t+1$, à partir :

- d'une mesure d'état hydrique $z(s_{re},t)$ effectuée à la date *t*,
- et de données auxiliaires $\mathbf{c}(t,t+1)$, en relation avec l'état hydrique de la plante et mesurées avec une haute résolution temporelle.

Cette estimation sera ensuite extrapolée à l'ensemble du domaine considérée grâce au modèle spatial préalablement étalonné.

$$\hat{z}(s_{re},t+1) = f\left(z(s_{re},t), \mathbf{c}(t,t+1)\right), \quad [13]$$

Deux types d'observation auxiliaires pourront être envisagés :

- des observations provenant de capteurs fixes, (dendromètre ou flux de sève) installés sur une plante située sur le site de référence. L'intérêt de tels systèmes est de produire une ou plusieurs données en relation avec l'évolution de l'état hydrique de la plante avec une fréquence journalière[41].
- des observations climatiques provenant d'une station météorologique située à proximité du site de référence. Une telle station fournit des données permettant de caractériser la demande évaporative du climat avec une fréquence journalière.

[41] Ferandez J.E., Cuevas M.V., 2010. Irrigation scheduling from stem diameter variations : a review. Agricultural and Forest Meteorology. 150, 135-151

L'approche que nous proposons diffère des approches de modélisation classique. En effet, elle prévoit la collaboration entre un modèle étalonné localement qui est régulièrement « mis à jour » lorsqu'une mesure de référence est effectuée. Cette approche pose des questions originales relatives à : i) la proposition et la validation d'un modèle f , l'indentification des données auxiliaires **c** permettant de représenter les variations d'état hydrique des plantes sur le site de référence et iii) la mise en œuvre d'une méthode d'étalonnage du modèle qui devra être effectuée en ligne. Pour répondre à cette dernière question, des méthodes basées sur l'assimilation de données pourront être envisagées.

5.2.4. Questions de recherche liées à la préconisation

A l'échelle du bassin de production, les préconisations sont généralement prodiguées par un technicien ou un ingénieur agronome auprès d'un viticulteur ou d'un chef de culture. Comme mentionné précédemment, l'élaboration d'une préconisation nécessite une expertise agronomique complexe qui ne fait pas partie de mon champ de recherche. Mes travaux se focaliseront donc sur des développements de méthodes destinées à faciliter l'intégration de la VP dans le but d'améliorer et faciliter le conseil effectué par les techniciens viticoles.

A cette échelle de travail, l'un des enjeux de la VP sera de faciliter la mise en place (ou la validation) de réseaux de parcelles de référence (référentiels). Les observations et les informations agronomiques acquises sur les parcelles de référence sont utilisées par le technicien viticole pour effectuer un diagnostic. Ce diagnostic constitue la base d'une préconisation qui est extrapolée aux parcelles du bassin de production qui présentent les mêmes caractéristiques pédo-climatiques que la parcelle de référence. L'exhaustivité spatiale des observations apportées par la VP permettra d'améliorer l'identification des grandes unités pédo-climatiques à l'échelle du bassin de production. L'intégration de la VP à cette échelle pose donc des questions scientifiques relatives aux méthodes de zonage.

Quelle méthode pour zoner un bassin de production viticole sur la base d'observations à haute et moyenne résolution et de connaissances expertes ?

Le zonage est une question que nous avons déjà abordée lors de nos précédentes recherches. L'approche que nous avons proposée fait intervenir des méthodes de segmentation issues du domaine de l'analyse d'images (ligne de partage des eaux) et nécessite que les données soient organisées selon une grille régulière.

Le contexte de changement d'échelle auquel nous nous intéressons, nécessite de proposer une approche de zonage permettant de :

- prendre en compte une information qui n'est pas nécessairement organisée suivant une grille régulière, en particulier les données générées par un réseau de capteurs (météo, humidité du sol, etc.). Les méthodes de segmentation classiquement appliquées au traitement des images sont difficilement transposables à ces spécificités,
- automatiser totalement ou partiellement le zonage afin de proposer des unités de fonctionnement sur un grand territoire,
- intégrer des aspects multivariés, en effet plusieurs variables d'observation ou de caractérisation devront être introduites simultanément dans le processus de zonage,
- intégrer l'expertise développée par la personne qui conduit l'analyse, que ce soit par la prise en compte de contraintes opérationnelles (surface minimale et contour des zones proposées) ou par la prise en compte de connaissances expertes (type de sol, caractéristiques particulières d'une région de l'espace etc.).

Ces spécifications mettent en évidence les limites des approches de zonage que nous avons proposées dans nos précédents travaux.
Notre recherche s'intéressera à l'apprentissage de zones sur la base de données spatialisées multivariées, hétérotopes et imprécises afin de prendre en compte la diversité des observations disponibles. Le formalisme que nous envisageons pour développer cette nouvelle approche de zonage s'inscrit dans la continuité des travaux que nous avons menés sur la fusion de données spatialisées. La théorie des possibilités nous semble particulièrement adaptée au problème de fusion de données hétérogènes. Notre apport théorique principal reposera sur le développement d'une approche originale mettant en œuvre un raisonnement simultané dans l'espace géographique et dans l'espace des attributs. Nos recherches viseront à proposer des mesures de similarités adaptées au caractère hétérogène des données et permettant de raisonner simultanément dans ces deux espaces. Ces mesures de similarité seront utilisées pour guider le zonage.

5.2.5. Des perspectives de recherche sources de futures collaborations

Le caractère multidisciplinaire des questions posées va nécessiter de nombreuses collaborations au niveau local, national et international.

Des collaborations scientifiques : mes projets de recherche devraient conforter des collaborations existantes et en initier de nouvelles :
- en modélisation de l'architecture de la plante (LEPSE - laboratoire d'Ecophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux-E. Lebon) et en interaction plante-rayonnement (UMR EMMAH, Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydro systèmes- F. Baret) pour aborder la question des facteurs d'influence de la conduite de la vigne sur les images multispectrales,
- en géostatistiques (université de Sydney), en statistique et en informatique (UMR MISTEA (Mathématiques, Informatique et STatistique pour l'Environnement et l'Agronomie) pour les questions relatives à l'échantillonnage spatial et à l'intégration de contraintes opérationnelles dans l'échantillonnage,
- en écophysiologie de la vigne (INRA de Pech–Rouge, Université de Talca, Université Publique de Navarre) sur les aspects relatifs à l'utilisation d'observations auxiliaires à haute résolution temporelle.

Des collaborations techniques seront également nécessaires en particulier avec l'Institut Français de la Vigne (Rodilhan), le centre interprofessionnel des vins de Champagne (CIVC), des partenaires professionnels (Syndicat de cru de Tavel) pour expérimenter le changement d'échelle relatif à l'extrapolation spatiale de l'état hydrique des plantes.

Enfin, des partenariats avec des entreprises sont également initiés, que ce soit pour la mise en place d'expérimentations de validation ou pour des actions de transferts. Des collaborations sont d'ores et déjà effectives avec l'Institut Coopératif du Vin (ICV), Spot Image et Fruition Sciences.

Ces collaborations s'inscriront dans différents projets financés i) en propre par les industriels (Fruition Sciences), ii) par l'état et/ou la région (projet FUI, projet CPER) ou iii) par d'autres sources de financement (projet CTP, conseil scientifique de Montpellier SupAgro, INRA).

5.3. La VP va-t-elle bouleverser la viticulture ?

Le caractère multidisciplinaire de mes recherches me permet aujourd'hui d'identifier les bouleversements que la VP va introduire dans l'organisation et la gestion des systèmes de production tels que nous les connaissons aujourd'hui. Avec ce chapitre, mon souhait et de partager cette analyse mais aussi et surtout de mettre en évidence les grands enjeux qui en découlent. Cela me permettra de présenter les grandes questions de recherche que la VP va poser dans un avenir proche. Mes investigations s'attacheront à répondre à certaines de ces questions. Mais surtout, cela me permettra d'identifier des enjeux qui se situent en dehors de ma thématique de recherche. Nous verrons en particulier que la VP va à terme générer des questions de recherche dans différents domaines tels que la sociologie, l'économie et la gestion, l'éco-évaluation et naturellement l'agronomie.

Ce bouleversement va s'effectuer dans trois domaines que je détaille ci-après.

a. Valorisation des données de l'entreprise viticole

La viticulture de précision va générer une quantité très importante de données géo-référencées. Il s'agira de données techniques, mais aussi de données de traçabilité puisqu'il sera possible d'enregistrer automatiquement la plupart des opérations. La VP va ainsi permettre de satisfaire des obligations réglementaires de traçabilité et d'évoluer vers le zéro saisie. Ces données seront également utiles pour la gestion économique et l'éco-évaluation de l'entreprise. A moyen terme, les données issues de la VP viendront donc compléter/alimenter des bases de données déjà utilisées pour la traçabilité, la gestion économique, etc. des entreprises viticoles.
L'association des données issues de la VP avec d'autres informations déjà habituellement collectées et structurées dans des bases de données au sein des entreprises viticoles va devenir un enjeu dans les prochaines années.

Plusieurs aspects sont à considérer :

- le pré-traitement et la mise en forme des données collectées afin de produire une information utile pour la traçabilité ou la gestion économique de l'entreprise. Un exemple simple et déjà opérationnel sur certaines applications concerne la localisation systématique des interventions où les positions géographiques des machines constituent une information exhaustive des temps de travaux à condition de traduire une succession de positions en temps de déplacement, temps de travail, temps de manœuvre, etc. Cet exemple est trivial, mais il illustre bien l'intérêt que revêtent certaines informations issues de la VP pour des applications autres que la gestion technique.

- la collaboration entre les diverses informations collectées afin de créer de nouvelles informations qui sont inaccessibles aujourd'hui par la mesure. C'est par exemple le cas de certains indicateurs environnementaux. Reprenant l'exemple précédent, la connaissance des temps de travaux (mesurés de manière exhaustive) en association avec la consommation du matériel (mesurée ou estimée par la puissance) permettra d'estimer précisément le coût énergétique de toutes les pratiques. Il est aujourd'hui difficile d'imaginer l'étendue de la connaissance qui sera ainsi générée. Cette association entre les diverses informations collectées permettra de générer une connaissance fine, locale et multi-dimensionnelle du système de production.

- L’élaboration de références techniques et économiques, les bases de données constituent (ou constitueront à moyen terme) une mémoire de l’entreprise qu’il sera possible de mobiliser pour répondre à de nouvelles questions. Ainsi, une application triviale s’apparente à l’une des approches de la VP que nous avions identifiée au début du document : l’expérimentation en ligne. En effet, la comparaison de l’année en cours avec des millésimes passés peut constituer, à tout moment, une aide sur les décisions à prendre pour conduire la culture dans un contexte économique ou climatique particulier. Il s’agit d’un raisonnement par analogie à des cas résolus par le passé.

Ces différents aspects, brièvement présentés, sont susceptibles de générer des questions scientifiques qu’il sera nécessaire d’investir à moyen terme.

b. La mise en réseau de données et des informations géoréférencées

A terme, tous les acteurs d'un territoire (bassin de production, région, aire d'apport d'une cave coopérative) pourront mettre à disposition et partager de l'information. Tout comme l'ensemble des réseaux sociaux qui voient aujourd'hui le jour, il est difficile d'imaginer les applications potentielles qui en résulteront pour l'agriculture. Dans ce domaine, l’Institut Français de la Vigne joue un rôle de pionnier avec la plateforme Epicure.
D'un point de vue purement technique, une observation sanitaire, une mesure d'état hydrique, un contrôle de maturité, etc. vont prendre un tout autre sens s'ils sont positionnés sur un territoire, cartographiés et mis en relation avec les mesures voisines. Cette mise en réseau va bouleverser la place et le rôle des structures de conseil, des instituts techniques et de la recherche expérimentale. En effet, le système de production va générer lui-même toutes les informations aujourd’hui élaborées à partir de référentiels, de sites pilotes, d’observatoires, etc.
D’un point de vue économique, cette mise en réseau va révolutionner le conseil en agriculture puisqu’il va falloir inventer de nouveaux services et de nouveaux modèles économiques.
D’un point de vue scientifique, ces applications vont soulever des questions qui s’inscrivent dans la continuité des travaux que nous avons entrepris. Elles sont relatives à l’interpolation spatiale des données, la résolution temporelle des données collectées, l’hétérotopie des données, le caractère asynchrone des données, la prise en compte de la fiabilité et de l’hétérogénéité des informations collectées, etc.

c. La gestion de la complexité.

En association avec d’autres informations, la VP, et de manière plus générale l’AP, va permettre d’approcher la complexité des systèmes de production agricoles. La connaissance apportée permettra une meilleure maîtrise des interactions entre les cultures et leur environnement immédiat, tout en restant dans le cadre de systèmes agricoles mécanisés et/ou robotisés, rentables, productifs et peu pénibles.
Ainsi, l’agriculture mécanisée classique qui consiste à mettre en place une seule espèce (un seul clone) sur un espace travaillé uniformément indépendamment des spécificités locales relatives à l’environnement de la parcelle va disparaître. La cartographie du système de production associée à une localisation des outils d’intervention va permettre d’effectuer des opérations très précises et adaptées localement sans générer de contraintes relatives à la conduite ou à la gestion du matériel. Il sera ainsi possible de mettre en oeuvre des itinéraires d'une remarquable complexité au sein d'une même parcelle et de valoriser :
- les associations végétales pour mieux gérer les intrants et/ou limiter l’impact environnemental des pratiques culturales,

- les associations variétales afin d'exploiter les résistances et limiter les infestations sanitaires,
- l'équilibre avec l'environnement immédiat de la parcelle (haie, faune auxiliaire, cours d'eau, etc.).

Remarquons que certaines pratiques innovantes apparaissent déjà en grande culture, en particulier grâce au développement fulgurant des systèmes de positionnement centimétrique (GPS RTK, Real Time Kinematics) qui équipent aujourd'hui 30 % (Source Arvalis) des exploitations en grande culture en France. Cette technologie de positionnement, permet d'ores et déjà des pratiques culturales qui étaient inconcevables il y a quelques mois (gestion des coupures de tronçon, semis sous couverts interspécifiques, etc.) et qui sont expérimentées par des agriculteurs avant-gardistes.

L'Agriculture de Précision va faire évoluer le champ des possibles, elle va certainement introduire des changements importants dans la recherche agronomique puisqu'il sera possible de mettre en oeuvre et de tester 'en ligne et en réseau' des expérimentations relatives à des itinéraires techniques d'une complexité inégalée mais réalistes d'un point de vue technique. Aujourd'hui, l'impact des nouvelles technologies géoréférencées sur l'agriculture semble peu pris en compte par la recherche agronomique. Lors d'un congrès scientifique important qui s'est tenu à Montpellier en Septembre 2010 et qui avait pour thème "Comment inventer une nouvelle agriculture conciliant respect de l'environnement et satisfaction des besoins alimentaires et non alimentaires de l'homme », il est intéressant de noter qu'aucune session ne traitait des nouvelles technologies. L'AP est certainement perçue comme marginale et comme une innovation incrémentale. A court terme, l'enjeu sera de convaincre les agronomes qu'il s'agit d'une innovation de rupture et qu'il est nécessaire d'intégrer les possibilités offertes par ces technologies dans la recherche agronomique car l'AP (et la VP) va certainement projeter "toutes les agricultures" dans un nouveau paradigme.

6. Curriculum Vitae

a. Etat Civil

Nom : TISSEYRE,
Prénom : Bruno,
Date de naissance : 14 février 1968 (Montargis, Loiret – 45-, France,
Nationalité : française
Grade : Maître de conférence première classe (Ministère de l'Agriculture),
Adresse professionnelle : Unité Génie Rural, département Génie des Agro-Bio-Procédés, Unité Mixte de Recherche Information et Technologie pour les Agro-procédés, Bâtiment 21, Montpellier SupAgro, 2 Place Pierre Viala 34060 Montpellier Cedex. Tel: +33-499-61-23-35 - Fax : +33-499-61-24-36, Email : tisseyre@supagro.inra.fr

b. Cursus académique

1991 : Diplôme d'ingénieur en technique agricole de l'ENESAD (Etablissement National d'Enseignement Supérieur Agronomique de Dijon). Spécialisation : Physique Appliquée au Machinisme Agricole et au Génie Rural.
1992 : Diplôme d'Etude Approfondie (DEA) à l'ENSBANA (Ecole Nationale Supérieure de Biologie Appliquée à la Nutrition et à l'Alimentation - Dijon). Spécialisation en énie des procédés.
1993 : Assistant d'enseignement et de recherche contractuel (AERC) (Chaire de génie rural, Montpellier SupAgro).
1996 : Thèse de doctorat en sciences agronomiques de l'Ecole Nationale Supérieure Agrnonomique de Montpellier. Titre : modélisation de la taille d'hiver de la vigne sur la base d'analyse d'images d'arborescence. Composition du jury : P. BAYLOU (rapporteur), Pr. Ecole Nationale d'Electronique et de Radioélectricité de Bordeaux), H. PRADE (rapporteur), Directeur de Recherche, Centre National de Recherche Scientifique, Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, C. INTRIERI (rapporteur), Pr. Viticulture à l'Université de Bologne (Italie), A. CARBONNEAU (examinateur), Pr. Viticulture Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier), C. SINFORT, maître de conférence en Génie Rural à Montpellier Supagro, A. BOURELY, Dr. Responsable du département recherche et développement de la société Pellenc S.A., F. SEVILA, Pr en génie rural à Montpellier SupAgro.
- Mention très honorable avec les félicitations du jury.
1996 : maître de conference à Montpellier SupAgro.
2003 : séjour en délégation au centre Australien d'Agriculture de Précision de la faculté d'agriculture de l'université de Sydney (Australie).

7. Références bibliographiques

Articles dans des revues internationales à comité de lecture (ACL) et ouvrages scientifiques (OS)

TAYLOR J.A., ACEVEDO-OPAZO C., PELLEGRINO A., OJEDA H., TISSEYRE B., Can within-season grapevine predawn leaf water potentials be predicted from meteorological data in non-irrigated Mediterranean vineyards? Submitted to **Journal international des sciences de la vigne et du vin**.

KAZMIERSKI M., GLEMAS P., ROUSSEAU J., TISSEYRE B., 2011. Temporal stability of within-field patterns of NDVI in non irrigated Mediterranean vineyards, **Journal international des sciences de la vigne et du vin**, 45,2, 61-73.

TAYLOR J., ACEVEDO-OPAZO C., GUILLAUME S., OJEDA H., TISSEYRE B., 2011. A comment on inter-field spatial extrapolation of vine (*Vitis vinefera* L.) water status**, Journal international des sciences de la vigne et du vin**, 45, 2, 121-124.

COLIN F., GUILLAUME S., TISSEYRE B., 2011. Small catchment agricultural management using decision variables defined at catchment scale and a fuzzy rule-based system: A mediterranean vineyard case study, **Agricultural Water Management,** 2649-2668.

TISSEYRE B., 2011. Vineyard Mechanization effort and development in France, Chapter 6, In: Vineyard Mechanization: development and status in the United States and in major Grape Producing Regions of the world. **Eds. J. R. Morris and P. L. Brady, American society for horticultural science**, USA, Alexandria. ISBN 978-0-9830932-1-3.

JOHNSON L. F., NEMANI R., HORNBUCKLE J., BASTIAANSSEN W., THORESON B., TISSEYRE B., PIERCE L., 2011. Remote Sensing for Viticultural Research and Production, Chapter 3, In: The Geography of Wine: Eds. P. H. Dougherty, Springer, Germany (In press) ISBN 978-94-007-0463-3. Details can be found at http://www.springer.com/earth+sciences+and+geography/geography/book/978-94-007-0463-3

ROUDIER P., TISSEYRE B., POILVE H., ROGER J.M.R., 2011. A technical opportunity index adapted to zone-specific management Management zone delineation using a modified watershed algorithm, **Journal of Precision Agriculture,** 12, 1, 130-145.

PAOLI J. N., TISSEYRE B., STRAUSS O., McBRATNEY A.B., 2010. A technical opportunity index based on a fuzzy footprint of the machine for site-specific management: application to viticulture, **Journal of Precision Agriculture,** 11, 4 , 379-396.

SANTESTEBAN L. G., MIRANDA C., JIMENEZ C., FUENTEMILLAM., URRETAVIZCAYA I., TISSEYRE B., GUILLAUME S., ROYO J.B., 2010. Evaluation

of the interest of NDVI to identify distinct management units in vineyards. **Revista de teledeteccion**. 3, 11-16.

ACEVEDO-OPAZO C., TISSEYRE B., TAYLOR J., OJEDA H., GUILLAUME S. 2010. Spatial prediction model of the vine (Vitis vinifera L.) water status using high resolution ancillary information, **Journal of Precision Agriculture,** 11, 4, 358-378.

TAYLOR J., ACEVEDO-OPAZO C., OJEDA H., TISSEYRE B., 2010, Identification and significance of sources of spatial variation in grapevine water status**, Australian Journal of vine and wine research**, 16, 218-226.

PEDROSO M., TAYLOR J., TISSEYRE B., CHARNOMORDIC B., GUILLAUME S., 2010. A segmentation algorithm for the delineation of management zones, **Computer and electronics in agriculture**, 70, 199-208.

ACEVEDO-OPAZO C., TISSEYRE B., GUILLAUME S. and OJEDA H., 2010. Spatial extrapolation of the vine (Vitis vinifera L.) water status: a first step towards a spatial prediction model, **Irrigation science**. 28,2, 143-155.

COULOUMA, G., TISSEYRE, B., and LAGACHERIE, P., 2010. Is a systematic two dimensional EMI soil survey always relevant for vineyard production management? A test on two pedologically contrasting Mediterranean vineyards. Chapter 24, 1, 4, 283-295. In: Proximal soil sensing: Eds. R.A. Viscarra Rossel, A.B. McBratney and B. Minasny. **Progress in Soil Science series**. Springer.

TISSEYRE B., TAYLOR J., COULOUMA G., LAGACHERIE P., 2009. Mapping soil units within a vineyard using statistics associated with spatial data and factorial discriminant analysis, **Geoderma**, 153, 278-284.

ACEVEDO-OPAZO C., TISSEYRE B., GUILLAUME S., OJEDA H. and ORTEGA FARIAS S., 2008. Is it possible to assess the spatial variability of vine water status, **Journal international des sciences de la vigne et du vin.** 42, n°4, 203-219.

ACEVEDO-OPAZO C., TISSEYRE B., GUILLAUME S. and OJEDA H., 2008. The potential of high spatial resolution information to define within-vineyard zones related to vine water status. **Journal of Precision Agriculture,** 9, 285-302.

ROUDIER P., TISSEYRE B., POILVE H., ROGER J.M.R., 2008. Management zone delineation using a modified watershed algorithm, **Journal of Precision Agriculture,** 9, 233-250.

TISSEYRE B., McBRATNEY A.B., 2008. A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management using yield monitor data : application to viticulture, **Journal of Precision Agriculture,** 9, n°1-2, 101-113.

TISSEYRE B., MAZZONI C., FONTA H., 2008. Whithin-field temporal stability of some parameters in viticulture : potential toward a site specific management. **Journal international des sciences de la vigne et du vin,** 42, n°1, 27-39.

TISSEYRE B., OJEDA H., TAYLOR J., 2007. New technologies and methodologies for site-specific viticulture. **Journal international des sciences de la vigne et du vin**, 41, n°2, 63-76.

PAOLI J. N., STRAUSS O., TISSEYRE B., ROGER J. M., GUILLAUME S., 2007. Spatial data fusion for qualitative estimation of fuzzy request zones: Application on precision viticulture. **Fuzzy Sets and Systems**, 158, 5, 535-554.

GRELIER M., GUILLAUME S., TISSEYRE B., SCHOLASCH T., 2007. Precision viticulture data analysis using fuzzy inference systems, **Journal international des sciences de la vigne et du vin.** 41 (1), 19-31.

CONSTANZA P., TISSEYRE B., HUNTER J.J., DELOIRE A., 2004. Shoot development and non destructive determination of grape vine (vitis vinifera) leaf area. **African journal of enology and viticulture**. 25,2, 43-47.

SONG S., WANG W., HONG T., WANG P., LUO X., SINFORT C., TISSEYRE B., SEVILA F., 2003. Testing research on effects of top layer rice fog drop interception on pesticide spraying distribution in rice fields**, Transactions of Chinese Society of agricultural machinery**, 19, 6, 114-117.

GAUDIN J.M., RABATEL G., TISSEYRE B., 2001. Traitement différentiel linéaire de données GPS brutes pour la localisation autonome ou multicapteur, **Journal Européen des Systèmes Automatisés**, 35, 6, 727-746.

HONG T., TISSEYRE B., SINFORT C., SEVILA F., 2001. Study on the quality of pesticide spraying distribution based on DGPS technology, **Transactions of Chinese Society of agricultural machinery**, 4, 32, 42-47.

McFARLANE N.J.B., TISSEYRE B., TILLETT R. D., SEVILA F., 1997, Image analysis for long cane pruning of grapes vines. **Journal of agricultural Engeneering Research**, 66, 111-119.

TISSEYRE B., McFARLANE N.J.B., SINFORT C., TILLETT R. D., SEVILA F., CARBONNEAU A., 1997, Fuzzy multi-criteria decision-making for long cane pruning : a system for standard and complex vine configurations. **International journal of intelligent systems**, 12, 877-889.

TISSEYRE B., COQUILLE J.C., GERVAIS P., 1995, Conception and characterization of a continuous plug flow bioreactor. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, 13,3, 113-118.

Conférences internationales invité (INV)

TISSEYRE B., TAYLOR J., 2008. An overview of methodologies and technologies for implementing precision agriculture in viticulture. **Actes des XII congresso Brasileiro de viticultura e enologia**, 45-54

TISSEYRE B., 2005. Precision viticulture : within vineyard variability and temporal stability in yield and harvest quality**. actes des 14 émes journées du Groupe d'Etude des Systèmes de Conduite de la vigne,** 1, 18-29**.**

TISSEYRE B., TAYLOR J., OJEDA H., 2006. New technologies to characterize spatial variability in viticulture. **Proceedings of the VI international congress on terroir**, 204-217.

TISSEYRE B., 2004. An 'old world' view of the problem of vineyard variability, **workshop on managing vineyard variation (precision viticulture), 12th Australian Wine Industry Technical Conference.**

Communication à des congrès internationaux avec comité de lecture et publication des proceedings (ACTI)

SANTESTEBAN L.G., GUILLAUME S., ROYO J.B., TISSEYRE B., 2011. Are precision agriculture tools and methods relevant at the whole vineyard scale ? **Proceedings of eighth European Conference on Precision Agriculture,** ED. John v. Stafford, Ampthill, UK, 302-311.

DUPIN S., GOBRECHT A., TISSEYRE B., 2011. Airborne thermography of vines canopy : effect of the atmosphere and mixed pixel on observed canopy temperature. **Proceedings of eighth European Conference on Precision Agriculture,** ED. John v. Stafford, Ampthill, UK, 79-89.

PAOLI J-N., TISSEYRE B. , STRAUSS O. , McBRATNEY A.B., 2009. A technical opportunity index based on a fuzzy footprint of the machine for site-specific management: application to viticulture. **Proceedings of the 7th EFITA Conference, 6-8 July 2009, Wageningen, the Netherlands,** 73-80.

TAYLOR J., TISSEYRE B., ACEVEDO-OPAZO C., LAGACHERIE P., 2009. Field-scale model of the spatio-temporal vine water status in a viticulture system. **Proceedings of Seventh European Conference on Precision Agriculture,** 537-544.

SANTESTEBAN, L. G., TISSEYRE, B., ROYO, J. B., and GUILLAUME, S. 2008. Is it relevant to consider remote sensing information for targeted plant monitoring ? **proceedings of the VIIth International terroir Congress**, Nyon, Suisse, 469-474.

COULOUMA G., TISSEYRE B., LAGACHERIE P., 2008. Is systematic EMI two dimensional soil survey suitable for vineyard production management? A test on two pedologically-contrasted Mediterranean vineyards, **Proceedings of first global workshop on high resolution digital soil sensing and mapping,**

ROUSSEAU J., DUPIN S., ACEVEDO-OPAZO C., B. TISSEYRE, H. OJEDA., 2008. L'imagerie aérienne : application à la caractérisation des potentiels viticoles et oenoligiques, **Bulletin de l'organisation internationale de la vigne et du vin**. 81, 507-517.

ACEVEDO-OPAZO C., TISSEYRE B., GUILLAUME S. and OJEDA H., 2007. Test of NDVI information for a relevant vineyard zoning related to vine water status, **Proceedings of Sixth European Conference on Precision Agriculture,** 547-554.

TISSEYRE B., McBRATNEY A.B., 2007. A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management using yield monitor data : application to viticulture, **Proceedings of Sixth European Conference on Precision Agriculture,** 249-256.

ROUDIER P., TISSEYRE B., POILVE H., ROGER J.M., 2007. Management zone delineation base on remotely sensed data. **Proceedings of Sixth European Conference on Precision Agriculture**, 625-632.

TISSEYRE B., OJEDA H., CARILLO N., DEIS L., HEYWANG M., 2005b. Precision viticulture and water status: mapping the predawn water potential to define within vineyard zones. **Proceedings of the Fruits and nuts and vegetable production engineering TIC (Frutic05) Conference**, Montpellier, 719-736. On line on http://cemadoc.cemagref.fr/exl-doc/colloque/ART-00001663.pdf.

TAYLOR J., TISSEYRE B., PRAAT J.P., 2005. Bottling good information : mixing tradition and technology in vineyardsss. . **Proceedings of the Fruits and nuts and vegetable production engineering TIC (Frutic05) Conference**, Montpellier, 19-37.

TAYLOR J., TISSEYRE B., BRAMLEY R., REID A., 2005. A comparison of the spatial variability of vineyrad yield in European and Australian production systems. **Proceedings of Fith European Conference on Precision Agriculture,** 907-915

PAOLI J.N., TISSEYRE B., STRAUSS O., ROGER J.M., GUILLAUME S., 2005. Combination of heterogeneous datasets in precision viticulture. **Proceedings of Fith European Conference on Precision Agriculture**, 915-923

TISSEYRE B., PAOLI J.N., MAZZONI C., ARDOIN N., 2003. Data fusion for winegrape yield data analysis, **Proceedings of Fourth European Conference on Precision Agriculture**, 133.

PAOLI J.N., TISSEYRE B., STRAUSS O., ROGER J.M., 2003. Method to define confidence intervals for kriged values : application to precision viticulture, **Proceedings of Fourth European Conference on Precision Agriculture**, 521-526.

TISSEYRE B., MAZZONI C., ARDOIN N., CLIPET C., 2001. Yield and harvest quality measurement in precision viticulture – application for a selective vintage, **Proceedings of Third European Conference on Precision Agriculture**, 133-138.

MOTTRAM T., LAPEYRONIE P., TISSEYRE B. , 2001. Experiments to test electronic image analysis techniques for proximate sensing of pasture biomass, **Proceedings of Third European Conference on Precision Agriculture**, 265-270.

STORINO M., ARNAUD M., PIROT R., TISSEYRE B., SEVILA F., 2001. Methodoligical aspects of geo referenced data association from different origins : the case

of tractor/soil data association, **Proceedings of Third European Conference on Precision Agriculture**, 127-132.

TISSEYRE B., ARDOIN N.,SEVILA F., 1999, Precision viticulture : precise location and vigour mapping aspects**, 2 nd European Conference on Precision Agriculture**, Odense, Denmark, 319-330.

TISSEYRE B., SACCA A., TOTAL J., SEVILA F., 1998, dGPS correction based on a map matching algorithm for accurate machine location in the vineyard, **International conference on agricultural engineering, OSLO 98**.

ARDOIN, N., TISSEYRE, B., SEVILA F., 1998, Specifications for decision support systems in precision viticulture. **Book of abstracts of Bio-decision98 conferenc*e*,** Ed. Agro-Montpellier, Montpellier, France, 55-56.

Article dans des revues nationales (ASCL)

ROUSSEAU J., HALLEREAU C., TISSEYRE B., 2009. La télédétection pour caractériser des potentialités viticoles. **Revue de viticulture et d'œnologie de la vallée du Rhône**. 4, 10-14.

TISSEYRE B., OJEDA H., CARRILLO N., DEIS L., HEYWANG M. 2006. Viticultura de precisión y estado hídrico. I: Cartografía del potencial hídrico e interés para la zonificación a nivel intra-parcelario. **Enología Nº 12**.

TISSEYRE B., TAYLOR J., 2005. Viticulture de précision : variabilité spatiale et stabilité temporelle des paramètres quantitatifs à un niveau intra-parcellaire. **Le progrès agricole et viticole,** 22, 481-487**.**

PAOLIJ.-N., TISSEYRE B. , ZEBIC O. , GUILLAUME S. 2005. Détermination et cartographie des potentialités viticoles : Une approche experte. **Le Progrès agricole et viticole**. 23, 508-511.

ROUSSEAU J., TISSEYRE B., VERDIER B., GRELLET S., MERLET L., 2004. La cartographie des référentiels de maturité : intérêts et limites de la méthode**, Revue Française d'œnologie**, 207, 13-19.

TISSEYRE B., 2007. La télédétection en viticulture**, La vigne**, 187, 48-49.

TISSEYRE B., 2006. L'imagerie aérienne pour une vendange sélective, **Réussir vigne**, 121, 28.

TISSEYRE B., 2002. Le GPS pour la cartographie de la qualité et de la vendange, **Réussir vigne**, 74, 34-35.

TISSEYRE B., SEVILA F., 1997. La viticulture de précision, **La Vigne**, 83, 52-53

Communication à des congrès internationaux avec publication des proceedings (ACTI)

ROUSSEAU J., DUPIN S., ACEVEDO-OPAZO C., B. TISSEYRE, H. OJEDA., 2008. L'imagerie aérienne : application à la caractérisation des potentiels viticoles et oenoligiques, **Bulletin de l'organisation internationale de la vigne et du vin**. 81, 507-517.

ACEVEDO-OPAZO C., TISSEYRE B., GUILLAUME S. and OJEDA H., 2007. Modelling the spatial variability of the vine water status at a within field scale. **actes des 15 émes journées du Groupe d'Etude des Systèmes de Conduite de la vigne,** 1, 237-245**.**

TISSEYRE B., OJEDA H., CARRILLO N., DEIS L., HEYWANG M., 2005. Precision viticulture and water status I : mapping the predawn water potentiel and utility to define within vineyard zones. **actes des 14 émes journées du Groupe d'Etude des Systèmes de Conduite de la vigne,** 1, 18-29**.**

OJEDA H., CARILLO N., DEIS L., TISSEYRE B., HEYWANG M., CARBONNEAU A., 2005. Precision viticulture and water status II : quantitative and qualitative performance of different within field zones, defined from water potential mapping. **actes des 14 émes journées du Groupe d'Etude des Systèmes de Conduite de la vigne,** 2, 741-748.

SOUCHON N., RENAUD C., TISSEYRE B., 2001. Comparaison d'indicateurs d'entassement du feuillage sur vigne, **actes des 12 émes journées du Groupe d'Etude des Systèmes de Conduite de la vigne**, 97-102.

TISSEYRE B., ARDOIN N., CLIPET C., MAZZONI C., 2001. Mesure des paramètres de rendement et de qualité en viticulture de précision – application en vue d'une récolte sélective, **actes des 12 émes journées du Groupe d'Etude des Systèmes de Conduite de la vigne**, 639-643.

TISSEYRE B., LOPEZ F., BOGLIO P., SEVILA F., 1999. Mise en œuvre d'une méthode d'évaluation de l'expression végétative de la vigne, **actes des 12 émes journées du Groupe d'Etude des Systèmes de Conduite de la vigne,** 119-125.

PAOLI J.N., STRAUSS O., TISSEYRE B., ROGER J.M., GUILLAUME S., 2004. Aggregation of georeferenced data, **LFA 2004**, 77-84.

TISSEYRE B., MAZZONI C., ARDOIN N., CLIPET C., 2000. Mesure des paramètres de rendement et de qualité en viticulture de précision : application en vue d'une récolte sélective, **Actes du colloque agriculture de précision UMR Cemagref-enesad-Dijon**, 265-273.

STORINO M., PIROT R., TISSEYRE B., SEVILA F., 2000. Performance du tracteur comme indicateur de l'état physique du sol en agriculture de précision : première approche en riziculture camarguaise, **Actes du colloque agriculture de précision UMR Cemagref-enesad-Dijon**, 103-115.

Conférences nationales invité (COM)

TISSEYRE B., 2010. L'innovation en viticulture. Journées portes ouvertes de Pech-Rouge organisées par Transfert LR. Présentation disponible : http://www.transferts-lr.org/agroalimentaire/actualites/innovation/reussite_pour_la_journee_portes_ouvertes_a_pech_rouge.

TISSEYRE B. et GOBRECHT A., 2009. Les recherches en matière de viticulture de précision. SITEVI. Cycle de conférences organisées par le pôle de compétitivité Qualimed.

SANTESTEBAN L.G., MIRANDA C., FUENTEMILLA B., TISSEYRE B., GUILLAUME S., ROYO J.B., 2009. Evaluación del interés del índice NDVI para la delimitación de unidades de manejo diferenciado dentro de una explotación vitícola**. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección**. p 23.

TISSEYRE B., 2009, Potentialité des nouvelles technologies pour limiter les intrants. 11ème journée Vignoble & qualité, centre vinicole de Champagne Nicolas Feuillate.

TISSEYRE B., 2007. La viticulture de précision où en est-on ? Conférence organisée par les chambres d'agriculture de Dordogne et de Charente.

TISSEYRE B., 2006. Les nouvelles technologies pour caractériser les systèmes de production viticoles. Assemblée générale du comité interprofessionnel du vin de Champagne (CIVC).

TISSEYRE B., 2005. Viticulture de précision : les systèmes de mesure embarqués Actes de 15ème journées EUROVITI Ed. ITV. 97-102.

TISSEYRE B., 2003. La viticulture de précision, vers une connaissance très affinée des moyens de production, **actes de 7ème rencontres rhodaniennes**. Pp. 25-34.

TISSEYRE B., 2002. Un point sur la viticulture de précision. **Rencontres professionnelles d'innovigne, domaine de Pech-rouge.**

TISSEYRE B., 2002. Objectifs, état de l'art et perspectives de la viticulture de précision, **rencontres professionnelles du Vinitech (Bordeaux).**

Encadrement de Doctorant

Tutorat direct

Nom	Année	Thème de thèse
Jean-Noël Paoli	2001-2004	Fusion de donnée spatialisée appliquée à la viticulture de précision
Pierre Roudier	2005-2008	Définition de zones intra-parcellaires sur la base d'images de télédétection
César Acévédo	2006-2009	Modélisation de la variabilité spatiale de l'état hydrique des plantes.
Séverine Dupin	2009-	Collaboration entre expertise et modèle paramétrique pour la valorisation de base de données temporelles en viticulture.

Encadrement d'élèves de niveau Master

Tutorat direct

Nom	**Année**	**DAA/Master**	**Thème de mémoire**
Jamie Total	1996-1997	DEA Robotique LIRMM	Algorithme de map matching pour la correction de données GPS
Abdallah Sacca	1996-1997	AgroTIC	Elaboration d'une méthode de référence pour évaluer l'erreur de positionnement d'un mobile par GPS
Nathalie Ardoin	1998-1999	AgroTIC	Mesure des paramètres de rendement et de qualité de la vendange en ligne sur machine à vendanger
Nicolas Souchon	1999-2000	Viticulture (Enita Bordeaux)	Mesure de l'entassement du feuillage par analyse d'image
Nathalia Carrillo	2004-2005	Master viticulture université de Mendoza (Argentine)	Mesure et cartographie de la variabilité spatiale de l'état hydrique des plantes.
Eric Zermatten	2005-2006	AgroTIC	Cartographie de la variabilité spatiale du couvert végétal de la vigne par télédétection
Grégory Wagner	2006-2007	AgroTIC	Validation d'un indice d'estimation de la variabilité spatiale en viticulture sur la base d'images de télédétection
Cédric Vaissade	2007-2008	AgroTIC	Formalisation et mise en place d'un Système d'information dédié à l'acquisition et au traitement d'images de télédétection dans le cadre d'un service auprès des coopératives viticoles

8. Annexe

Codification des publications et productions proposée par l'AERES

ACL : Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture répertoriées par l'AERES ou
dans les bases de données internationales (ISI Web of Knowledge, Pub Med…).

ACLN : Articles dans des revues avec comité de lecture non répertoriées dans des bases de données internationales.

ASCL : Articles dans des revues sans comité de lecture.

INV : Conférences données à l'invitation du Comité d'organisation dans un congrès national ou international.

ACTI : Communications avec actes dans un congrès international.

ACTN : Communications avec actes dans un congrès national.

COM : Communications orales sans actes dans un congrès international ou national.

AFF : Communications par affiche dans un congrès international ou national.

OS : Ouvrages scientifiques (ou chapitres de ces ouvrages).

OV : Ouvrages de vulgarisation (ou chapitres de ces ouvrages).

DO : Directions d'ouvrages ou de revues.

AP : Autres productions : bases de données, logiciels enregistrés, traductions, comptes rendus d'ouvrages, rapports de fouilles, guides techniques, catalogues d'exposition, rapports intermédiaires de grands projets internationaux, prototype*, procédés pilotes* et démonstrateurs, obtentions végétales*, outils d'aide à la décision ou de prévision*, etc.

BL* : Brevet, licence associée à un brevet déposé