




Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union 

Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union 



DÉVELOPPEMENT D'UN PROGRAMME DE FORMATION  
POUR L'AMÉLIORATION DE L'UTILISATION DES OUTILS  
TIC DANS LA MISE EN ŒUVRE DE L'AGRICULTURE DE  
PRÉCISION  
2018-1-ES01-KA202-050709

## **CM Télédétection et Application des SIG en agriculture - tuteurs**

Auteurs: UPC

Date: Mai 2020

*Ce projet a été financé avec le soutien de la Commission européenne. Cette publication n'engage que son auteur et la Commission ne peut être tenue responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations qu'elle contient.*

## Sommaire

<b>1</b>	<b>1. Variabilité des sols.....</b>	<b>2</b>
1.1	Cartographie digitale des sols .....	2
1.2	Cartographie digitale des sols vs cartographie conventionnelle.....	3
1.3	La cartographie numérique des sols en quelques mots .....	4
1.4	Cartographie numérique des sols NCSS .....	5
1.5	Variabilité des sols. Exemple de la conductivité électrique .....	5
<b>2</b>	<b>Protection des plantes .....</b>	<b>6</b>
2.1	Gestion intégrée.....	6
2.2	Protection des plantes. Désherbage. Exemple 1 .....	8
2.3	Protection des plantes. Désherbage. Exemple 2 .....	10
<b>3</b>	<b>Mesure du rendement.....</b>	<b>12</b>
3.1	Générer des cartographies de rendement .....	13
3.2	Applications potentielles.....	15
3.3	Suivi du rendement. Cartographie des rendements de vendange.....	16
<b>4</b>	<b>Taux d'application variable.....</b>	<b>18</b>
4.1	Exemples de VRA .....	20
<b>5</b>	<b>Conclusion et challenges futurs .....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Références.....</b>	<b>23</b>

## 1. Variabilité des sols

(Diapositive 2-8 du document LectureGIS.pptx) [1,2]

L'agriculture conventionnelle traite un champ entier de manière uniforme en ce qui concerne l'application d'engrais, de pesticides, d'amendements du sol ou d'autres intrants. Cependant, le sol est spatialement hétérogène, la plupart de ses propriétés chimiques et physiques variant de manière significative à un mètre près. L'hétérogénéité spatiale du sol est l'un des nombreux facteurs à l'origine de la variation intra-champ du rendement des cultures. D'autres facteurs variables dans l'espace et/ou dans le temps influencent la variation intra-champ du rendement des cultures, notamment les influences liées à l'homme (par exemple, la gestion de l'irrigation, le compactage dû à l'équipement, etc.), biologiques (par exemple, les maladies, les parasites, etc.), météorologiques (par exemple, l'humidité, les précipitations, le vent, etc.) et topographiques (par exemple, la pente, l'aspect, etc.). L'incapacité de l'agriculture conventionnelle à prendre en compte les variations de ces facteurs à l'intérieur d'un champ a non seulement un impact économique négatif en raison de la réduction du rendement dans certaines zones d'un champ, mais a également un impact négatif sur l'environnement en raison des applications excessives de produits agrochimiques et du gaspillage de ressources limitées.

L'agriculture de précision, ou plus précisément la gestion des cultures en fonction du site, a été proposée comme un moyen de gérer la variabilité spatiale des facteurs édaphiques (c'est-à-dire liés au sol), anthropiques, topographiques, biologiques et météorologiques qui influencent le rendement des cultures dans le but d'accroître la rentabilité, d'augmenter la productivité des cultures, de préserver l'environnement sol-plante, d'optimiser les intrants et/ou de minimiser les impacts environnementaux négatifs. Les unités de gestion spécifiques au site (SSMU) sont des domaines spatiaux du sol qui peuvent être gérés de manière similaire pour optimiser le rendement en tenant compte de la variabilité.

### 1.1 Cartographie digitale des sols

Définition :

"La création et la population d'une base de données pédologiques géographiquement référencée, générée à une résolution donnée en utilisant des méthodes d'observation sur le terrain et en laboratoire couplées à des données environnementales par le biais de relations quantitatives."

- Le groupe de travail international sur la cartographie numérique des sols (WG-DSM)

"Production de cartes de classes ou de propriétés des sols à l'aide de logiciels de SIG et/ou de télédétection" - anonyme

La cartographie numérique des sols (DSM) représente "la création et la population de systèmes d'information spatiale sur les sols par l'utilisation de

méthodes d'observation sur le terrain et en laboratoire couplées à des systèmes d'inférence spatiale et non spatiale des sols" [3]. La science du sol, la science de l'information géographique, les méthodes quantitatives (statistiques et géostatistiques) et la cartographie sont combinées dans le cadre de la DSM. Les méthodes DSM sont utilisées pour estimer la distribution spatiale des classes de sol (par exemple, les séries de sol) et/ou des propriétés du sol (par exemple, la matière organique du sol), et peuvent être employées à différentes échelles (des champs individuels aux pays), et se sont avérées précieuses pour développer des cartes des sols plus quantitatives, plus exactes et plus précises.

## 1.2 Cartographie digitale des sols vs cartographie conventionnelle

L'utilisation de techniques géospatiales pour la cartographie des sols est largement couverte par le terme "cartographie numérique des sols" (CNS). La cartographie numérique des sols est définie comme la création de bases de données pédologiques géographiquement référencées, basées sur des relations quantitatives entre des données environnementales spatialement explicites et des mesures effectuées sur le terrain et en laboratoire.

L'utilisation des techniques de cartographie numérique des sols a progressé au fur et à mesure que les pédologues ont adopté les outils les plus récents pour faciliter le processus de cartographie. Le processus consistant à faire une déduction sur un segment de paysage (par exemple, une unité de carte pédologique) à partir de quelques observations ponctuelles en utilisant les facteurs de formation des sols est appelé "modélisation". Que la carte pédologique soit produite à l'aide d'une tarière à godet et d'une photo aérienne ou d'un logiciel géospatial, le processus est une opération de modélisation. L'utilisation des méthodes DSM augmente avec le temps et finira par ne plus être considérée comme une technique distincte et nouvelle. [4]

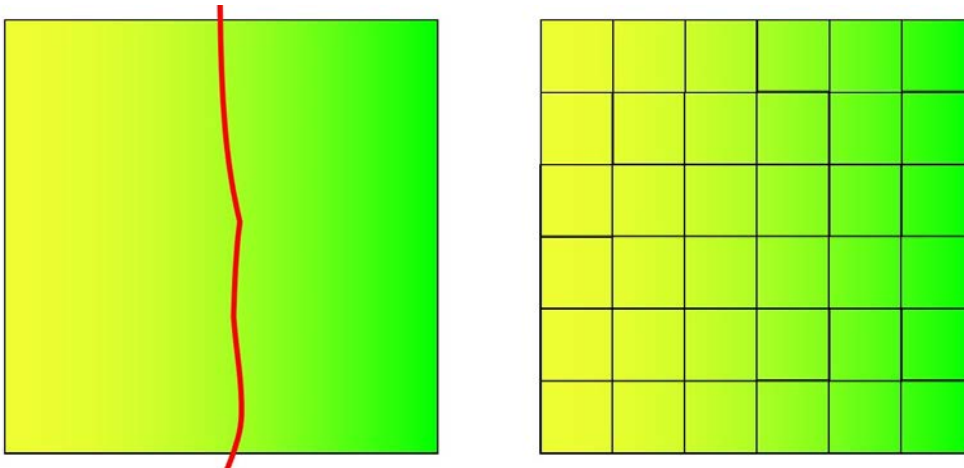
La carte numérique des sols est une carte matricielle composée de cellules bidimensionnelles (pixels) organisées en une grille dans laquelle chaque pixel a un emplacement géographique spécifique et contient des données sur le sol. Les cartes numériques des sols illustrent la distribution spatiale des classes ou des propriétés des sols et peuvent documenter l'incertitude de la prédiction des sols. La cartographie numérique des sols rend mieux compte de la variabilité spatiale observée et réduit la nécessité d'agréger les types de sols en fonction d'une échelle cartographique définie. La cartographie numérique des sols peut être utilisée pour créer des cartes initiales de levés pédologiques, pour compléter les projets de mise à jour des MLRA et pour générer des interprétations des sols. Elle peut faciliter l'inventaire rapide, le ré-inventaire et la gestion par projet des terres dans un environnement changeant.

La disponibilité et l'accessibilité des systèmes d'information géographique (SIG), des systèmes de positionnement global (GPS), des données spectrales télédéteectées, des données topographiques dérivées des modèles

numériques d'élévation (MNE), des modèles de prédiction ou d'inférence et des logiciels d'analyse des données ont considérablement fait progresser la science et l'art de l'étude des sols. La cartographie pédologique conventionnelle intègre désormais des observations ponctuelles sur le terrain qui sont géoréférencées par GPS et des modèles numériques d'élévation visualisés dans un SIG. Cependant, la distinction importante entre la cartographie numérique des sols et la cartographie conventionnelle des sols est que la cartographie numérique des sols utilise des modèles d'inférence quantitative pour générer des prédictions de classes de sols ou de propriétés des sols dans une base de données géographique (raster). Les modèles basés sur l'exploration de données, l'analyse statistique et l'apprentissage automatique organisent de grandes quantités de données géospatiales en groupes significatifs pour reconnaître les modèles spatiaux. Une quantité importante de données utilisées dans la cartographie numérique des sols peut être archivée sous forme numérique dans un SIG, de sorte que les connaissances expertes utilisées pour prédire la distribution des sols dans le paysage sont conservées. Des plans d'échantillonnage objectifs peuvent être mis en œuvre pour saisir statistiquement la variabilité du paysage, représentée par des covariables environnementales numériques (données environnementales représentant les facteurs de formation du sol). Les aspects les plus intéressants de la cartographie numérique des sols concernent la capacité de représenter des segments plus petits du paysage pour les classes de sol traditionnelles, la représentation continue des propriétés physiques et chimiques en plusieurs dimensions et la génération associée de couches matricielles représentant les incertitudes respectives. Ce sont des capacités qui permettront aux pédologues d'analyser de façon plus complète les propriétés physiques et chimiques des sols.

### 1.3 La cartographie numérique des sols en quelques mots

- La cartographie numérique des sols est la génération de bases de données pédologiques géographiquement référencées, basées sur des relations quantitatives entre des données environnementales spatialement explicites et des mesures effectuées sur le terrain et en laboratoire [5].
- La cartographie numérique des sols est la prédiction des classes ou des propriétés des sols à partir de données ponctuelles en utilisant un algorithme statistique.
- La carte pédologique numérique est une trame composée de cellules bidimensionnelles (pixels) organisées en une grille dans laquelle chaque pixel a un emplacement géographique spécifique et contient des données pédologiques.
- Dans la cartographie conventionnelle, la question principale est "Où est la limite entre deux sols ?" et l'accent est mis sur ces zones marginales (figure de gauche ci-dessous).
- Dans la cartographie numérique des sols, le concept central est bien défini avec des variations exprimées à travers le paysage (figure de droite ci-dessous).



- Les cartes numériques des sols illustrent la distribution spatiale des classes ou des propriétés des sols et peuvent documenter l'incertitude de la prédiction des sols.
- La cartographie numérique des sols peut être utilisée pour créer des cartes initiales d'étude des sols, affiner ou mettre à jour les études pédologiques existantes, générer des interprétations spécifiques des sols et évaluer les risques [6].
- Elle peut faciliter l'inventaire rapide, le ré-inventaire et la gestion par projet des terres dans un environnement changeant.

## 1.4 Cartographie numérique des sols NCSS

Le National Soil Survey Center - Geospatial Research Unit a identifié le DSM comme un domaine d'intérêt important pour soutenir les activités de prospection pédologique. De nombreux projets de recherche DSM ont été soutenus par le GRU. La classification numérique (hiérarchique et floue), l'interpolation spatiale et temporelle (géostatistique, ondelettes), le plan d'échantillonnage (basé sur un modèle ou sur un plan), l'analyse statistique (visualisation, ordination, régression et classification), l'analyse d'incertitude (propagation des erreurs, évaluation de la précision) et l'incorporation de données auxiliaires (imagerie proximale et télédéteectée, modélisation sol-terrain) font partie des méthodes utilisées pour élaborer des cartes prédictives des classes et des propriétés des sols.

## 1.5 Variabilité des sols. Exemple de la conductivité électrique

Une équipe de chercheurs a étudié l'application d'images aériennes détaillées et d'un capteur de résistivité du sol (Veris 3100) pour détecter la variabilité spatiale du sol et des cultures afin de faciliter la gestion des vergers. [7]

L'étude de cas a été réalisée dans un verger de pêchers (*Prunus persica*) situé à Lleida (Catalogne), qui est la principale zone de production de pêches en Espagne et également l'une des plus importantes en Europe. La zone d'étude a subi des transformations foncières au cours de la décennie 0 pour agrandir les champs et passer de cultures arables pluviales à des vergers irrigués.

L'étude de la conductivité électrique a été réalisée avec un instrument d'arpentage Veris 3100 ECa (Veris Technologies Inc. Salina, Kansas, USA). Le Veris 3100 utilise deux réseaux de conductivité électrique (CE) pour cartographier simultanément les profondeurs de sol de 0 à 30 cm (CEa peu profonde) et de 0 à 90 cm (CEa profonde). Les données ont été géoréférencées au moyen d'un récepteur Trimble AgGPS332 avec correction différentielle EGNOS en coordonnées géographiques WGS84 (EPSG 4326).

Il a été démontré que, dans un verger relativement petit, une variation spatiale importante des propriétés du sol et de la vigueur des plantes peut être trouvée, ce qui peut justifier l'application des techniques d'agriculture de précision. Les résultats de l'enquête ECa et de l'échantillonnage du sol ont montré que la transformation des terres effectuée à partir de la décennie 1980 pour agrandir les champs pourrait avoir modifié la distribution spatiale et la continuité des propriétés du sol.

Dans l'ensemble, les résultats suggèrent que la stratégie d'AP pourrait être appropriée en raison des structures spatiales des variables EC et NDVI. Néanmoins, et en raison de l'absence de relation entre EC et NDVI, il est préférable de proposer deux types de zones de gestion, en fonction de l'objectif de l'action à mener. Un premier type de zones de gestion serait délimité en fonction des classes d'EC peu profondes, ce qui servirait principalement à améliorer la capacité de rétention d'eau par des amendements en matière organique et une irrigation plus fréquente ; et à améliorer le drainage naturel. Le second type de zones de gestion serait délimité en fonction des classes NDVI, qui serviraient de référence pour réguler la vigueur et le rendement des arbres par différentes actions telles que la taille, l'application de régulateurs de croissance ou l'éclaircissage des fruits.

## 2 Protection des plantes

(Diapositives 10-14 du document LectureGIS.pptx)

### 2.1 Gestion intégrée

"On entend par "lutte intégrée contre les ennemis des cultures" l'examen attentif de toutes les méthodes de protection des plantes disponibles et

l'intégration ultérieure de mesures appropriées qui découragent le développement de populations d'organismes nuisibles et maintiennent l'utilisation de produits phytopharmaceutiques et d'autres formes d'intervention à des niveaux qui sont économiquement et écologiquement justifiés et réduisent ou minimisent les risques pour la santé humaine et l'environnement. La 'lutte intégrée contre les nuisibles' met l'accent sur la croissance d'une culture saine en perturbant le moins possible les agro-écosystèmes et encourage les mécanismes naturels de lutte contre les nuisibles." [8]

#### Principes

1. La prévention et/ou la suppression des organismes nuisibles doivent être réalisées ou soutenues, parmi d'autres options, notamment par :
  - La rotation des cultures,
  - Utilisation de techniques culturales adéquates (par exemple, technique du lit de semence éventé, dates et densités de semis, sous-semis, travail de conservation du sol, taille et semis direct),
  - Utilisation, le cas échéant, de cultivars résistants/tolérants et de semences et matériel de plantation standard/certifiés,
  - Utilisation de pratiques équilibrées de fertilisation, de chaulage et d'irrigation/drainage,
  - Prévention de la propagation d'organismes nuisibles par des mesures d'hygiène (par exemple, par le nettoyage régulier des machines et des équipements),
  - Protection et renforcement des organismes utiles importants, par exemple par des mesures de protection des plantes adéquates ou l'utilisation d'infrastructures écologiques à l'intérieur et à l'extérieur des sites de production.
2. Les organismes nuisibles doivent être surveillés par des méthodes et des outils adéquats, lorsqu'ils sont disponibles. Ces outils adéquats devraient inclure des observations sur le terrain ainsi que des systèmes d'alerte, de prévision et de diagnostic précoce scientifiquement fondés, lorsque cela est possible, ainsi que le recours aux conseils de professionnels qualifiés.
3. Sur la base des résultats de la surveillance, l'utilisateur professionnel doit décider si et quand appliquer des mesures phytosanitaires. Des valeurs seuils robustes et scientifiquement fondées sont des éléments essentiels de la prise de décision. Pour les organismes nuisibles, les seuils définis pour la région, les zones spécifiques, les cultures et les conditions climatiques particulières doivent être pris en compte avant les traitements, lorsque cela est possible.
4. Les méthodes biologiques, physiques et autres méthodes non chimiques durables doivent être préférées aux méthodes chimiques si elles permettent une lutte satisfaisante contre les organismes nuisibles.
5. Les pesticides appliqués doivent être aussi spécifiques que possible à la cible et avoir le moins d'effets secondaires possible sur la santé humaine, les organismes non ciblés et l'environnement.
6. L'utilisateur professionnel doit maintenir l'utilisation de pesticides et d'autres formes d'intervention aux niveaux nécessaires, par exemple par des doses réduites, une fréquence d'application réduite ou des applications



partielles, en considérant que le niveau de risque pour la végétation est acceptable et qu'ils n'augmentent pas le risque de développement de résistance dans les populations d'organismes nuisibles.

7. Lorsque le risque de résistance à une mesure phytopharmaceutique est connu et que le niveau d'organismes nuisibles nécessite l'application répétée de pesticides sur les cultures, les stratégies anti-résistance disponibles doivent être appliquées pour maintenir l'efficacité des produits. Cela peut inclure l'utilisation de plusieurs pesticides ayant des modes d'action différents.

8. Sur la base des registres d'utilisation des pesticides et de la surveillance des organismes nuisibles, l'utilisateur professionnel doit vérifier le succès des mesures phytosanitaires appliquées.

Raisons de la prospection [9]

Il existe de nombreuses raisons pour effectuer des enquêtes sur les organismes nuisibles, dont les suivantes :

- pour établir une liste des organismes nuisibles ou des hôtes présents dans une zone donnée
- pour démontrer l'existence d'une zone indemne (l'absence d'un organisme nuisible particulier dans une zone) ou de lieux à faible prévalence d'organismes nuisibles à des fins commerciales
- pour établir une liste de référence des organismes nuisibles avant de procéder à une surveillance continue des changements de statut des organismes nuisibles.
- pour la gestion et le contrôle des organismes nuisibles
- pour la détection précoce des organismes nuisibles exotiques
- pour la détection précoce d'organismes établis qui deviennent des organismes nuisibles
- pour délimiter l'étendue totale d'un organisme nuisible après une incursion
- pour suivre les progrès d'une campagne d'éradication d'un organisme nuisible.

L'Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes (OEPP) est l'organisation qui coordonne de nombreux aspects de la protection des plantes dans la plupart des pays européens. L'OEPP a produit un certain nombre de normes sur les mesures phytosanitaires et les produits phytosanitaires. Bien que ces normes ne s'appliquent qu'aux transactions avec la Communauté européenne, elles donnent également un aperçu des barrières de quarantaine utilisées. Certaines de ces normes fournissent une liste d'organismes nuisibles et des informations sur leur contrôle pour différentes cultures et sur leur identification sur le terrain.

## 2.2 Protection des plantes. Désherbage. Exemple 1

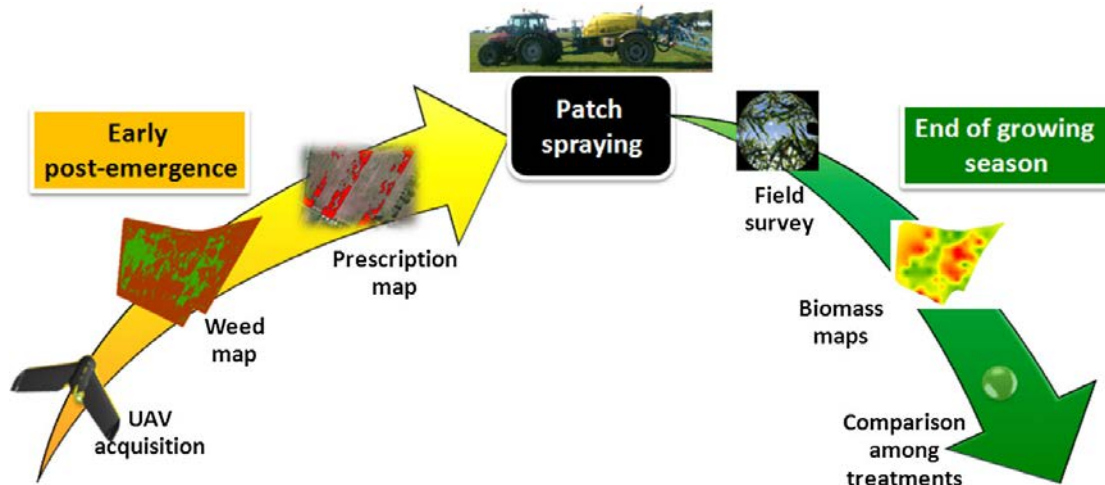
Évaluation du potentiel des images provenant de véhicules aériens sans pilote (UAV) pour soutenir la pulvérisation d'herbicides dans le maïs [10].

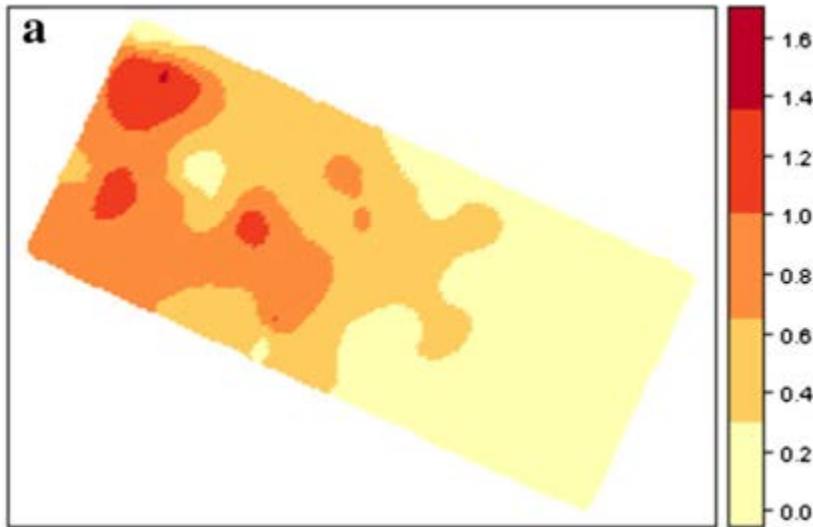
La détection des parcelles de mauvaises herbes dans le champ est la clé de l'application d'un système de pulvérisation localisée. La gestion spécifique des mauvaises herbes sur le site (SSWM) nécessite des informations précises sur la distribution spatiale des mauvaises herbes. Le repérage sur le terrain couplé à l'application de techniques géostatistiques pourrait permettre d'obtenir des cartes précises des mauvaises herbes, mais cette approche n'est pas réalisable en dehors des contextes de recherche, car elle est longue et coûteuse.

Les technologies des capteurs (spectromètres, capteurs de fluorescence et caméras numériques) et les systèmes de positionnement global différentiel (DGPS) peuvent être couplés pour obtenir des informations sur la variation des populations de mauvaises herbes dans un champ, en utilisant à la fois des instruments de proximité (capteurs sur le terrain montés sur le tracteur) et de télédétection.

L'utilisation de véhicules aériens sans pilote (UAV) avec des vols à basse altitude, fournit des images avec une très haute résolution spatiale (<50 mm), qui sont moins coûteuses et ont moins de contraintes logistiques par rapport à la collecte de données aériennes habitées.

L'objectif du présent travail est d'évaluer la faisabilité d'un SSWM basé sur des cartes de mauvaises herbes à partir d'images acquises par des drones, englobant l'ensemble du processus menant à l'application d'herbicides à taux variable, dans un contexte opérationnel. Les étapes ont consisté à acquérir des images de drones au début de la culture du maïs d'ensilage pour détecter la distribution spatiale des mauvaises herbes dans quatre champs du centre de l'Italie. Les cartes des mauvaises herbes dérivées des données des drones ont été utilisées pour évaluer deux (2014) ou trois (2015) stratégies d'application d'herbicides de post-émergence : (i) contrôle non traité, (ii) application uniforme en couverture, et (iii) pulvérisation parcellaire selon la carte de prescription.





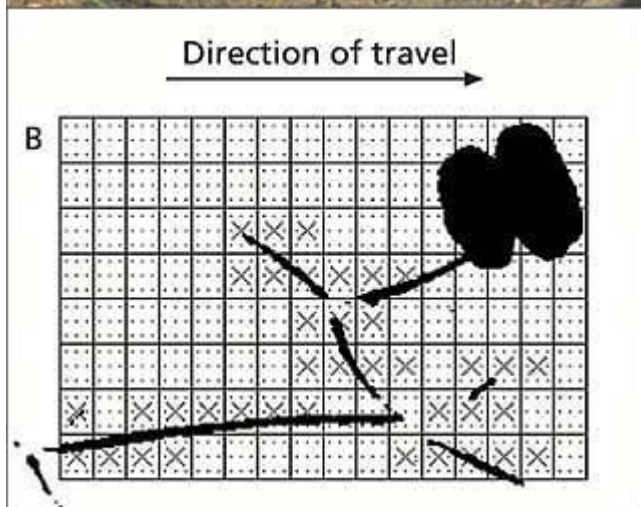
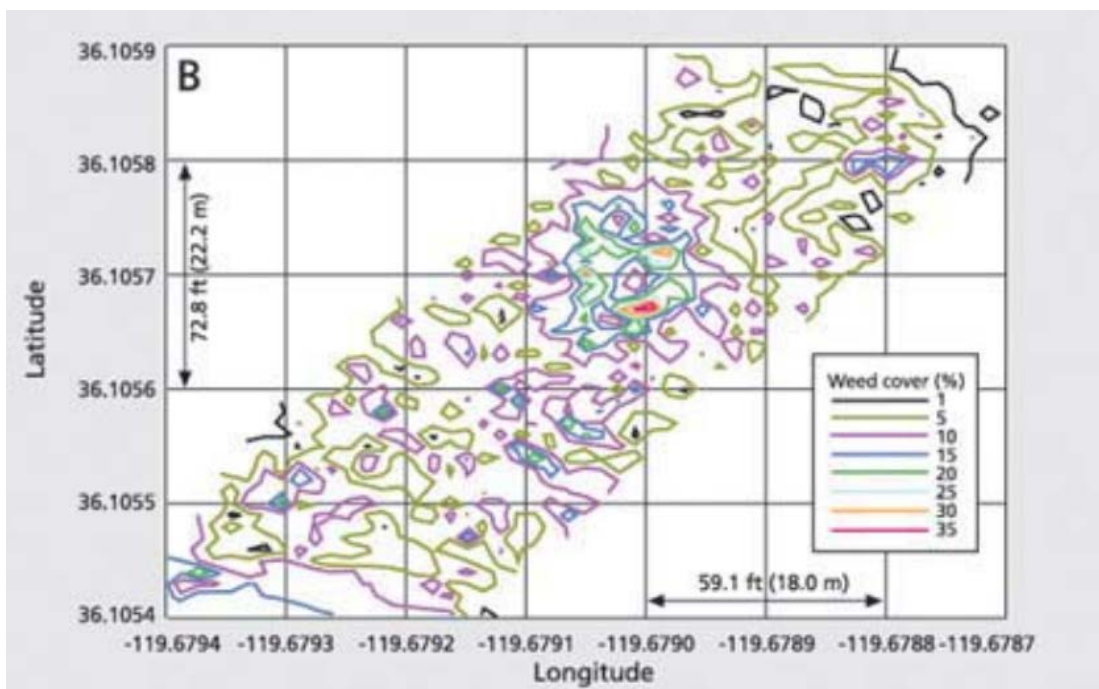
Weed biomass ( $t\ ha^{-1}$ )

Les résultats obtenus dans les expériences réalisées ont montré que les données d'image acquises à partir d'un drone pourraient être utilisées de manière opérationnelle en post-émergence précoce sur le maïs, dans des conditions similaires à celles dans lesquelles cette étude a été réalisée, et permettraient de diminuer l'utilisation d'herbicide sans conséquences négatives en termes de rendement de la culture. En même temps, ils ont permis d'augmenter la production de biomasse par rapport à la zone non traitée. L'économie d'herbicide s'est élevée entre 14 et 39,2 % pour les pulvérisations localisées par rapport à une application généralisée, permettant d'économiser de 16 à 45 €  $ha^{-1}$ . L'économie d'herbicide est fonction de la couverture des mauvaises herbes et donc du niveau d'infestation du champ.

### 2.3 Protection des plantes. Désherbage. Exemple 2

L'objectif de cette étude était d'acquérir des coordonnées GPS simultanément avec des images numériques des mauvaises herbes dans le coton en début de saison et de développer une routine automatisée pour identifier et cartographier les densités de mauvaises herbes et de cultures pour la gestion des cultures. [11]

Les données vidéo et les coordonnées ont été recueillies simultanément tout en se déplaçant le long de la ligne de semis de la culture à une vitesse moyenne de 1,57 mph. Le temps GPS était synchronisé avec le code temporel de la bande vidéo numérique en filmant le temps GPS sur l'écran du récepteur au début de chaque rangée.



Le système démontre la faisabilité technique de la cartographie automatisée des mauvaises herbes. Avec un taux de traitement de 10 images par seconde, le potentiel d'économie de main-d'œuvre par rapport aux méthodes conventionnelles de cartographie des mauvaises herbes est important. La technique pourrait être combinée à des opérations agricoles - y compris la plantation, la culture ou les applications chimiques (comme la fertilisation ou les pulvérisations d'insecticides) - ce qui réduirait encore les coûts de main-d'œuvre, de carburant et d'équipement (comme les tracteurs). Un système automatisé et peu coûteux de cartographie des mauvaises herbes permettrait aux cultivateurs de suivre les mauvaises herbes tout au long de la saison afin de fournir un retour d'information sur l'efficacité des programmes de gestion des mauvaises herbes et dans l'analyse des cartes de rendement GPS.

### 3 Mesure du rendement

(Diapositive 16-19 du document LectureGIS.pptx) [12]

De nombreux producteurs ont investi dans des systèmes de surveillance du rendement qui font partie de l'équipement standard des moissonneuses-batteuses depuis un certain nombre d'années. Les données de ces systèmes peuvent fournir des renseignements précieux sur les zones du champ où le rendement est nettement inférieur. Ces informations, en particulier les données recueillies sur plusieurs années dans des conditions météorologiques différentes, peuvent être utilisées pour traiter les zones à problèmes et améliorer les rendements. Les données des moniteurs de rendement sont de plus en plus utilisées dans l'agriculture de précision pour développer la précision de la fertilisation, de la pulvérisation et de la plantation à taux variable.

Importance de la gestion des quantités d'eau

La productivité des cultures dépend fortement de l'humidité du sol, qui est souvent le facteur de rendement le plus limitatif de la production. Les cultures sont produites sur des champs composés de nombreux types de sols différents. Les cartes de rendement peuvent nous donner un aperçu des avantages potentiels d'un investissement dans un meilleur drainage pour les sols lourds, ou peut-être dans l'irrigation pour les sols plus légers. De bonnes données doivent être collectées sur un certain nombre d'années, car les rendements des champs dont les sols sont variables varieront considérablement selon qu'il s'agit d'années humides ou sèches.

Pour les cultures irriguées, des données précises peuvent être utilisées pour évaluer les changements de rendement dus à des taux d'irrigation variables dans le champ. La comparaison des rendements dans les coins secs peut être utilisée pour évaluer les avantages de l'irrigation pour cette année-là.

Les tests d'uniformité montrent souvent des différences significatives dans les taux d'application sur un pivot, et avec des données de rendement précises, l'impact des différents taux sur la saison peut être déterminé. Les données précises du moniteur de rendement peuvent également être utilisées pour montrer l'impact des taux variables d'azote (N) avec l'irrigation.

### Importance dans la production agricole

Les données précises des moniteurs de rendement sont particulièrement importantes pour aider à comprendre quels facteurs ont un impact sur les rendements du maïs. Des cartes de rendement précises permettent également d'identifier les zones des champs où il est possible de gérer les intrants tels que l'azote ou les taux de semis afin d'atteindre les meilleurs rendements potentiels sur différents types de sol.

L'un des intrants les plus importants dans la production de maïs est l'azote. Étant donné que la disponibilité de l'azote dépend fortement des pertes environnementales (lixiviation, dénitrification et volatilisation) et de la minéralisation de la matière organique, la corrélation des rendements avec le type de sol en fonction des précipitations d'une saison peut nous aider à mieux gérer le moment et le type d'applications pour maximiser les rendements lors de la gestion des intrants. Sur les sols plus légers, la disponibilité du soufre joue un rôle de plus en plus important dans le maintien de la productivité du maïs, et la réponse économique au soufre des engrais sera très probablement fortement liée à la texture du sol et aux niveaux de matière organique à un endroit donné du champ.

En clair, une bonne gestion des ravageurs est appelée à devenir beaucoup plus complexe au cours des prochaines années. Il faudra probablement de multiples applications d'herbicides et d'insecticides, ainsi qu'un dépistage plus poussé, pour assurer le même niveau de protection des cultures auquel nous sommes habitués. Une cartographie précise du rendement permet aux producteurs d'évaluer différents hybrides, traits et stratégies de lutte contre les ravageurs sur leur exploitation de manière relativement indolore en plantant ou en pulvérisant des bandes dans un champ. Cet effort supplémentaire peut s'avérer très rentable si vous trouvez des moyens de gérer les parasites de manière plus rentable ou de sélectionner des variétés à haut rendement pour votre exploitation.

## 3.1 Générer des cartographies de rendement

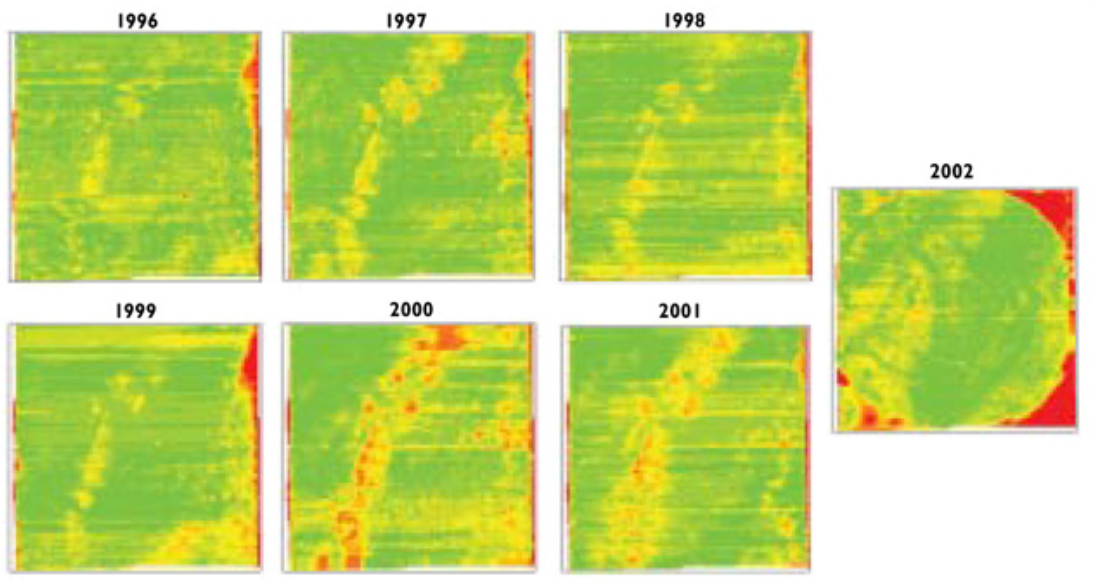
Le rendement calculé à chaque emplacement du champ peut être affiché sur une carte à l'aide d'un logiciel de système d'information géographique (SIG). Cependant, le fichier journal brut contient des points enregistrés pendant les virages et les mesures des capteurs ne correspondent pas aux emplacements exacts de la récolte, car le passage du grain dans une

moissonneuse-batteuse est un processus retardé (à moins qu'une correction en temps réel ne soit appliquée). Pour éliminer ces erreurs évidentes, les données brutes sont décalées pour compenser le retard de la moissonneuse-batteuse, et les points correspondant à la position de la tête haute sont supprimés. Les réglages du délai d'écoulement du grain sont spécifiques à la moissonneuse-batteuse et parfois même à la culture, mais les valeurs typiques pour les cultures céréalières varient entre 10 et 12 secondes[13].

[13]  
En général, quelques points au début et à la fin d'un passage doivent également être supprimés. On les appelle les retards de début et de fin de passage. Les retards de début de passage se produisent lorsque la moissonneuse-batteuse commence à récolter la récolte, mais que le flux de grain n'est pas stabilisé parce que l'élévateur se remplit progressivement. De même, les retards de fin de passage se produisent lorsque la moissonneuse-batteuse sort de la récolte et que le débit de grain diminue progressivement jusqu'à zéro lorsque l'élévateur est complètement vidé. Consultez le fabricant de votre moniteur de rendement pour connaître les paramètres les plus appropriés à utiliser avec votre moissonneuse-batteuse.

Le décalage des données brutes pour corriger le retard du flux de grain ainsi que la suppression des points qui représentent l'état de la tête de coupe et les retards de début et de fin de passage est la principale procédure de filtrage des données intégrée au logiciel fourni avec les systèmes de cartographie de rendement.

L'évaluation de la variation temporelle (d'une année à l'autre) de la distribution du rendement dans le champ est une étape essentielle pour définir les zones de champ avec des rendements potentiellement élevés et faibles. Plusieurs approches peuvent être utilisées pour évaluer les effets temporels sur le rendement. L'une d'elles consiste à calculer le rendement relatif (normalisé) pour chaque point ou cellule de la grille. Le rendement normalisé peut être défini comme le rapport entre le rendement réel et la moyenne du champ : Lorsque les conditions de culture d'un champ varient considérablement, comme les zones irriguées et les zones sèches ou les différentes cultures ou variétés cultivées dans différentes zones, la normalisation doit être effectuée séparément pour ces zones, les rendements relatifs résultants étant recombinaés dans un seul fichier de données pour l'ensemble du champ. La figure suivante montre l'historique des rendements relatifs d'un champ de maïs (soja dans la moitié sud en 2000) cultivé en utilisant l'irrigation par sillon (jusqu'en 2001) et l'irrigation par pivot central (en 2002).



Cartes du rendement relatif du maïs et du soja cultivés pendant une période de sept ans (le rouge indique les zones à faible rendement et le vert les rendements supérieurs à la moyenne).

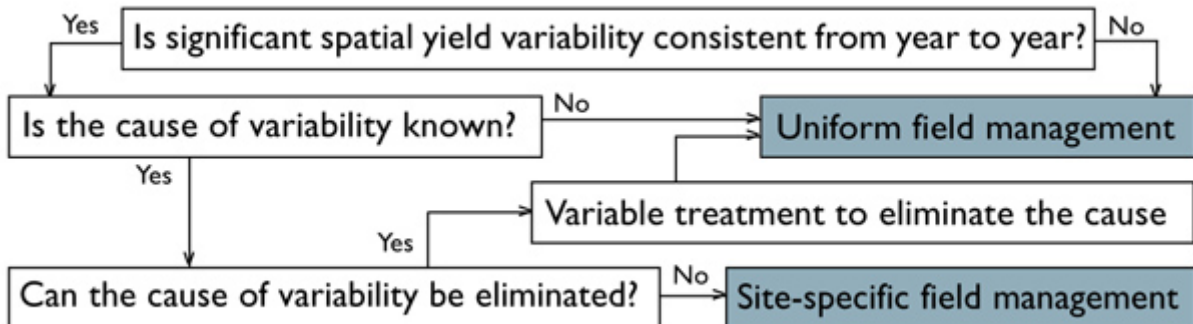
### 3.2 Applications potentielles

Les cartes de rendement représentent les résultats de la production agricole. D'une part, ces informations peuvent être utilisées pour étudier l'existence de facteurs limitant le rendement, variables dans l'espace. D'autre part, l'historique des rendements peut être utilisé pour définir des objectifs de rendement variables dans l'espace qui peuvent permettre de faire varier les intrants en fonction de la productivité attendue du champ.

L'organigramme suivant illustre le processus que l'on pourrait suivre pour décider d'investir dans une gestion des cultures spécifique au site, sur la base de l'analyse des cartes de rendement. Si la variabilité du rendement d'un champ à l'autre ne peut pas être expliquée par une propriété du champ non uniforme dans l'espace, une gestion uniforme peut être appropriée. La gestion spécifique au site devient une stratégie prometteuse si les schémas de rendement sont cohérents d'une année sur l'autre et peuvent être corrélés à



une ou plusieurs propriétés du champ (par exemple, l'apport de nutriments, la topographie, la gestion antérieure, etc.)



Si les causes de la variation du rendement sont connues et peuvent être éliminées de façon permanente, toute la zone pourrait être amenée à des conditions de croissance similaires et gérée uniformément par la suite. Ce concept est l'une des premières philosophies de l'agriculture de précision, mais il n'est probablement réalisable que pour certaines propriétés du champ. Par exemple, le chaulage à taux variable peut être utilisé pour corriger les zones acides d'un champ. Dans ce cas, la carte de rendement est utilisée uniquement pour déterminer si le faible pH du sol est un facteur limitant le rendement, et la carte des sols est utilisée pour prescrire des taux d'application variables. Un autre exemple serait un travail profond du sol localisé pour atténuer la compaction dans certaines zones du champ. La plupart des facteurs limitant le rendement ne peuvent être modifiés de façon permanente par des mesures uniques en raison de contraintes économiques ou pratiques. Par conséquent, une gestion des cultures spécifique au site peut être utilisée pour prendre en compte de manière appropriée la variabilité spatiale existante dans le rendement réalisable et/ou les propriétés du sol.

### 3.3 Suivi du rendement. Cartographie des rendements de vendange

Indépendamment de la technique utilisée pour acquérir l'imagerie, le post-traitement est toujours généralement basé sur le calcul de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI). Basé sur la réflectance de la lumière solaire dans les longueurs d'onde rouge (R) et proche infrarouge (NIR)

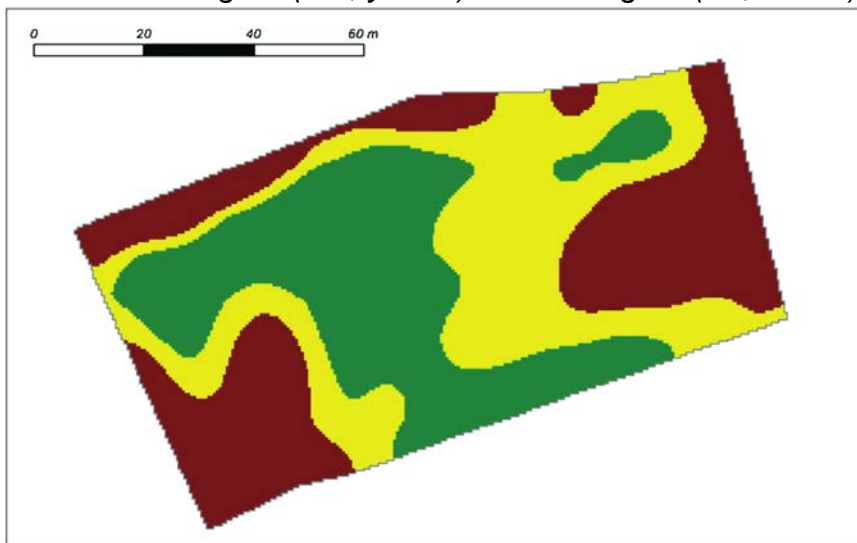
selon l'équation  $(NIR-R)/(NIR + R)$ , le NDVI permet de cartographier le vignoble en fonction d'un nombre variable de classes de vigueur (2, 3, 5 ou 10) au sein desquelles les performances de la vigne sont supposées être similaires. Il représente donc un bon indicateur de la biomasse

photosynthétiquement active qui est liée à la taille de la canopée (vigueur) et à l'état de santé et de stress de la vigne.

Gatti, M. et al. (2017) [14] a pour objectif d'élucider la variabilité intra-champ dans un vignoble situé dans le nord-ouest de l'Italie par le biais d'une approche NDVI standard, de fournir une vérification agronomique au sol sur une base de deux ans (2012-2013) des niveaux de vigueur dérivés du NDVI et de définir la meilleure stratégie pour une efficacité optimale du vignoble. rendement optimal du vignoble.

L'essai a été réalisé en 2012 et 2013 dans un vignoble commercial non irrigué de *Vitis vinifera* L. cv. Barbera - un matériel standard greffé sur Kober 5BB - établi en 2004 à Ziano Piacentino, district viticole de Colli Piacentini, domaine Malvicini Paolo (44°59'0" N, 9°22'0" E, 262 m d'altitude), Italie.

*Map of NDVI showing the high-vigour (HV, green), medium-vigour (MV, yellow) and low-vigour (LV, brown)*



Des images satellite d'une résolution de 5 m prises à pleine canopée ont permis de détecter la variabilité de la vigueur de la vigne grâce à l'évaluation du NDVI dans un petit vignoble de Barbera. Les vérifications au sol effectuées sur les classes LV, MV et HV ainsi identifiées ont montré une corrélation étroite entre le NDVI et les paramètres de végétation, de rendement et de composition du raisin. Les vignes LV ont obtenu des résultats exceptionnels en termes de rendement rémunérateur (3,2 kg/vigne correspondant à 13,3 t/ha) et de maturation complète tout en maintenant un niveau d'acidité considérable. Les parcelles MV et HV ont toutes deux présenté une vigueur et un encépagement excessifs ainsi qu'un retard de maturation. Les informations dérivées de la cartographie de la vigueur basée sur le NDVI et d'une

vérification au sol appropriée ouvrent la voie à deux options de décision pour la gestion durable des cultures : (i) l'exploitation de la variabilité naturelle par une récolte sélective manuelle ou mécanique afin de diversifier les produits phénologiques finaux, ou simplement le report de la cueillette des MV et HV jusqu'à ce que leur retard de maturation soit compensé, et (ii) la correction de la variabilité naturelle par une approche à taux variable de la fertilisation minérale et/ou organique afin de convertir les classes de vigueur supérieure en LV.

## 4 Taux d'application variable

(Diapositives 21-26 du document LectureGIS.pptx) [14]

Il faut répondre à un certain nombre de questions avant d'établir un programme de gestion des cultures propre à un site (GSCS). Bon nombre de ces questions sont d'ordre économique, certaines sont d'ordre agronomique et environnemental, et d'autres sont liées à la technologie. Cette publication a pour but de discuter des dispositifs à taux variable qui sont disponibles, tout en permettant de comprendre quelles technologies pourraient le mieux convenir à un système de culture et à une stratégie de gestion de la production.

La plupart des agriculteurs ont pratiqué une forme d'application à débit variable (VRA) avec un pulvérisateur conventionnel. Un pulvérisateur conventionnel applique un produit chimique mélangé en cuve avec un support (généralement de l'eau) à l'aide de buses de pulvérisation et d'une vanne de régulation de la pression afin de fournir une application volumétrique souhaitée du mélange de pulvérisation à une certaine vitesse du véhicule. Toute modification de la pression de la rampe ou de la vitesse du véhicule par rapport à celle de l'étalonnage entraîne un taux d'application différent du taux prévu. Les applicateurs ont parfois utilisé ce phénomène à leur avantage. Par exemple, lorsqu'il observe une zone de forte infestation de mauvaises herbes, l'applicateur peut augmenter manuellement la pression ou réduire la vitesse pour appliquer un taux plus élevé (mais quelque peu inconnu) d'herbicide.

### **Méthodes d'application à taux variable**

Une question importante liée à la technologie est la suivante : quelles sont les méthodes d'application à taux variable d'engrais, de chaux, de désherbage et de semences disponibles ? Il existe une variété de technologies d'application à débit variable qui peuvent être utilisées avec ou sans système GPS. Les deux technologies de base de la VRA sont : la cartographie et les capteurs.

La technologie VRA basée sur la carte ajuste le taux d'application en fonction d'une carte électronique, également appelée carte de prescription. En utilisant la position du champ à partir d'un récepteur GPS et une carte de prescription

du taux désiré, la concentration de l'intrant est modifiée à mesure que l'applicateur se déplace dans le champ.

La VRA basée sur des capteurs ne nécessite ni carte ni système de positionnement. Des capteurs installés sur l'applicateur mesurent les propriétés du sol ou les caractéristiques de la culture "en cours de route". Sur la base de ce flux continu d'informations, un système de contrôle calcule les besoins en intrants du sol ou des plantes et transfère les informations à un contrôleur, qui fournit les intrants à l'endroit mesuré par le capteur. Étant donné que la VRA basée sur les cartes et celle basée sur les capteurs présentent des avantages et des limites uniques, certains systèmes SSCM ont été développés pour tirer parti des avantages des deux méthodes.

### **VRA basée sur des cartes**

La méthode basée sur les cartes utilise des cartes d'éléments mesurés précédemment et peut être mise en œuvre en utilisant un certain nombre de stratégies différentes. Les producteurs de cultures et les consultants ont élaboré des stratégies pour faire varier les intrants en fonction (1) du type de sol, (2) de la couleur et de la texture du sol, (3) de la topographie (terrain élevé, terrain bas), (4) du rendement des cultures, (5) des données de repérage sur le terrain, (6) des images télédéteectées et (7) de nombreuses autres sources d'information qui peuvent être spécifiques à la culture et au lieu.

de nombreuses autres sources d'information qui peuvent être spécifiques à la culture et au lieu.

Certaines stratégies sont basées sur une seule source d'information tandis que d'autres impliquent une combinaison de sources. Quelle que soit la stratégie retenue, c'est l'utilisateur qui, en définitive, contrôle le taux d'application. Ces systèmes doivent être capables de déterminer l'emplacement de la machine dans le champ et de faire le lien entre cette position et le taux d'application souhaité en " lisant " la carte de prescription.

### **VRA basée sur des capteurs**

La méthode basée sur les capteurs permet de faire varier le taux d'application des intrants sans cartographie préalable ni collecte de données. Des capteurs en temps réel mesurent les propriétés souhaitées - généralement les propriétés du sol ou les caractéristiques de la culture - en cours de route. Les mesures effectuées par un tel système sont ensuite traitées et utilisées immédiatement pour contrôler un applicateur à taux variable.

La méthode des capteurs ne nécessite pas nécessairement l'utilisation d'un système de positionnement, ni une analyse approfondie des données avant de procéder à des applications à débit variable. Cependant, si les données du capteur sont enregistrées et géoréférencées, l'information peut être utilisée dans de futurs exercices de gestion des cultures spécifiques au site pour

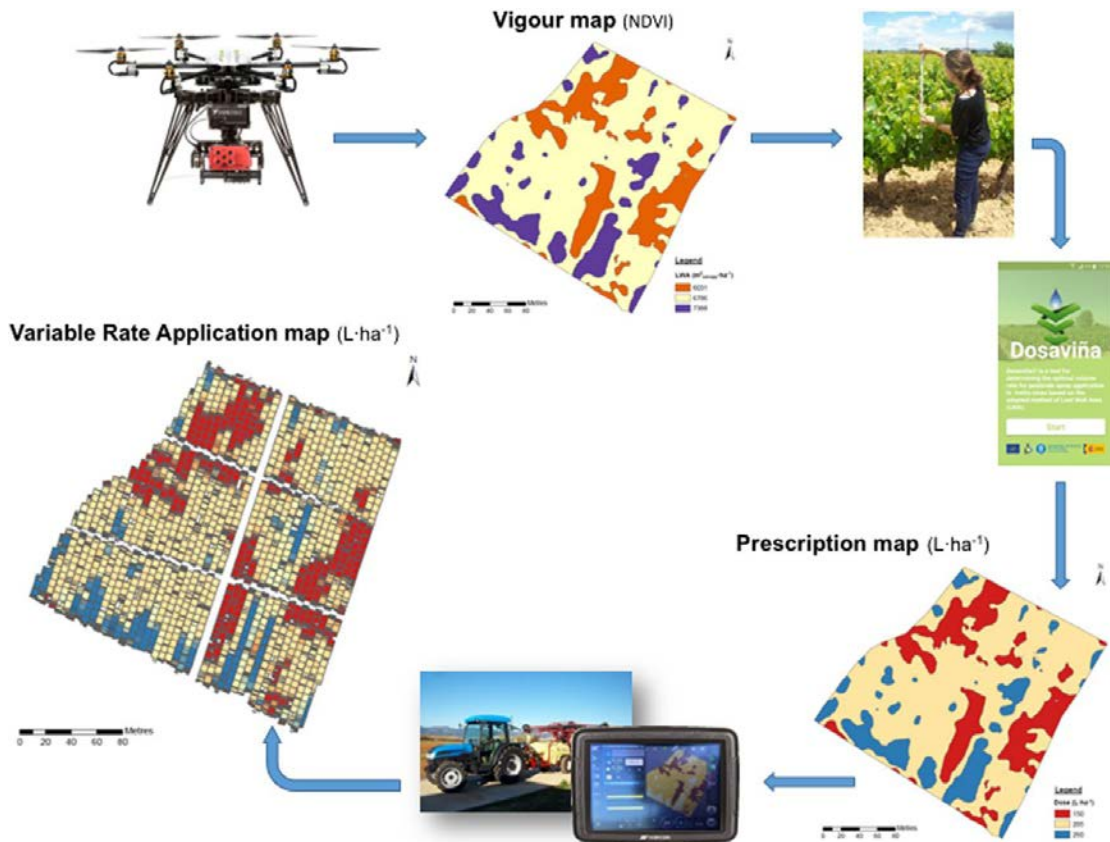
créer une carte de prescription pour d'autres opérations et des opérations futures, ainsi que pour fournir un dossier d'application " tel qu'appliqué " pour le producteur.

#### 4.1 Exemples de VRA

Javier Campos et al. (2019) [16] trouvent une bonne corrélation entre les données obtenues par les technologies de télédétection et les caractéristiques de la canopée. L'hypothèse est que le NDVI est un bon indicateur de la vigueur de la canopée et que, par conséquent, le volume d'application peut varier en fonction des zones NDVI pour maintenir une couverture d'application à peu près constante. Les implications pratiques de cette corrélation seront présentées sous la forme d'un nouveau dispositif d'application de pulvérisation intelligent basé sur le principe de l'application à débit variable (VRA) adapté aux plantations de vignes. La nouvelle technologie développée sera capable de suivre une carte de prescription géoréférencée obtenue en combinant la caractérisation spatiale de la canopée avec l'application de la méthode modifiée de LWA (Leaf Wall Area) générée par un nouveau système d'aide à la décision (DSS) Dosaviña. Les étapes spécifiques de cette recherche étaient les suivantes

- Obtenir une carte de la canopée identifiant les zones présentant de nettes différences de vigueur.
- Établir une carte de prescription (quantité de liquide et de pesticide) à appliquer en fonction des caractéristiques de la canopée définies précédemment.
- Développer un pulvérisateur conventionnel modifié pour vergers, adapté à la gestion automatique du site pendant l'application de la pulvérisation.

- Évaluer la précision de la méthode proposée



Tout d'abord, l'orthophotocarte créée à partir de l'imagerie haute résolution acquise avec le drone, a donné une résolution spatiale de 6,33 cm pixel<sup>-1</sup> et était composée des mêmes cinq bandes offertes par la caméra (R, G, B, RE et NIR). L'orthophotocarte a été calibrée radiométriquement à l'aide de quatre étalons en niveaux de gris placés sur le terrain au moment de la lumière et visibles sur l'image. Les courbes de calibration ont été construites avec des standards de réflectance en échelle de gris de 22, 32, 44 et 51% pour chacun des canaux spectraux de la caméra multispectrale. Les équations extraites du processus d'étalonnage ont été utilisées pour convertir les nombres numériques de 12 bits en échelle de gris en valeurs de réflectance. Les nouvelles images de réflectance ont ensuite été combinées pour calculer l'indice différentiel de végétation normalisé (NDVI). Les résultats montrent clairement l'effet positif du processus d'application à taux variable. La quantité totale de liquide appliquée sur la parcelle de 5 ha a été réduite de 44,3 % et 47,3 % en utilisant le pulvérisateur de gestion spécifique au site développé, sans et avec les capteurs US, respectivement. Le gain de temps correspondant était d'environ 45 minutes dans les deux cas, ce qui équivaut à environ 9 minutes par hectare. Enfin, les économies potentielles de matière active étaient de 3,1 kg et 2,9 kg, avec et sans capteurs à ultrasons, respectivement. Les résultats obtenus peuvent être

directement liés aux objectifs établis dans la Directive européenne pour l'utilisation durable des pesticides (EU 2009)

## 5 Conclusion et challenges futurs

(Diapositive 27 du document LectureGIS.pptx) [17]

Les SIG n'ont pas encore été adoptés en masse dans les sciences agricoles, mais ils présentent un potentiel énorme dans des domaines tels que la planification agricole, des implications intéressantes pour l'avenir de la gestion de notre production agricole et l'augmentation des rendements en accord avec d'autres technologies. Les agronomes cherchent en permanence des moyens de produire au mieux nos cultures, de gérer les sols tout en respectant l'environnement et de les protéger des maladies et des parasites. Il y a un défi permanent à relever pour faire face aux changements climatiques et aux besoins d'aujourd'hui. Les SIG peuvent jouer un rôle essentiel pour relever ces défis.

L'utilisation des SIG est assez limitée à l'heure actuelle dans les sciences agricoles, mais il existe de nombreuses utilisations reconnues, même lorsque l'outil n'est pas réellement utilisé dans la pratique. Il existe de nombreux avantages stratégiques pour les futures pratiques et politiques agricoles potentielles et l'industrie commence à peine à les remarquer. Éviter les sécheresses, les inondations et les insectes par une planification stratégique peut améliorer à la fois le rendement et la qualité d'une culture (2) et changer de culture en fonction de l'évolution du sol peut maintenir un rendement maximal et protéger l'environnement.

Pendant la majeure partie de l'histoire de l'humanité, la planification agricole a été en grande partie un système de conjectures. Même lorsqu'un grand nombre de données ont été acquises pour un terrain particulier, il existe des facteurs variables que nous ne pouvons pas prendre en compte et nous choisissons la meilleure solution. Le SIG peut éliminer les approximations dans la gestion de la planification des cultures grâce à la collecte efficace de données sur les sols et à la saisonnalité de la topographie en fonction de l'évolution des conditions. Il permet une agriculture de précision, permettant par exemple aux vignobles de maximiser le rendement et la qualité (3).

La qualité du sol n'est jamais omniprésente, même dans un seul champ. Si le champ est en pente, le drainage et l'accès à l'eau peuvent changer radicalement sur quelques mètres seulement (à cause du drainage). D'autres facteurs qui peuvent affecter la qualité sont la quantité de soleil, d'ombre ou de pluie que reçoit une certaine zone, la proximité d'un côté d'une route (et donc le niveau de pollution potentiel, la poussière ou les fragments de matériaux artificiels comme le caoutchouc et le métal) peuvent tous affecter la qualité d'une culture (4).

La cartographie est utilisée pour trouver des caractéristiques archéologiques dans nos terres agricoles et cela a été pendant de nombreuses années un outil efficace dans l'industrie du patrimoine (5). Cependant, les mêmes types de données seront utiles à la science agricole car les caractéristiques sous-jacentes peuvent affecter la qualité et la hauteur relative de la récolte produite. Il en va de même pour la roche-mère sous-jacente.

L'identification de nouvelles zones à cultiver, soit pour rendre les rendements existants plus efficaces, soit simplement pour continuer à fournir des rendements croissants à notre population mondiale croissante, est actuellement et restera le plus grand défi de la science agricole. Les SIG sont actuellement utilisés dans le cadre d'un projet de crowd sourcing pour gérer la sécurité alimentaire et réorganiser les cultures dans le tiers monde (6) afin de garantir une utilisation maximale des sols fragiles de certaines régions.

Les SIG sont essentiels pour cartographier les zones, notamment les sources de nourriture, qui sont vulnérables aux catastrophes naturelles telles que la sécheresse et les inondations. Le Programme alimentaire mondial, la division des Nations unies chargée de la sécurité alimentaire, est l'un des plus grands utilisateurs de données SIG à cette fin (7). Ils participent à la protection des approvisionnements alimentaires en construisant efficacement des projets de génie civil simples tels que des barrages, des levées et des systèmes d'irrigation pour protéger les approvisionnements alimentaires.

## 6 Références

- [1] Stoorvogel, J., Kooistra, L., & Bouma, J. (2015). Managing Soil Variability at Different Spatial Scales as a Basis for Precision Agriculture. (November), 37–72. <https://doi.org/10.1201/b18759-3>
- [2] <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/geo/?cid=stelprdb1254424>
- [3] Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective 2007. Edited by P. Lagacherie, A. B. McBratney & M. Voltz, 2007 Elsevier 600 pages ISBN 0-444-52958-6
- [4] Based on excerpts from the Digital Soil Mapping chapter in the Soil Survey Manual (in press, 2017) and “Options for Communicating Soil Knowledge” (NCSS Newsletter Issue 78, Feb 2017)
- [5] McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. In Geoderma (Vol. 117). [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- [6] Carré, F., McBratney, A. B., Mayr, T., & Montanarella, L. (2007). Digital soil assessments: Beyond DSM. Geoderma, 142(1–2), 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.08.015>



- [7] J.A. Martínez-Casasnovas, E. Daniele, A. Uribeetxebarria, A. Escolà, J.R. Rosell-Polo, L. Sartori, J. Arnó. (2017). Combined use of remote sensing and soil sensors to detect variability in orchards with previous changes in land use and landforms: consequences for management. <https://doi.org/10.1177/0309133309346882>
- [8] [https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/sustainable\\_use\\_pesticides/ipm\\_en](https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/sustainable_use_pesticides/ipm_en)
- [9] [Reasons for surveying](#)(PDF) , Teresa McMaugh, Australian government
- [10] Castaldi, F., Pelosi, F., Pascucci, S. et al. Assessing the potential of images from unmanned aerial vehicles (UAV) to support herbicide patch spraying in maize. Precision Agric 18, 76–94 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9468-3>
- [11] Downey D, Giles D, Slaughter D. 2004. Weeds accurately mapped using DGPS and ground-based vision identification. Calif Agr 58(4):218-221. <https://doi.org/10.3733/ca.v058n04p218>.
- [12] <https://www.no-tillfarmer.com/articles/6103-the-importance-of-collecting-accurate-yield-monitoring-data>
- [13] <https://cropwatch.unl.edu/ssm/mapping>
- [14] Gatti, M., Garavani, A., Vercesi, A., & Poni, S. (2017). Ground-truthing of remotely sensed within-field variability in a cv. Barbera plot for improving vineyard management. Australian Journal of Grape and Wine Research, 23(3), 399–408. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12286>
- [15] Grisso, R. B., Engineer, E., Engineering, B. S., & Tech, V. (2011). Precision Farming Tools : Variable-Rate Application. Virginia Cooperative Extension, (January), 1–16.
- [16] Campos, J., Llop, J., Gallart, M., García-Ruiz, F., Gras, A., Salcedo, R., & Gil, E. (2019). Development of canopy vigour maps using UAV for site-specific management during vineyard spraying process. Precision Agriculture, 20(6), 1136–1156. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09643-z>
- [17] <https://www.environmentalscience.org/agriculture-science-gis>