



HAL
open science

Agriculture de précision

Maud Seger

► **To cite this version:**

Maud Seger. Agriculture de précision. Master. Master 2 Hydrosystèmes et Bassins versants (Agriculture de précision), 2017. hal-02791743

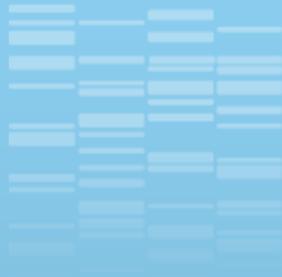
HAL Id: hal-02791743

<https://hal.inrae.fr/hal-02791743v1>

Submitted on 5 Jun 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.



Agriculture de précision

SEGER Maud

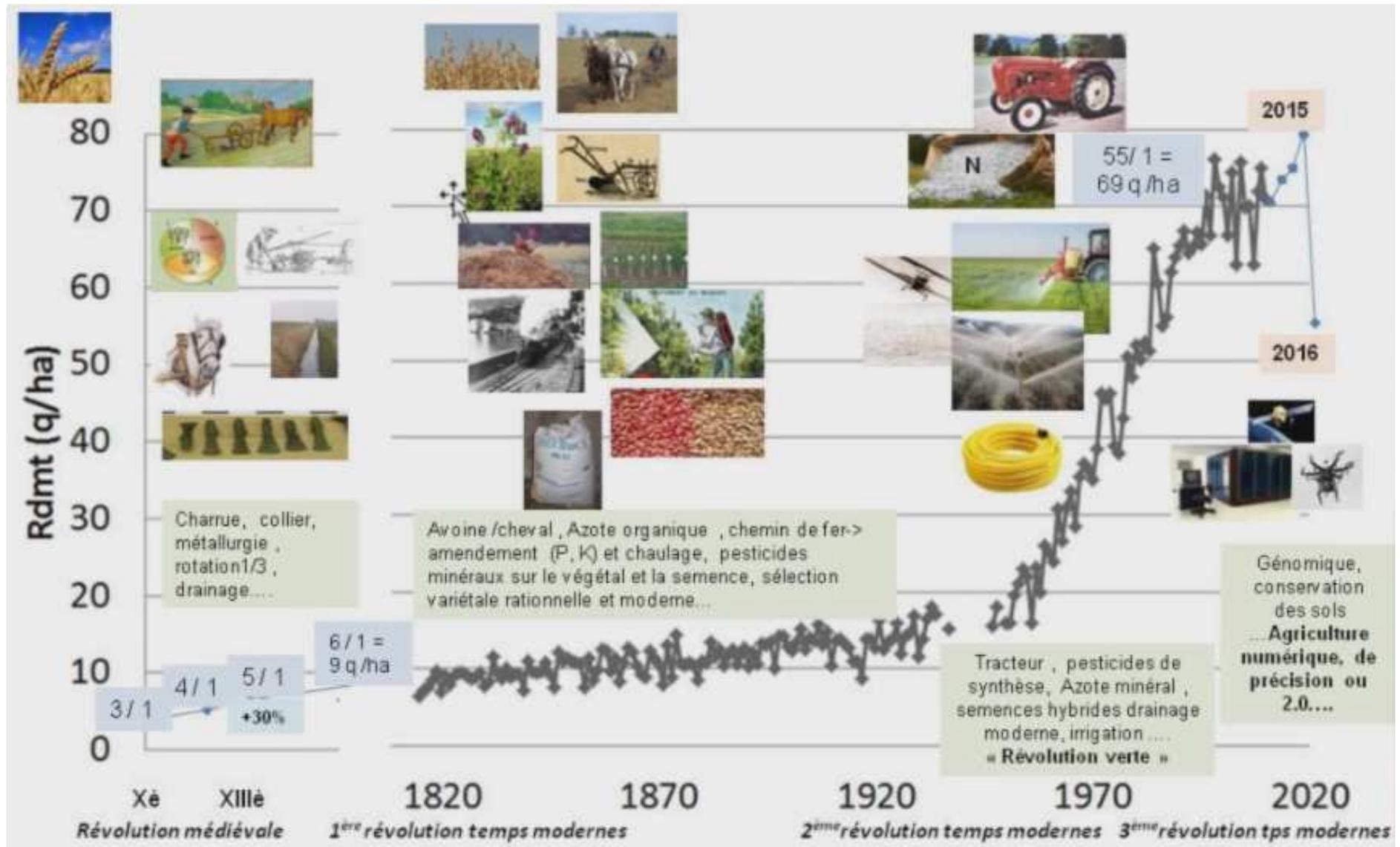
INRA Val de Loire – Site d'Orléans – Unité de Recherche de
Science du Sol



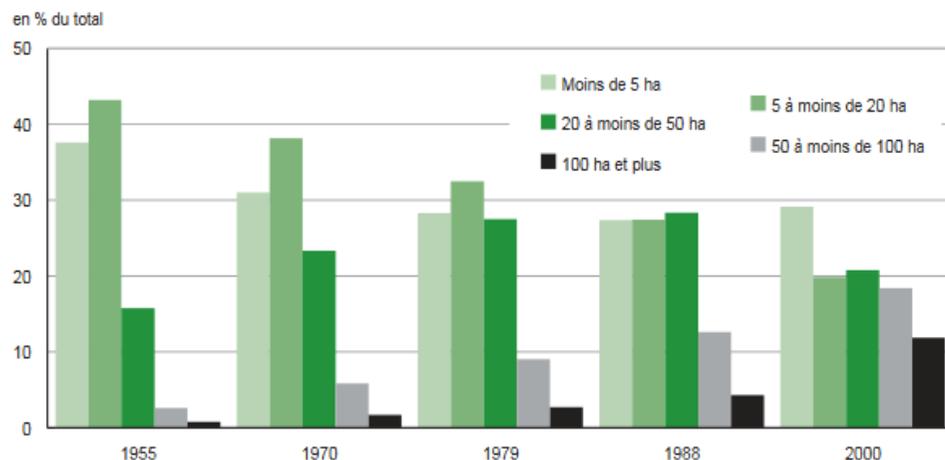
01 décembre 2017
Maud.Seger@inra.fr

M2 Hydrosystèmes et Bassins versants
UE5 Sols et Pratiques Agricoles

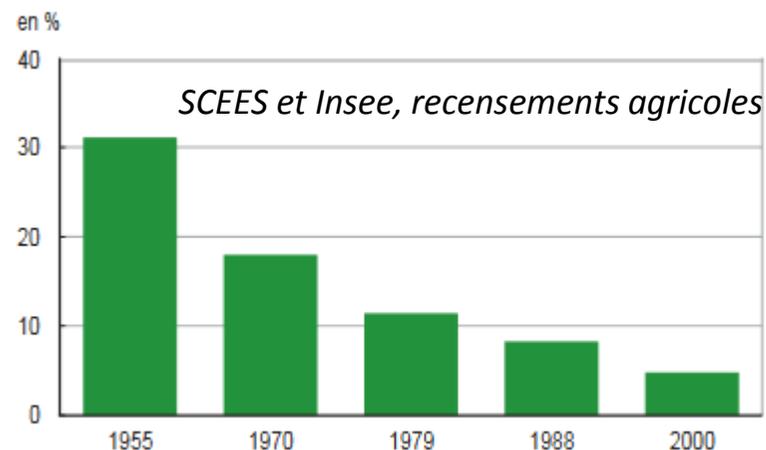
Contexte historique



Contexte historique et actuel



Evolution de la taille des exploitations



Part de l'emploi agricole dans l'emploi total

- Baisse continue de la SAU (surface agricole utile), augmentation de la surface forestière et urbanisation : besoin d'augmenter la productivité
- Diminution du nombre d'exploitation et de personnes actives
- Modification des pratiques, usage **des nouvelles technologies (internet, smartphones, navigation par satellite)**

« Challenges » de l'agriculture de demain

Enjeux démographiques, sécurité alimentaire :

- 2050 : population mondiale > 9,5 milliards d'habitants
- Besoin d'augmenter rendement agricole de 70 à 100 %

Enjeux environnementaux : Produire plus en consommant moins

Evolution du parcellaire agricole

Remembrement intensif, environ 15 milliard d'ha
Suppression des obstacles physiques

1995



Photo aérienne
Beauce (Eure-et-Loir)

1965



Evolution du parcellaire agricole



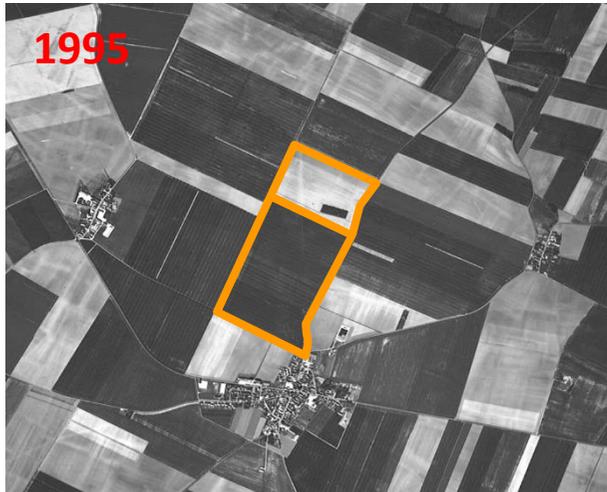
Approche agriculture : **principe d'homogénéité** des parcelles = application d'interventions culturales uniformes (travail du sol, semis, fertilisation, protection des culture, irrigation)

Justifié par :

- Taille des parcelles (petite et souvent découpées sur des critères d'homogénéité)
- Absence de moyens techniques économiquement accessibles pour qualifier la variabilité du milieu

→ **Approche qui ignore la variabilité du milieu naturel à l'échelle intra parcellaire**

Evolution du parcellaire agricole

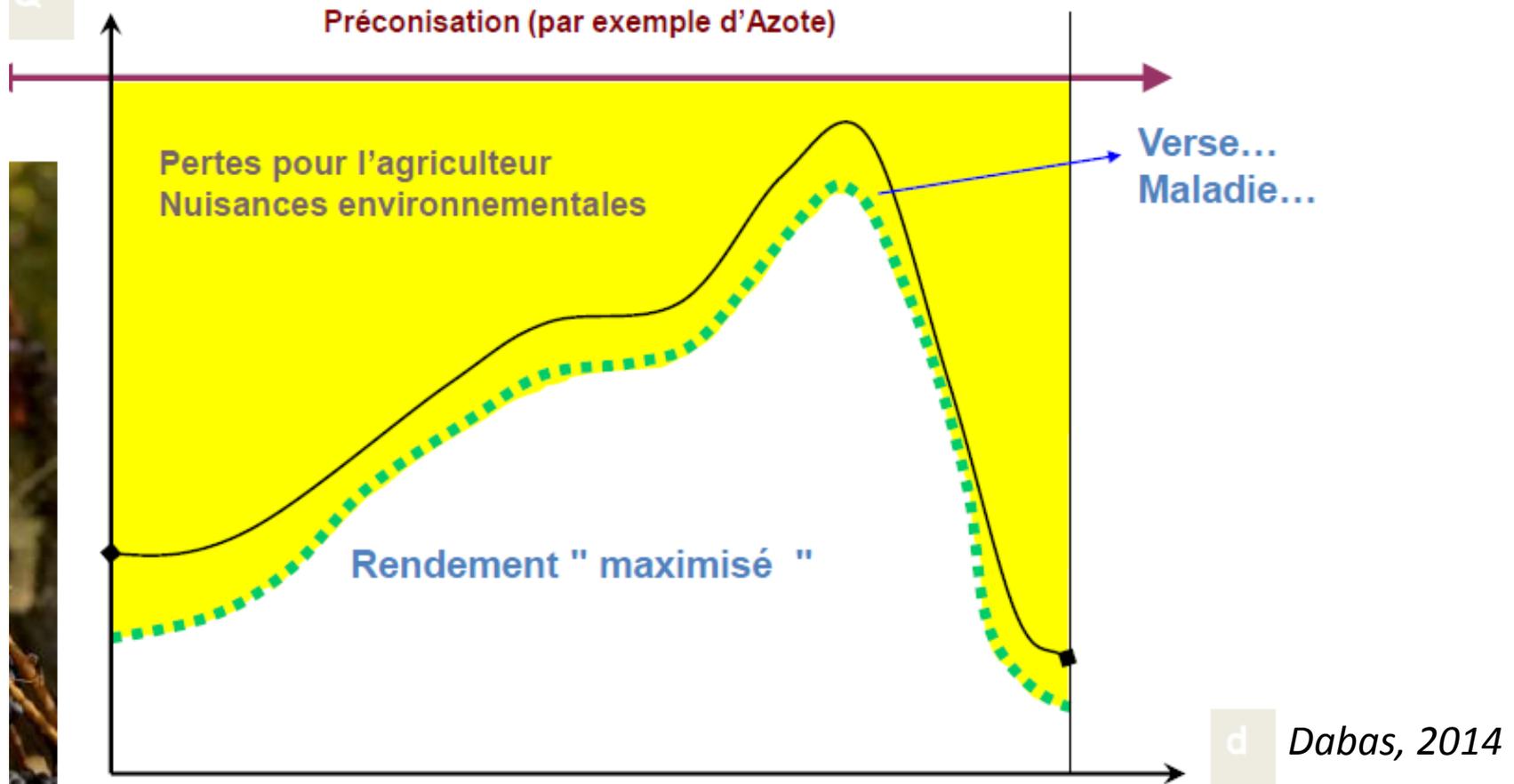


Aujourd'hui : agrandissement continue des tailles d'exploitations, réorganisation et regroupement de parcelles en unités de plusieurs dizaines d'hectares

En parallèle : progrès technologiques avec l'apparition de l'informatique, des systèmes GPS, de l'électronique embarquée

- Accès à des informations précises de la variabilité naturelle des milieux et possibilités de modulation des pratiques
- Apparition d'un concept de gestion des cultures (parmi d'autres) : l'Agriculture de Précision

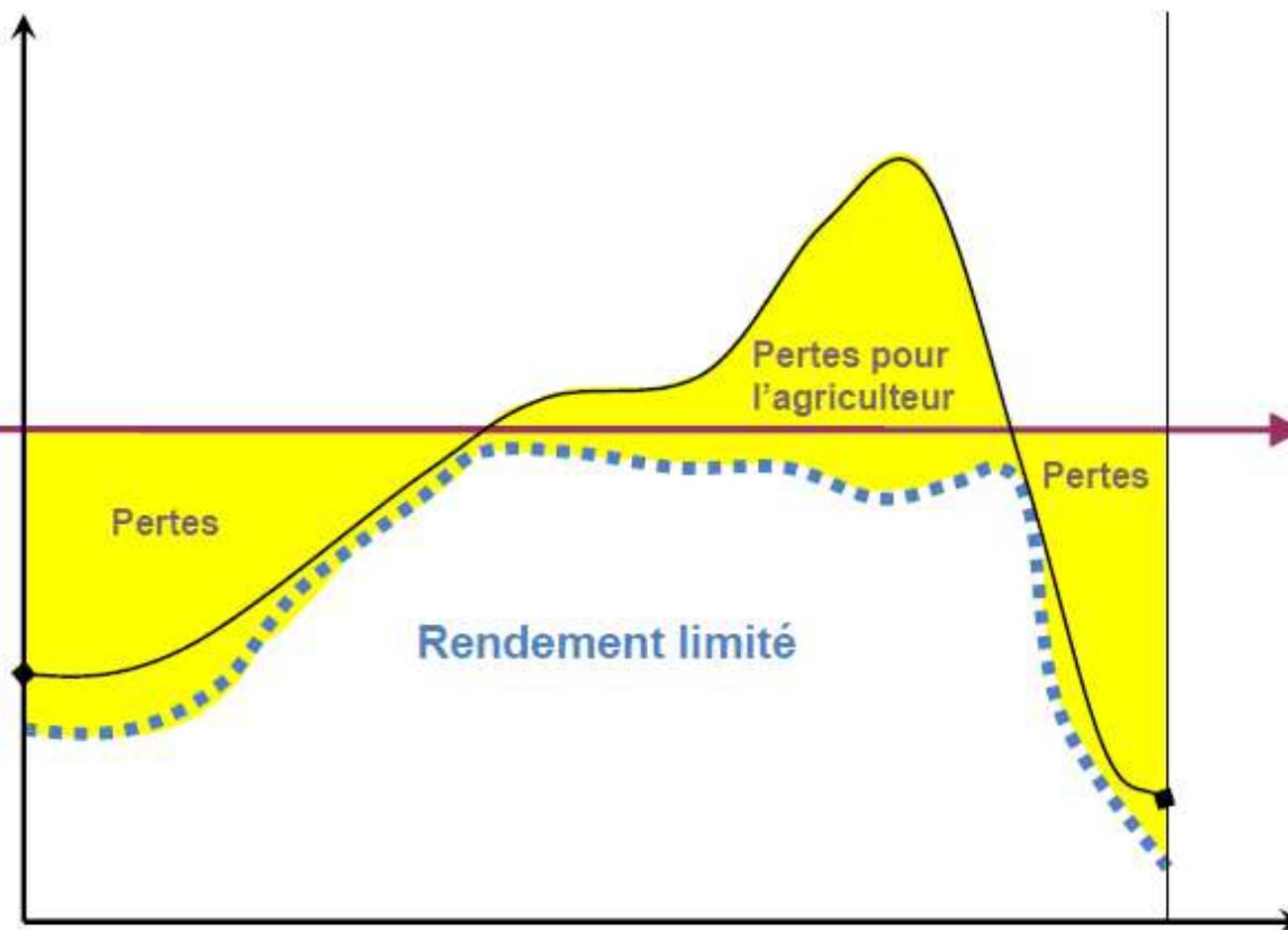
L'agriculture classique



Aucune prise en compte de la variabilité intra-parcellaire

Agriculture raisonnée- Raisonement à la parcelle

Q

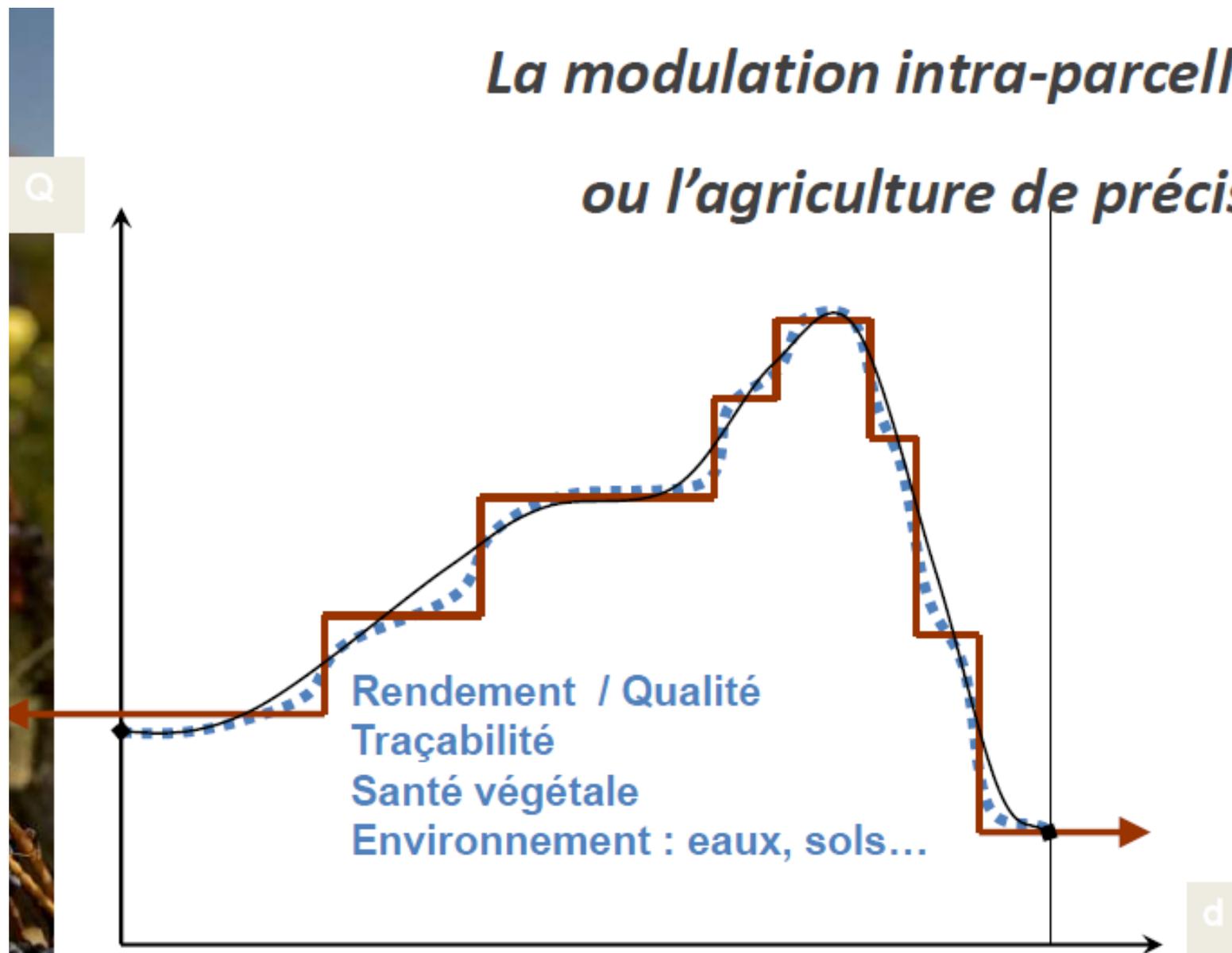


d

Prise en compte partielle de la variabilité intra-parcellaire

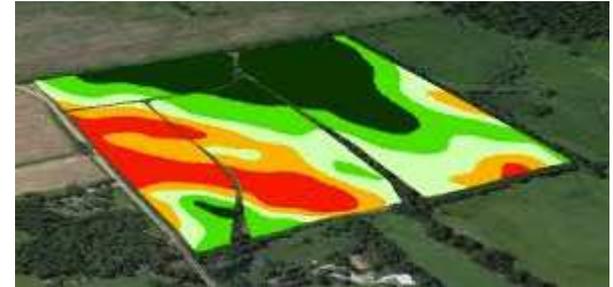


La modulation intra-parcellaire ou l'agriculture de précision



Concept et définition de l'agriculture de précision

→ L'agriculture de précision est un concept de conduite des parcelles qui repose sur le constat de l'existence d'une **variabilité intra parcellaire** : il existe au sein des parcelles des zones avec des besoins de gestion (fertilisation, irrigation) différenciés.



→ Si l'on connaît ces zones, on peut **moduler** les pratiques agricoles selon la zone où l'engin agricole se trouve.

L'objectif est d'**optimiser** la gestion des cultures (intrants, engrais, phyto, eau) et de **maximiser** les rendements agricoles.

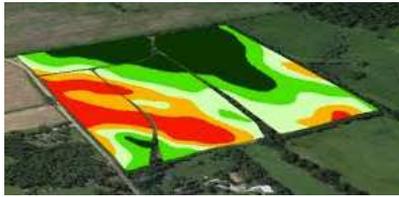
Diminution globale des intrants = Intérêts économiques et environnementaux.



« La bonne intervention, au bon endroit, au bon moment »

Historique de l'agriculture de précision

- 1983-1984 : USA, premières modulations des apports d'engrais P et K
- Début des années 90 :
 - Commercialisation des capteurs de rendement, dont la moitié connectée à un DGPS
 - Offre croissante de services par coopératives, sociétés de conseil agronomique : échantillonnages et analyses de sol, cartes de rendement, cartes de préconisations
 - 1993-1994 : Première étude sur la mesure de variabilité intraparcellaire du rendement en production céréalière par l'ITCF
 - 1997 : Année charnière en France avec présentation au SIMA de 5 systèmes de cartographie de rendement par constructeurs de moissonneuses batteuses
 - Années 2000-2010 : essor des capteurs et enregistrement de données haut débit et haute résolution (drones, capteurs au sol etc...)



« Au bon endroit »

- Connaissance fine de la variabilité spatiale du milieu sol/plante
- Besoins d'outils GPS

« La bonne intervention, au bon endroit, au bon moment »

« Au bon moment »

- Suivi dynamique de la culture
- Méthodes de prévisions



« La bonne intervention »

- Calcul des bonnes doses
- Agroéquipements permettant la modulation



Plan

1. Agriculture de précision : historique, définition, concept

2. Les système de positionnement géographique

« Au bon endroit »

3. Connaissance des sols

4. Analyse des besoins de la plante

« Au bon moment »

5. Modulation des apports, technologies

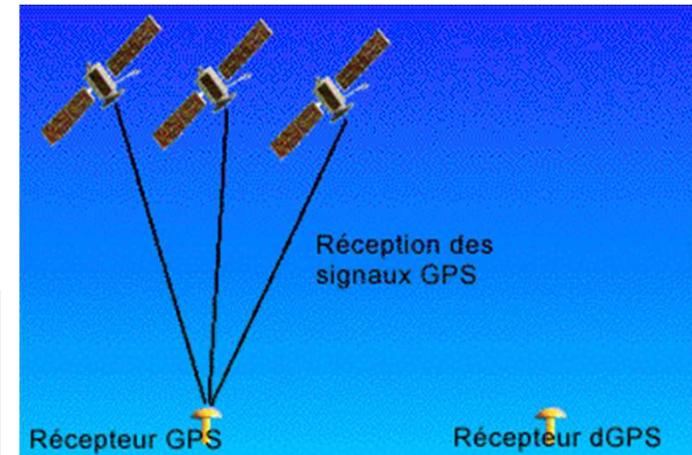
« La bonne intervention »

Systemes de positionnement par satellites

Définition : Système qui permet de déterminer la position et la vitesse d'un récepteur à tout moment, en tout point de la planète, quelque soit la météo.

Principes de de mesure :

- Mesure du **temps de propagation** d'un signal émis par un **satellite**, jusqu'à sa réception par un récepteur sur Terre
- Positionnement par **trilatération** (intersection des signaux provenant de plusieurs satellites)



→ Il faut 3 satellites dans l'espace dont la position est précisément connue pour calculer la position (en réalité 4 pour la composante temps)

Systèmes de positionnement par satellites

- ✓ GPS (Global Positioning system)
 - ➔ Système américain : opérationnel depuis 1995 (fins militaires), 24 satellites

- ✓ GLONASS : système russe
 - ➔ Opérationnel en 1996, puis obsolète, puis de nouveau opérationnel depuis 2011

- ✓ GALILEO
 - ➔ Système européen : en déploiement depuis 2003 partiellement opérationnel depuis fin 2016. Déploiement doit s'achever en 2020 avec 30 satellites

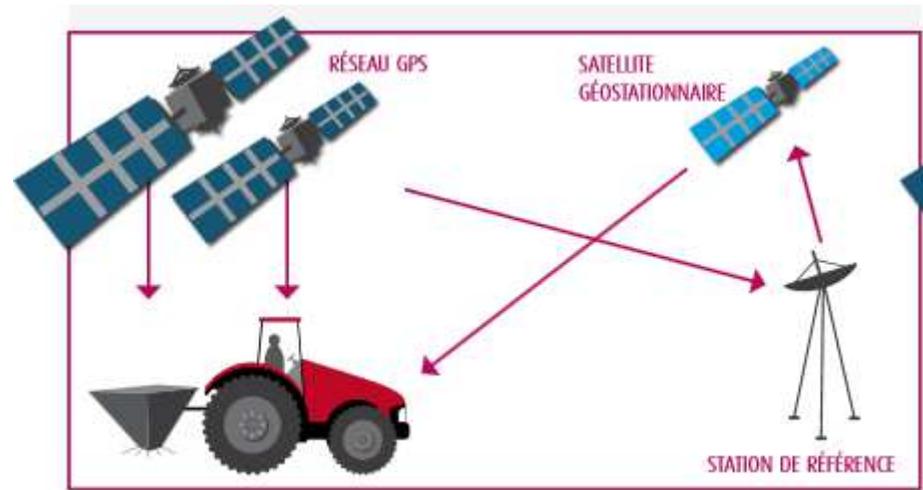
- ✓ Autres systèmes régionaux
 - ➔ QZSS : système japonais
 - ➔ Beidou : système Chinois

➔ **Précision de l'ordre de 1 à 15 m, insuffisante en agriculture**

Systèmes de positionnement : systèmes de correction

Le GPS différentiel (dGPS)

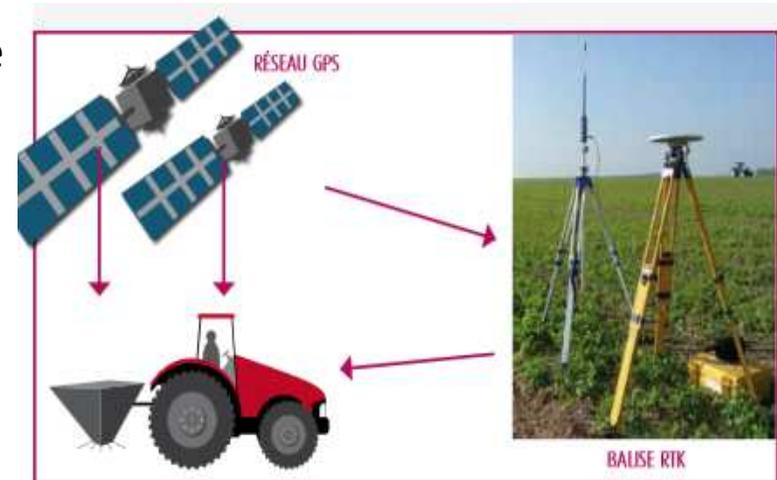
- Utilisation de **stations de référence** de coordonnées connues exactement
- Elle reçoivent les signaux des mêmes satellites que les terminaux mobiles utilisés = estimation en permanence de l'erreur locale → correction
- Les stations de référence peuvent être situées à plusieurs centaines de kilomètres
- 2 niveau de précision :
 - 15 à 50 cm (82 à 275€/mois)
 - 5 à 10 cm (180 à 265€/ mois)



Systèmes de positionnement : systèmes de correction

La cinématique temps réel (RTK, real Time Kinematic)

- Stations de référence situées à proximité de l'utilisateur (**inférieur à 10 km**) : les **balises RTK** : mesure du décalage temporel des ondes émis par le satellite
- Correction transmise sous forme **d'ondes radio, par internet ou GPRS (réseau téléphonie mobile)**
- Précision : **2 à 3 cm**
- Cout :
 - l'agriculteur achète sa propre balise (10000 à 15000€) ou
 - L'agriculteur se regroupe avec d'autres agriculteurs pour mettre leur balises en réseau
 - L'agriculteur s'abonne auprès d'un organisme qui fourni des corrections



Activités	Exemples d'application	Précisions disponibles		
		dGPS		RTK
		15-30 cm	5-10cm	2-5 cm
Positionnement	Localisation de point (obstacles, bornes,...)			
Arpentage	Mesure de surfaces ou de distances			
Cartographie de l'exploitation	Modulation d'intrants, cartes de rendement			
	Identification de zones d'intérêt (zone vulnérable,réseau de drainage, rond d'adventices,...)			
	Visualisation et traitement de cartes			
Assistance au guidage	Épandage, pulvérisation, travail du sol avec de grandes largeurs d'outils			
Autoguidage	Travail du sol avec de petites largeurs (hors labour) et récolte			
	Semis	Non valorisée*		
	Binage, Strip Till,...	Insuffisante	Limitée**	
Autres	Passage de roue au même endroit dans la parcelle			
	Coupure de tronçons automatique			

*Apporte un confort de travail uniquement

**Les données sont en cours d'acquisition.

 Précision adaptée à l'application

 Précision non nécessaire à l'application

 Précision inadaptée

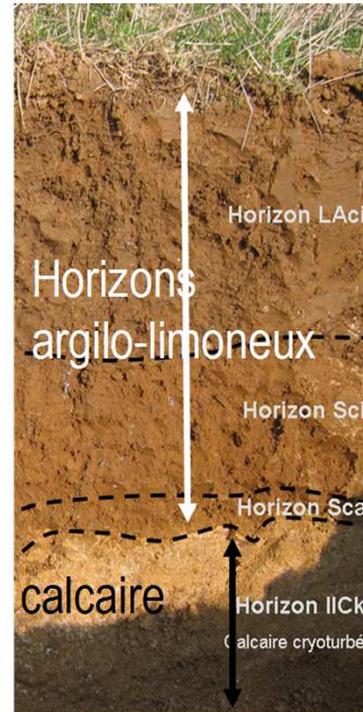
Ces différents exemples montrent qu'il est possible de réaliser des économies de temps et de charges tout en diminuant l'impact sur l'environnement grâce au GPS. Il est nécessaire de s'attarder à trouver les meilleures combinaisons d'outils pour limiter les investissements.

Plan

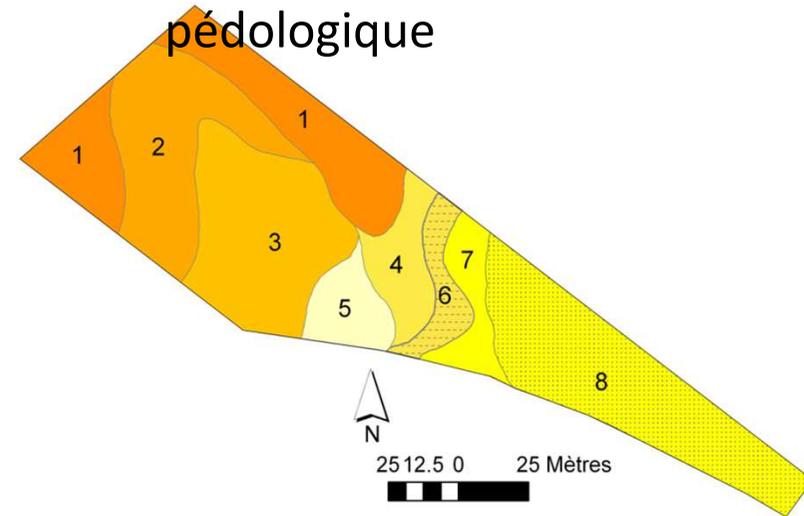
- 1. Agriculture de précision : historique, définition, concept**
- 2. Les système de positionnement géographique**
- 3. Connaissance des sols**
- 4. Analyse des besoins de la plante**
- 5. Modulation des apports, technologies**

Variabilité intra-parcellaire des sols

Hétérogénéité verticale



Hétérogénéité latérale = couverture pédologique



UCS

- 1 Calcosol épais développé sur matériau cryoturbé beige
- 2 Calcosol moyennement épais développé sur matériau cryoturbé
- 3 Calcosol peu épais sur matériau cryoturbé
- 4 Calcosol épais sur matériau cryoturbé et calcaire tendre
- 5 Calcosol peu épais sur matériau cryoturbé et calcaire tendre
- 6 Calcosol épais sur matériau cryoturbé et calcaire tendre à dalle calcaire profonde (80 à 110 cm)
- 7 Calcosol sur dalle calcaire moyennement profonde (60cm)
- 8 Calcosol caillouteux sur calcaire dur

→ Hétérogénéité des sols = variations de texture, de profondeurs de sols, de pH, de teneur en matières organiques → source importante de variabilité pour la production agricole

Comment cartographier les sols de la parcelle ?

- Méthodes de cartographie conventionnelle
- Cartographier avec l'aide de méthodes de géophysique
- Cartographier avec l'aide de la télédétection

Cartographie conventionnelle – Démarche du pédologue cartographe

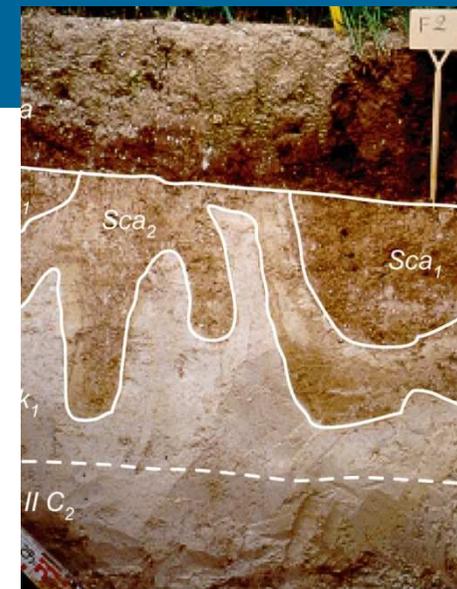
L'objectif de la cartographie des sols est l'individualisation, la délimitation puis la caractérisation morphologique d'unités de sols représentées sous formes de **plages cartographiques** (ou polygones).

1. Acquisition des informations - Observations

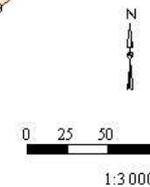
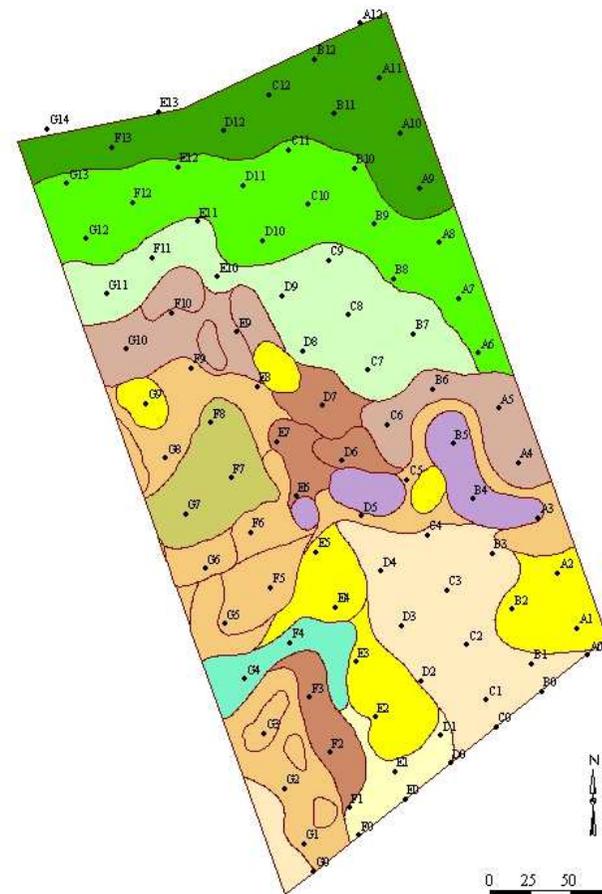
- Données disponibles (topographie, images aériennes)
- Observations de sondages et de profils pédologiques
- Observation du paysage (pentes, haies, parcellaire....)
- Caractérisations analytiques : granulométrie, pH, cations échangeables, CaCO₃ etc...

2. Spatialisation et modélisation cartographique

- Elaboration des plages cartographiques : Les sondages et fosses qui présentent des caractéristiques pédologiques similaires et de même intensité sont considérés comme **appartenant à la même unité cartographique avec prise en compte de la géomorphologie, géologie, occupation des sols, cartes géophysiques**
- Représentation spatiale sous SIG



-  luvisols limoneux sur matériau cryoturbé profond
-  néoluvisols limoneux sur matériau cryoturbé profond
-  complexe de calcisols et de néoluvisols érodés sur matériau cryoturbé
-  complexe de calcisols et de calcosols sur craie remaniée sableuse
-  complexe de calcosols sur craie, craie altérée et matériau cryoturbé
-  calcosols sur craie remaniée (type pâte calcaire)
-  calcosols sur craie sableuse et craie remaniée (type farine calcaire)
-  calcosols assez caillouteux sur craie
-  calcosols peu caillouteux sur craie
-  calcosols très peu caillouteux sur craie
-  colluviosols
-  calcomagnésisols sur sable grésifié
- sondage pédologique (réseau régulier)



Méthode de cartographie conventionnelle

- Avantages
 - Opérationnalité (rapidité, coût...)
 - Approche déterministe robuste
- Conditions d'opérationnalité
 - Efficience du pédologue (acquis régional)
- Limites
 - Approche qualitative
 - Représentation cartographique discontinue
 - Analyse statique sur variables pérennes

Cartographier avec des méthodes de géophysique appliquée

Géophysique : Une discipline des sciences de la terre. Elle concerne l'étude de caractéristiques physiques de la Terre (ou d'autres planètes) utilisant des **techniques de mesures indirectes**.

Géophysique appliquée : application des méthodes géophysiques pour des objectifs économiques (ex : recherche hydrocarbure, minerais). Utilisation dans le domaine de l'agriculture depuis quelques années,

Phénomène à caractériser, non ou difficilement mesurable directement
Changement de densité, variation d'humidité, changement de nature d'un matériau....



Variation d'une propriété physique mesurable (contrastes latéraux et verticaux)



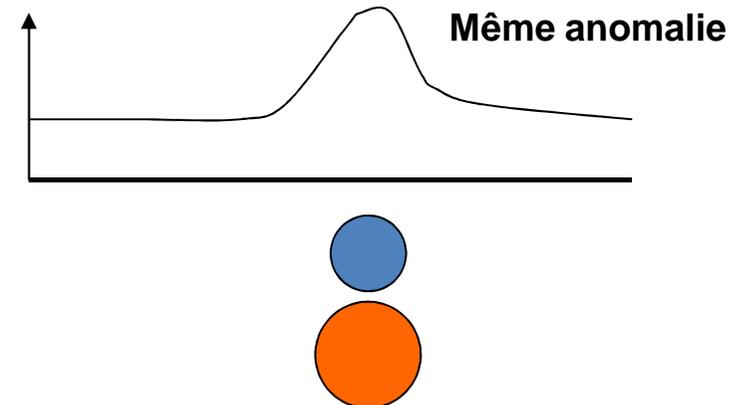
Mesure
Outils géophysiques



Cartographier avec des méthodes de géophysique appliquée

Avantages :

- Mesures depuis la surface : non destructives, rapides
- Mesures reproductibles
- Possibilité d'avoir une importante densité de mesures



Inconvénients :

- Méthodes indirectes : nécessité du traitement des données, de formuler des hypothèses
Existe une infinité de solutions pour une anomalie mesurée
 - Problème de la « myopie » des méthodes géophysiques
 - Nécessité d'un contraste du paramètre physique mesuré → importance du choix de la méthode
- **On ne peut pas s'affranchir d'une connaissance experte du terrain étudié. Utilisation de méthodes complémentaires.**

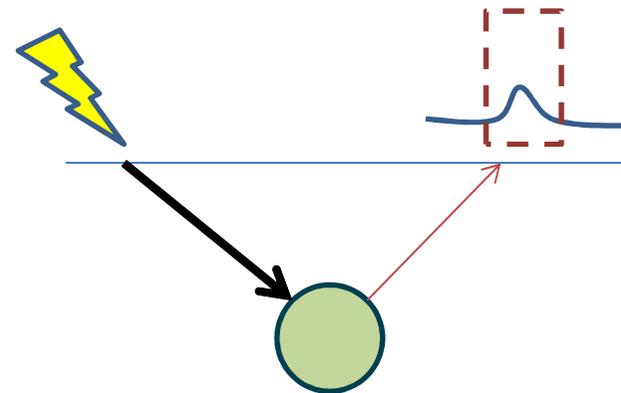
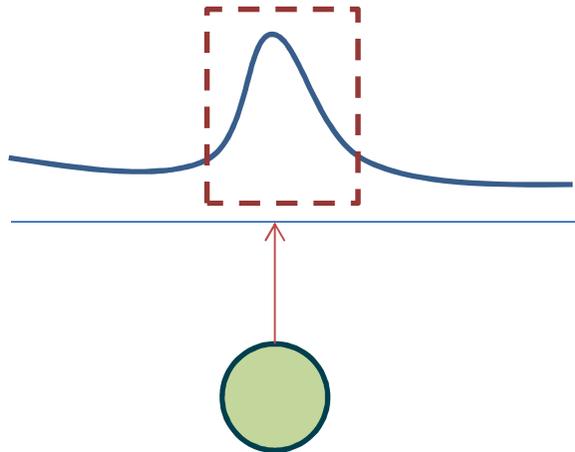
Les méthodes de la géophysique appliquée

Source naturelle (passive)

- La polarisation spontanée
- La gravimétrie
- La tellurique
- La magnétotellurique
- Le magnétisme

Source artificielle (active)

- La polarisation induite
- **La méthode électrique (courant continu)**
- **Les méthodes électromagnétiques (courant alternatif)**
- **La sismique**



Notion de résistivité/conductivité électrique

→ Principaux paramètres physiques mesurés en prospections électrique et électromagnétique.

→ Méthode actives : sources artificielles de courant continu (basse fréquence)

La **résistivité électrique** d'un sol est la propriété physique qui détermine sa capacité à limiter le passage d'un courant électrique.

Résistivité : notée ρ , unité : $\Omega.m$ (**ohm.mètre**)

- Résistivité = résistance électrique d'un volume de terrain de section S et de longueur L tel que $\rho = R * L/S$
- Si $S = 1m^2$ et $L=1m$, alors on a : $\rho = R$

La **conductivité électrique** d'un sol est la propriété physique qui détermine sa capacité à se laisser traverser par un courant électrique.

Inverse résistivité = conductivité électrique

Conductivité : notée σ , unité : $(\Omega.m)^{-1}$ ou en plus communément en S/m (Siemens/mètre)

Relation avec résistivité : $\sigma = 1 / \rho$ → $1 \Omega.m = 1000mS/m$

Ces facultés sont étroitement liées aux caractéristiques intrinsèques du sol.

Comment se fait le passage d'un courant dans le sol ?

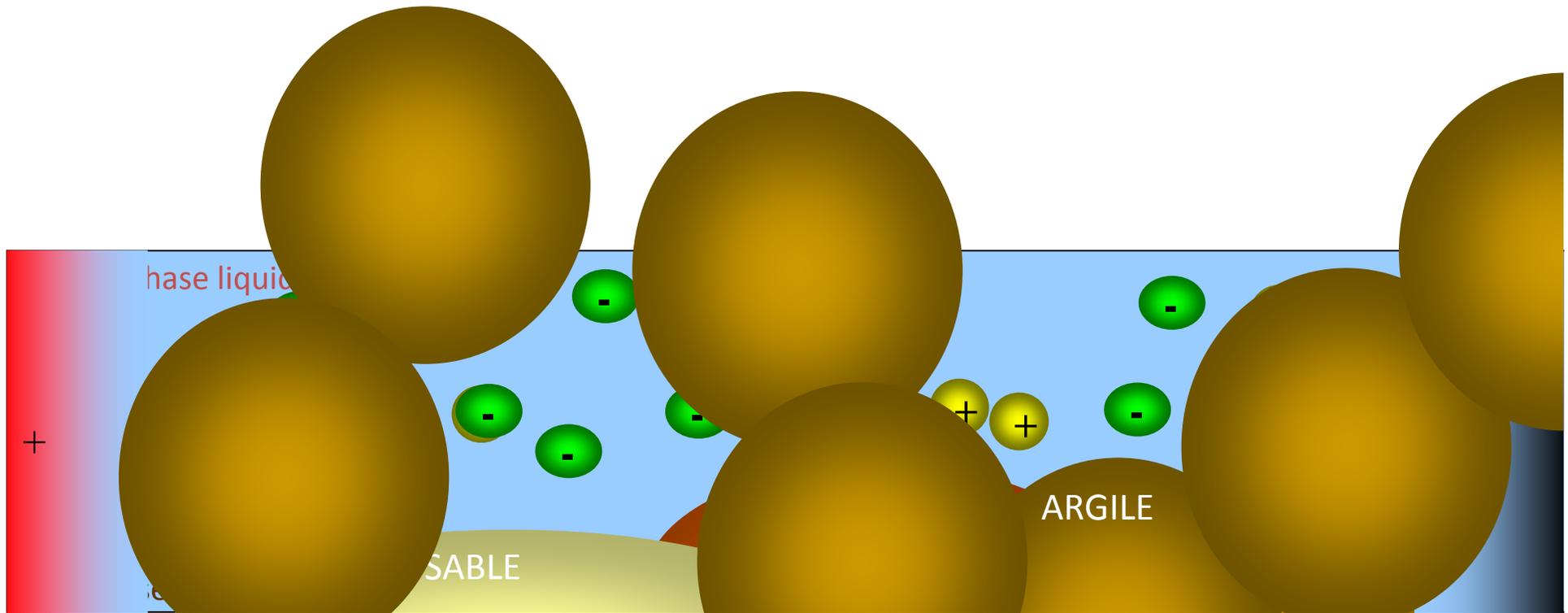
- Courant électrique = déplacement de charges électriques libres (électrons, ions).
- Dans les sols, le passage du courant se fait selon un mode dit électrolytique (ions), on parle de **conductivité électrolytique** :
 - **Conductivité électrolytique volumique** : déplacement des ions de l'eau interstitielle
 - **Conductivité électrolytique surfacique** : déplacement des ions liés à la surface des particules, en particulier les argiles. Les minéraux situés en bords de feuillets sont chargés négativement.
- Conductivité mesurée = **volumique + surfacique = conductivité effective**

→ Dépend de :

- Qualité de l'électrolyte : nature des ions présents
- Quantité d'électrolyte
- Mode de distribution de l'électrolyte

→ **Ces facteurs dépendent eux-même de facteurs pédologiques**

De quoi dépend la résistivité électrique d'un sol ?



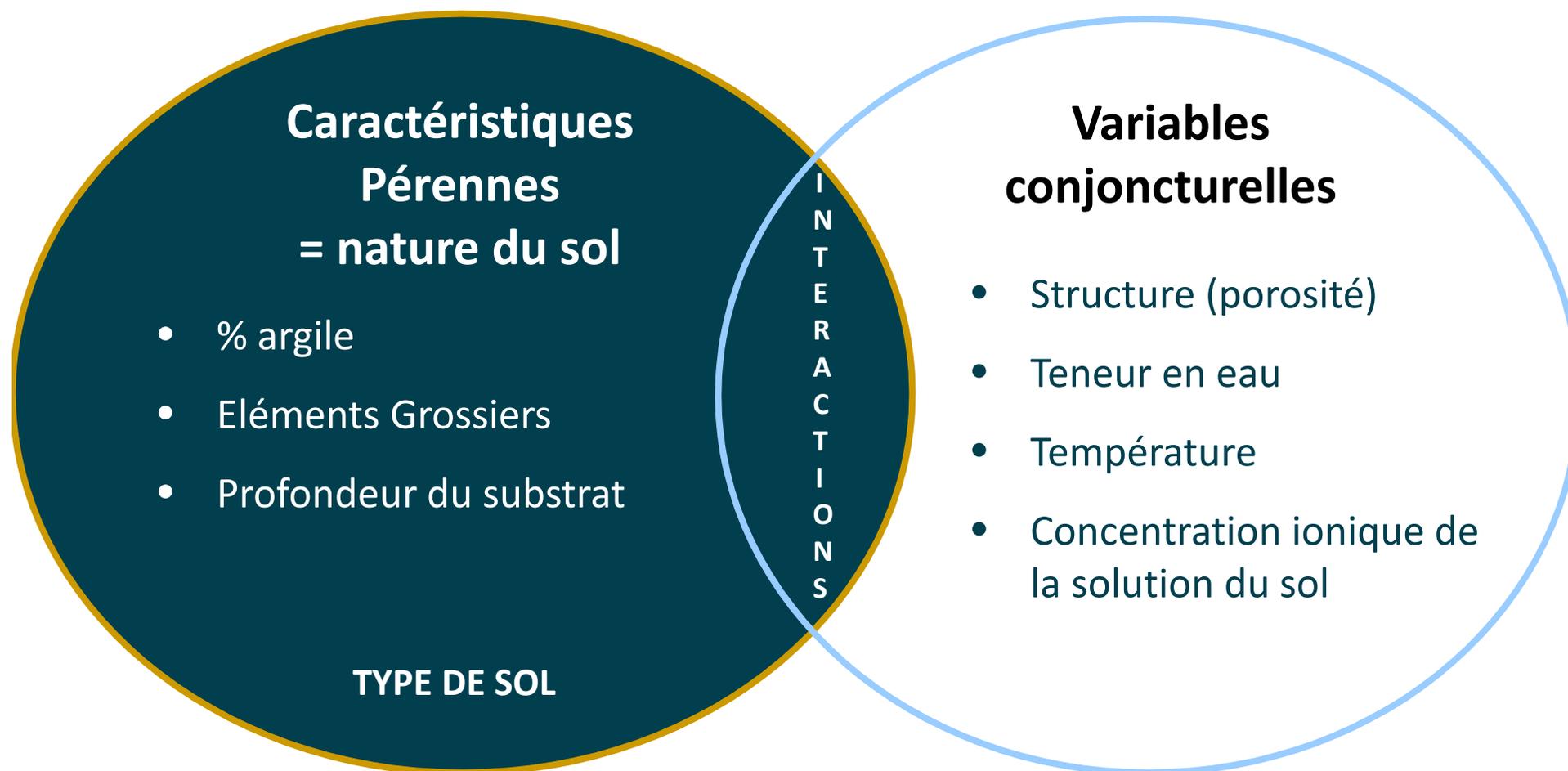
TENEUR EN EAU

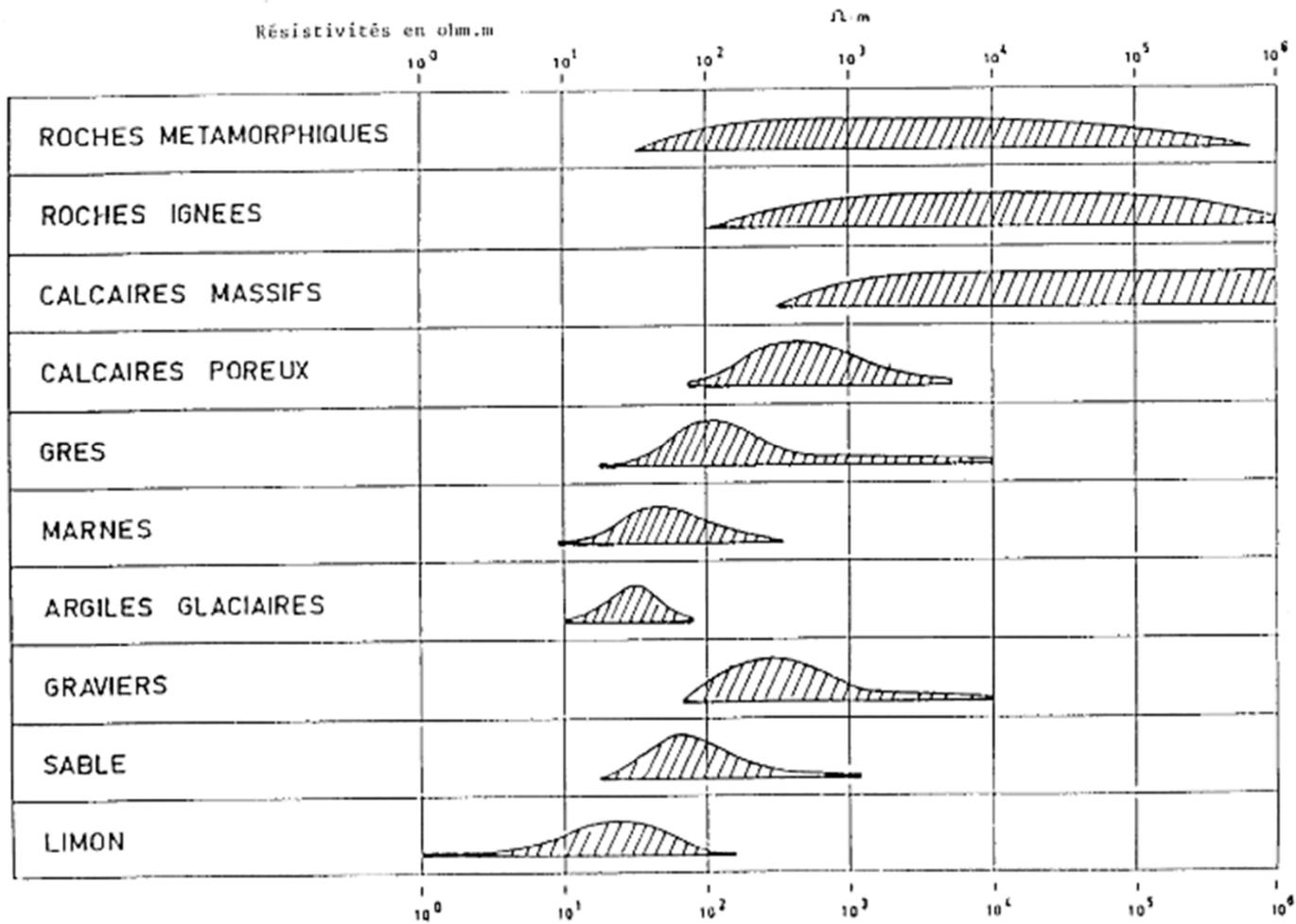
COMPOSITION IONIQUE DE LA SOLUTION

TEMPERATURE

MATERIAU

De quoi dépend la résistivité électrique d'un sol ?





Méthodes de mesures de la résistivité du sol

Méthode électrique

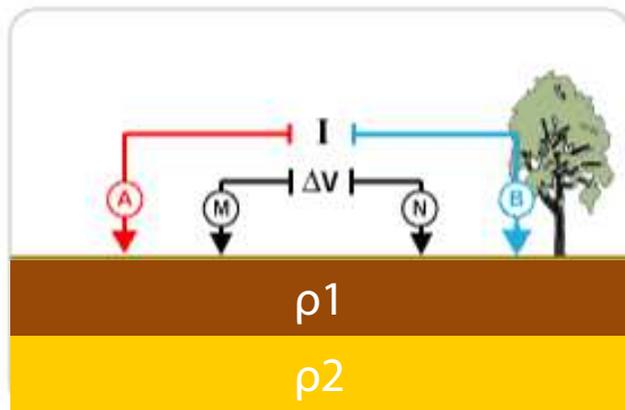
- Le courant électrique est **directement injecté** dans le sol grâce à un générateur
- Méthode dite « galvanique » = nécessite un **contact** entre le sol et le moyen de diffuser le courant électrique dans le sol (électrodes)
- Appareil de mesure : **résistivimètre**

Méthode électromagnétique

- Méthode sans contact : courant électrique **induit** par une champ magnétique (induction)
- Méthode sensible aux milieux conducteurs (faible signal pour les résistivités élevées)
- Appareil de mesure : **conductivimètre**

Méthode électrique à courant « continu »

Méthode galvanique (avec contact) : injection directe d'un courant électrique continu dans le sols via des électrodes



Quatre électrodes (quadripôle) :

- A et B pour l'injection du courant I_{AB}
- MN pour la mesure de Δu

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \left[\frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN} \right)} \right] = K \times \frac{\Delta V}{I}$$

avec K : coefficient géométrique

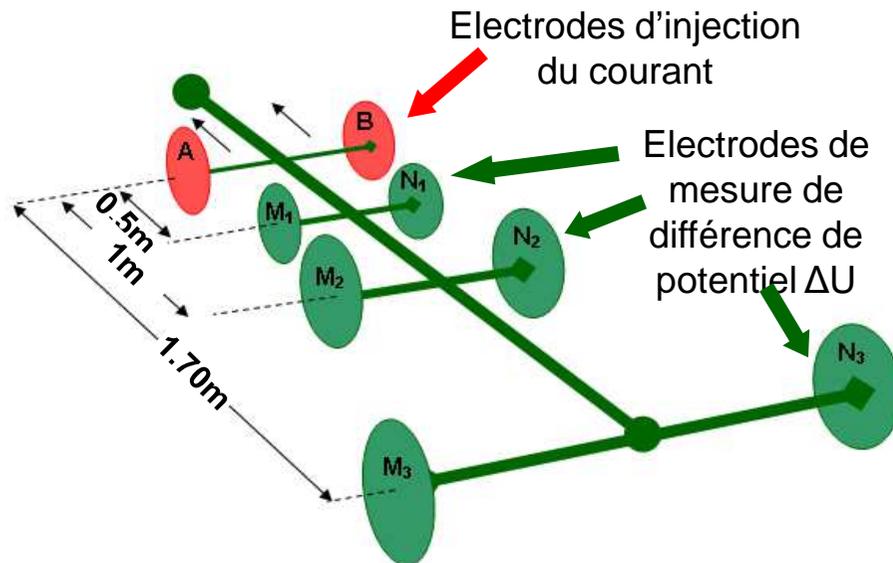
Le volume caractérisé par la mesure dépend de l'écartement entre les électrodes : plus l'écartement est grand, plus le volume prospecté est grand.

La mesure géo-électrique



L'ARP (Automatic Resistivity Profiler) :

- Prospection électrique « continue » : enregistrement sur les trois voies tous les 10 cm
- Résolution latérale dépend uniquement du trajet réalisé
- Mesures géoréférencées : dGPS, précision planimétrique de l'ordre de 10 cm
- Prospection rapide : 10 à 15 km/h



3 écartements (Voie 1, Voie 2, Voie 3)

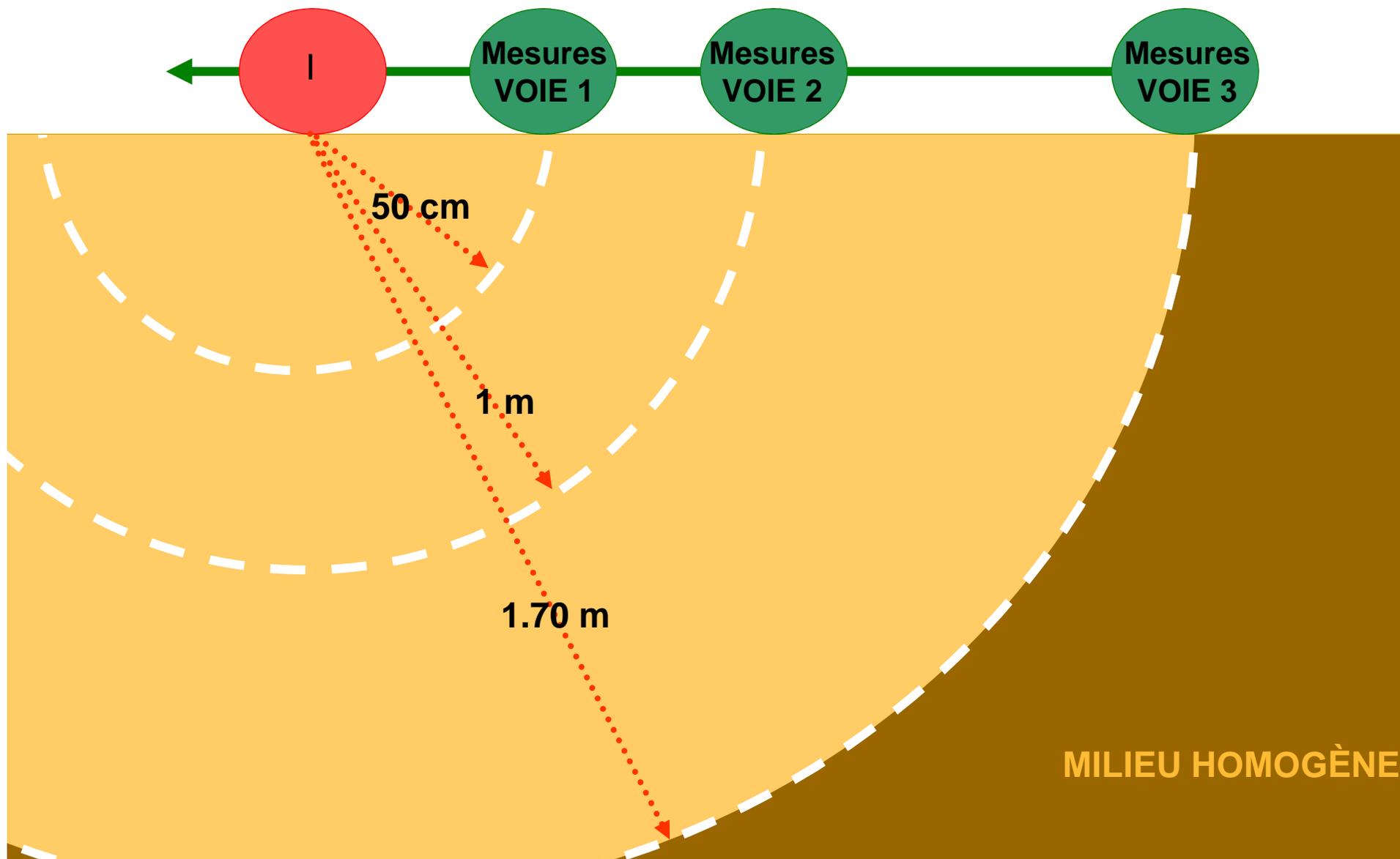
=

3 profondeurs d'investigation

=

3 cartes de résistivité apparente

Que mesure-t-on ?



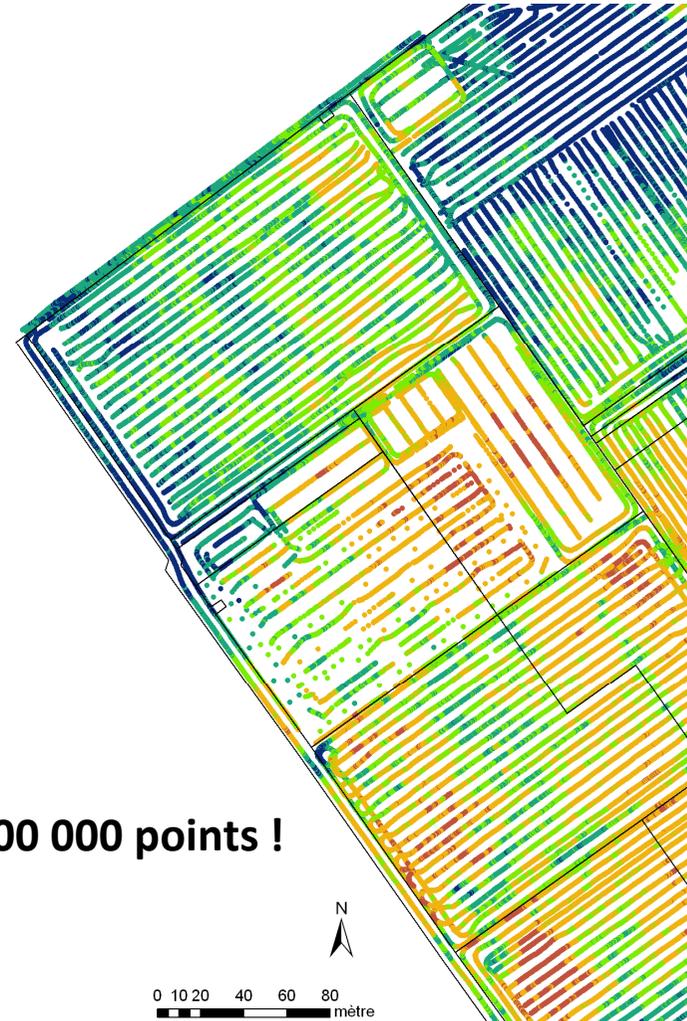
Exemple : la cartographie des sols de l'Unité Expérimentale d'Epoisses

Les données brutes

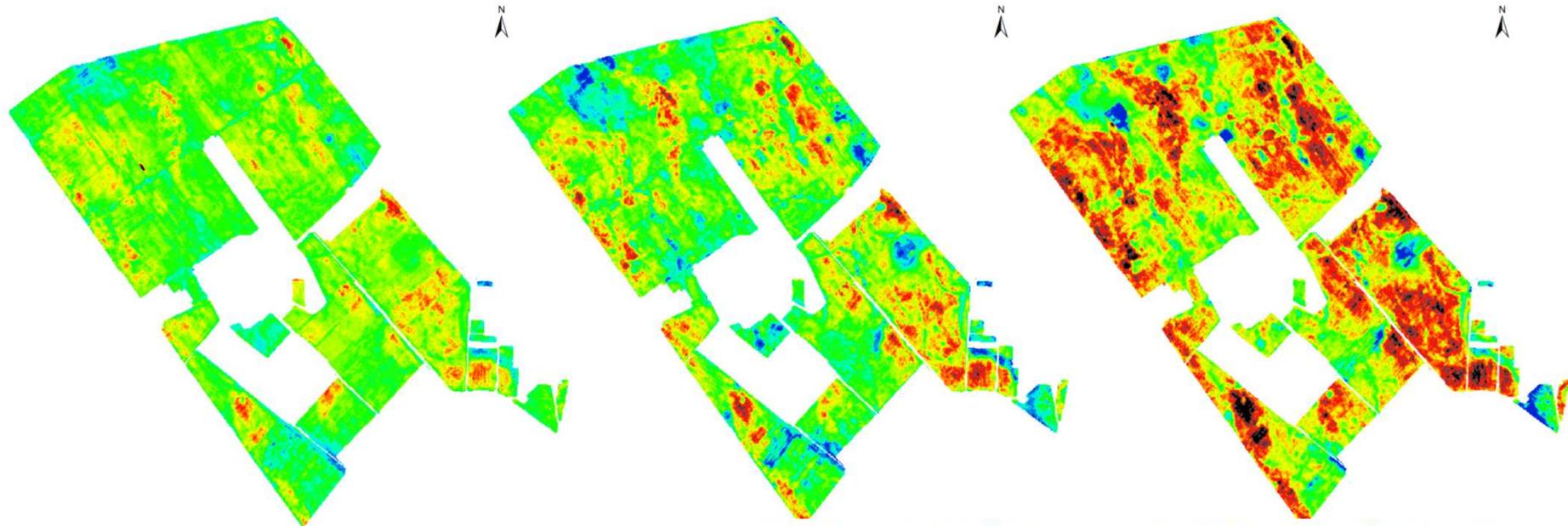
Surfer - [LuxWGS84brute.dat]

File Edit Format Data Window Help

A1	EASTING									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	EASTING	NORTHING	Z	voie 1	voie 2	voie 3	fichier			
2	6.1562352	49.929478	433.13	403.94	635.74	847.43		4		
3	6.1562407	49.929479	433.13	417.66	613.12	827.14		4		
4	6.1562422	49.929479	433.15	425.78	555.75	765.04		4		
5	6.1562438	49.929479	433.15	415.49	569.57	751.01		4		
6	6.1562452	49.929479	433.15	403.22	549.05	759.03		4		
7	6.1562467	49.929479	433.15	386.79	550.3	759.28		4		
8	6.1562482	49.929479	433.15	383.9	588	757.77		4		
9	6.1562496	49.929479	433.15	403.22	566.64	762.03		4		
10	6.1562511	49.929479	433.15	415.13	577.11	799.09		4		
11	6.1562525	49.929479	433.15	413.32	580.46	785.57		4		
12	6.1562541	49.929479	433.15	413.68	572.08	784.32		4		
13	6.1562556	49.929479	433.15	412.24	571.24	790.83		4		
14	6.1562570	49.929479	433.15	384.45	550.3	769.79		4		
15	6.1562587	49.929479	433.2	389.32	551.98	782.32		4		
16	6.1562603	49.929479	433.2	449.24	592.18	805.1		4		
17	6.1562619	49.929479	433.2	459.89	587.16	796.59		4		
18	6.1562635	49.929479	433.2	485.52	598.89	793.84		4		
19	6.1562651	49.929479	433.2	470.18	598.47	783.07		4		
20	6.1562667	49.929479	433.2	464.58	600.14	776.81		4		
21	6.1562684	49.929479	433.2	436.16	571.24	736.74		4		
22	6.1562699	49.929479	433.2	447.8	560.36	705.19		4		
23	6.1562716	49.929479	433.2	462.24	586.32	684.65		4		
24	6.1562733	49.929479	433.2	494.36	600.56	701.93		4		
25	6.1562748	49.929479	433.2	508.26	593.44	700.43		4		
26	6.1562765	49.929480	433.2	511.87	593.44	716.46		4		
27	6.1562781	49.929480	433.2	529.92	623.59	747.01		4		
28	6.1562797	49.929480	433.2	528.12	614.38	735.99		4		
29	6.1562813	49.929480	433.2	493.64	592.6	701.93		4		
30	6.1562829	49.929480	433.2	464.58	557.42	686.4		4		
31	6.1562845	49.929480	433.2	448.7	558.26	687.16		4		
32	6.1562862	49.929480	433.2	424.51	549.05	694.42		4		
33	6.1562875	49.929480	433.28	-1	-1	-1		4		
34	6.1562889	49.929480	433.28	434.8	555.75	723.72		4		
35	6.1562902	49.929480	433.28	434.62	555.75	723.72		4		
36	6.1562916	49.929480	433.28	444.37	538.16	732.48		4		
37	6.1562929	49.929480	433.28	457.72	521.83	746.26		4		
38	6.1562943	49.929480	433.28	426.32	485.81	729.48		4		
39	6.1562957	49.929480	433.28	399.61	478.69	713.95		4		
40	6.1562970	49.929480	433.28	405.56	494.19	722.72		4		
41	6.1562983	49.929480	433.28	427.04	517.64	746.26		4		
42	6.1562997	49.929480	433.28	433.54	539.42	767.04		4		
43	6.1563011	49.929481	433.28	423.61	539	763.03		4		
44	6.1563025	49.929481	433.28	430.29	544.86	768.54		4		
45	6.1563037	49.929481	433.28	429.93	541.09	739.24		4		
46	6.1563051	49.929481	433.28	427.22	539	738.99		4		
47	6.1563065	49.929481	433.28	421.08	532.72	719.96		4		
48	6.1563079	49.929481	433.28	402.86	526.01	721.71		4		



Cartes des trois voies



Voie 1

Voie 2

Corrélation entre la variable d'intérêt (épaisseur du sol) et les variables auxiliaires (résistivité)

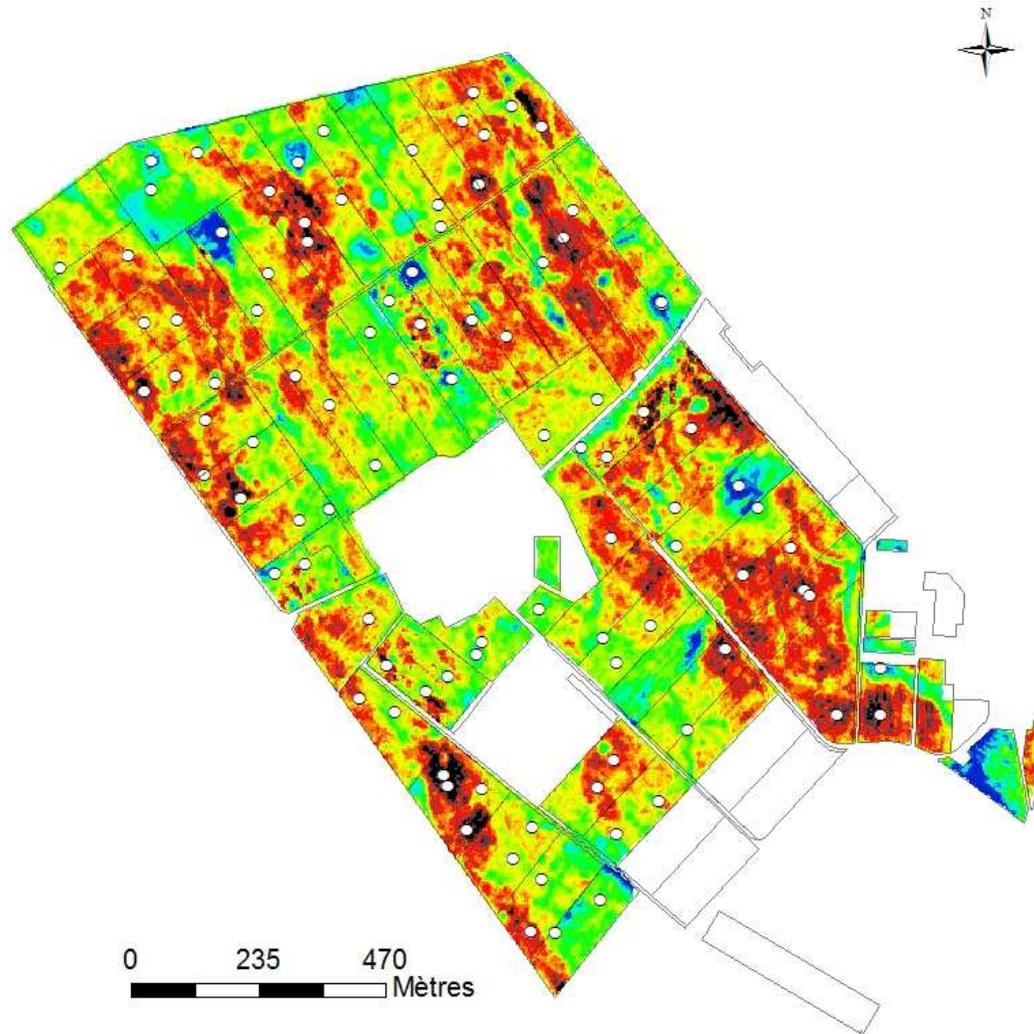
0 50 100 200 Mètres

15 classes



Variables	Coefficient de corrélation
Ep	1
R1*	-0,58
R2*	-0,68
R3*	-0,71
ln (R1*)	-0,60
ln (R2*)	-0,76
ln (R 3*)	-0,84

Plan d'échantillonnage sondages pédologiques



- Une centaine de points positionnés (~1 sondage/ha)
- Répartition sur toute la gamme de résistivité
- Bonne répartition spatiale sur l'ensemble du domaine, et par parcelle
- Pas de sur échantillonnage des zones de faible superficie

Description pédologique de chaque sondage



Critères de description :

- Epaisseurs des horizons, épaisseur du sol
- Présence d'éléments grossiers
- Texture
- Hydromorphie
- Présence CaCO_3

Analyses chimiques par horizon :

pH, granulométrie, teneurs éléments chimiques....



Description des sols (RP, 2008)

Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourds avec fentes de retrait en période sèche

Critères pour la classification :

- Sols calciques à calcaires
- Sols sains ou hydromorphes
- Profondeur d'apparition de l'horizon Cca



Au total : 9 types de sol décrits → 9 Unités Typologiques de Sol (UTS)

Sol calcique moyennement profond (70 cm)

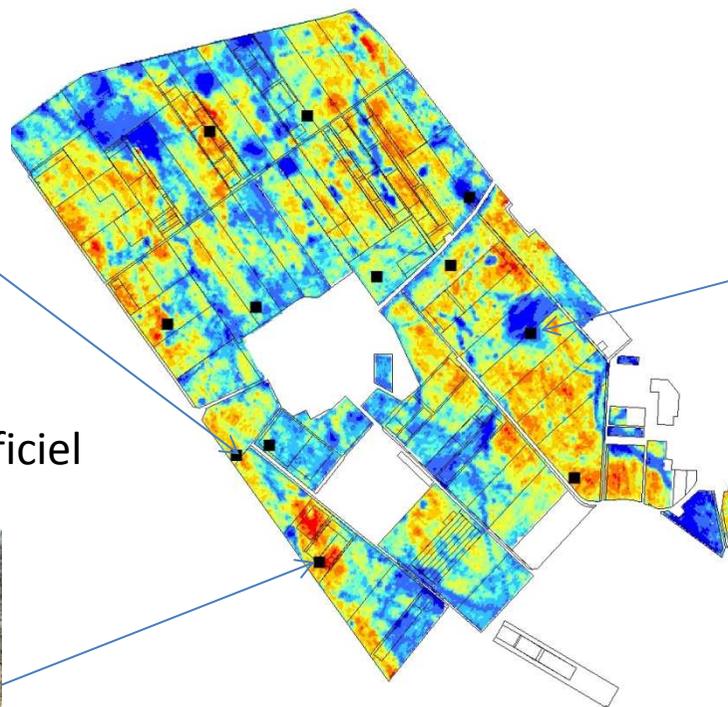


40 ohm.m

Sol calcaire superficiel (30-40 cm)



60 ohm.m

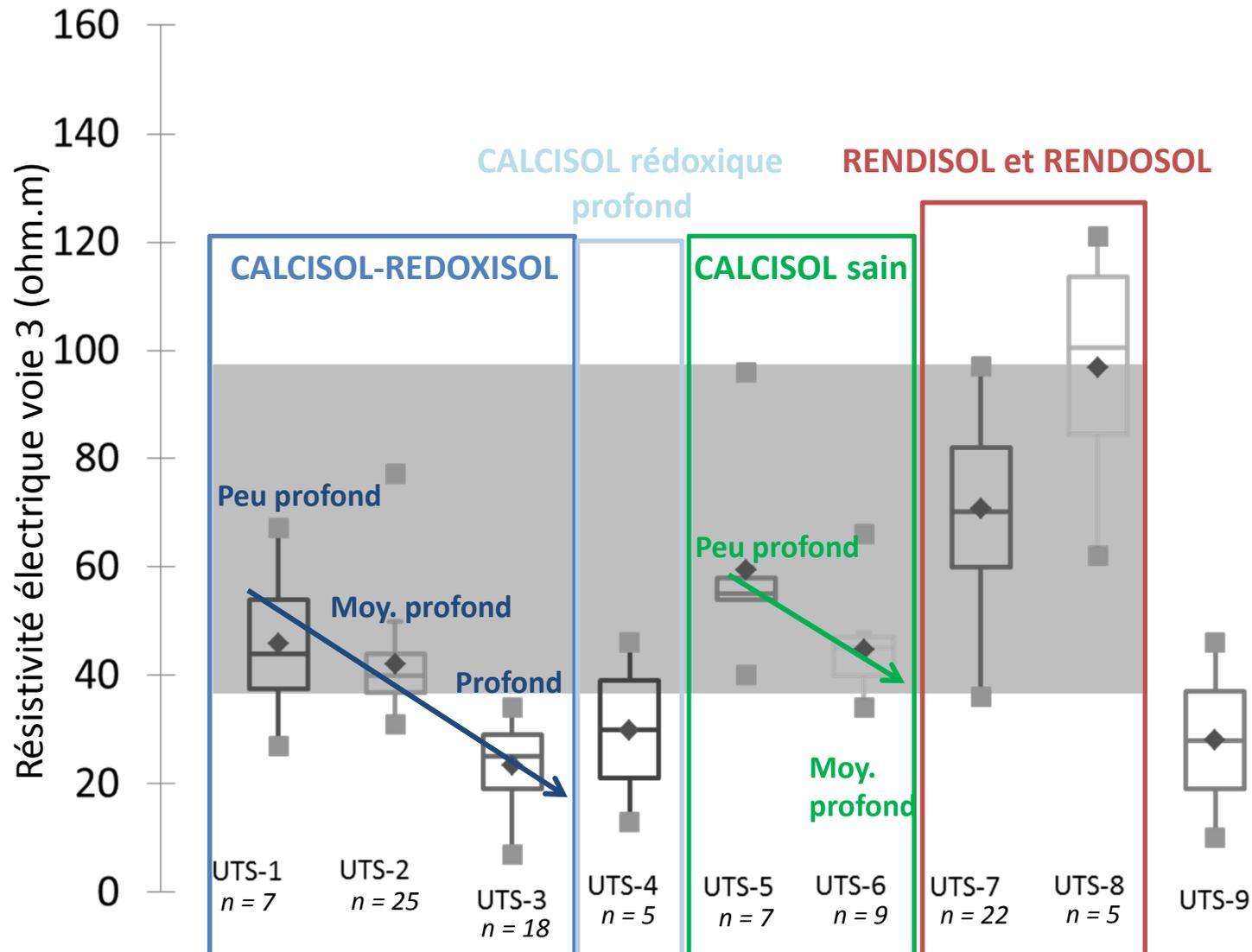


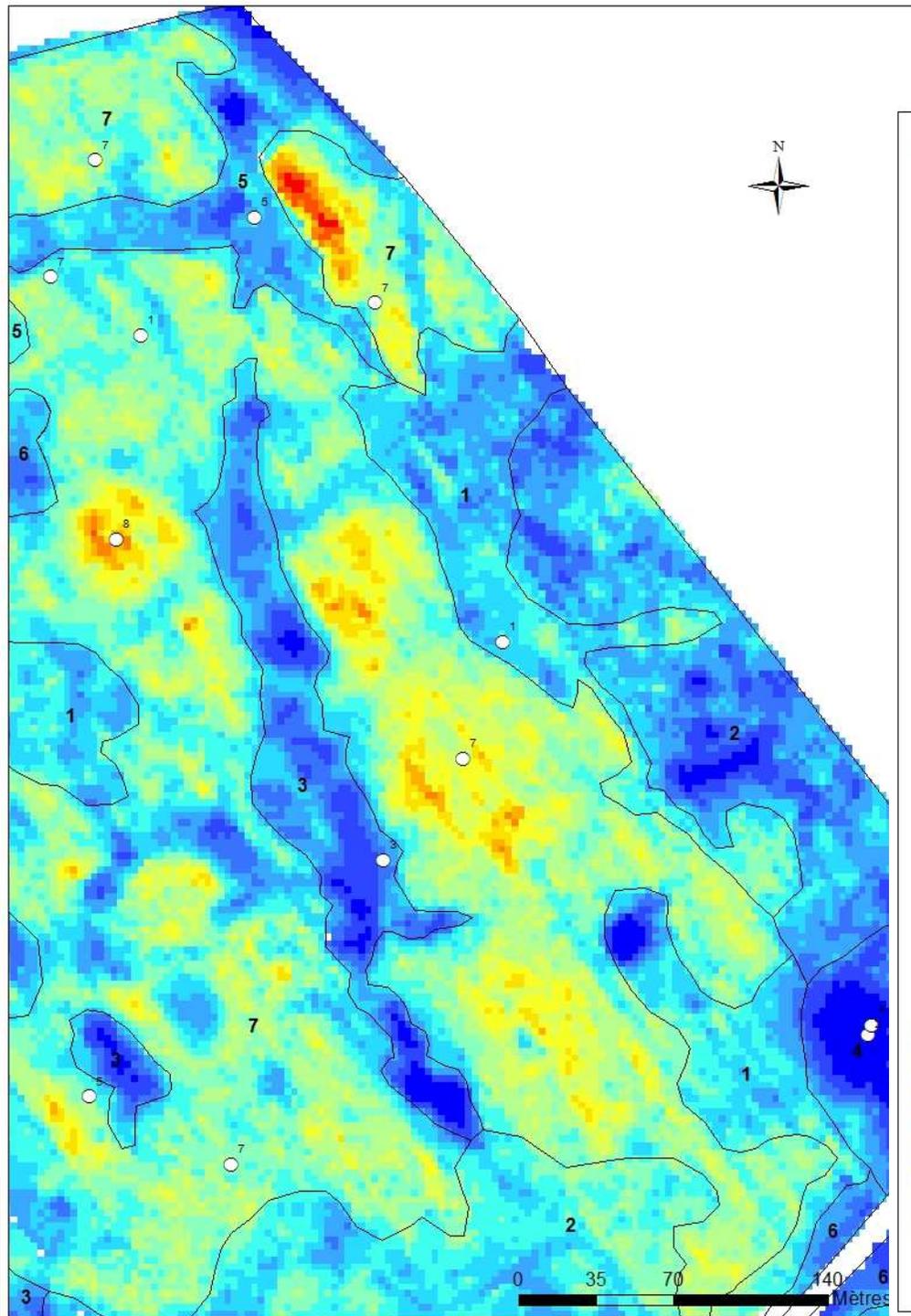
Sol calcique, AL-ALO, hydromorphe, profond (200 cm)



20 ohm.m

Relation résistivité / type de sol

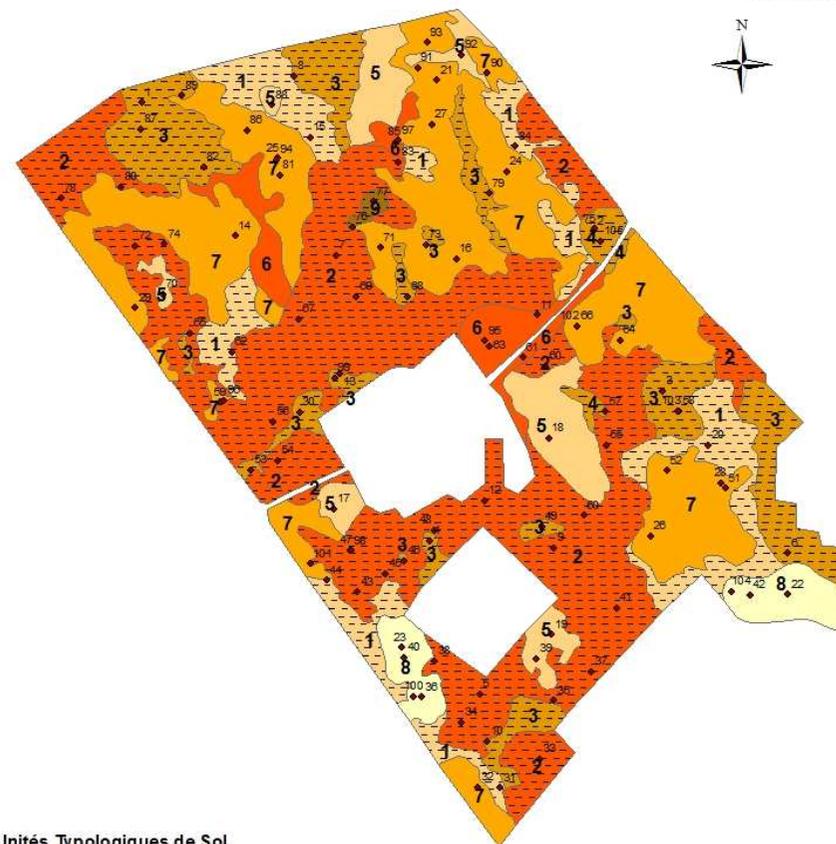




Carte des Unités Typologiques de Sol de l'Unité Expérimentale d'Epoisses

UR SOLS
Unité de Recherche de Science du Sol
et d'Élevage

Girot G., Séger M.,
Novembre 2015



Unités Typologiques de Sol

- 1. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, peu profonds
 - 2. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, moyennement profonds
 - 3. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, profonds
 - 4. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd hydromorphes à partir de 50 cm, calciques, à fente de retrait en période sèche, profonds
 - 5. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd non hydromorphes, calciques à calcaires, à fente de retrait en période sèche, peu profonds
 - 6. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd non hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, moyennement profonds
 - 7. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd non hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, superficiels
 - 8. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd non hydromorphes, calcaires, à fente de retrait en période sèche, superficiels
 - 9. Sols alluviaux argilo-limoneux hydromorphes, lessivés à planosoliques (changement textural argileux brusque), profonds
- Fosses pédologiques
 - Sondages pédologiques 2014-2015
 - Sondages pédologiques 2013

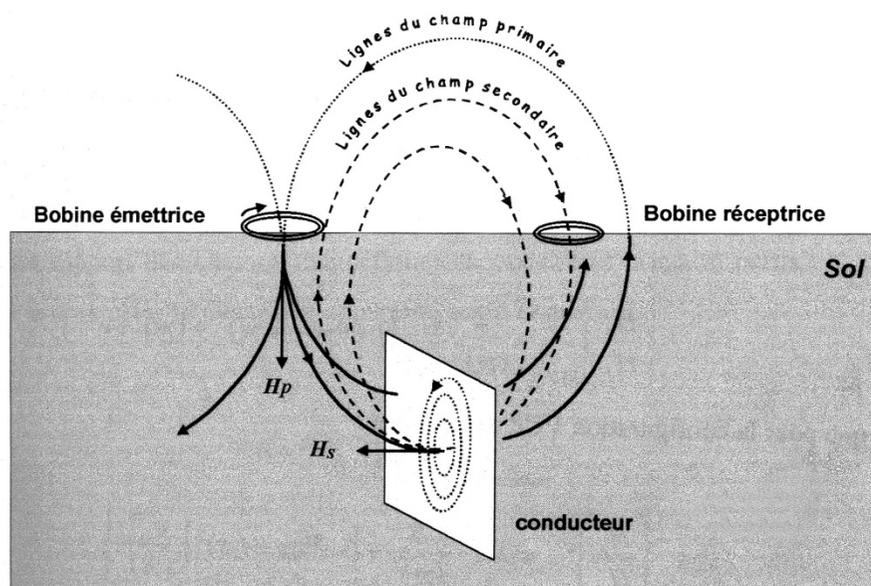
Méthode électromagnétique (méthode Slingram)

Principe : Emission artificielle d'un champ magnétique primaire qui au contact d'un corps conducteur induit un champ magnétique secondaire qui dépend de conductivité électrique. Le rapport entre champ secondaire et champ primaire est proportionnel à la conductivité du milieu.

Méthode Slingram : utilisation de deux bobines :

- Emettrice : champ primaire
- Réceptrice : champ primaire + champ secondaire

Mesure : Champ I + Champ II



Conductivimètres

EM38 Geonics

Profondeur investigation =
0,75 – 1,5 m



EM31 Geonics

Profondeur investigation =
3-6 m



Mesures électromagnétiques

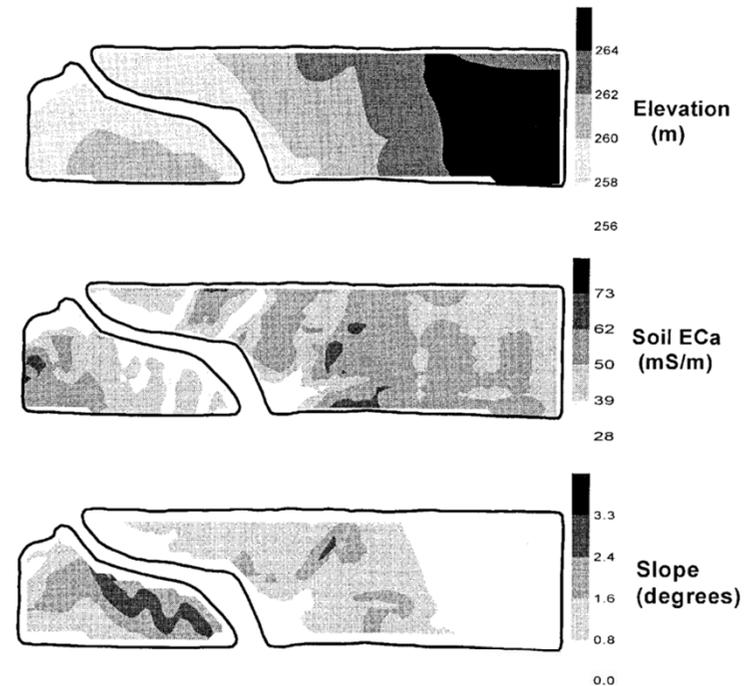
- Utilisation de la technologie EM38 (Geonics) attelé à un véhicule mobile
- 3500 mesures /ha
- Géoréférencement
- Profondeur d'investigation = 135 cm environ
- Cartes de conductivités
- Génération de cartes de potentiel agronomiques du sol



Définition de zones homogènes de gestion

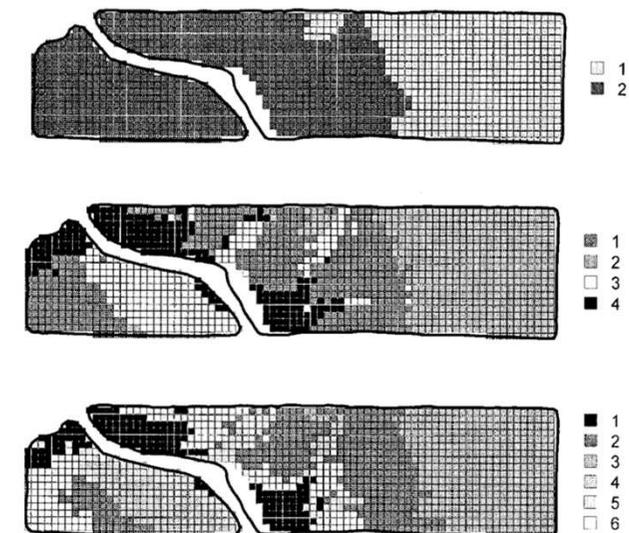
- Zonage « expert »
- Zonage à partir de méthodes statistiques et géostatistiques :
Méthodes de classification / clustering
(Johnson et al., 2003; Morari et al., 2009)
- Logiciels développés
Exemple : Management Zone Analysis (Etats Unis)

Clustering Variables Used as Input for MZA



Fridgen et al., 2003

Management Zones by MZA Clustering



Sol et télédétection

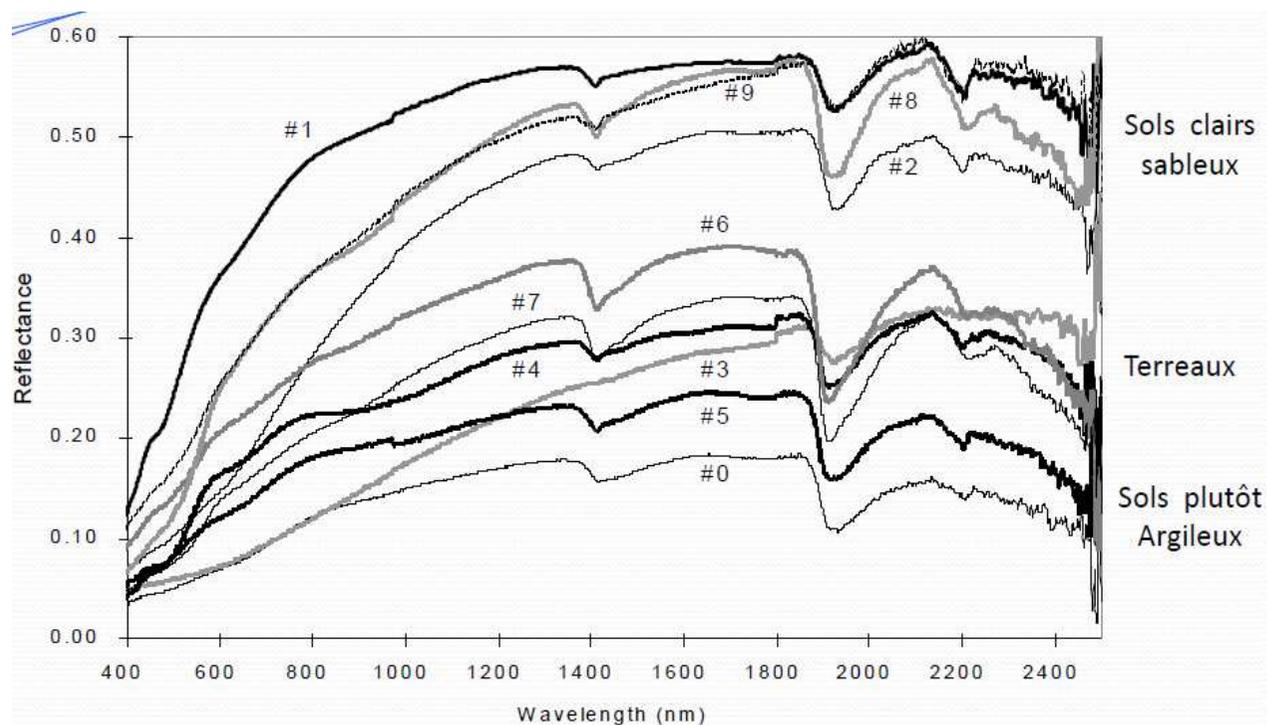
Valeurs de réflectance d'un sol nu dépend :

- Contenu en éléments minéraux
- Granulométrie
- Humidité
- Rugosité

Corrélation réflectance à la MO

→ Plus le sol est riche en MO plus il est sombre

→ Conseil pour les apport de PRO



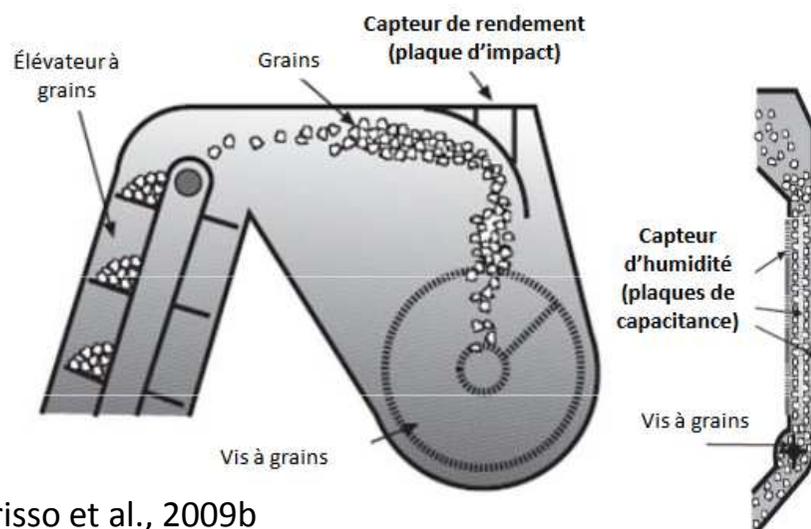
Plan

- 1. Agriculture de précision : historique, définition, concept**
- 2. Les système de positionnement géographique**
- 3. Connaissance des sols**
- 4. Analyse des besoins de la plante**
- 5. Modulation des apports, technologies**

Comment connaître les besoins de la plante ?

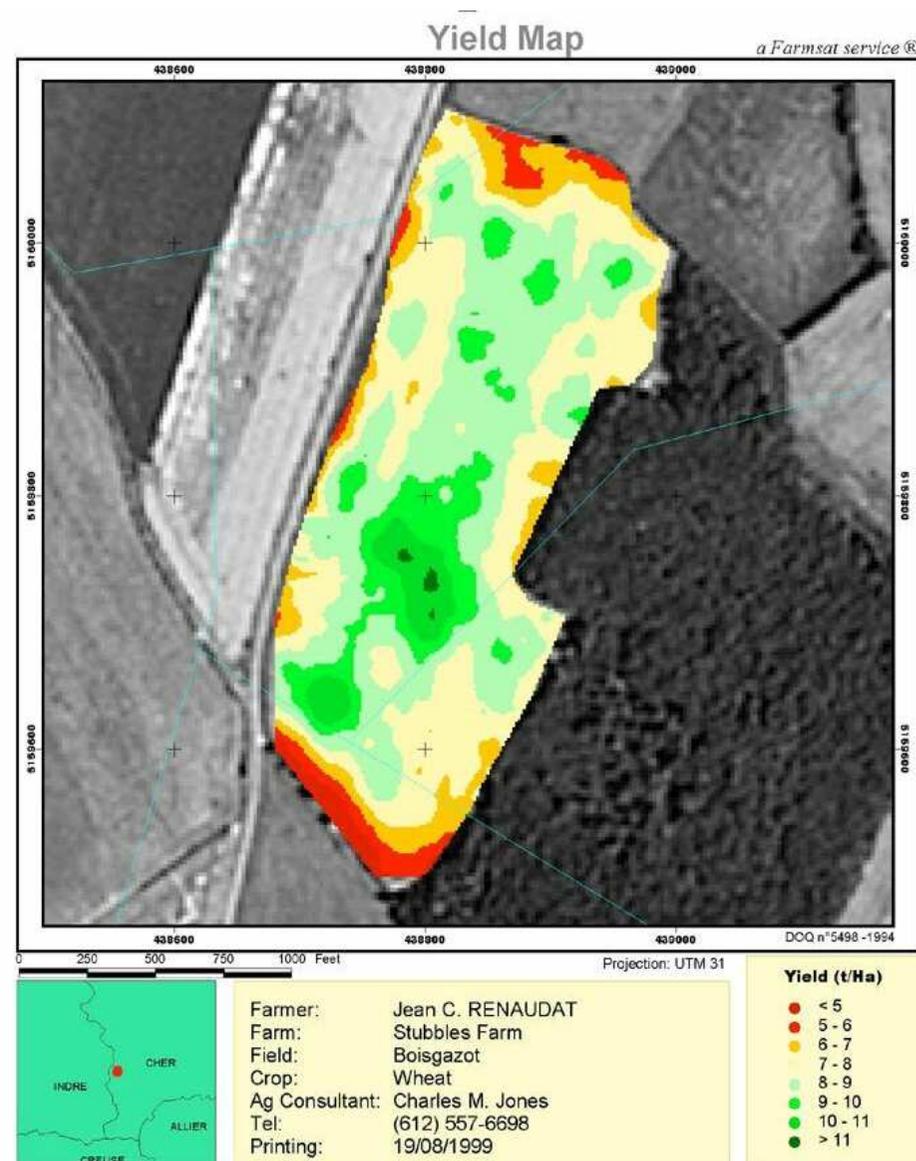
- Avec des données du passé : Analyses de cartes de rendement, analyse du potentiel de rendement de la parcelle
- Analyse en temps réel : grâce à la télédétection

Capteur de rendement



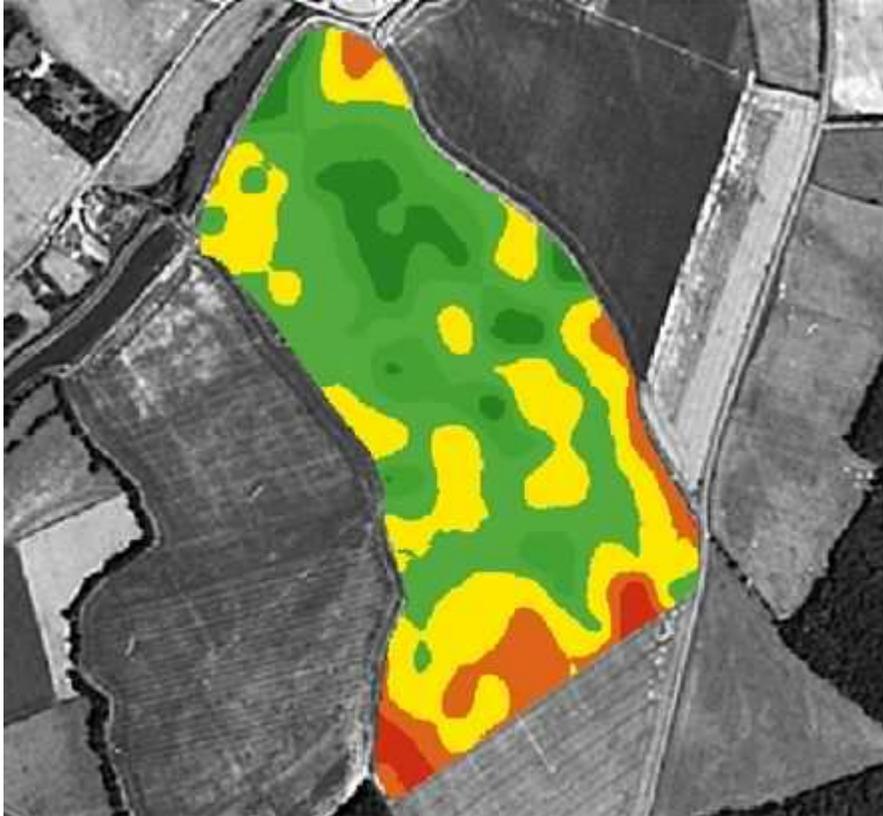
Grisso et al., 2009b

- Capteurs embarqués sur les moissonneuses-batteuses
 - Mesure de la force de l'impact des grains sur la plaque d'impact.
 - Mesures de masse ou mesures volumétriques
- Nécessite une bonne calibration du capteur



Influence des propriétés du sol sur le rendement

Exemple du pH



Carte du rendement



Carte du pH

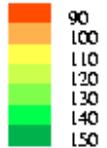
Analyse monodate de la carte de rendement

Rendement enregistré au champ (1998)
Assemblage culture de maïs + culture de blé



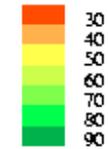
Erreur d'itinéraire technique

Maïs—rendement en quintaux / hectare
à 14.5% d'humidité



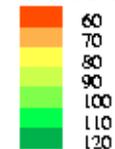
Type de sol

Blé dur—rendement en quintaux / hectare
à 14.5% d'humidité

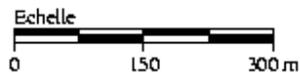


ancien parcellaire

Blé—rendement en quintaux / hectare
à 14.5% d'humidité

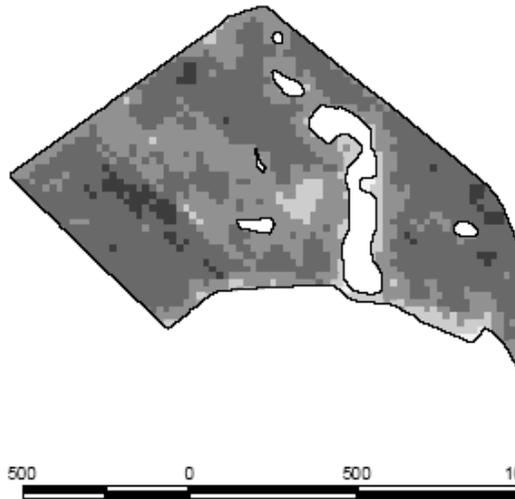


Effet Variétés



Analyse multidates de cartes de rendement

Exemple de la ferme de Karsow (Allemagne)
7 cartes de rendement de 1994 à 2000



Average yield*
25 - 50
50 - 75
75 - 100
100 - 125
125 - 150
150 - 175

Carte du rendement moyen



Carte du rendement maximal relatif

Maximum yield*
25 - 50
50 - 75
75 - 100
100 - 125
125 - 150
150 - 175
*percentage

Carte du potentiel de rendement



Maximum deviation*
above average
0 - 25
25 - 50
50 - 75
*percentage

Permet de connaître le potentiel de rendement de sa parcelle
→ Objectifs de rendements réalistes, non surévalués

Comment connaître les besoins de la plante ?

- Avec des données du passé : Analyses de cartes de rendement
- Analyse en temps réel : connaissance de la culture à un instant précis
 - **Exemple du diagnostic de l'état azoté**

L'état azoté

Azote : premier constituant des protéines, composant essentiel de la matière vivante. Élément essentiel du métabolisme et de la croissance des plantes.

Apports azotés : En dehors des légumineuses les plantes n'absorbent pas l'azote sous forme gazeuse. Besoin d'apports par fertilisation.

Stratégie actuelle d'apport azoté en agriculture :

Calcul de la dose à apporter par calcul du bilan prévisionnel (COMIFER) :

- Objectif de rendement/variété = dose totale
- Prise en compte des différents types d'apports
- Prise en compte de l'azote apporté par le sol (résidus de cultures passées)
- Fractionnement des apports (2 à 4)

Enjeu en agriculture de précision = optimiser l'apport azoté en apportant suffisant pour la culture mais sans excédent (gain économique et pour l'environnement avec limitation du lessivage). Meilleur compromis rendement/protéines. **Besoin d'estimer les besoins des cultures.**

→ C'est sur le dernier apport qu'un ajustement est classiquement mis en œuvre.

Mesures teneur en azote d'une culture

Méthodes de laboratoire :

1/ Echantillonnage

2/ Prélèvement,

3/ Méthodes analytiques de laboratoire (Méthode Kjeldahl ou méthode Dumas)

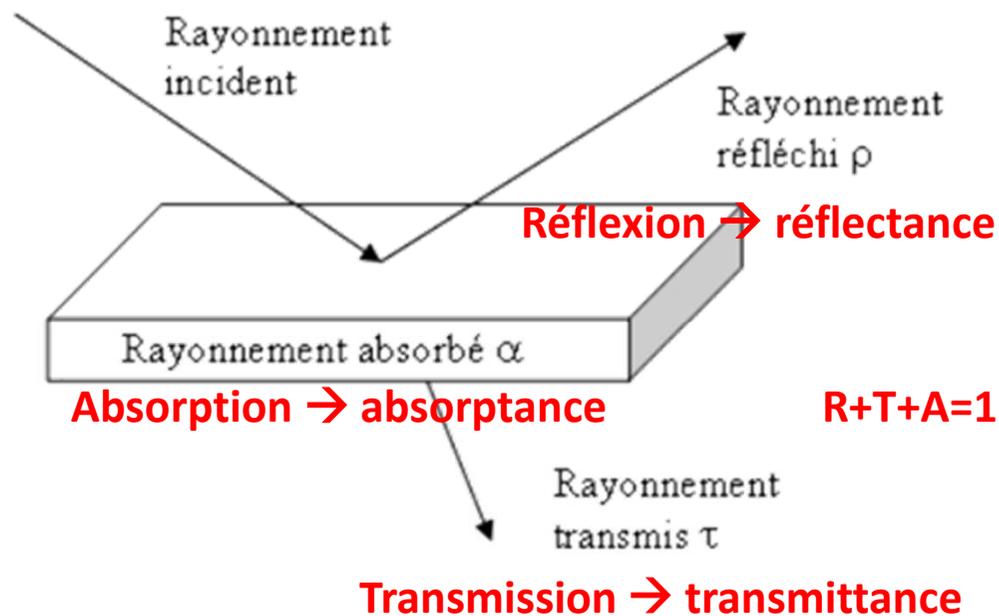
→ Long, couteux et ponctuel – Pas adapté aux besoin de l'Agriculture de précision

→ Estimation indirecte par méthodes de télédétection

Téledétection définition et principe de mesure

La **téledétection** est l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des **mesures effectuées à distance**, sans contact matériel avec ceux-ci. Basée sur la mesure des rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis des objets étudiés.

Interactions ondes électromagnétiques – Objets étudiés



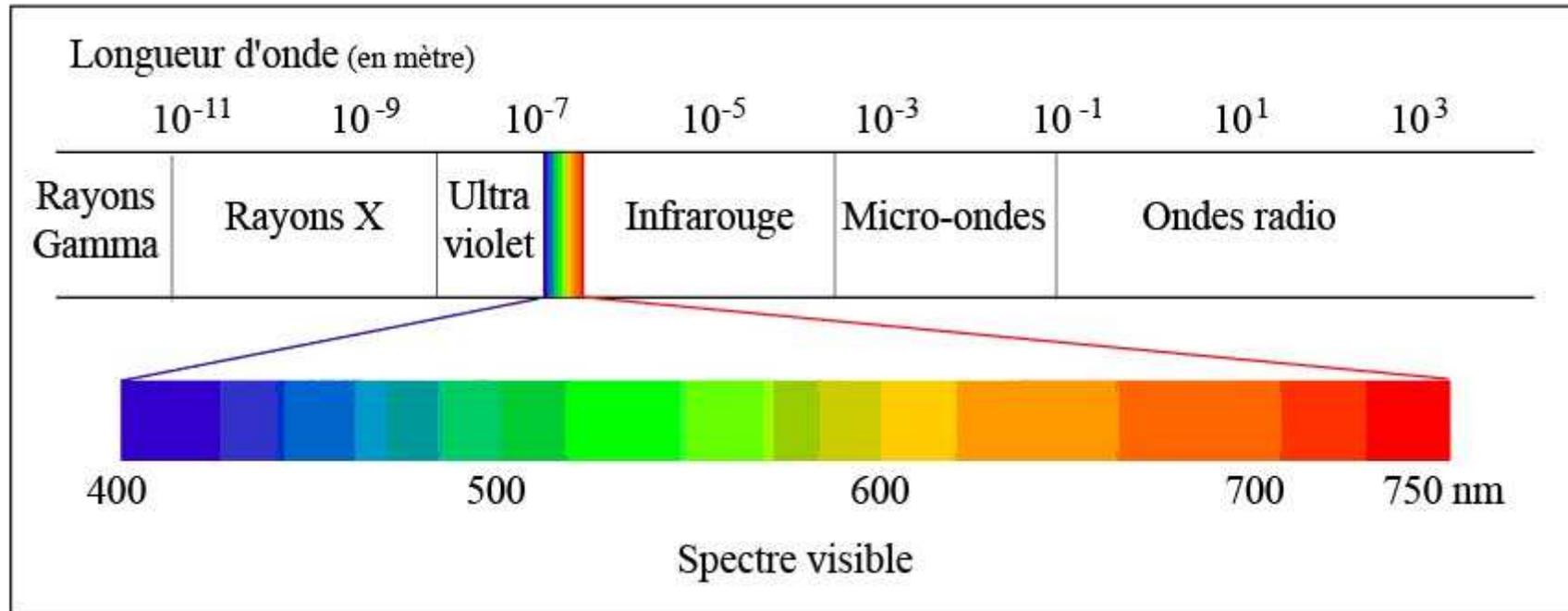
Les objets étudiés émettent ou réfléchissent du rayonnement à différentes longueurs d'onde et intensités selon leur état

FIG. 2.3 – Absorption, réflexion et transmission (Bonn et Rochon, 1993)

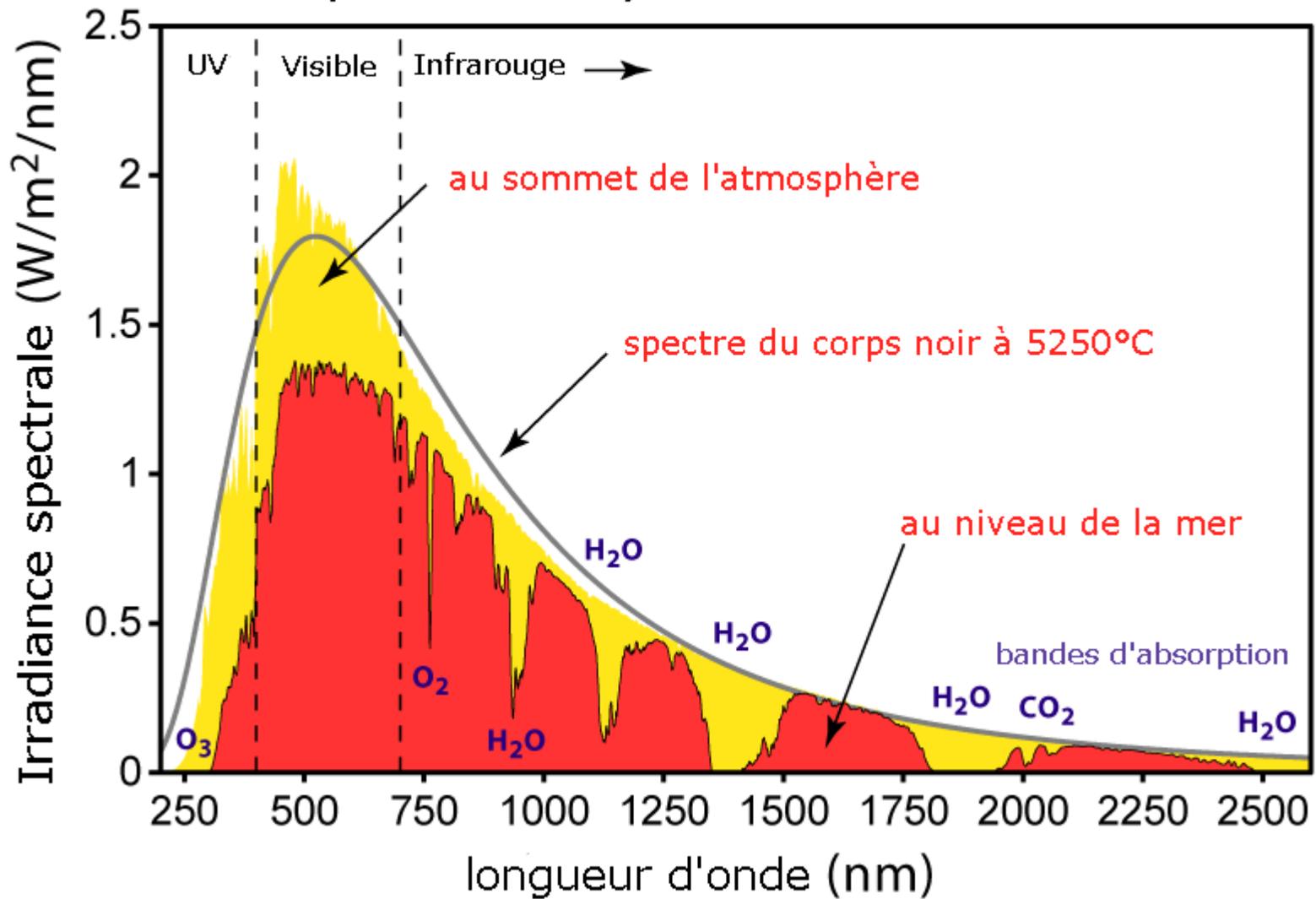
Spectre électromagnétique

Une onde électro-magnétique est caractérisée par :

- Une **longueur d'onde** : distance entre 2 crêtes
- Une fréquence : nb d'oscillation/unité de temps



Spectre du rayonnement solaire



Variables biophysiques et propriétés des cultures

Variables Biophysiques		Visible Proche Infrarouge	Proche Moyen Infrarouge	Infra-rouge thermique	Micro-ondes actives (radar)	Micro-ondes passives
Structure du couvert	LAI	+++	+++	+	++	+
	Taux de couverture	++++	++++	++	++	+
	Port foliaire	+++	+++	+	+	+
	Taille des feuilles	+	+	+	+	+
	Hauteur du couvert	-	-	-	++	-
Propriétés des feuilles	Contenu en chlorophylle	+++	-	-	-	-
	Contenu en eau	-	+++	-	+++	+++
	Température	-	-	++++	-	++
Sol	Humidité (surface)	-	+	+	++	+++
	Rugosité	+	+	-	++	+
	Résidus de récolte	+++	++	-	-	-
	Matière organique	++	++	-	-	-

Tableau 1 : Variables biophysiques estimables par télédétection. Le niveau de précision et robustesse de l'estimation est indiqué par le nombre de + ("++++" précis et robuste ; "-" non estimable par télédétection).

Stress azoté

Stress hydrique

Différentes hauteurs de mesures

Au sol = Proximité



Capteurs
« manuel »



Capteurs embarqués

Aéroportés

Drones



Avions – Photos aériennes



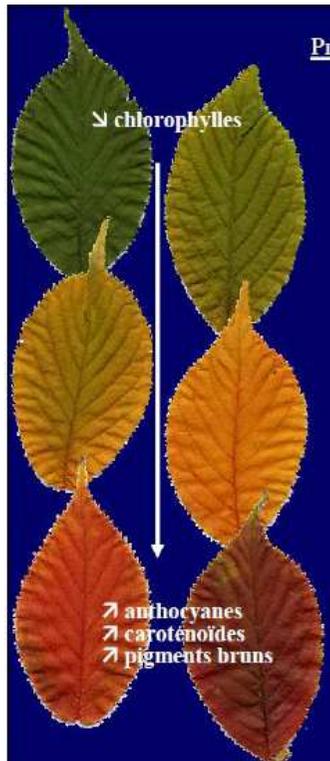
Satellites



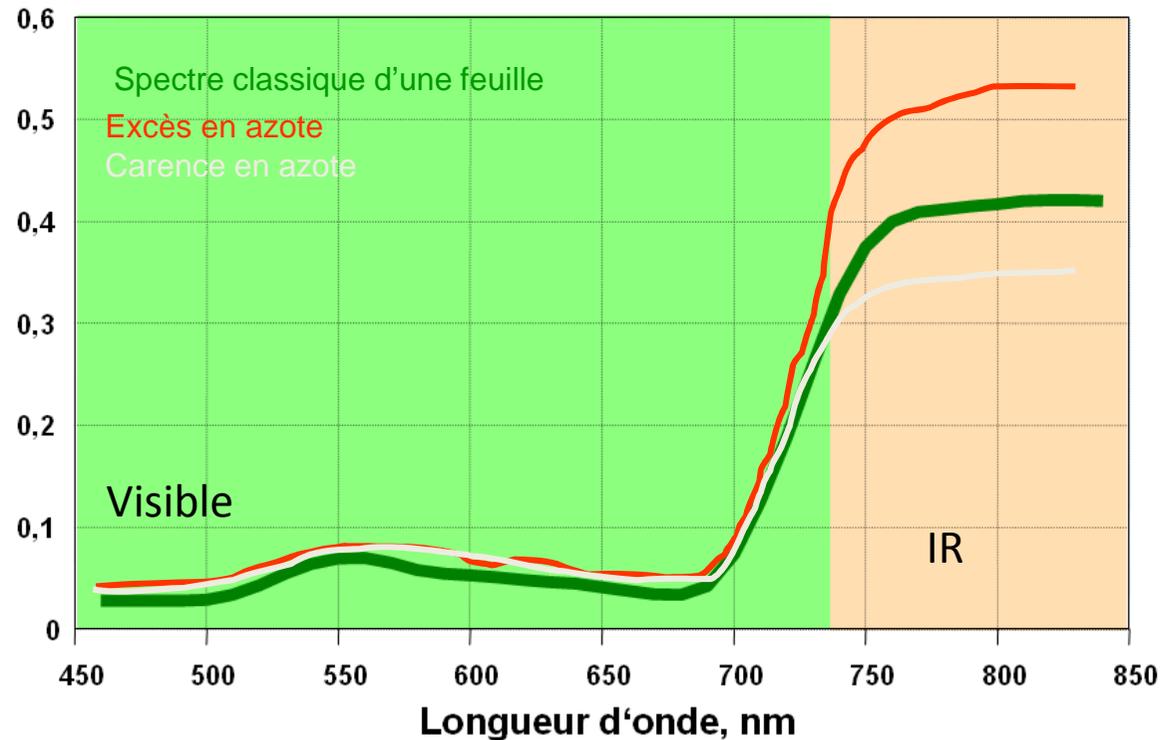
Comment déterminer l'état azoté ?

Quantité d'azote absorbée par la plante ↔ Protéines chlorophylliennes des feuilles

≠ Teneurs en pigments



Reflectance



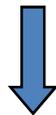
La réflectance des végétaux dépend :

- Des propriétés optiques des éléments qui les composent
- De la quantité de chacun des éléments présent dans le couvert (biomasse)
- De la façon dont ces éléments sont assemblés les uns par rapport aux autres pour former le couvert (architecture)

Stratégies pour le suivi de l'état azoté de la plante

Ajustement en temps réel Proxydetection

Mesures locales en temps réel de l'état de la culture



Ajustement de la dose à apporter en temps réel

*Ex : Hydro N-sensor
N-pilot, GreenSeeker*

Ajustement après analyse d'image Mesures aéroportées

Image à distance de la culture à un instant t



Etat de la culture



Carte de préconisation des apports



Passage de l'engin agricole à l'instant $t+1$
Modulation des apports

*Ex : Service Airinov
Projet Farmstar*

Proxidétection : Le N-Pilot, Borealis Lat



- **Réflectomètre portable** utilisable au champ pour les cultures céréalières (blé, orge)
- Mesure de la réflectance des cultures dans le spectre **visible et infrarouge**
- Estimation de la teneur en chlorophylle et la biomasse → déduction de l'état de nutrition azotée de la plante avec prise en compte du stade de croissance, de la variété et de l'objectif de rendement
- Détermination en direct d'un besoin en azote et fourniture instantanée d'une recommandation du complément d'azote minéral à épandre
- Utilisateurs : agriculteurs, conseillers agricoles
- Application smartphone et site internet : compte personnalisé consultation, archivage de rapports,
- Prix : 2200€ HT l'appareil, pas d'abonnement

Proxidétection : Le N sensor, Yara

- Capteur radiométrique embarqués sur tracteur qui mesure la réponse radiométrique de la culture sur 45 bandes spectrales comprises entre 450 et 890 nm (visible et IR)
- Mesure sur 50 m² autour du véhicule à chaque seconde
- Mesure au sol : indépendante des condition météorologiques
- Modulation en direct. Action en temps réel.

Tarifs :

1 à 5 parcelles : 30 € HT / parcelle
6 à 10 parcelles : 25 € HT / parcelle
+ de 10 parcelles : 20 € HT / parcelle





Proxidétection : Le GreenSeeker, Trimble

Principe du GreenSeeker

- 1) Mesure de la réflectance (NDVI) pour identifier la variabilité de la culture
- 2) Calcul de la dose à appliquer
- 3) Modulation instantanée de la dose



- Capteur actif : émet son propre rayonnement (VR et PIR) pour s'affranchir des effets atmosphériques
- Mesure du **NDVI** (Différence Normalisée d'indice de végétation) : indice de végétation fortement corrélé avec la biomasse, information sur la vigueur de la plante et capacité à absorber l'azote.

$$NDVI = \frac{a_{nir} - a_{vir}}{a_{nir} + a_{vir}}$$

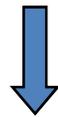
NDVI faible → stress azoté

Govaerts and Verhulst, 2010

Stratégies pour le suivi dynamique de la croissance de la plante

Ajustement en temps réel Proxydetection

Mesures locales en temps réel de l'état de la culture



Ajustement de la dose à apporter en temps réel

*Ex : Hydro N-sensor
N-pilot, GreenSeeker*

Ajustement après analyse d'image Mesures aéroportées

Image à distance de la culture à un instant t



MODELISATION

Etat de la culture



Carte de préconisation des apports



Passage de l'engin agricole à l'instant $t+1$
Modulation des apports

*Ex : Service Airinov
Projet Farmstar*

Drones



AIRINOV

L'avenir de vos terres est dans le ciel

AZOTE BLÉ - CONSEIL SIMPLIFIÉ

Objectif de rendement: **72 q/ha**
 Type de sol: **Superficiel**
 Date du vol: **21/04/2016**
 Azote absorbé moyen: **114 U/ha**
 Matière sèche moyenne: **4,0 T/ha**
 Stade estimé: **3N**

**DOSE MOYENNE
60 U/HA**

	Dose	Surface	%
	53 U/ha	31,7 ha	38
	65 U/ha	30,6 ha	36
	66 U/ha	22,0 ha	26



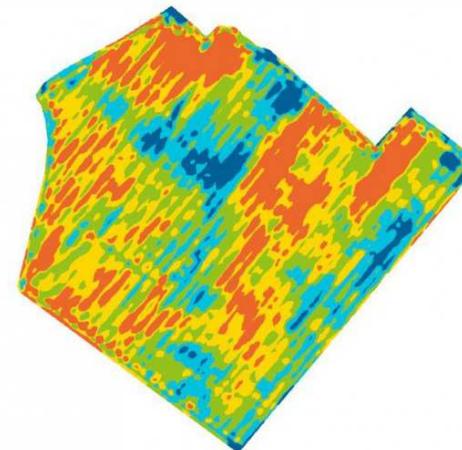
0 100 200 m

AIRINOV

© Airinov 2016
Campagne 2015 - 2016

AIRINOV

- Capteur multispectral 4 bandes : vert (550nm), rouge (660nm), red edge (735nm) et PIR (735nm)
- Indicateurs pour les cultures de blé, orge, colza et maïs : biomasse, LAI, tx de chlorophylle
- Correction du signal de réflectance grâce à un luxmètre intégré (mesure de l'intensité de la lumière du soleil)
- Résolution : 5 à 30 cm/px selon la hauteur de vol
- Vitesse de vol : 60 km/h, autonomie 45min
- 3ha/min, 375ha/j en moyenne



0 100 200 m

AIRINOV

© Airinov 2016
Campagne 2015 - 2016

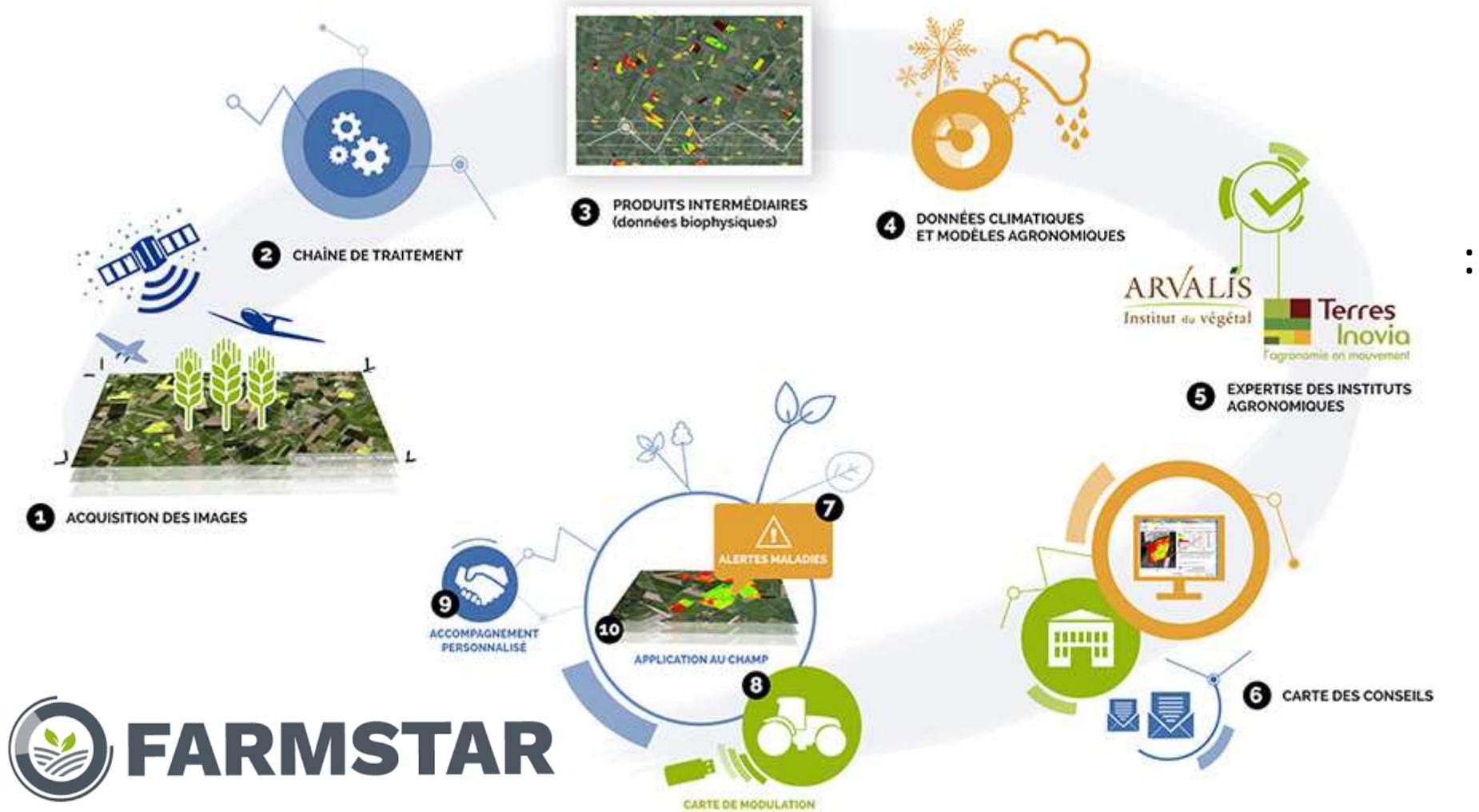
AIRINOV

Date du vol: **21/04/2016**
 Azote absorbé moyen: **114 U/ha**
 Matière sèche moyenne: **4,0 T/ha**
 Stade estimé: **3N**

**DOSE MOYENNE
60 U/HA**

	Dose	Surface	%
	40 U/ha	4,0 ha	5
	49 U/ha	12,7 ha	15
	57 U/ha	25,4 ha	30
	65 U/ha	25,4 ha	30
	72 U/ha	16,8 ha	20

Images satellites





Conseils pour le colza

Conseils pour l'orge

Conseils pour le blé

Préconisation 3ème Apport d'Azote

Émile Durant

Parcelle : Petit Query

Surface : 10,00 ha

Variété : TREMIE

Semis : 25/11/2001

Carte de préconisation

Interprétation au 13/05/2002
(date du vol)

Dose	% Surface	% Surface cumulée
≤ 30U	4.3	4.3
40U	17.9	22.2
50U	38.0	60.3
60U	23.6	83.9
70U	6.1	90.0
≥ 80U	10.0	100.0

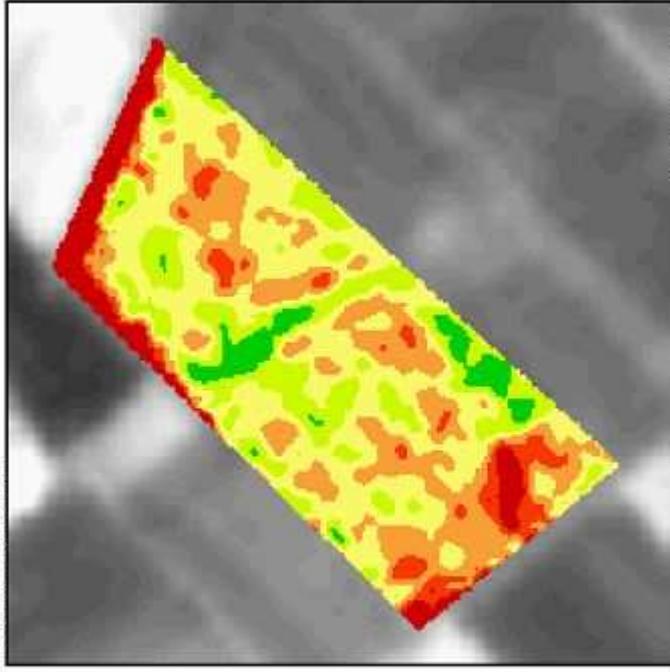
Dose recommandée :

60U

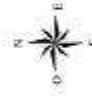
Commentaire : Dose recommandée pour satisfaire environ 80% de la parcelle, sous réserve qu'il n'y ait pas eu d'apport d'engrais dans les 20 jours précédant l'interprétation.

i Prévion du stade suivant : stade DF le 19/05/2002

4°26'54.2" E 149°16'25.3" N



Projection : Lambert-9 décalée



0 100m

Code : 267_02

juillet

carrière

nt



Plan

- 1. Agriculture de précision : historique, définition, concept**
- 2. Les système de positionnement géographique**
- 3. Connaissance des sols**
- 4. Analyse des besoins de la plante**
- 5. Modulation des apports, technologies**

Autoguidage



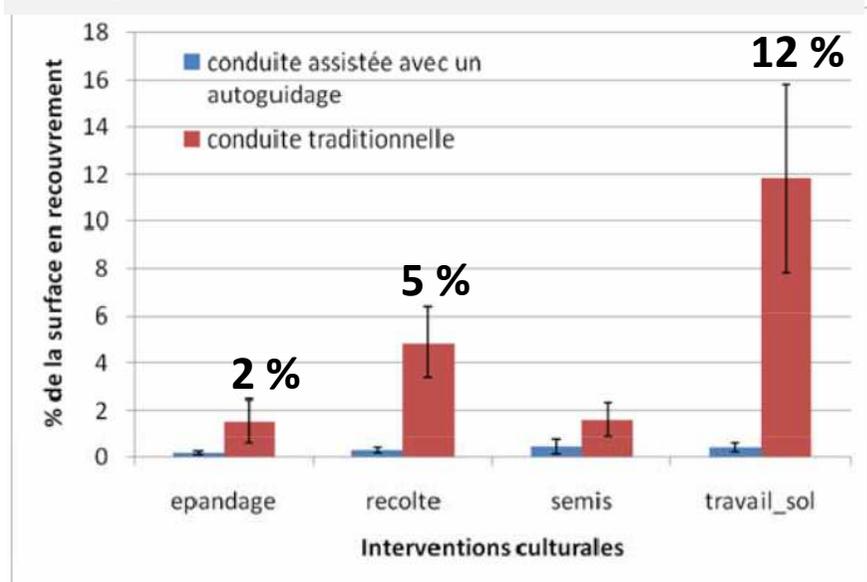
- Utilisation d'un signal GPS pour optimiser les passages des engins agricoles grâce à des **trajectoires préenregistrées** : le tracteur se dirige tout seul
- Objectifs :
 - Limiter les manques ou les **zones recouvrements entre les différents passages de tracteur**
 - **Se concentrer sur l'épandage (modulation)**
- Système hydraulique (précision 2 cm) ou électrique (précision 4 cm)

Etude Arvalis (2014)

- Gain de 10 à 23 €/ha/an (pour une exploitation de 300 ha → 3000€/an)
- Rentabilité variable selon les cultures
- Temps de retour sur investissement : 3 à 5 ans

% recouvrement en conduite manuelle comparée à un autoguidage (1624 ha).

Arvalis, 2014.



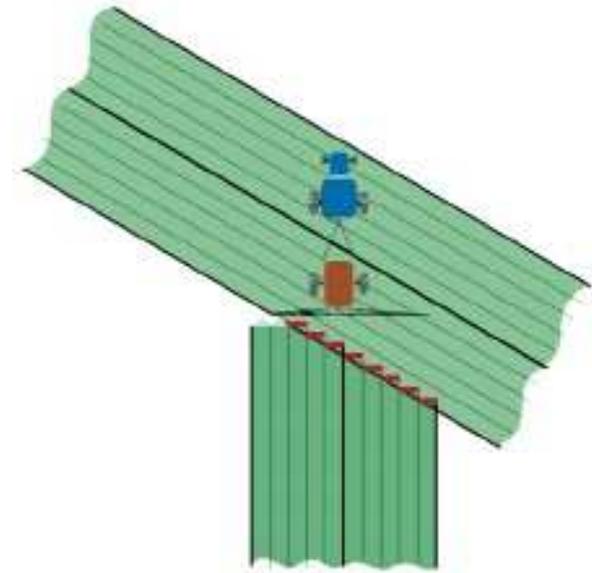
Coupure de tronçon

Principe : Fermeture et ouverture automatiques des tronçons de la rampe du pulvérisateur ou épandeurs

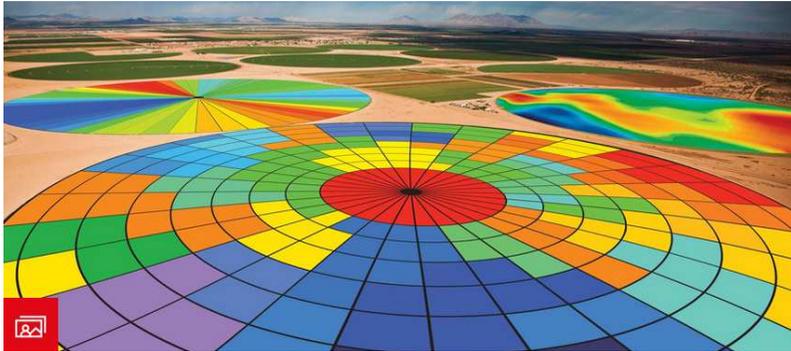
- Permet d'éviter les zones de recouvrement (zones déjà traitées : fourrières, pointes)
- Permet de moduler les apports
- Permet traitements de nuit

Coût de l'équipement (rampe) : 2000 à 4000 €

Economies : gain de 0,3 à 5 % de surface traitée ou semée suivant la géométrie et la surface de la parcelle (Desbourdes, 2010)



Irrigation de précision



VALLEY 

The Leader in Precision Irrigation

Système de Variation Raisonnée de l'Irrigation (VRI, Variable rate Irrigation)

Principe : Modulation de la quantité d'eau appliquée selon des secteurs ou zones « prescrites » à partir de d'informations topographiques, de données sol, de données sur le rendement (diagnostic agronomique) etc...

2 systèmes :

- VRI-vitesse : irrigation par secteurs, variation de la vitesse d'avancement du pivot selon la quantité à apporter
- VRI-zone : irrigation par zones, changement de la cadence des impulsions des arroseurs pour chaque zone de gestion

Objectifs :

- Optimiser la quantité d'eau (« la bonne dose au bon endroit »)
- Limiter les pertes et ses conséquences économiques et environnementales (protection de la ressource eau et du sol : ruissèlement/érosion)

Les bénéfices que pourrait apporter l'AGP (STOA, 2016)

Des bénéfices économiques et sociétaux

- Augmentation de la compétitivité des exploitations agricoles (grandes exploitations)
- Augmentation de la taille des exploitations, diminution du nombre
- Diminution des emplois dans les exploitations (en particulier main d'œuvre peu qualifiée)
- Nécessité d'augmenter le nombre d'agriculteurs qualifiés en TIC
- Opportunités de créations d'entreprises dans les chaînes agro-alimentaires : industrie des capteurs, TIC, machinisme)
- Pourrait contribuer à faire diminuer la désertification des zones rurales (création d'entreprise et emplois hautement qualifiés)
- Production de « plus avec moins » = gain environnemental et donc économique
- De nouvelles interactions sociales (corps de métiers, parité, disciplines...)
- Amélioration de la qualité de vie des agriculteurs : diminution des tâches répétitives et difficiles

Les bénéfices que pourrait apporter l'AGP (STOA, 2016)

Des bénéfices environnementaux

Technique	Bénéfices attendus
Guidage GPS	Réduction tassement des sols et émissions de CO2
Contrôle des pulvérisateurs et distribution	Prévention/élimination de la contamination directe des eaux de rivière Réduction des pollutions des eaux souterraines Réduction des émissions d'ammoniac
Irrigation de précision	Meilleure gestion consommation d'eau douce Prévention engorgements hydriques
Détection/cartographie des mauvaises herbes	Réduction herbicides
Détection des maladies	Réduction pesticides
Cartographie de l'azote dans le sol	Réduction de l'azote résiduelle dans le sol

Limites, difficultés de l'AGP

- **Techniques**
 - Problèmes de compatibilités entre appareils (CF. norme ISOBUS)
 - Nécessité de faire des campagnes de calage des mesures : capteurs utilisés intégrateurs
 - Risques d'erreurs dans l'interprétation des informations : incertitudes sur les indicateurs agronomiques issus de modélisations
- **Humaines**
 - Besoin de faire évoluer les compétences : technologiques (robotique, traitement de données, informatique, TIC....)
 - Modification de l'organisation du travail
 - Besoins d'experts pour valider les mesures/conseillers : sentiment de dépossession des agriculteurs
 - Quid des travailleurs saisonniers ? (4 millions en Europe)
- **Economiques**
 - Investissements au départ important, rentabilité encore difficile à évaluer
 - Matériel adapté à la gestion de grandes/très grandes parcelles en agriculture intensive (effet – de ce type d'agriculture)

Protocole de communication Isobus



- Norme Internationale (ISO 11783) pour les agro-équipements, adoptée par la filière développée depuis 2001 et structurée par un réseau de 150 constructeurs agricoles (AEF, Agricultural industry Electronics Foundation) depuis 2008 afin de fiabiliser l'outil.
- Norme universelle de communication électronique permettant de l'interopérabilité électronique entre les différents outils.
- En pratique : un terminal est installé sur le tracteur et contrôle tous les outillages compatibles ISOBUS.
- Elle permet :
 - Le « plug and play »
 - Une interface standardisée et compatible entre le tracteur et les équipements associés
 - Des échanges de données Exemple : une carte de préconisation avec un appareil de modulation

Volet économique

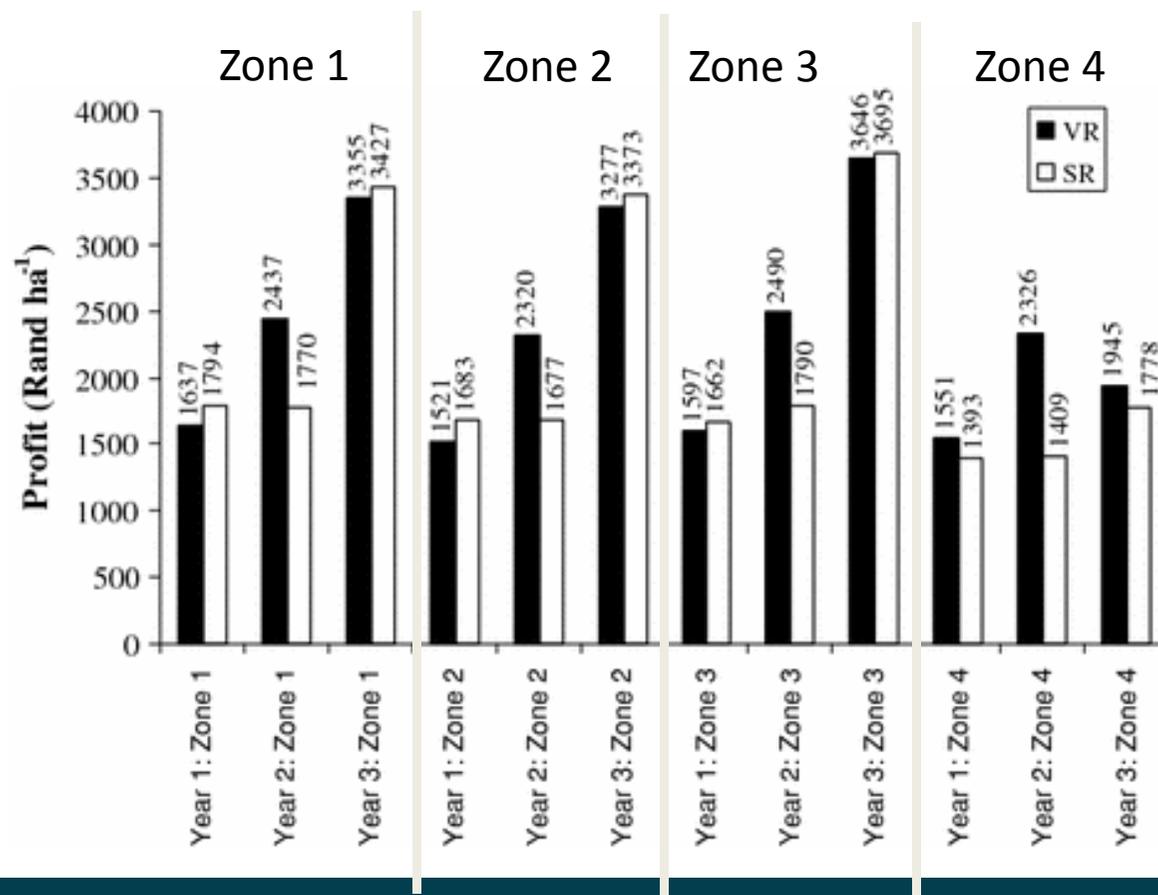
Precision Agriculture, Maine et al., 2010

Récolte de maïs dans une ferme sud-africaine

3 années d'essai : Year 1 (2002-2003) - Year 2 (2003-2004) - Year 3 (2004-2005)

2 modalités d'apport d'azote : VR = variable rate - SR = single-rate

Zone 1 -> zone 4 : potentiel de récolte de plus en plus élevé

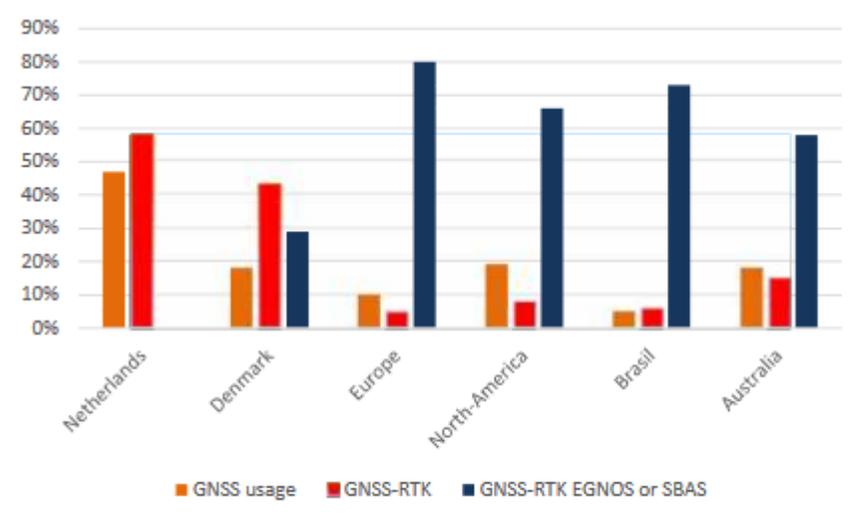


- Effet « année » marqué : VR pas toujours plus rentable que SR

- Zone 4 toujours plus rentable en VR

Agriculture de précision en Europe, Rapport du parlement européen Aout 2016

- Utilisation plus massive depuis les années 2000 avec le développement d'outils internet (plateforme, gestion des données, applications)
- Adoption de l'AGP plus forte pour les pays du Nord-Ouest de l'Europe
- Pratique la plus commune : 10% des fermes européennes utiliseraient le guidage automatique en 2012/2013 (Van des Wal, 2013), 47% aux Pays-Bas : réduction de 5 à 10% des intrants
- Estimation du marché de l'AGP en Europe par un consultant à 400M€ fin 2014, prévision pour 2020 = 1000M€. Marché en hausse.



Source: Van der Wal, 2015

*RTK: Real Time Kinematic; EGNOS: European Geostationary Navigation Overlay Service; SBAS: Satellite Based Augmentation System

Utilisation pour d'autres types de production

Figure 12. Selective broccoli harvesting with sensor technology on harvester



Source: Blok et al., 2015

Figure 13. Example of feeding robot on dairy farm



Figure 11. Sensor technology used on machines for selective weed control and fenotyping



Source: Pekkeriet et al., 2013.



Le Slugbot

Conclusion

Agriculture de précision = Concept de gestion de l'agriculture moderne qui utilise des techniques numériques pour contrôler et optimiser les processus de production agricole (STOA, 2016)

Avantages

- Gains économiques (limitation des intrants)
- Gain pour l'environnement
- Amélioration des conditions de travail
- Un marché économique pour les constructeurs agroéquipements

Limites

- Requière des compétences/temps apprentissage
- Manque de données globales sur les avantages : dépend de nombreux facteurs
- Adapté à la conduite de grandes parcelles
- Incompatibilité des outils
- Calibration des capteurs
- Tendance à faire diminuer les emplois agricoles

Une agriculture de demain :

- Importance des robots, intelligence artificielle
- La « révolution numérique » : Amélioration, augmentation de l'utilisation des capteurs
- La montée des drones

LE 4 POUR 1000 LA SÉQUESTRATION DU CARBONE DANS LES SOLS POUR LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE ET LE CLIMAT

LA QUANTITÉ DE CARBONE CONTENUE DANS L'ATMOSPHÈRE AUGMENTE CHAQUE ANNÉE DE 4,3 MILLIARDS DE TONNES

+4,3 Md t. carbone / an

↑↑
émissions de CO₂



FORÊTS ⊖

OCÉANS ⊖

ACTIVITÉS HUMAINES ⊕⊕⊕⊕

DÉFORESTATION ⊕

⊖ absorption ⊕ émission

LES SOLS DU MONDE CONTIENNENT SOUS FORME DE MATIÈRES ORGANIQUES 1 500 MILLIARDS DE TONNES DE CARBONE

absorption de CO₂ par les végétaux



stockage de carbone organique dans les sols

1500 Md t. carbone

SI ON AUGMENTE DE 4‰ (0,4%) PAR AN LA QUANTITÉ DE CARBONE CONTENUE DANS LES SOLS, ON STOPPE L'AUGMENTATION ANNUELLE DE CO₂ DANS L'ATMOSPHÈRE, EN GRANDE PARTIE RESPONSABLE DE L'EFFET DE SERRE ET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

davantage de végétaux = augmentation de l'absorption de CO₂



sols cultivés, prairies, forêts...



stockage de +4‰ de carbone dans les sols mondiaux

= des sols + fertiles
= des sols + adaptés aux effets du changement climatique

COMMENT STOCKER PLUS DE CARBONE DANS LES SOLS ?

Plus on couvre les sols, plus les sols sont riches en matière organique, et donc en carbone. Jusqu'à présent, la lutte contre le réchauffement climatique s'est beaucoup focalisée sur protection et la restauration des forêts. En dehors des forêts, il faut favoriser le couvert végétal sous toutes ses formes.



Ne pas laisser un sol nu et moins travailler le sol ; ex. : les techniques sans labour



Introduire davantage de cultures intermédiaires, intercalaires et de bandes enherbées



Développer les haies en bordure des parcelles agricoles et l'agroforesterie



Optimiser la gestion des prairies, par exemple allonger la durée de pâturage



Restaurer les terres dégradées, par ex. les zones arides et semi arides 88 du globe