



Utilisation de l'imagerie hyperspectrale pour la cartographie numérique des propriétés des sols en zone méditerranéenne

Cécile Gomez et Philippe Lagacherie,

*1: IRD Laboratoire d'étude des Interactions Sol Agrosystème Hydrosystème
campus Supagro INRA Montpellier ,
2 INRA, Laboratoire d'étude des Interactions Sol Agrosystème
Hydrosystème campus Supagro INRA Montpellier*



Contexte scientifique

- Capacités limitées d'investigation de la couverture pédologique
- Nombreux travaux sur les analyses de sol par spectrométrie au laboratoire

■ Développement de la spectrométrie

- Capteurs aéroportés (HYPERION, AVIRIS-NG)
- Applications en géologie planétologique (Poulet et al, 2002)

■ Récentes applications en cartographie des sols

- Estimations directes de propriétés de sol de surfaces (Ben Dor, 2002, Chabrilat et al, 2002, Ben Dor et al, 2008, Lagacherie et al, 2008, Gomez et al, 2008, Stevens et al, 2010)
- Nouvelle donnée spatiale pour prédire propriétés « profondes » des sols

Table 1

A review of the literature comparing quantitative predictions of various soil attributes using a multivariate statistical technique and spectral response in the ultra violet (UV), visible (VIS), near infrared (NIR) and mid infrared (MIR) regions of the electromagnetic spectrum

Soil attribute	Spectral region	Spectral range (nm)	Multivariate method	$r_{\text{calc}} r_{\text{val}}$	RMSE	R^2	Authors
Acid (exch.), cmol/kg	VIS-NIR	400-2498	PCR (11)	30 119	24.4	0.65	Cheng et al. (2001)
Al (exch.), cmol/kg	MIR	2500-25,000	PLSR	183		0.64	Jarvik et al. (1998)
Biomass (N), mg/kg	NIR	1100-2300	PLSR (8)	180 x-val		0.71	Reeves and McCarty (2001)
Biomass (N), mg/kg	NIR	1100-2498	PLSR (6)	120 59		0.79	Reeves et al. (1999)
Biomass, g/kg	MIR	2500-25,000	PLSR	23		0.69	Jarvik et al. (1998)
Biomass, mg/kg	VIS-NIR	400-2498	PCR (9)	30 119	389.71	0.60	Cheng et al. (2001)
C (inorg.), g/kg	MIR	2500-25,000	PLSR (16)	177 60		0.98	McCarty et al. (2002)
C (inorg.), g/kg	NIR	1100-2498	PLSR (19)	177 60		0.87	McCarty et al. (2002)
C (inorg.), g/kg	VIS-NIR	400-2498	PLSR (6)	76 32		0.15	Cheng and Laird (2002)
C (total), g/kg	MIR	2500-25,000	PLSR (17)	177 60		0.95	McCarty et al. (2002)
C (total), g/kg	NIR	1100-2498	PLSR (16)	177 60		0.86	McCarty et al. (2002)
C (total), g/kg	NIR	1100-2498	PLSR (7)	120 59		0.96	Reeves et al. (1999)
C (total), g/kg	VIS-NIR	400-2498	PLSR (5)	76 32	0.65	0.91	Cheng and Laird (2002)
C (total), g/kg	VIS-NIR	400-2498	PCR (7)	30 119	0.79	0.87	Cheng et al. (2001)
C, %	UV-VIS-NIR	250-2450	PLSR (6)	59 x-val	0.06		Walvoort and McBratney (2001)
C:N ratio	VIS-NIR	400-2498	PLSR (6)	76 32	0.21	0.88	Cheng and Laird (2002)
CEC, cmol(+) /kg	NIR	2500-25,000	PLSR	183		0.88	Jarvik et al. (1998)
CEC, cmol(+) /kg	MIR	2500-25,000	MRSA (63 bands)	35 56		0.64	Ben-Dor and Banin (1995)
CEC, mmol(+) /kg	NIR	400-2500	PCR	12 140		0.67	Islam et al. (2003)
CEC, cmol(+) /kg	VIS-NIR	400-2498	PCR (8)	30 119	38.2	0.81	Cheng et al. (2001)
CEC, cmol(+) /kg	VIS-NIR	350-2500	MARS	493 247	38	0.88	Shepherd and Walsh (2002)
CEC, mmol(+) /kg	UV-VIS-NIR	250-2500	PCR	12 140		0.64	Islam et al. (2003)
Σ exch. cations, cmol(+) /kg	MIR	2500-25,000	PLSR	183		0.84	Jarvik and Sjöenstad (1995)
Ca, mmol(+) /kg	NIR	400-2500	PLSR	12 140		0.72	Islam et al. (2003)
Ca, g/kg	VIS-NIR	400-2500	modified PLSR	309		0.90	Cozzolino and Moran (2003)
Ca, mmol(+) /kg	VIS-NIR	350-2500	MARS	493 247		0.88	Shepherd and Walsh (2002)
Ca (exch.), cmol(+) /kg	VIS-NIR	400-2498	PCR (12)	30 119	40	0.71	Cheng et al. (2001)
Ca, mmol(+) /kg	UV-VIS-NIR	250-2500	PCR	12 140		0.67	Islam et al. (2003)
Carboneo, %	MIR	2500-25,000	PLSR	183		0.95	Jarvik and Sjöenstad (1995)
Carboneo, %	NIR	1000-2500	MRSA (25-3113 bands)	22 47		0.69	Ben-Dor and Banin (1995)
Ca, mg/kg	VIS-NIR	400-2500	modified PLSR	310		0.82	Cozzolino and Moran (2003)
Ca (Mehlich III), mg/kg	VIS-NIR	400-2498	PCR (14)	30 119	5.37	0.25	Cheng et al. (2001)
EC, dS/m	MIR	2500-25,000	PLSR	88		0.23	Jarvik et al. (1998)

(Viscarra Rossel, 2006)

Projet DIGISOL-HYMED: Cartographie Numérique des Sols par imagerie hyperspectrale pour la modélisation environnementale en rég. méditerranéenne



■ Projet ANR « blanc » 2009-2012



■ Partenaires



INRA IRD LISAH Montpellier, INRA EMMAH Avignon, INRA BioSp Avignon



INAT, CNCT, ENIT (LTSIRS), Min. Agriculture et ress. Hydraul. (DG/ACTA)



Université de Sydney

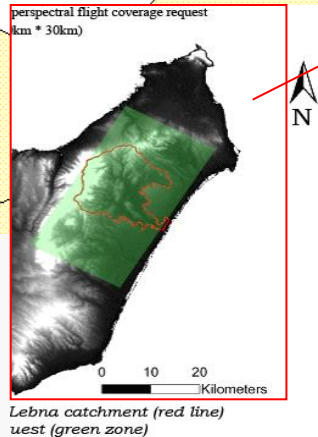
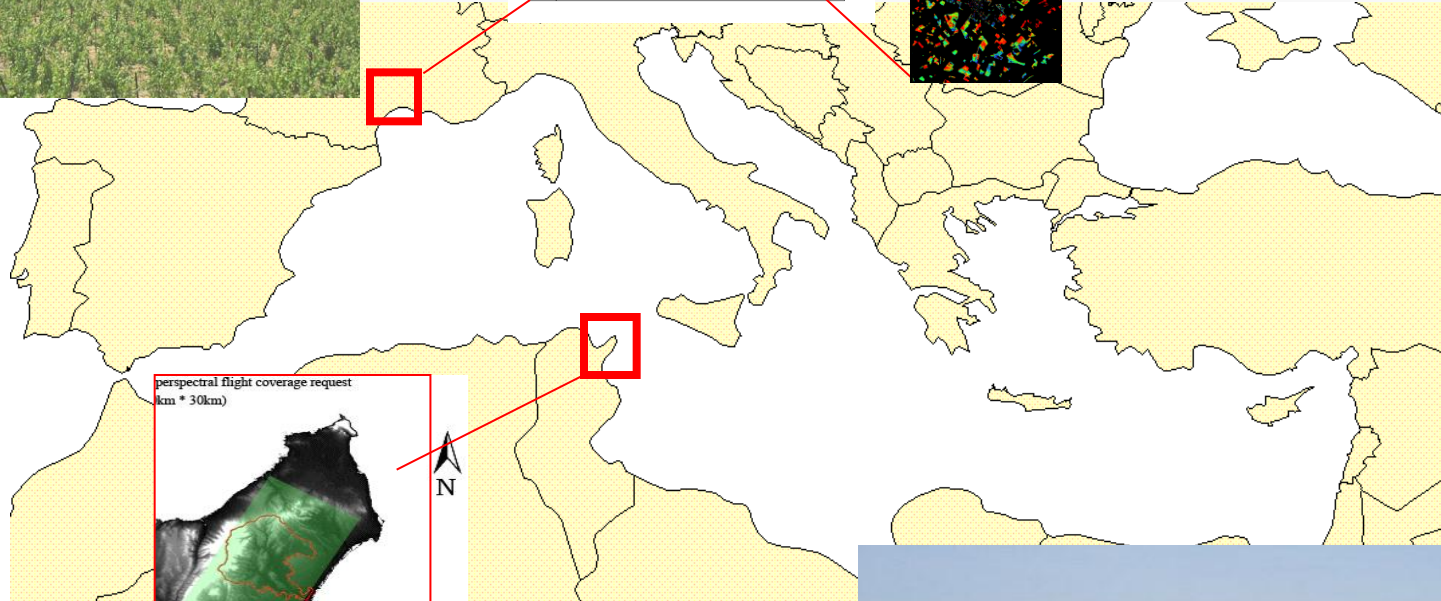
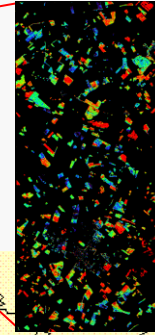
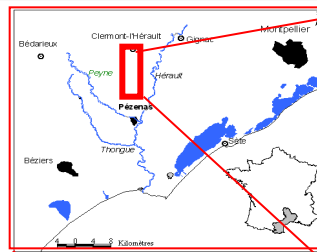
■ Programme conduit en association avec



Sanchez, P. et al, 2009 Digital Soil map of the world., Science, 325, 680-681

Terrains d'étude

Bassin versant de la Peyne (24.5 km²):



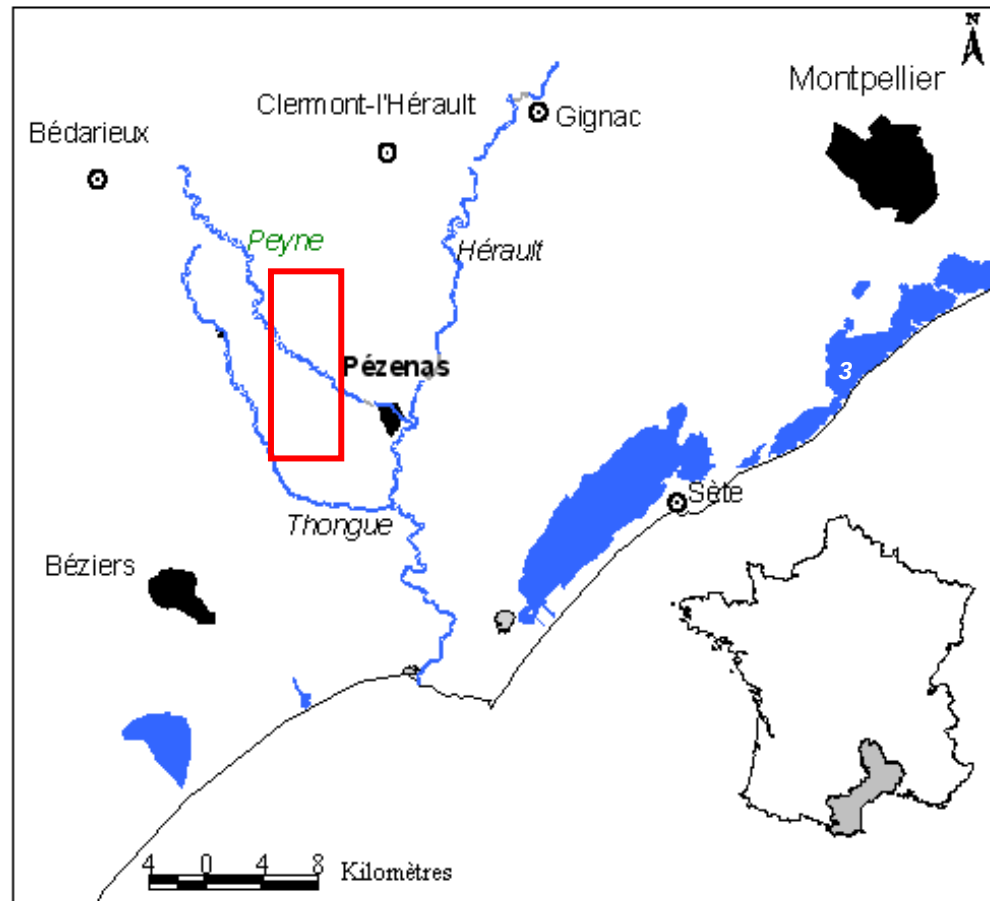
Gouvernorat de Nabeul (1 200 km²)

Plan de l'exposé

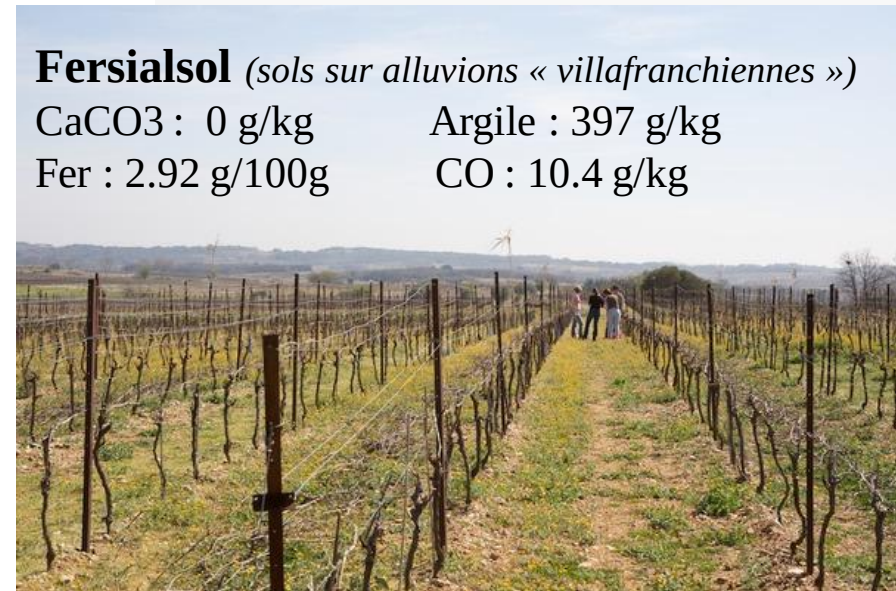


- **Introduction**
- **Site d'étude et données**
- **Prédictions de propriétés de surface de sol nu à partir d'une image hyperspectrale** (*Gomez et al, soumis à Geoderma.*)
- **Stratégies d'extension des prédictions sur surfaces végétalisées, étude du cas de l'argile :**
 - **Extraction du signal sol de pixels végétalisés par séparation de source en aveugle** (*Ouerghemmi et al, soumis à Geoderma*)
 - **Interpolation spatiale par co-krigeage par blocs** (*Lagacherie et al, soumis à Eur J. Soil Sci*)

Site d'étude



■ Zone viticole de 23.9 km² (Bassin versant de la Peyne, Hérault)



Calcosol (*sols développés sur molasse*)

CaCO ₃ : 336g/kg	Argile : 234 g/kg
Fer : 0.72 g/100g	CO : 5.4 g/kg

Calcisol (*sols sur alluvions quaternaires anciennes*)

CaCO₃ : 175g/kg Argile : 356 g/kg

Fer : 1.88 g/100g CO : 4.61 g/kg

Fluviosol (*sols sur bordures de petits cours d'eau*)

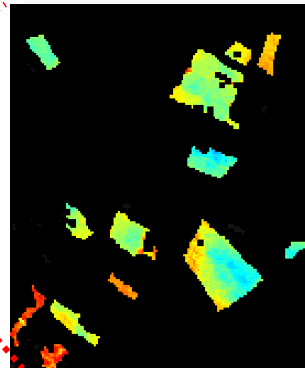
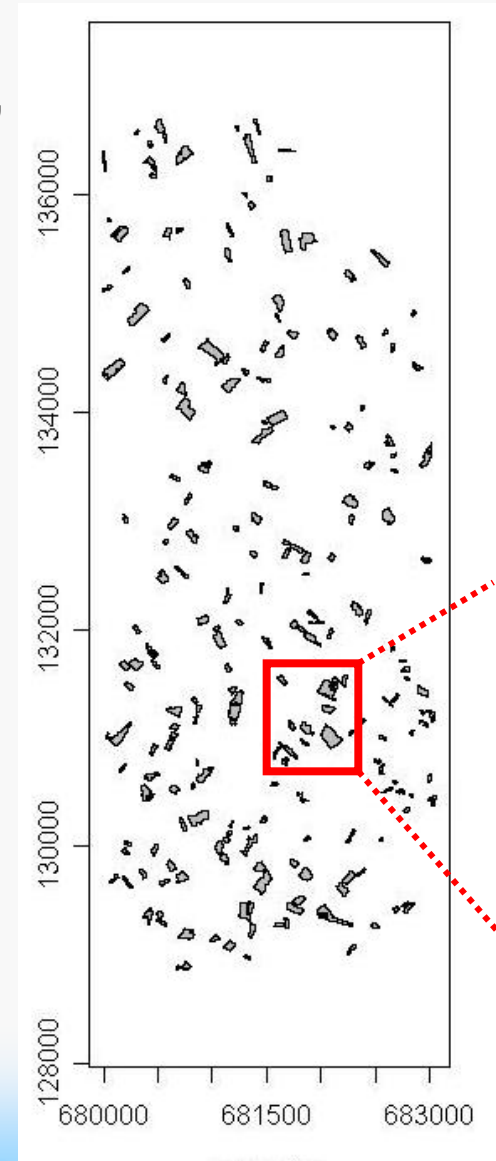
CaCO₃ : 202g/kg Argile : 125 g/kg
Fer : 0.8 g/100g CO : 18.2 g/kg

7

Image HYMAP



- Prise de vue en Juillet 2003 (conditions sèches, vignes en végétation)
- Gamme de longueur d'onde : 400nm → 2500 nm
- Résolution spectrale : 19 nm
- Résolution spatiale 5 m
- Masquée par la végétation (192 parcelles en sol nu = 3,5% de la zone d'étude)



200 sites mesurés

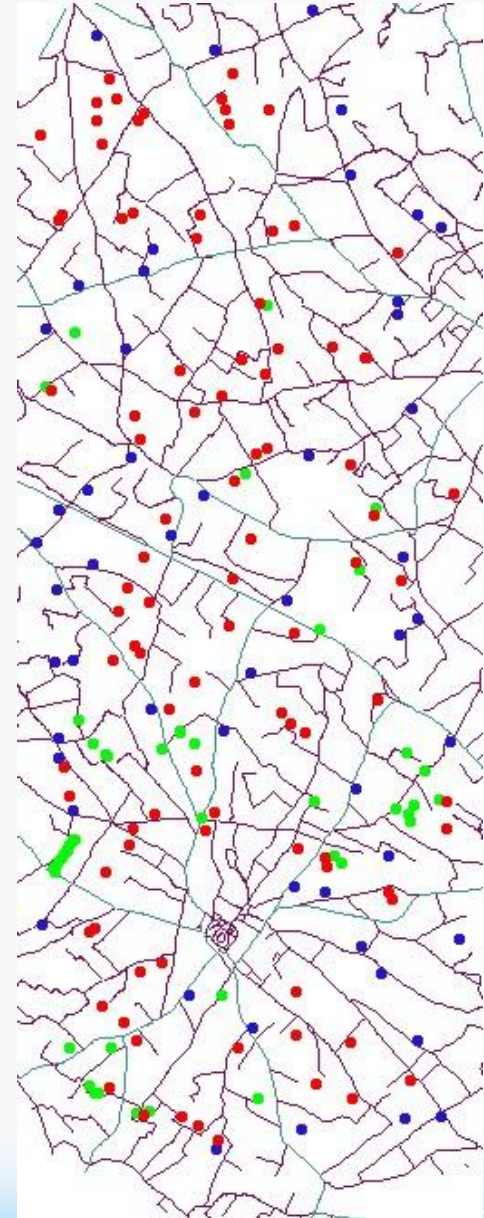


■ Parcelles de sol nu (137 sites)

- 95 sites avec analyses de sol + spectres VIS-NIR en labo (2008)
- 42 sites avec analyses de sol (2003 et 2005)

■ Parcelles de vigne (63 sites)

- 63 sites avec analyses de sol + spectres VIS-NIR en labo (2008)



Plan de l'exposé



- Introduction
- Sites d'études et données
- **Prédictions de propriétés de surface de sol nu à partir d'une image hyperspectrale** (*Gomez et al, soumis à Geoderma.*)
- **Stratégies d'extension des prédictions sur surfaces végétalisées, étude du cas de l'argile :**
 - Extraction du signal sol de pixels végétalisés par séparation de source en **aveugle** (*Ouerghemmi et al, accepté à Geoderma*)
 - Interpolation spatiale par co-krigeage par blocs (*Lagacherie et al, soumis à Eur J. Soil Sci*)

Démarche générale

■ 8 propriétés primaires du sol étudiées:

- granulométrie 3 fractions
- CaCO_3
- Fer libre
- Carbone organique
- Capacité d'échange cationique
- pH

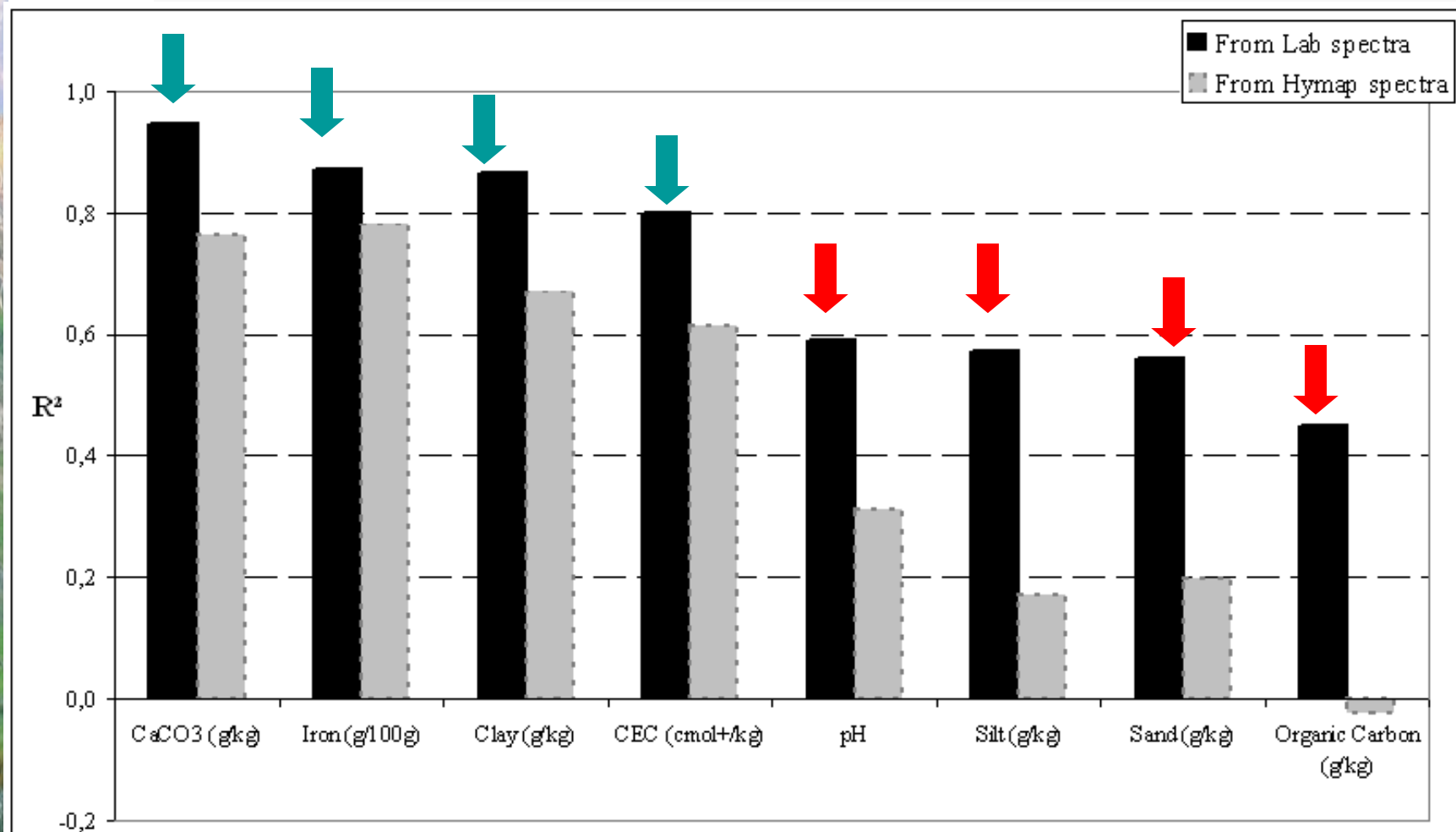
■ Prédications à partir de spectres de laboratoire et de spectres HYMAP

■ Construction des modèles de prédiction (PLSR) à partir des 95 sites de 2009

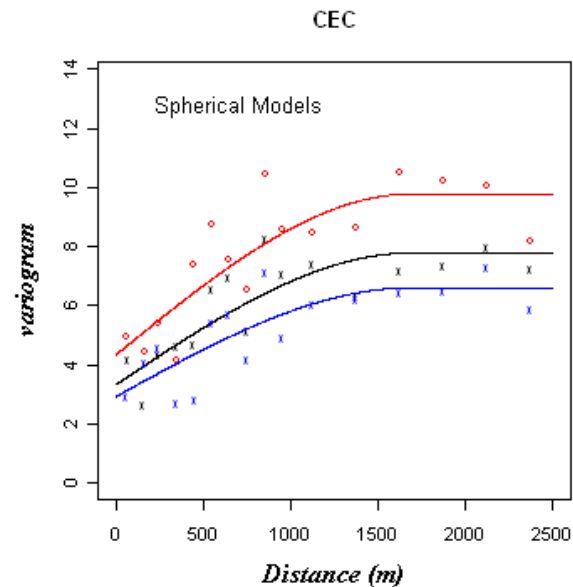
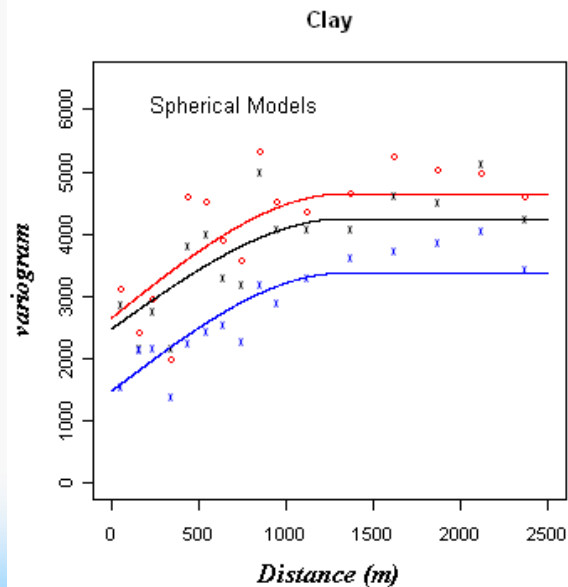
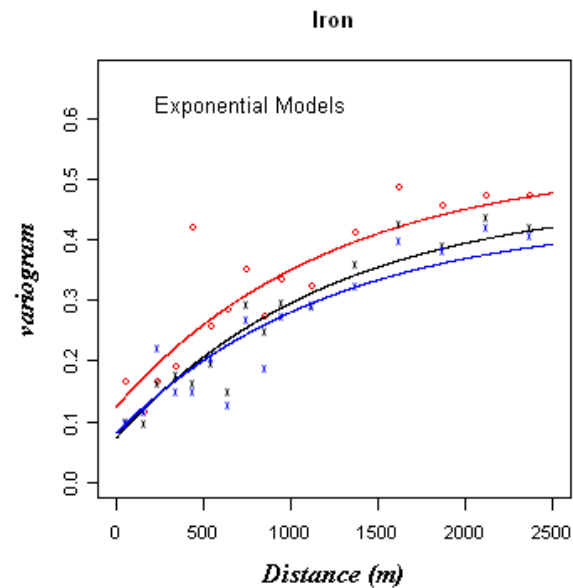
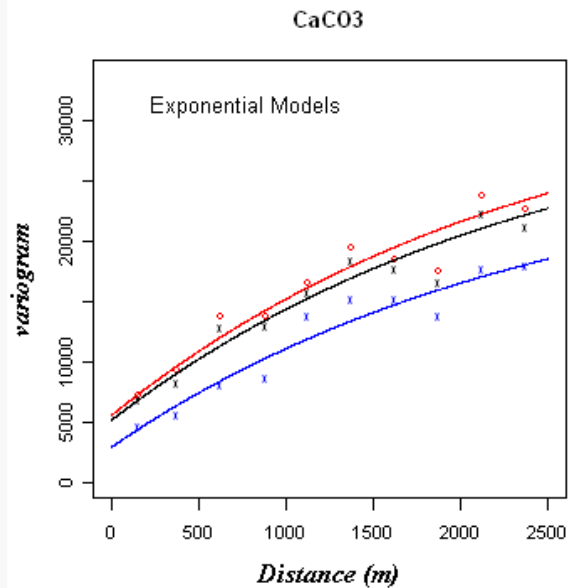
■ Validations

- locales (« leave-one-out » sur les 95 sites de 2009)
- spatiales (comparaisons de variogrammes)

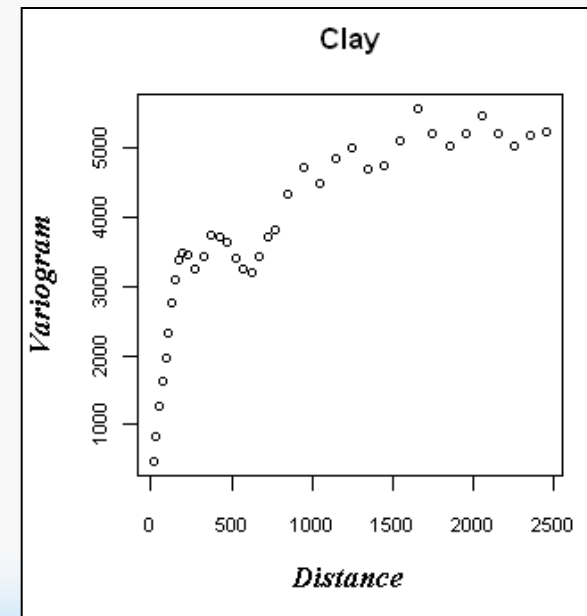
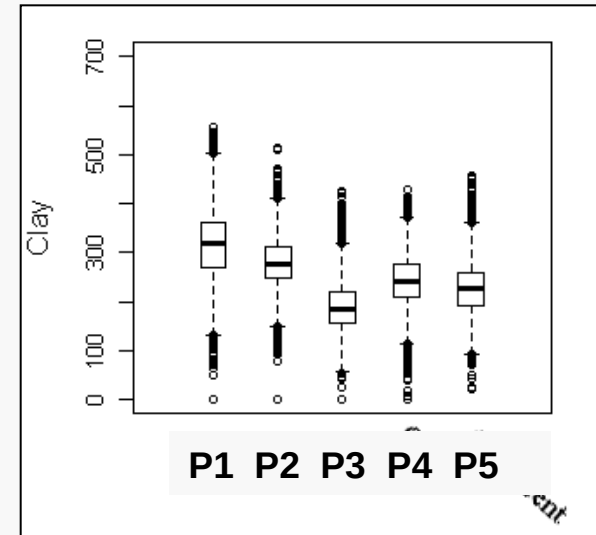
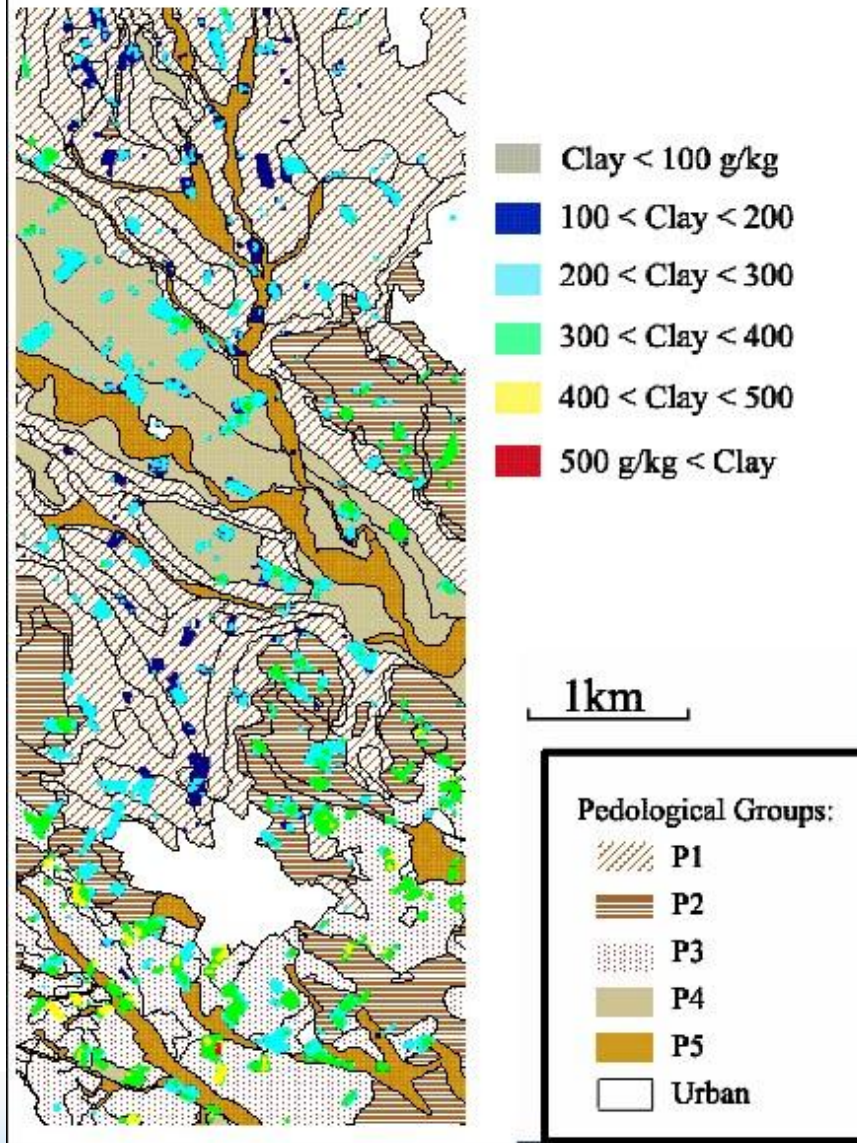
Performances des prédictions à partir de spectre labo et HYMAP (95 sites en « leave-one-out »)



Comparaison de variogrammes



Exemple d'utilisation (Argile)



Plan de l'exposé



- **Introduction**
- **Sites d'études et données**
- **Prédictions de propriétés de surface de sol nu à partir d'une image hyperspectrale** (*Gomez et al, soumis à Geoderma.*)
- **Stratégies d'extension des prédictions sur surfaces végétalisées, étude du cas de l'argile :**
 - **Extraction du signal sol de pixels végétalisés par séparation de source en aveugle** (*Ouerghemmi et al, soumis à Geoderma*)
 - **Interpolation spatiale par co-krigeage par blocs** (*Lagacherie et al, soumis à Eur J. Soil Sci*)

Démarche générale

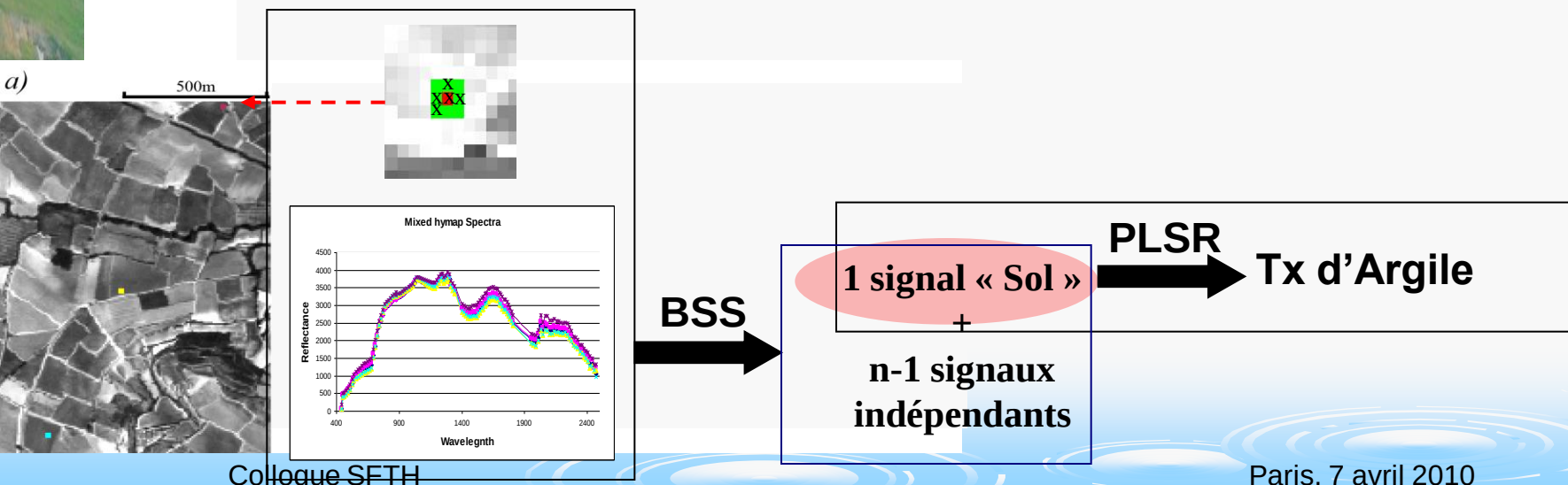
■ Données :

- 10 pixels Hymap « mixtes » (= partiellement végétalisés)

■ Algorithme de séparation de sources en aveugle BSS : InfoMax

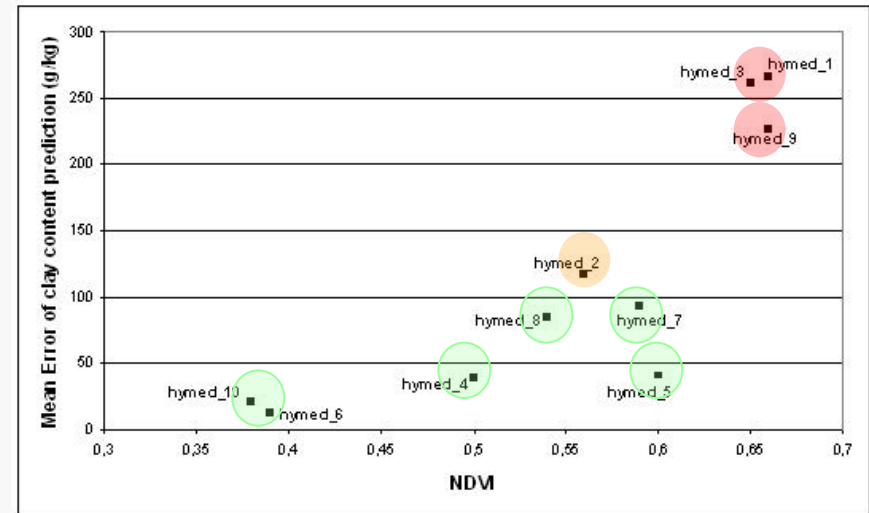
■ Double Extraction d'Information

- Sélection de n pixels Mixtes dans une grille de 3x3 pixels autour d'un pixel de réf.
- Séparation en Aveugle de n signaux « indépendants » y_i
- Identification d'un signal y_j comme étant le spectre de sol (le plus proche du spectre HYMAP moyen de sol)
- Prédiction du taux d'Argile à partir du spectre y_j assimilé au sol

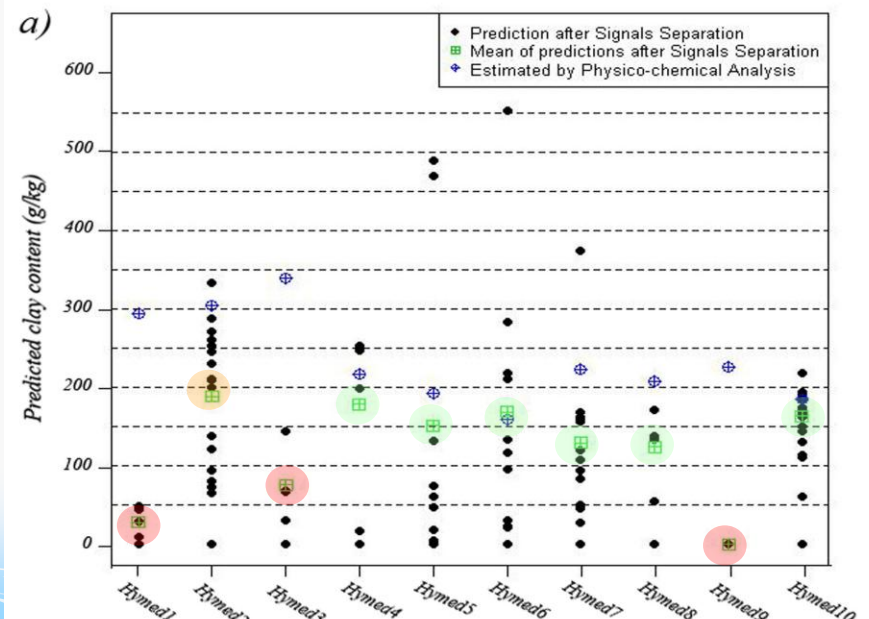


Résultats de prédictions sur des pixels Hymap Mixtes

- Bonnes prédictions d'Argile pour pixels à NDVI<0.6



- Grande variabilité des prédictions en fonction des tirages des n spectres



Plan de l'exposé



- **Introduction**
- **Sites d'études et données**
- **Prédictions de propriétés de surface de sol nu à partir d'une image hyperspectrale** (*Gomez et al, soumis à Geoderma.*)
- **Stratégies d'extension des prédictions sur surfaces végétalisées, étude du cas de l'argile :**
 - **Extraction du signal sol de pixels végétalisés par séparation de source en aveugle** (*Ouerghemmi et al, soumis à Geoderma*)
 - **Interpolation spatiale par co-krigeage par blocs** (*Lagacherie et al, soumis à Eur J. Soil Sci*)

Démarche générale



■ Données

- 200 sites avec mesures d'argile
- 192 parcelles de sol nu avec un estimateur spectrométrique du taux d'argile (CR_{2206}) ($R^2 = 0.58$)

Lagacherie et al, 2008

■ Principe :

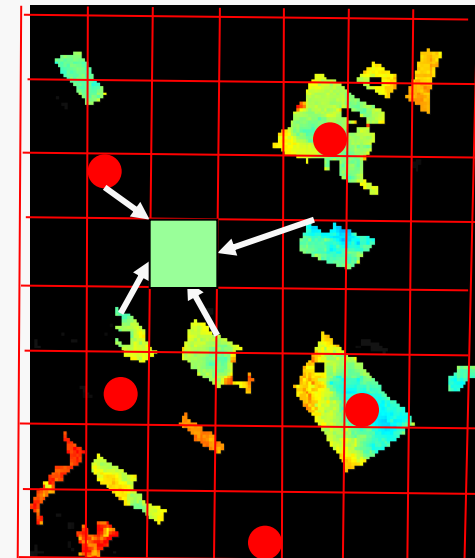
- Interpolation et agrégation spatiale

■ Outil :

- Cokrigage par blocs (R)

■ Stratégie d'estimation d'erreurs de spatialisation

- Validation des valeurs et erreurs prédites sur sites ponctuels par cokrigage
- Erreur sur bloc $\approx$ variance d'erreur estimée par cokrigage par block



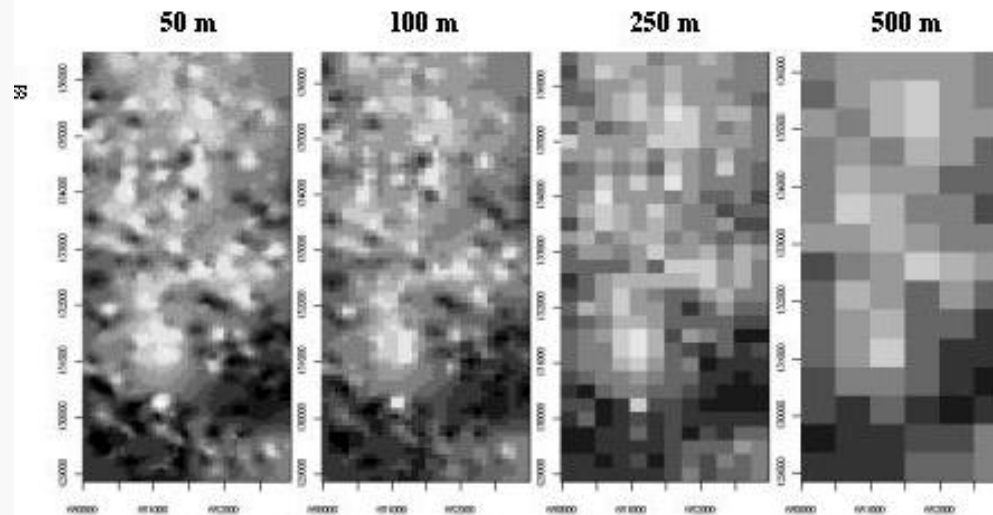
● Points mesurés

□ Bloc concerné par prédiction

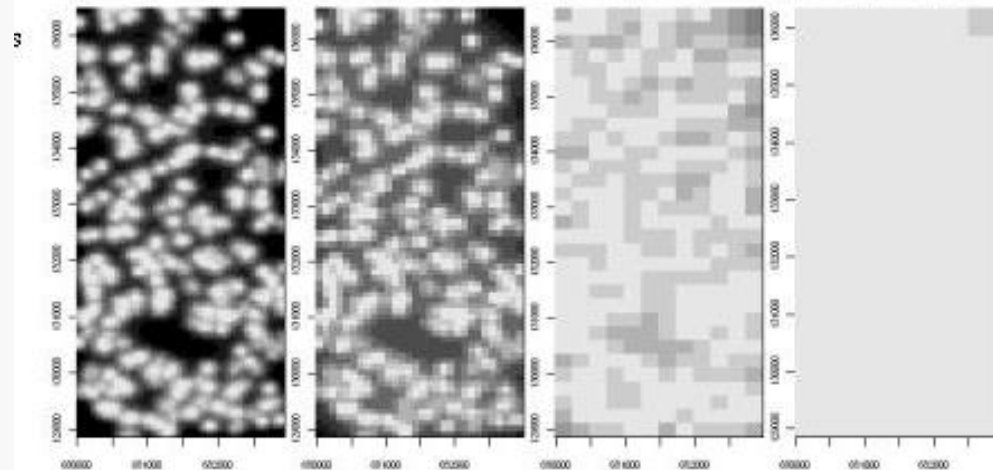
Co-krigeage par bloc à différentes résolutions spatiales



**Taux
d'argile**



**Erreur
estimée**



RMSEP

49 g/kg

46g/kg

33g/kg

22g/kg

R²

0.54

0.49

0.62

0.74

Conclusions - perspectives



- L'imagerie hyperspectrale peut être une source d'information importante pour la cartographie des sols méditerranéens
- Transposition de l'approche sur terrain Tunisien
- Extension de l'imagerie hyperspectrale au
- Valeur ajoutée de la cartographie numérique hyperspectrales
 - Spatialisation de l'érodibilité des sols
 - Spatialisations des bilans hydriques

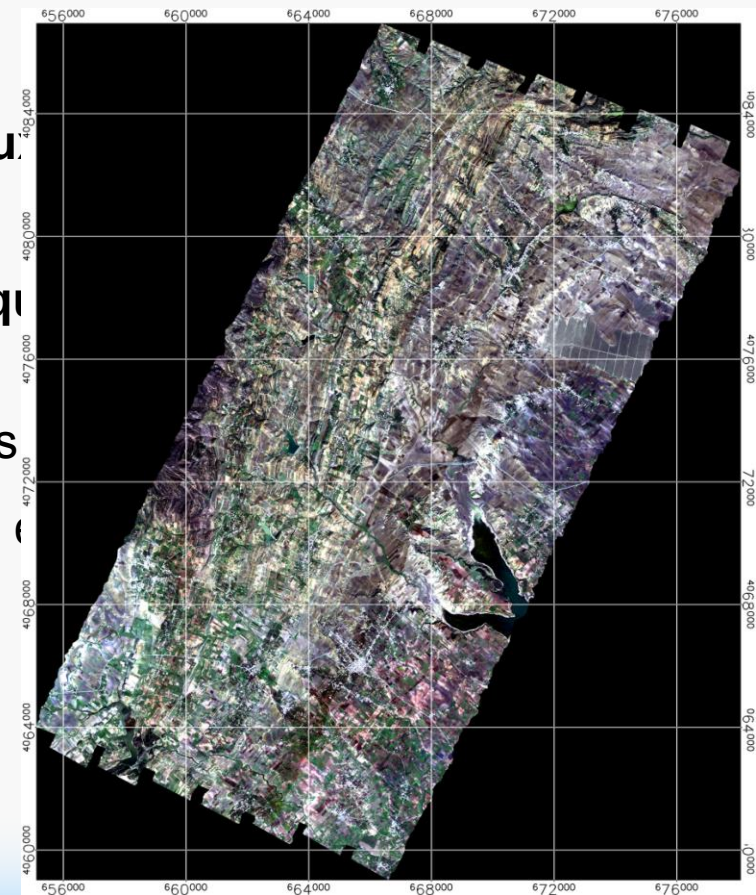


Image AISA sur Cap-Bon (Tunisie)