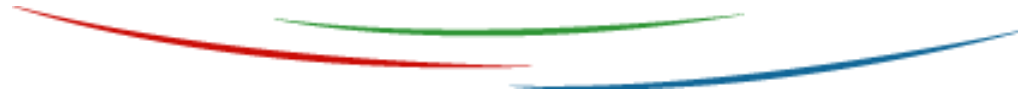


Performances des capteurs radar pour la caractérisation des états de surface des sols en milieux agricoles



Nicolas Baghdadi and Mehrez Zribi

IRSTEA, UMR TETIS, Maison de la Télédétection, Montpellier, France

Enjeux scientifiques et besoins d'observations

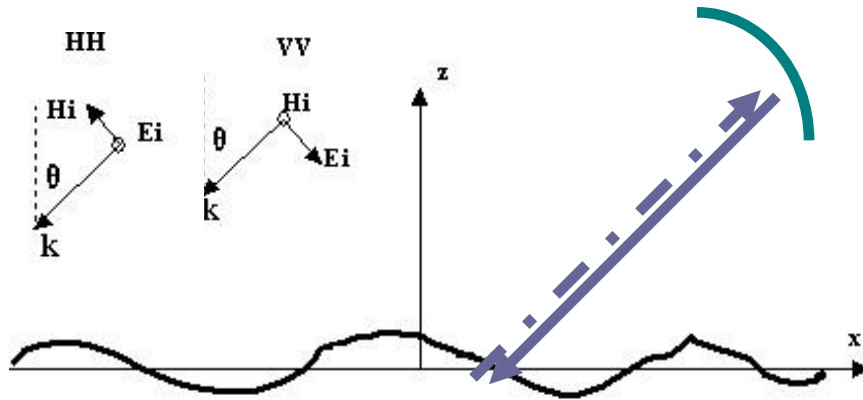
- Le sol joue un rôle important dans la régulation des grands cycles planétaires (comme celui de l'eau et du carbone)
- Ses caractéristiques et en particulier l'humidité et la rugosité, sont des paramètres clés en hydrologie, agronomie et météorologie
- Des travaux soulignent l'influence fondamentale de la surface du sol sur les processus associés à la dégradation des sols agricoles et à l'hydrologie de surface, et reconnaissent les sols nus comme des surfaces particulièrement contributives à la genèse d'évènements naturels extrêmes (Cerdan et al., 2006; Le Bissonnais et al., 2002)
- **Connaître et suivre l'état de surface des sols agricoles constitue un enjeu majeur du développement durable**
- **→ Besoin d'outils opérationnels permettant d'estimer et de suivre les paramètres du sol dans l'espace et dans le temps.**

Paramètres des surfaces continentales

- L'état hydrique du sol
- La rugosité du sol
- Les propriétés de la texture du sol
- Le couvert végétal (dynamique du couvert, biomasse, occupation du sol)

La mesure radar

- Le signal radar rétrodiffusé sur un sol nu est affecté par les caractéristiques du sol (humidité et rugosité)
- Seulement les propriétés du sol à la surface



$$\langle Pr \rangle = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} P_e \iint_{surf. obs.} G_{ek} G_{Rk} \frac{1}{R^4} \sigma^0(r) dS$$

$$\sigma_0 = f(\theta, fr, polarisation, rugosite, \varepsilon, vegetation)$$

Signal rétrodiffusé par un sol nu, fonction des:

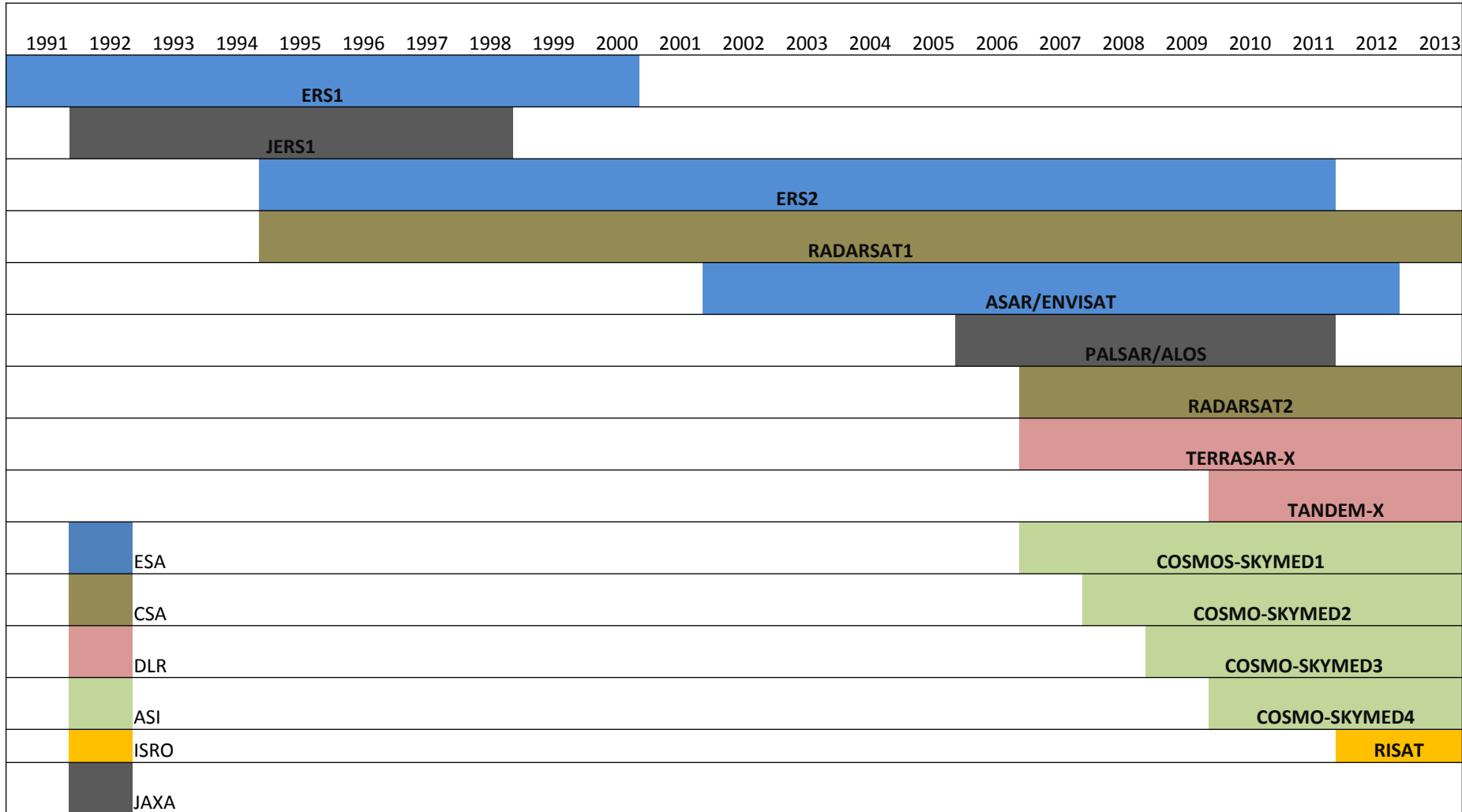
- propriétés diélectriques et géométriques
- configuration SAR

$$\sigma^0 = \underbrace{f(m_V; \theta; mn; \lambda)_{dB}}_{a m_V} + \underbrace{g(rms; \theta; mn; \lambda)_{dB}}_{b e^{-K rms}} + c$$

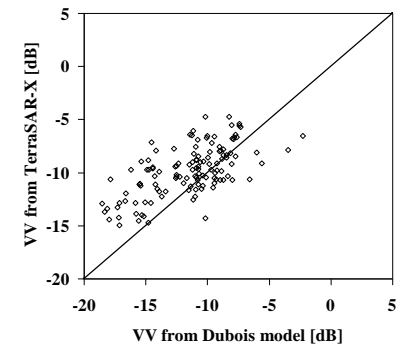
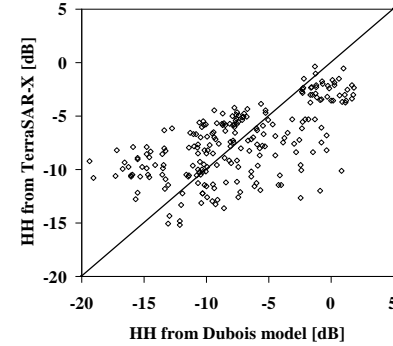
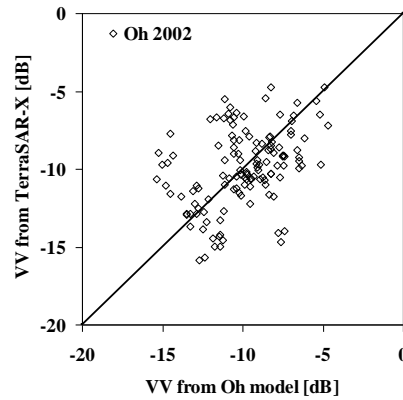
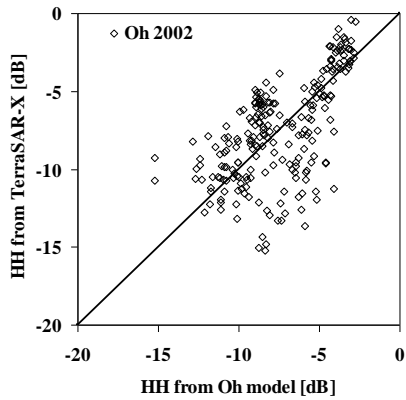
Axes de recherche

- **Validation et développement des modèles de rétrodiffusion radar**
- **Développement des modèles d'inversion**
- **Développement d'approches opérationnelles**
 - **SAR (études locales et régionales)**
 - Diffusiomètres (études régionales et globales)

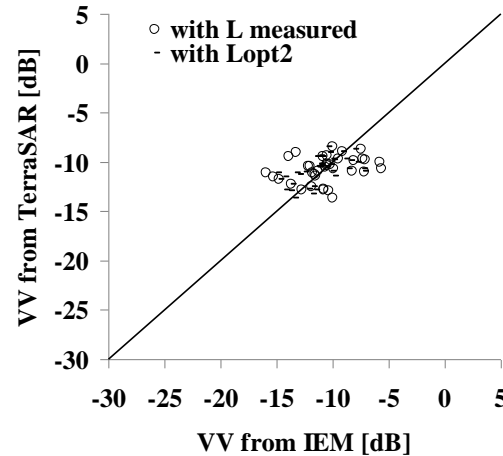
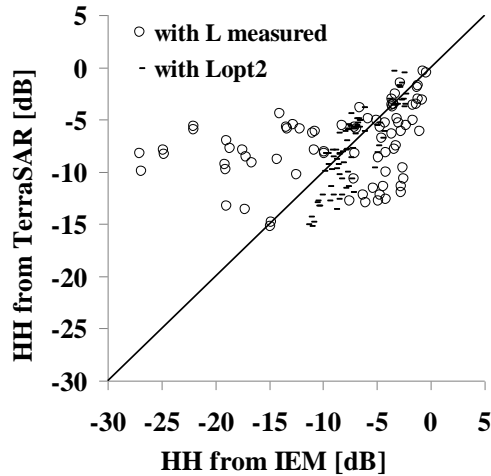
Les capteurs SAR



Validation et développement des modèles de rétrodiffusion radar



Validation de différents modèles de rétrodiffusion (Oh, Dubois, IEM, AIEM...)



Calibration semi-empirique du modèle IEM (Baghdadi et al., 2004, 2006, 2008, 2011, ...)

Sensibilité du signal radar à l'humidité du sol

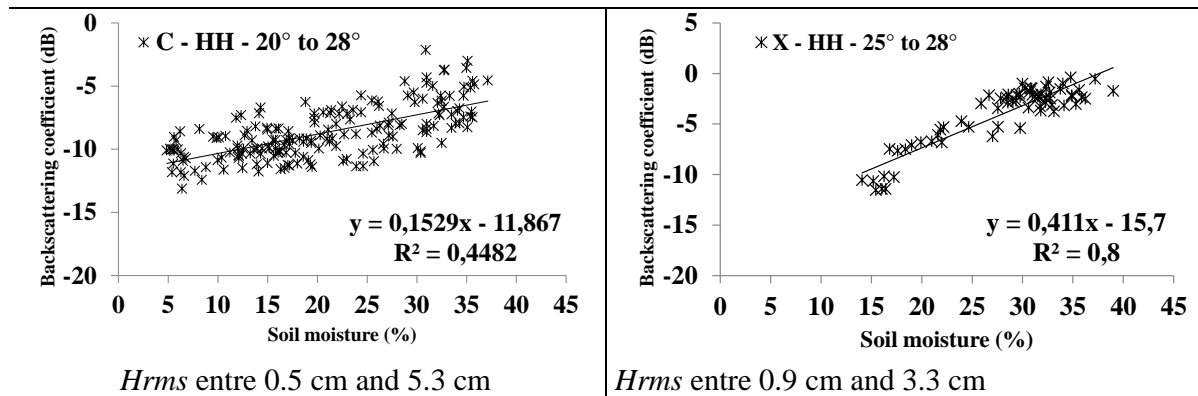
- Le signal radar suit l'humidité selon une loi logarithmique (Le Toan et al., 1994) pour des teneurs en eau < à 35%. Il tend vers une loi linéaire pour des humidités entre 10% et 30% (e.g. *Baghdadi et al., 2006-2008a ; Paris Anguela et al., 2010 ; Zribi et al., 2005 ; Aubert et al., 2011-2013*).
- Au-delà de 35%, le signal radar commence à décroître avec l'augmentation de l'humidité, et l'estimation de l'humidité ne peut se faire sans ambiguïté (e.g. *Baghdadi et al., 2006*).
- L'utilisation d'une seule image radar avec une seule configuration (une polarisation, une incidence, une longueur d'onde) ne permet de déterminer qu'un paramètre du sol à la fois (rugosité ou humidité).

$$\sigma^0 = \underbrace{f(m_v; \theta; mn; \lambda)_{dB}}_{a m_v} + \underbrace{g(rms; \theta; mn; \lambda)_{dB}}_{b e^{-K rms}} + c$$

- Les paramètres des capteurs SAR sont choisis pour augmenter la sensibilité du signal au paramètre du sol à estimer (humidité par exemple) et pour minimiser l'effet des autres paramètres du sol (rugosité par exemple).
- Les faibles incidences radar (environ 20°) sont les plus appropriées pour l'estimation de l'humidité (faible influence de la rugosité).

Sensibilité du signal radar à l'humidité du sol

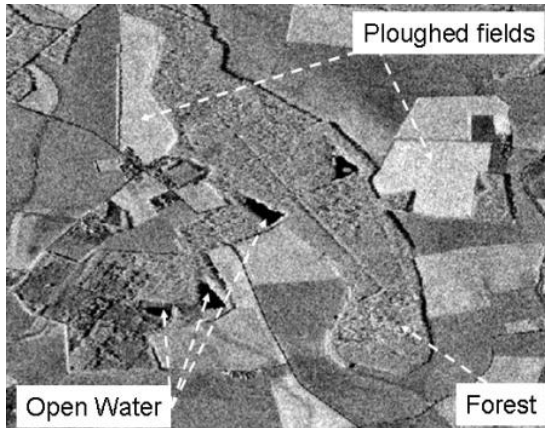
- Effet de la longueur d'onde radar: Sensibilité du signal à l'humidité du sol est deux fois supérieure en bande X qu'en bande C (~0.4 dB/% en bande X et ~0.2 dB/% en C) (e.g. Aubert et al., RSE-2011; Baghdadi et al., HP-2008; Zribi et Dechambre, 2002).
- La bande X permet d'observer de fines variations d'humidité, indétectables avec les données acquises par les capteurs en bandes C et L (*pour une précision radiométrique de 1 dB, des variations d'humidité de l'ordre de 2.5% sont détectables sur des images en bande X contre 5% en bandes C et L*).



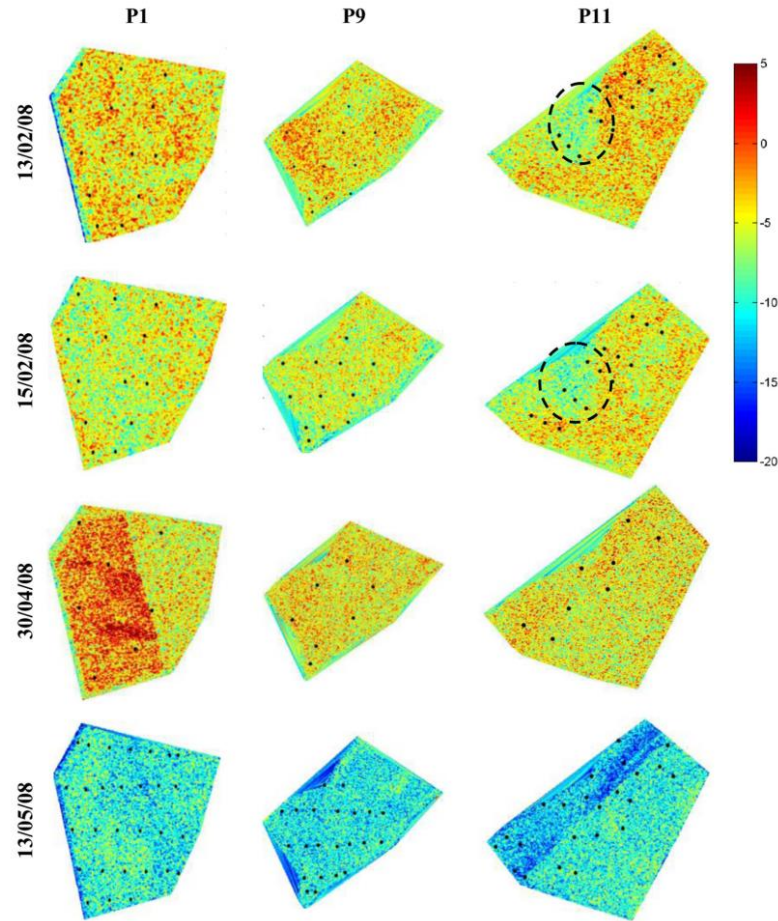
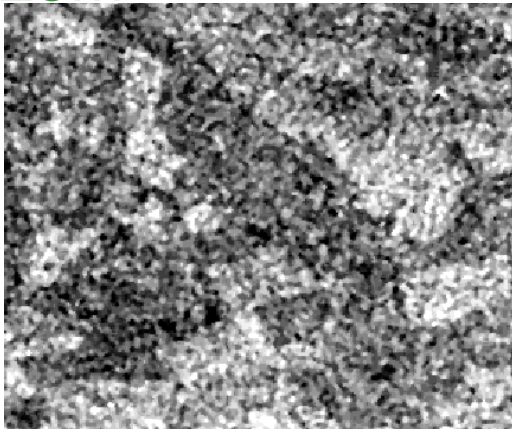
- Cette très forte sensibilité à l'humidité en bande X couplée à la très haute résolution spatiale des capteurs facilite également la détection des variations intra-parcellaires de l'humidité.

SAR THRS et variations intra-parcellaire du signal

1m



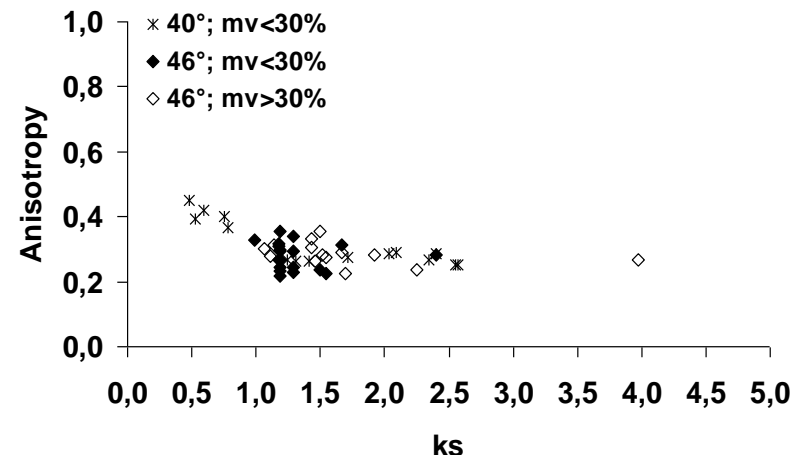
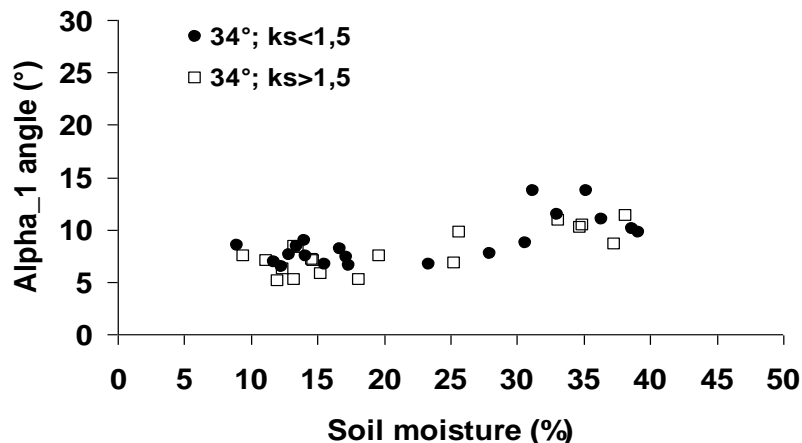
25m



- Nécessité de données THRS pour détecter des variations intra-parcellaire dues à des variations de rugosité ou d'humidité du sol (Baghdadi et al., RSE-2008; Paris et al., IEEE TGRS-2010; Aubert et al., 2011).

Potentiel de la polarimétrie radar

- La polarimétrie radar a été évaluée pour étudier son potentiel à améliorer l'estimation de l'humidité et de la rugosité du sol (RADARSAT-2: bande C).
- Contrairement aux résultats obtenus en bande L, l'utilisation des paramètres polarimétriques (entropie, anisotropie ...) en bande C n'apporte pas une amélioration significative de l'estimation de l'humidité et de la rugosité du sol en comparaison aux méthodes qui utilisent uniquement les coefficients de rétrodiffusion en polarisations HH, HV et VV.
- La dynamique des paramètres polarimétriques en bande C est trop faible pour permettre leur utilisation directe dans le processus d'estimation des paramètres du sol.



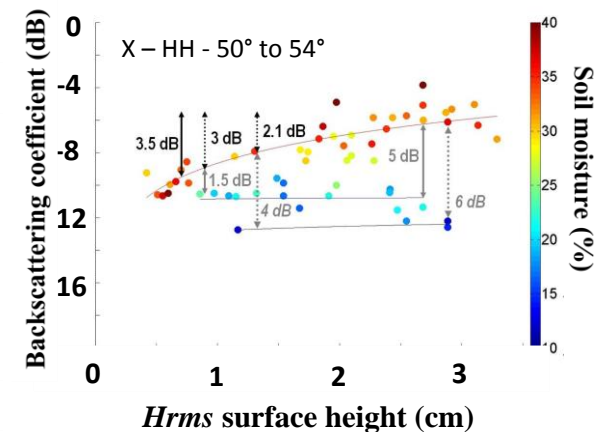
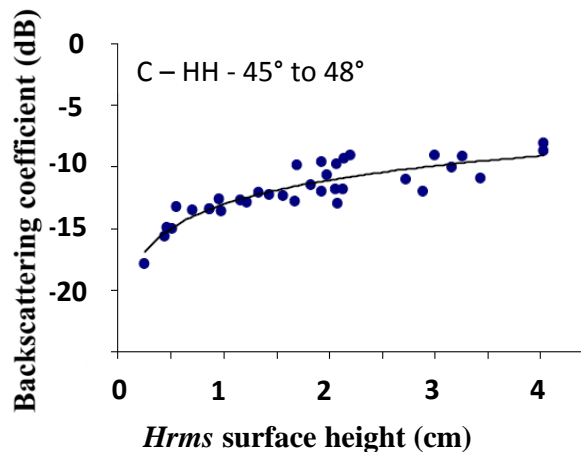
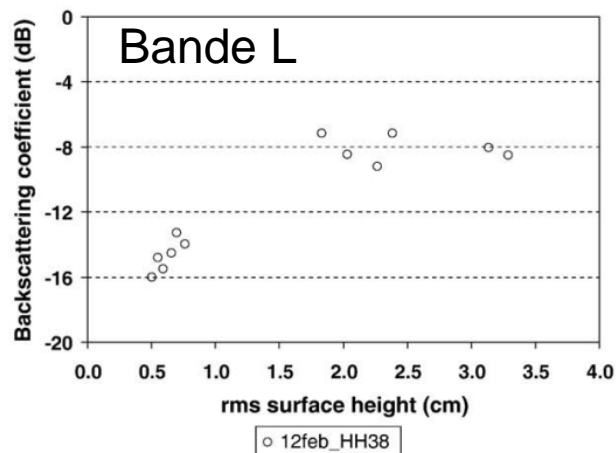
(Baghdadi et al., IEEE TGRS 2012)

Sensibilité du signal à la rugosité du sol

- Le signal radar augmente avec la rugosité selon une loi logarithmique ou exponentielle pour devenir constant à partir d'un certain seuil de rugosité (e.g. Aubert et al., 2011 ; Baghdadi et al., 2002 ; Zribi et Dechambre, 2002 ; Zribi et al., 1997; Baghdadi et al., 2008).
 - Ce seuil à partir duquel le signal devient constant dépend de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence utilisés par le capteur radar.
 - Les résultats montrent une saturation rapide du signal radar avec la rugosité du sol (H_{rms}) quand la longueur d'onde et/ou l'angle d'incidence sont faibles.
- ➔ Difficile de cartographier la rugosité en bande C pour $H_{rms} > 1$ cm à 20° et pour $H_{rms} > 1.5$ cm à 45° . En X, le signal est légèrement moins sensible à la rugosité du sol qu'en C avec une saturation à partir de H_{rms} d'environ 1 cm pour faibles ou fortes incidences.

Sensibilité du signal à la rugosité du sol

- Seules les plus grandes longueurs d'ondes (bande L par exemple) permettent de cartographier 2 ou 3 classes de rugosité (lisse « semis », rugueuse « labour », moyennement rugueuse).
- Les mesures terrain de la rugosité du sol montrent que 90% des valeurs de H_{rms} mesurées (pendant 20 ans sur de nombreux sites) varient entre 1 cm (semi) et 3.5 cm (labour). Avec cette gamme de valeurs de H_{rms} , il est possible de cartographier au mieux deux classes de rugosité ($H_{rms} < 1.5$ cm et $H_{rms} > 1.5$ cm) en L ou C.



Suivi de l'état hydrique du sol

- Cartographie de l'état hydrique du sol utilisant une seule configuration TerraSAR-X, avec différentes relations empiriques:

HH et VV à 25°-33°

$$mv = e [(\sigma^{\circ}(\text{dB})+33.167)/8.8054]$$

HH et VV à 50°-54°

$$mv = e [(\sigma^{\circ}(\text{dB})+30.974)/6.9482]$$

HH et VV à 40°

$$mv = e [(\sigma^{\circ}(\text{dB})+32.120)/7.9190]$$

(Aubert et al., JSTARS, 2013)

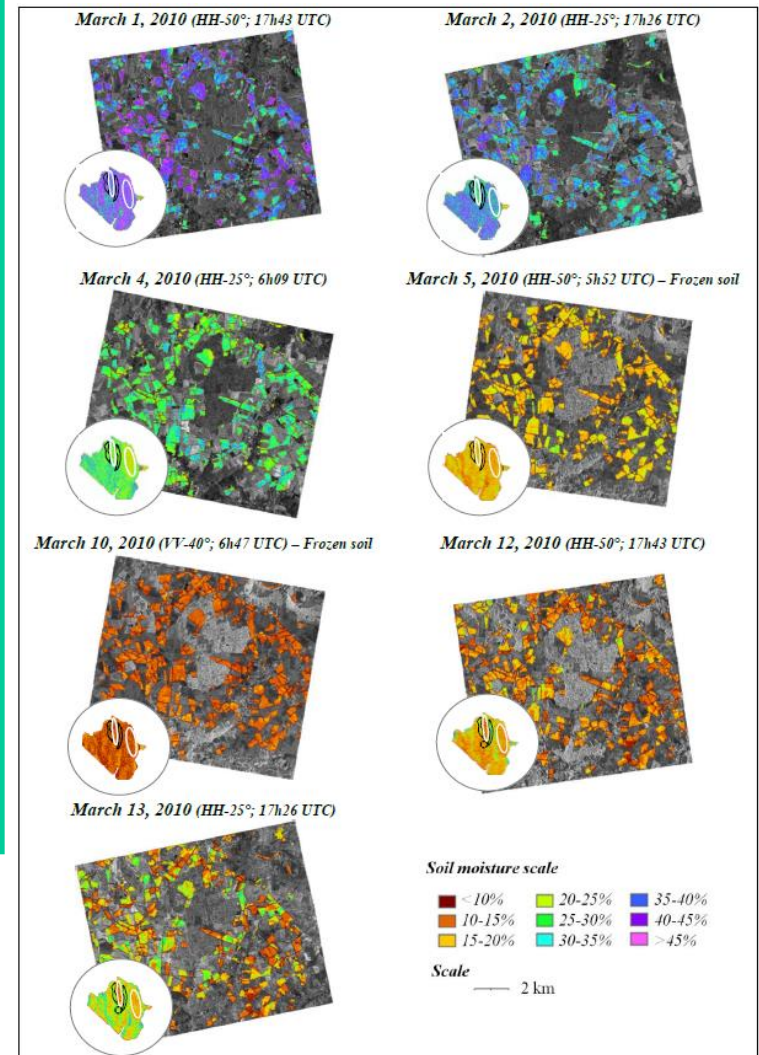
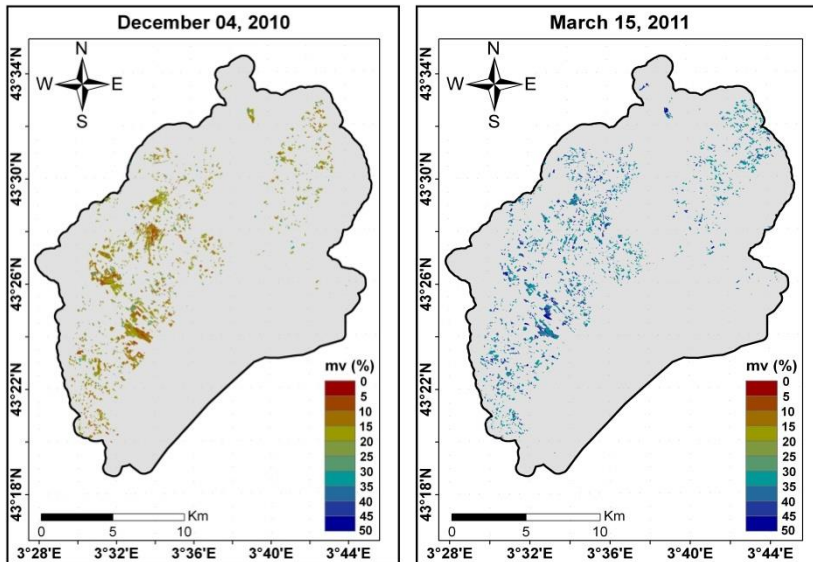
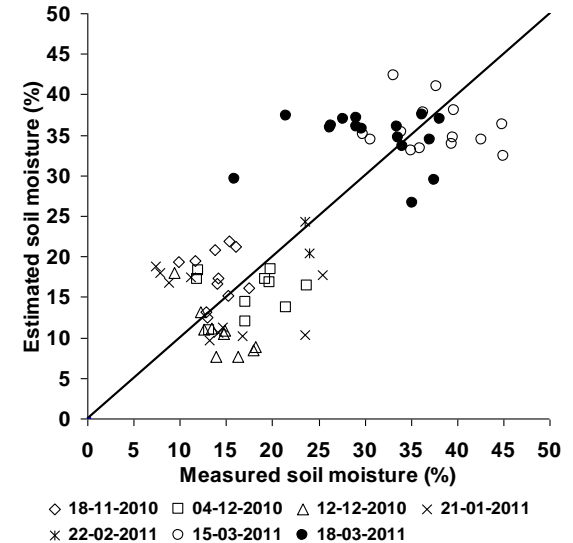


Fig. 10. Multitemporal evolution of bare soil moisture estimated from TerraSAR-X images acquired on the Orgeval watershed (BSMOM dataset). For each date, a zoomed representation of the variations in soil moisture within a training plot is presented. Soil I is outlined with a white line, and Soil II is outlined with a black line. The dotted black line shows soil II frozen on March 12 and thawed on March 13.

Suivi de l'état hydrique du sol

Modèle IEM calibré + images RADARSAT-2 + réseaux de neurones → estimation de l'humidité:

- 1. sans information a priori sur l'humidité
- 2. avec information a priori sur l'humidité (expert: sol très humide ou pas; pluviométrie)
- 3. utilisation des paramètres polarimétriques pour seuiller l'humidité et la rugosité



RMSE sur l'estimation de l'humidité = 0.065 cm³/cm³ avec information a priori information (expert)

= 0.098 cm³/cm³ sans information a priori

= 0.083 cm³/cm³ avec polarimétrie

Texture du sol

- **Salinisation des sols**
- **Contenu en argile**
- **Matière organique ...**



Estimation du contenu en argile par détection de changement: Analyse de la vitesse de sécheresse du sol suite à un évènement pluvieux (Rmse: 120gr/1Kg)

Synthèse et Perspectives de développement

- Les nouveaux capteurs RSO pouvant acquérir de données en mode très haute résolution spatiale (TerraSAR-X, RADARSAT-2, CosmoSky-Med) **permettent d'étudier la variabilité spatiale de l'humidité** à une échelle plus fine que la parcelle (sub-parcellaire).
- De plus, les RSO récents en **bande X ont une très bonne sensibilité à l'humidité du sol.**
- En revanche, la cartographie de la rugosité du sol avec des radars en bandes X et C est relativement limitée à deux classes (sols lisses avec $H_{rms} < 1\text{cm}$ et rugueux ou moyennement rugueux avec $H_{rms} > 1\text{cm}$). **Ainsi, le besoin des modélisateurs n'est atteint que partiellement.**

Perspectives de développement

- L'imagerie radar n'est pas encore un outil communément utilisé par les hydrologues et les agronomes même si certaines applications ont été développées pour assimiler ces paramètres de surface dans des modèles agronomiques ou hydrologiques.
- Ce retard d'utilisation peut être imputé à l'absence de capteurs dédiés proposant des configurations adaptées aux besoins, et d'algorithmes adéquats permettant d'estimer aisément et précisément les paramètres du sol.
- De plus, les radars permettent de mesurer l'humidité des couches superficielles du sol (max ~ 10 cm) alors qu'en agronomie et en hydrologie il est nécessaire de connaître l'humidité de la couche racinaire (~ 1 m). **De nombreux travaux ont été effectués récemment dans ce domaine et cet axe de recherche demeure prioritaire pour de nombreuses communautés.**

Perspectives de développement

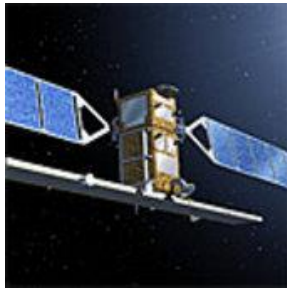
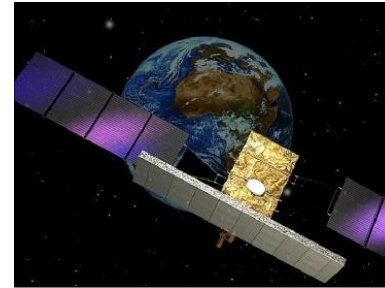
- Mission **Sentinelle 1** (constellation de deux radars bande C, mi-2014) doit permettre une couverture des surfaces terrestres européennes tous **les 5 jours** (données gratuites), ce qui va faciliter l'utilisation des données RSO pour la cartographie de l'humidité du sol → **Développement de méthodes nécessaire**
- Constellations CosmoSkyMed et TerraSAR-X permettent la cartographie de l'humidité avec une répétitivité proche de la journée mais le prix des images limite l'utilisation de ses capteurs en mode opérationnel
- En perspective et pour accéder à l'ensemble des paramètres caractérisant la surface du sol, il paraît essentiel de **développer davantage des méthodes multi-longueurs d'onde (bandes X, C et L), multi-capteur (radar et optique) et multi-résolution**

Perspectives de développement

- **Besoin de développer des méthodes robustes pour l'estimation de l'humidité du sol sous couvert végétal (en particulier agricole).**
- Des efforts importants ont été déployés ces dernières années en Europe (GMES) et en France (**Geosud, Pôle Thématique Surfaces Continentales THEIA...**) pour créer des infrastructures et des services opérationnels d'exploitation de données d'Observation de la Terre.
- **THEIA, GEOSUD, ...** : Initiatives pour apporter des réponses opérationnelles aux besoins des utilisateurs. Elles devraient ainsi dynamiser les transferts des techniques satellitaires vers l'opérationnel, notamment en offrant de nouvelles possibilités d'accès aux données, réduisant les coûts et favorisant l'accès aux images pour des recherches thématiques (hydrologie, agronomie, biodiversité...) et des services publics.

Le future

- **SENTINELLES 1, 2, 3: mi 2014**
- **RADARSAT-2, RADARSAT Constellation Mission: 2016**
- **ALOS-2 (and ALOS-3): 2013-**
- **TERRASAR-X, COSMO-SKYMED**
- **BIOMASS**
- **RISAT**
- **ASCAT/METOP and SMAP**
- **SWOT**
- **.....**



Merci pour votre attention