

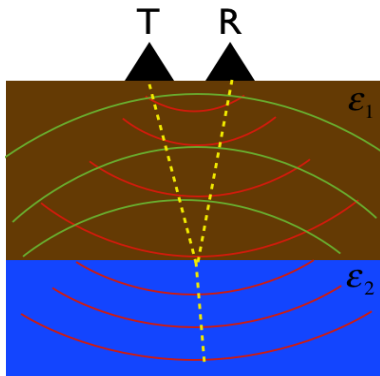
Quelques applications du radar de sol à l'hydrologie

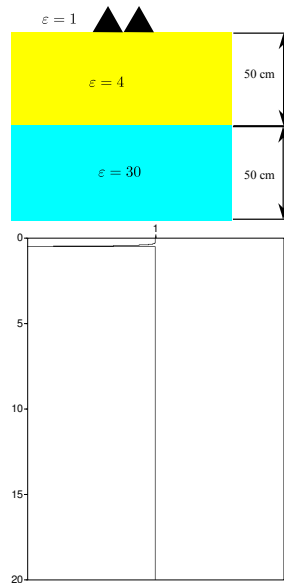
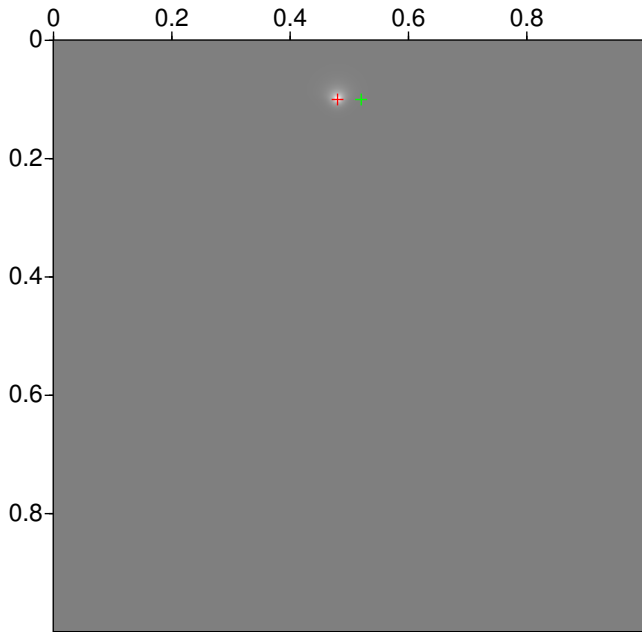
Albane Saintenoy

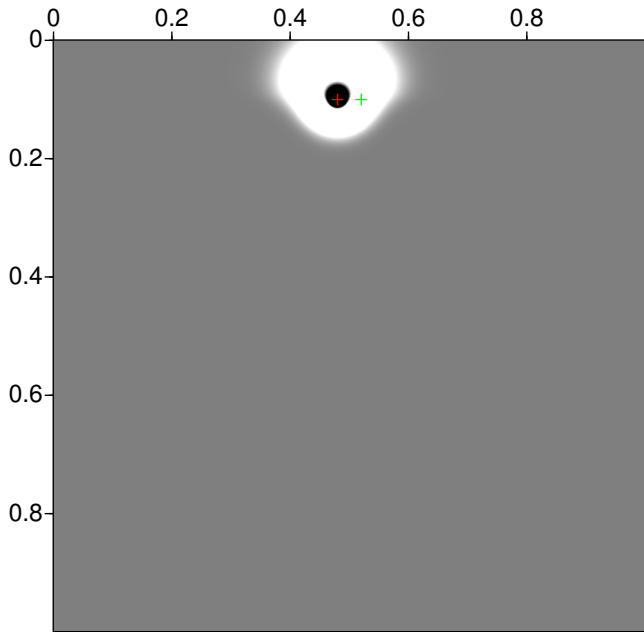
avec la collaboration de Emmanuel Léger, Piotr Tucholka, Jean-Michel Friedt, Florian Tolle, Éric Bernard, Mélanie Quenet, Christelle Marlin, Madeleine Griselin, Christelle Courbet, Lean Nguyen, François Costard, Christophe Grenier, Ivan Khristoforov

GEOPS UMR 8148 CNRS - Université Paris Sud

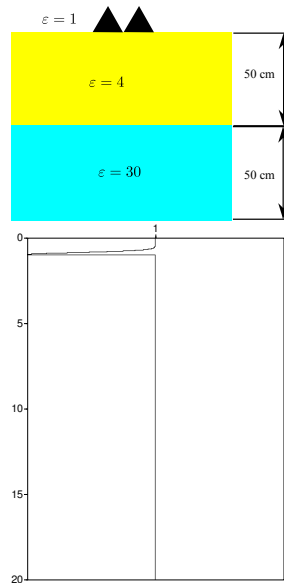
Des antennes commandées par un boîtier électronique haute fréquence pour émettre et enregistrer les amplitudes d'ondes électromagnétiques au cours du temps

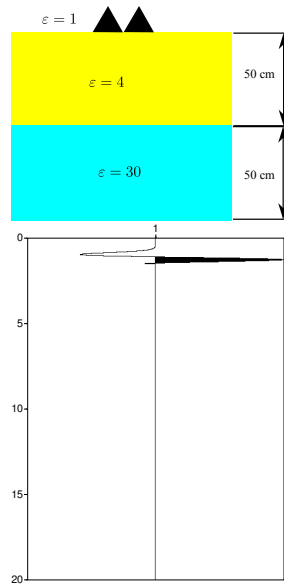
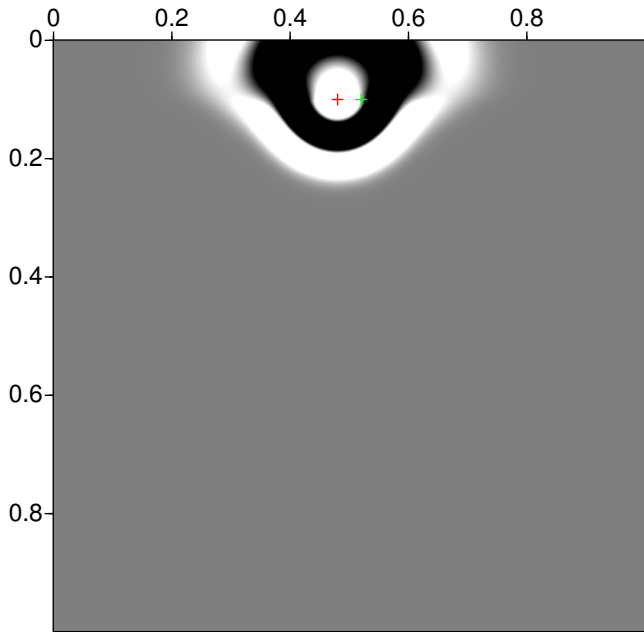


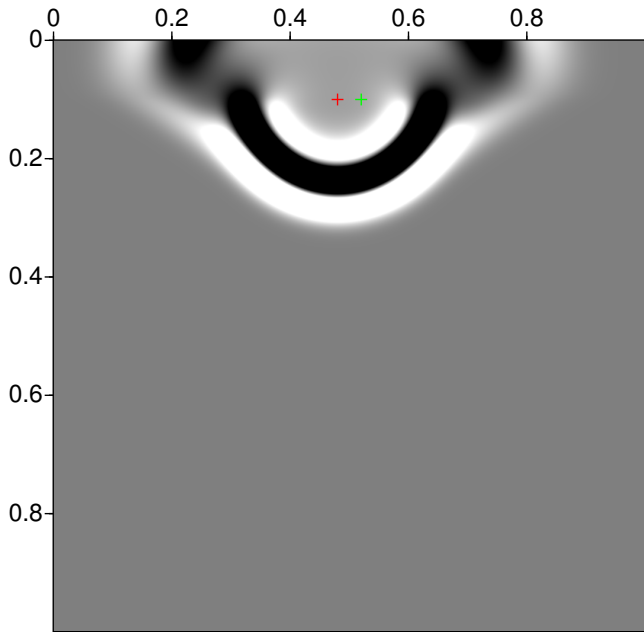




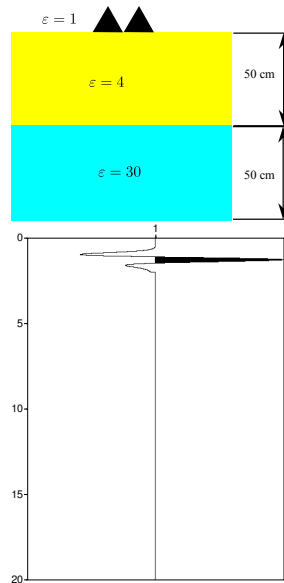
1.0 ns

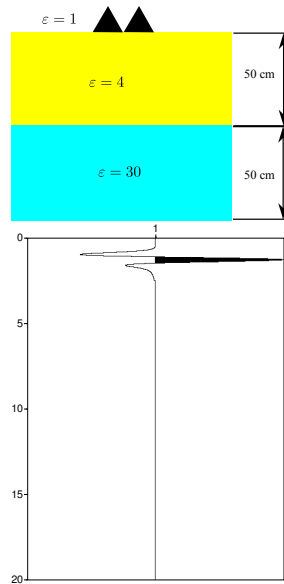
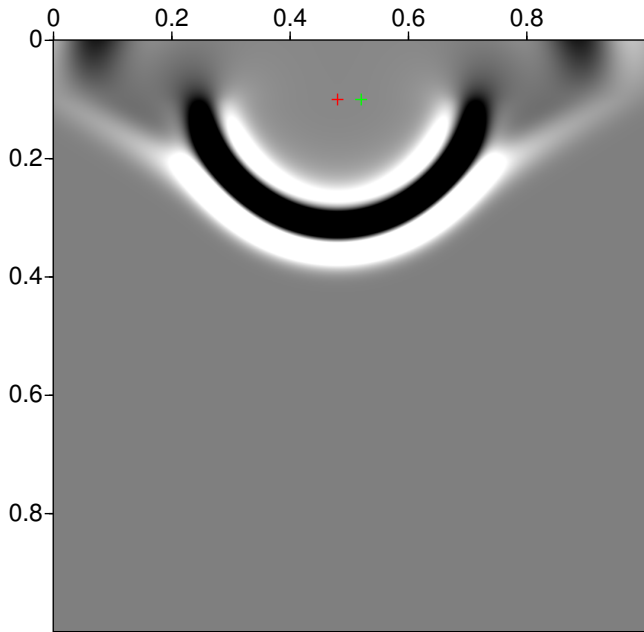


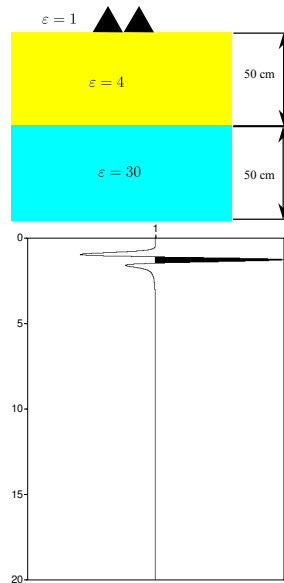
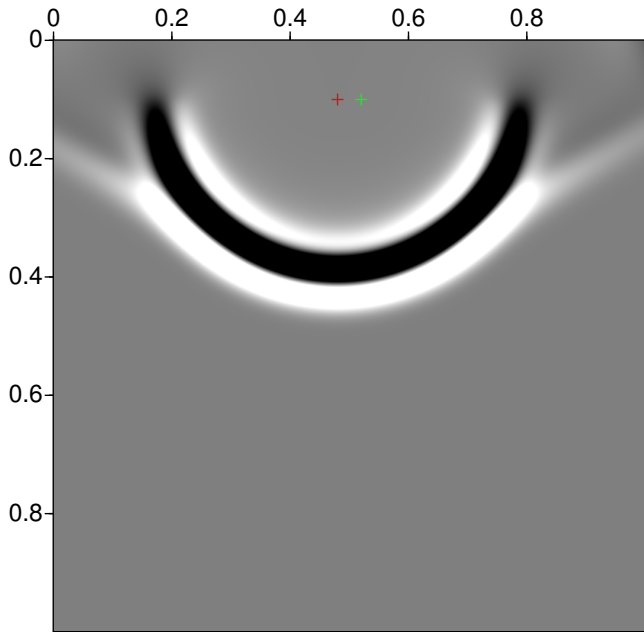


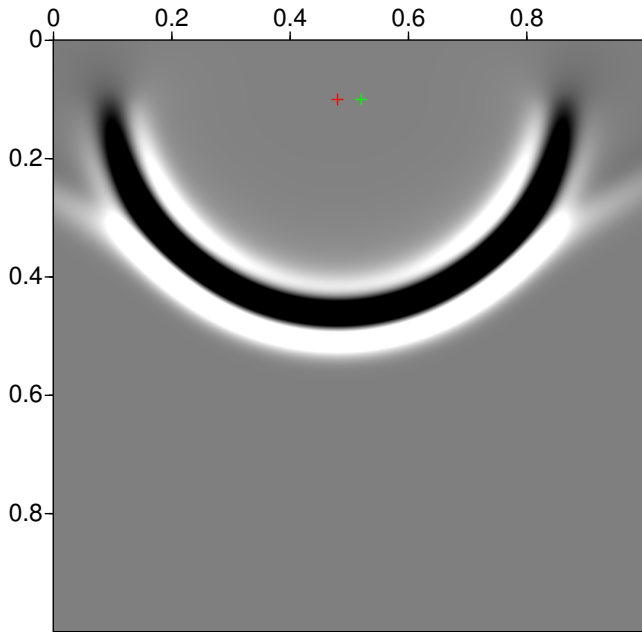


2.0 ns

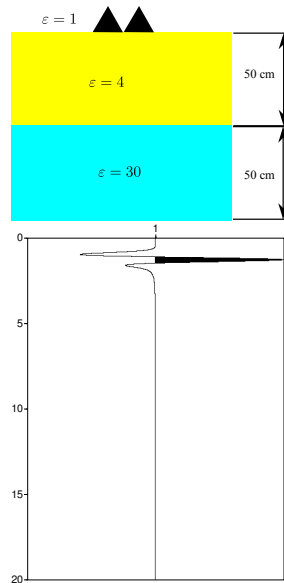


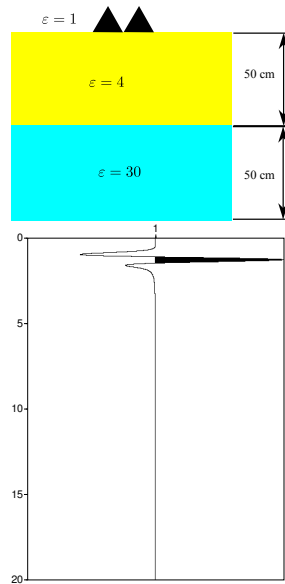
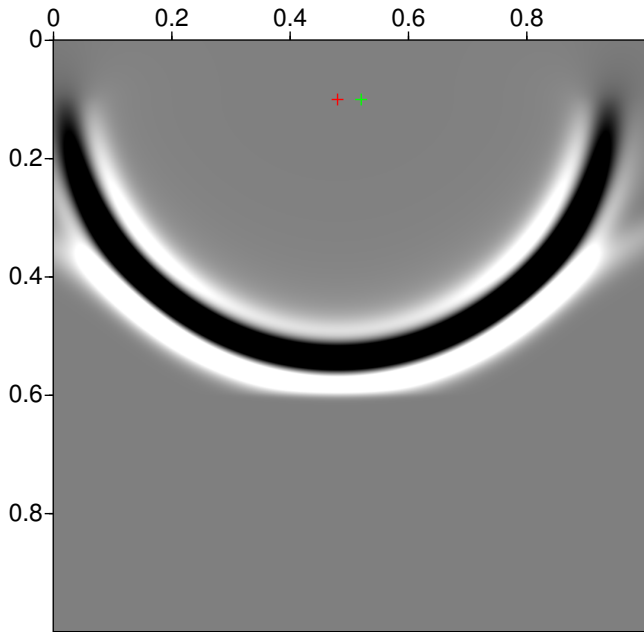


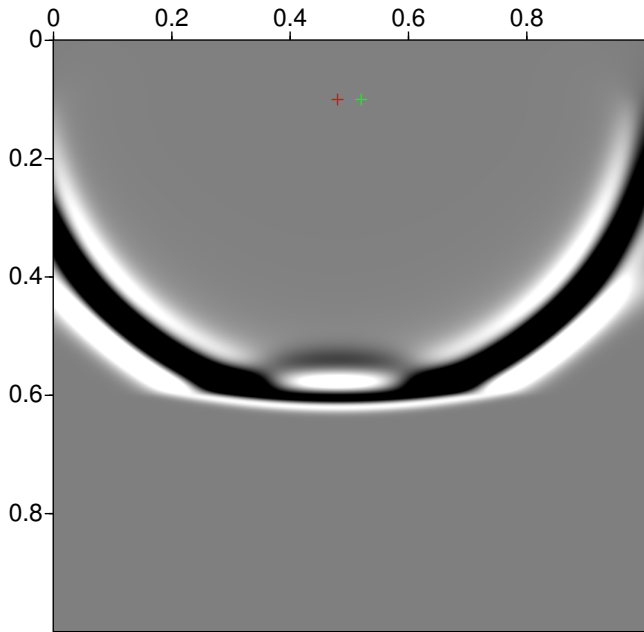




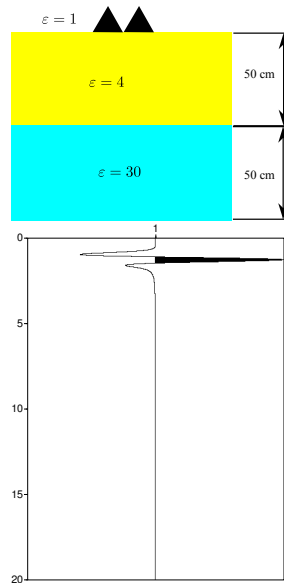
3.5 ns

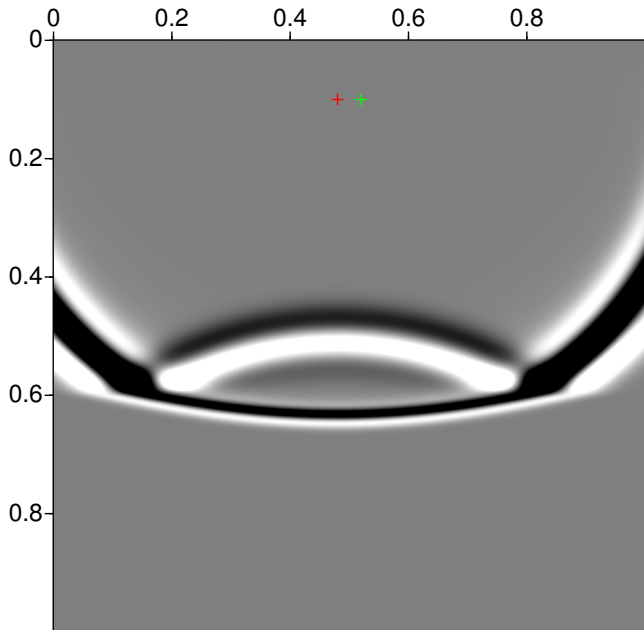




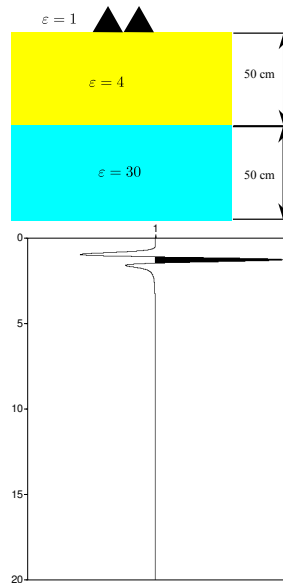


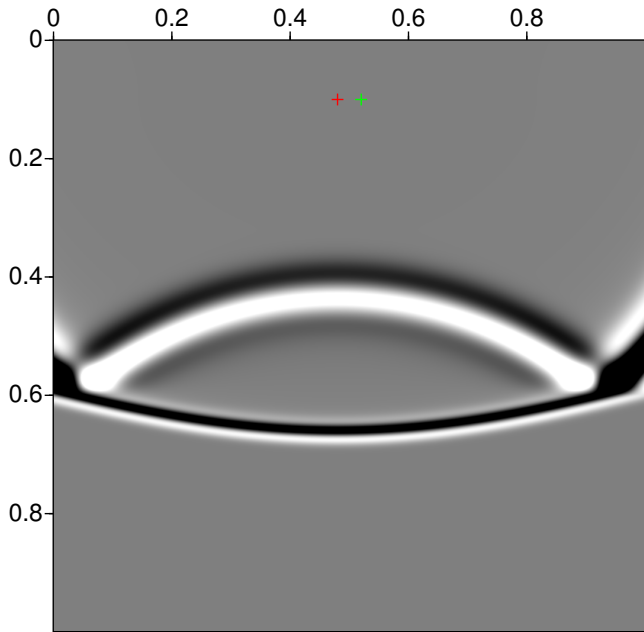
4.5 ns



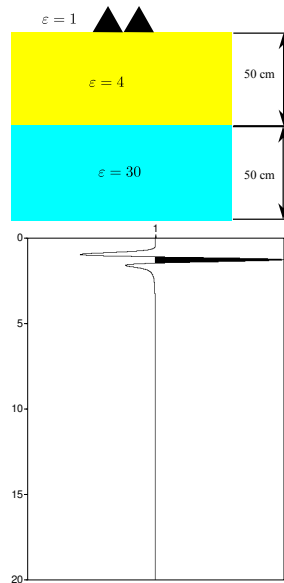


5.0 ns

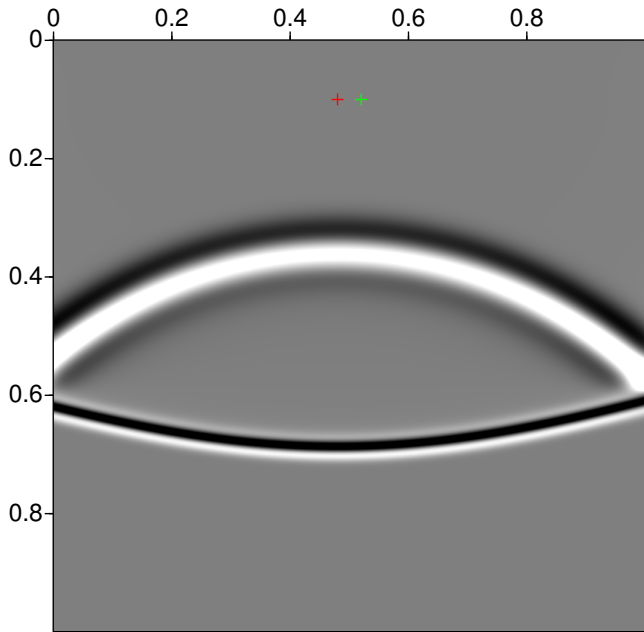




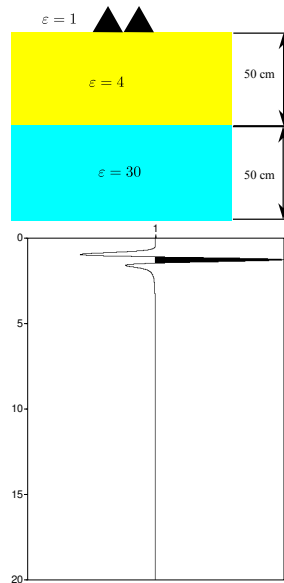
5.5 ns

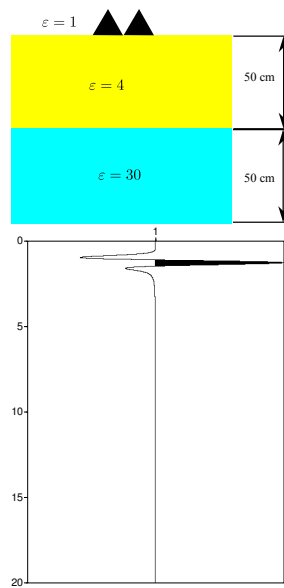
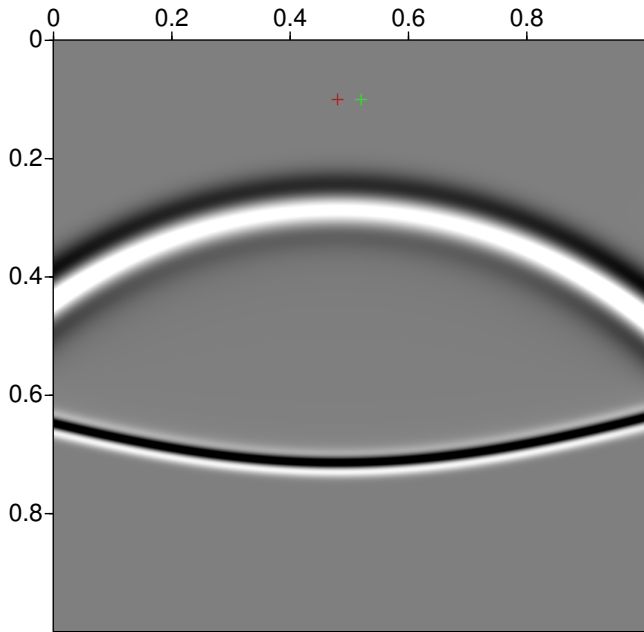


13 / 77



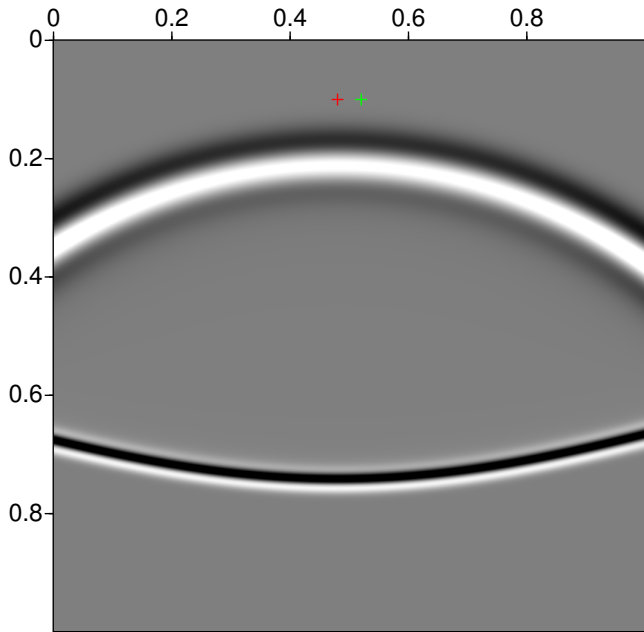
6.0 ns



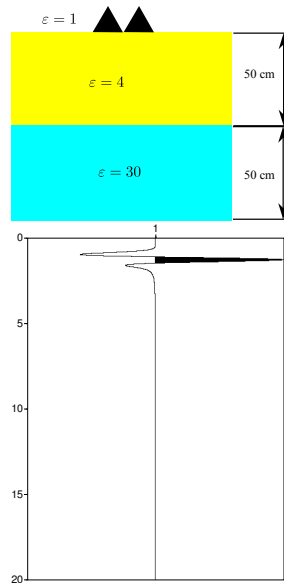


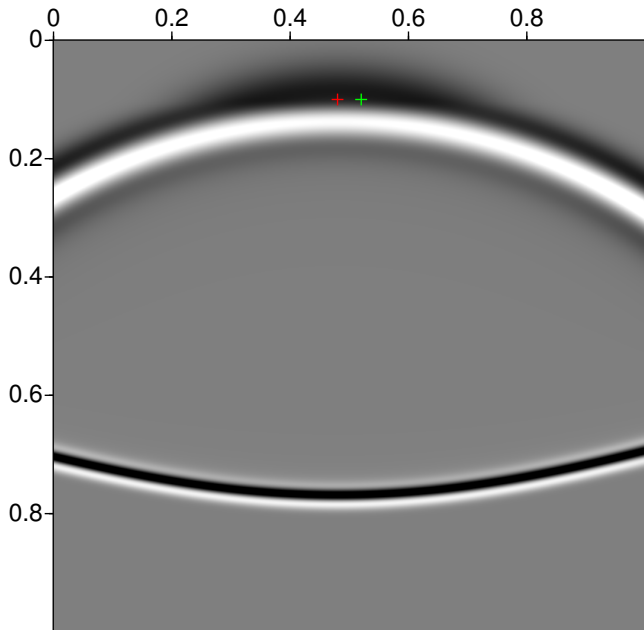
6.5 ns

15 / 77

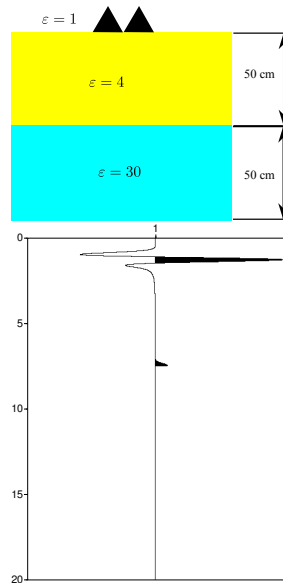


7.0 ns

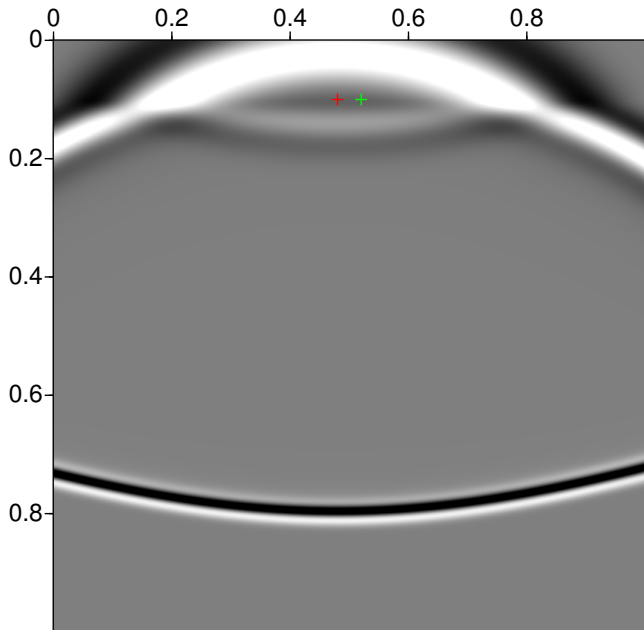




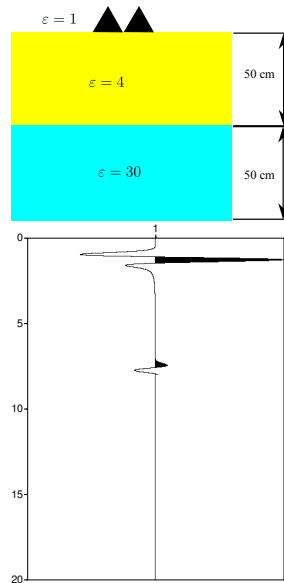
7.5 ns

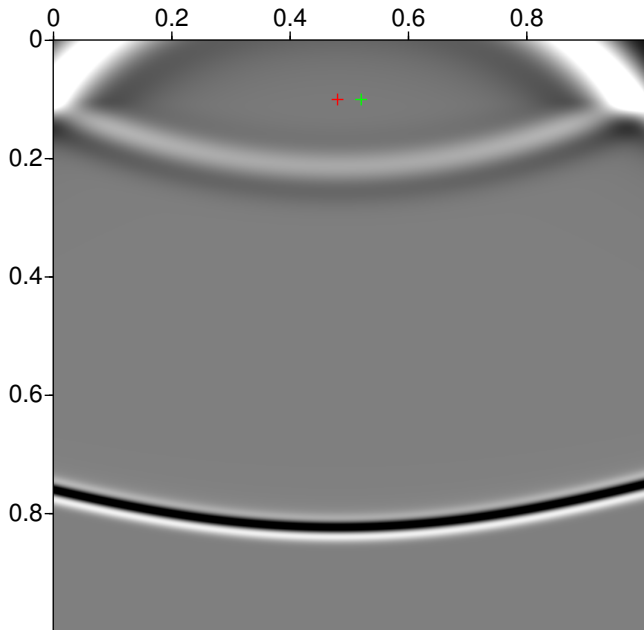


17 / 77

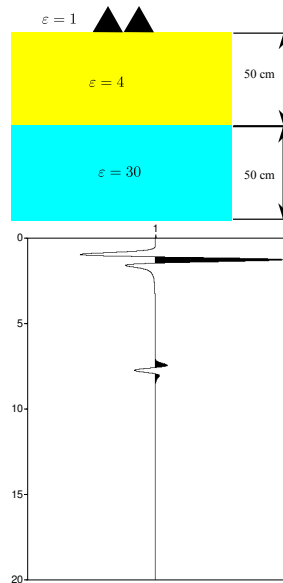


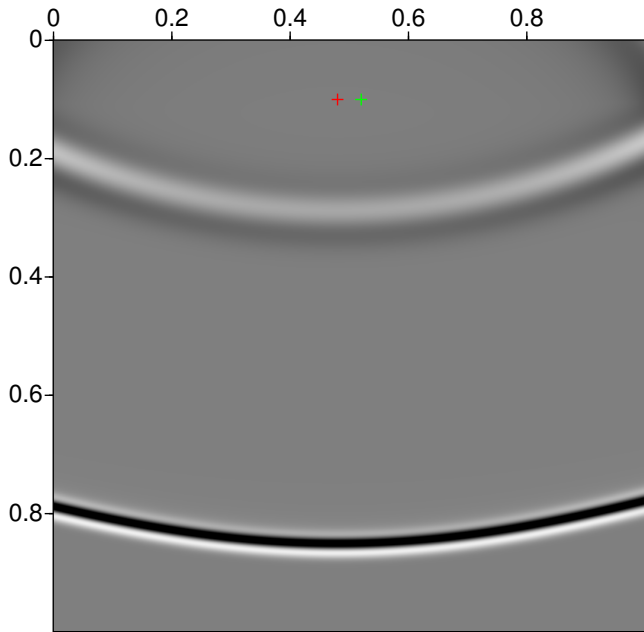
8.0 ns



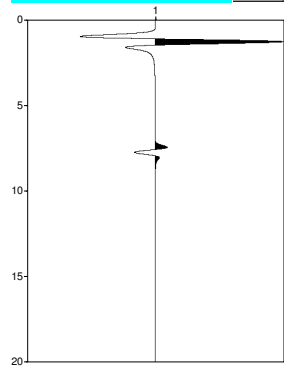
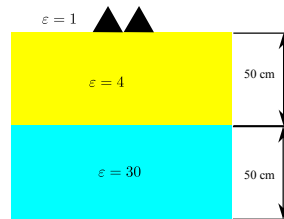


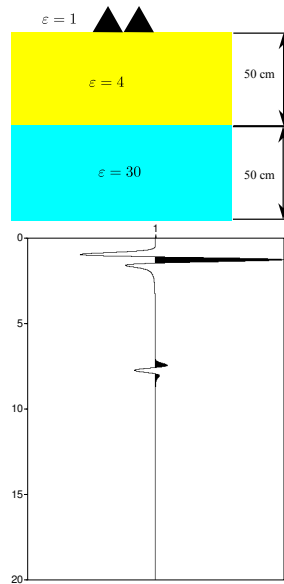
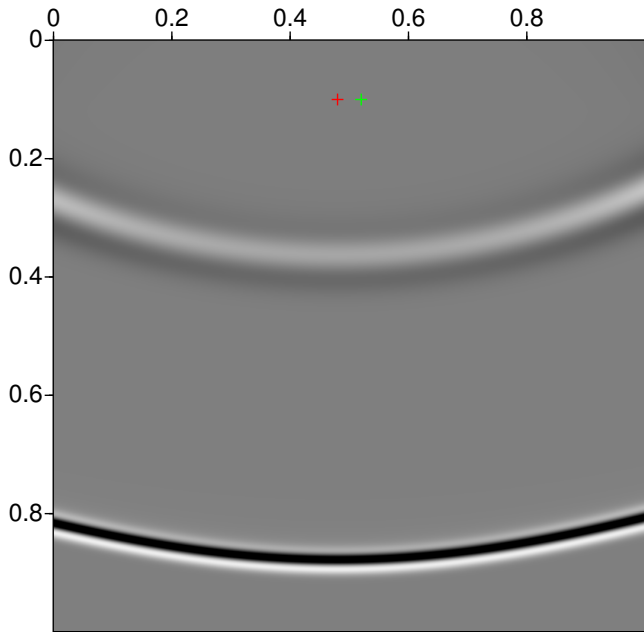
8.5 ns

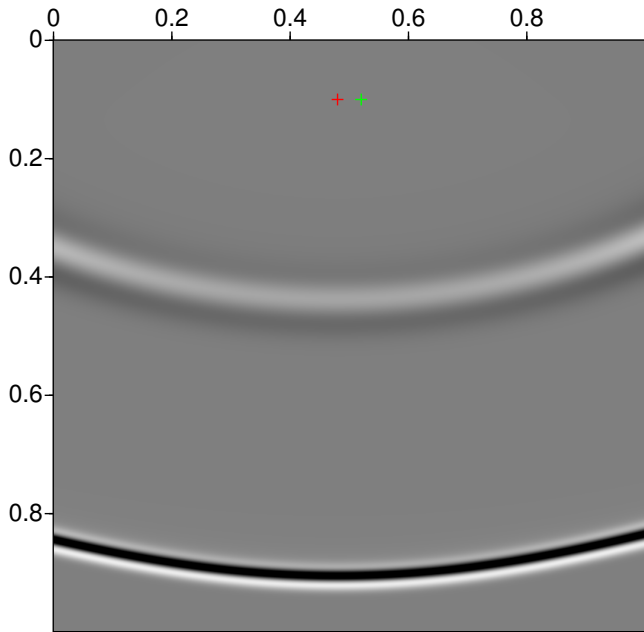




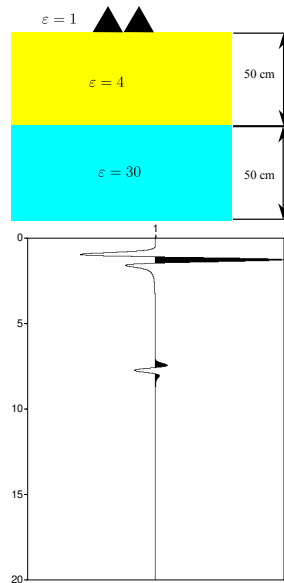
9.0 ns



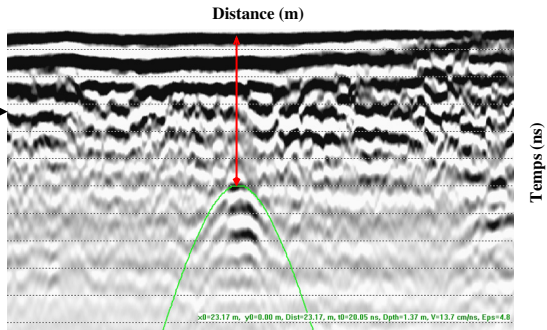
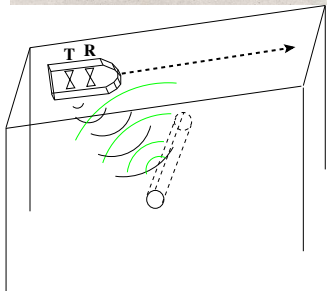




10.0 ns



Acquisition radar classique (mono-déport)



Paramètres accessibles

Estimation de paramètres électromagnétiques:

- ▶ **la permittivité diélectrique ϵ**
- ▶ la conductivité électrique σ
- ▶ la perméabilité magnétique μ

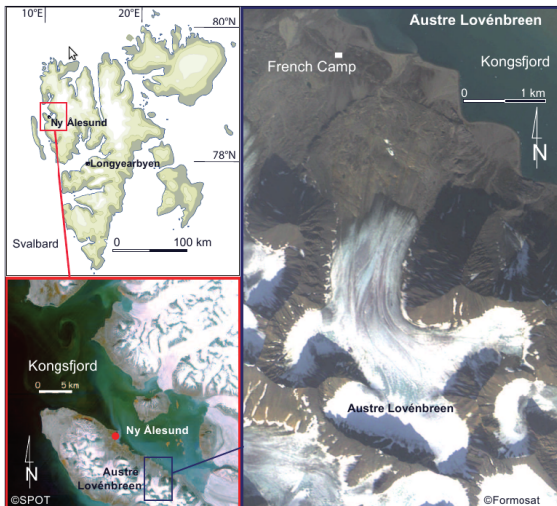
La permittivité diélectrique dépend de la teneur en eau et de la température → Applications en hydrologie

Radar en Arctique (2010 -)



avec C. Marlin, M. Griselin, J.-M. Friedt, F. Tolle, E. Bernard, D. Laffly

Austre Lovénbreen: glacier arctique de 4.6 km²

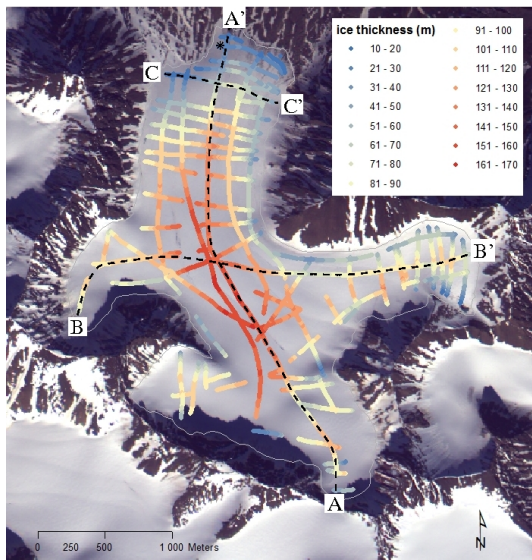


Équipements

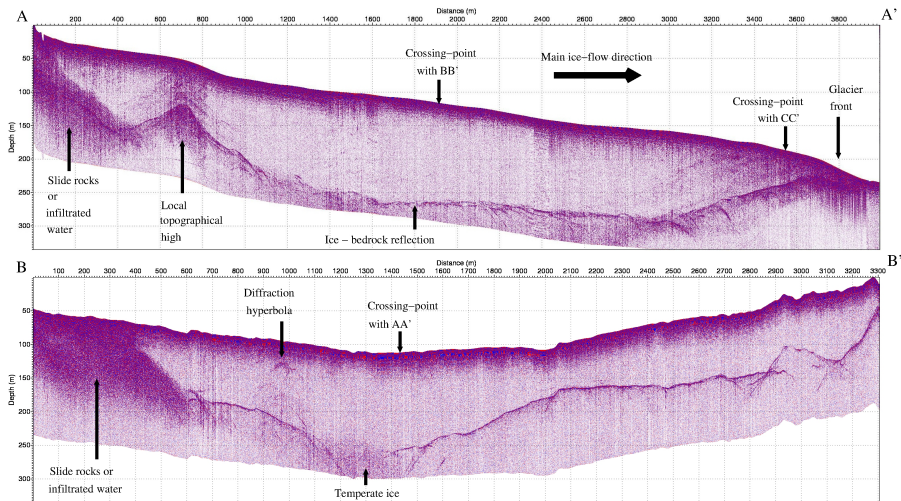
- ▶ Ramac Mala GPR avec CUII, antennes 50 MHz et 100 MHz
- ▶ Sondages de la couverture neigeuse
- ▶ GPS différentiels
- ▶ Appareils photos sur site



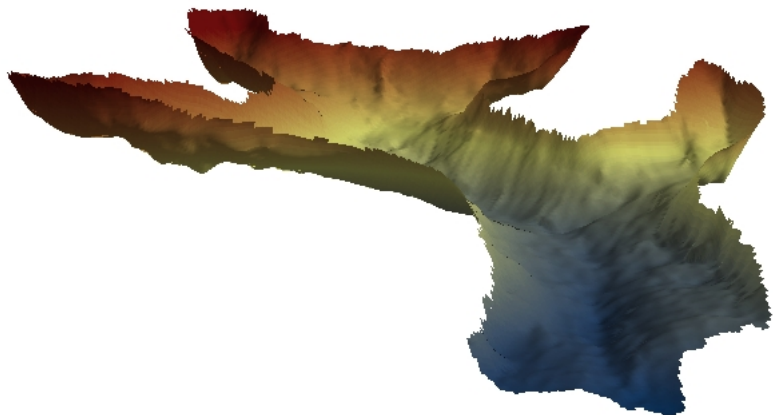
Profils radar et épaisseurs de glace



Radargrammes au travers du glacier (100 MHz)



Reconstruction du fond du glacier



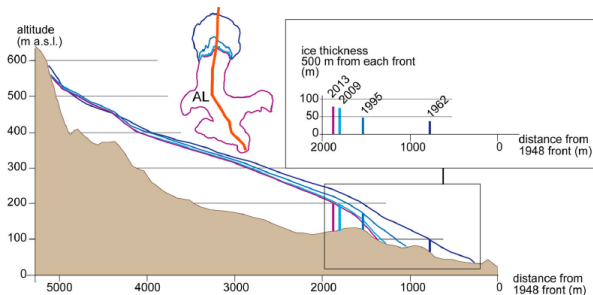
Incertitudes sur le volume de glace estimé

Source d'incertitude	Volume	Erreur relative
Positionnement GPR: ± 1.77 m	0.008 km ³	2.3 %
Surface du glacier	0.0056 km ³	1.6 %
Épaisseur de neige	9.2×10^{-4} km ³	0.3 %
Vitesse de l'onde	0.0042 km ³	1.2 %
Interpolation	0.040 km ³	11.5 %

Volume de glace estimé

- ▶ Volume dérivé des données migrées: $0.3487 \pm 0.041 \text{ km}^3$
- ▶ Épaisseur moyenne: 76 m
- ▶ Épaisseur moyenne d'après la formule empirique de Hagen :
 $D = 33 \log(A) + 25$ avec $A = 4.6 \pm 0.28 \text{ km}^2$ implique $D = 75 \pm 2 \text{ m}$
i. e. un volume de $0.345 \pm 0.046 \text{ km}^3$!

Évolution du glacier



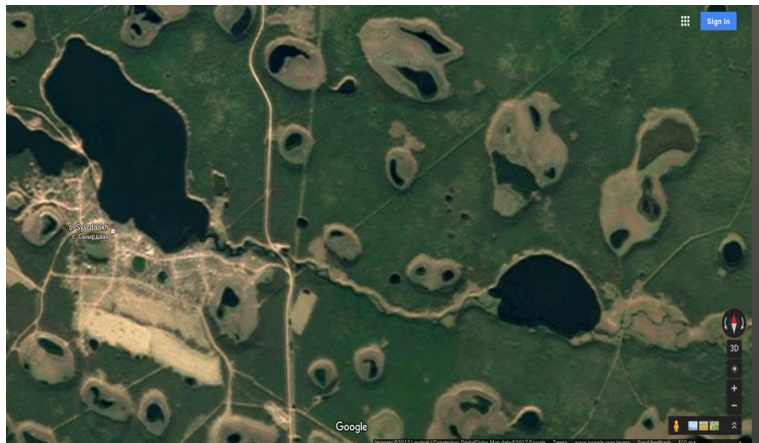
1962-1995 Perte de 16% du volume de 1962
taux moyen = 0,5% par an

1995-2009 Perte du 12% du volume de 1995
taux moyen = 0,9% par an

Autres études associées

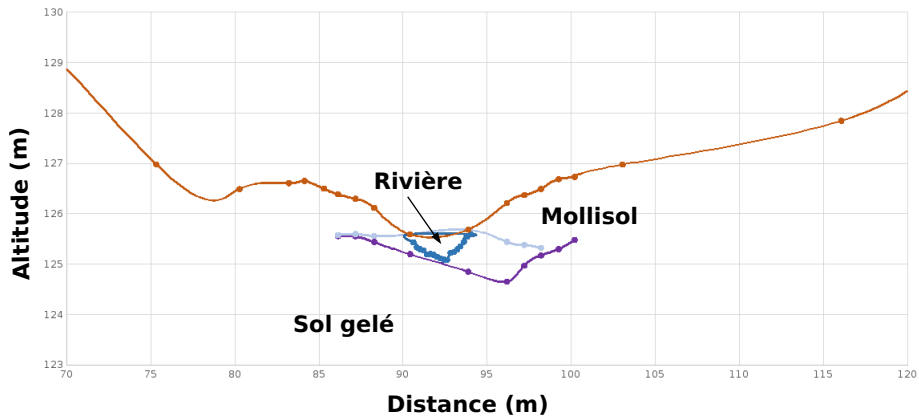
- ▶ Détermination des limites du glacier
- ▶ Modélisation état thermique du glacier
- ▶ Suivi d'un lac supra-glaciaire au cours des saisons
- ▶ Suivi thermique, hydrogéologique et géomorphologique de la zone morainique liée au retrait du glacier

Empreinte thermique d'une rivière à Syrdakh (Yakoutie Centrale)

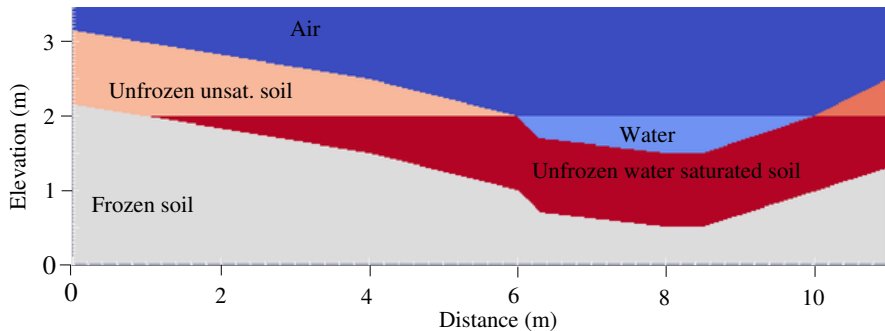


avec C. Grenier

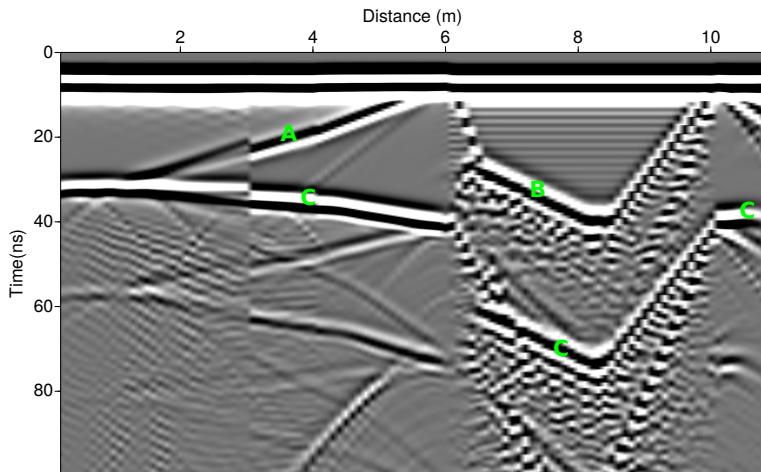
Mesures sur le terrain



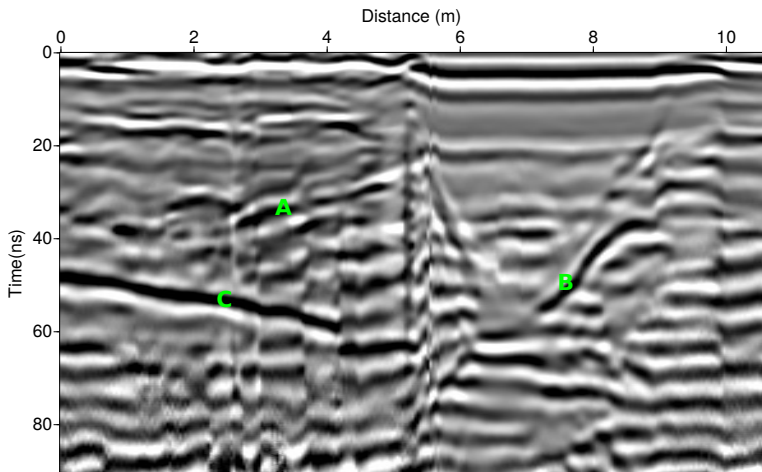
Modélisations numériques



Données simulées



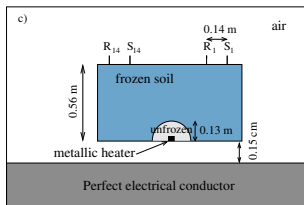
Données de terrain octobre 2016 (200 MHz)



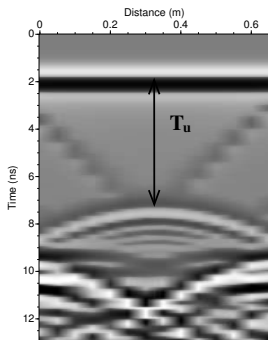
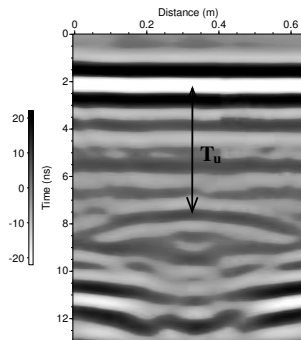
Poursuites futures à Syrdakh

- ▶ Les données radar acquises en octobre 2016 permettent de déterminer les interfaces entre mollisol et sol gelé ainsi que celle entre la zone saturée en eau autour de la rivière et celle non saturée en eau dans le mollisol.
- ▶ Répétition des mesures de terrain à différentes saisons.
- ▶ Couplage simulations numériques thermo-hydrodynamiques et électromagnétiques

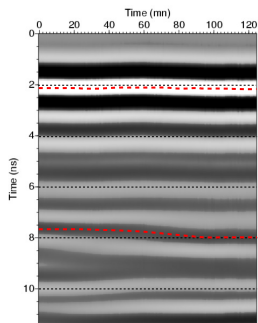
Bloc de pergélisol en chambre froide (2005)



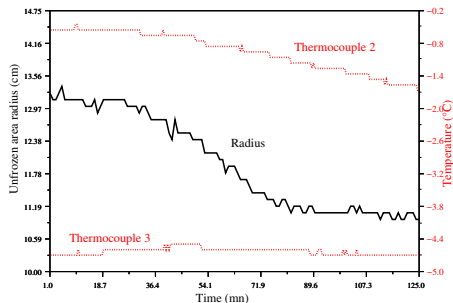
Modèle

Simulations numériques
(GprMax2D)Données mesurées
(800 MHz)

Suivi d'une interface gel/dégel



Mesures statiques au cours du regel



Rayon de la zone dégelée

→ coupler modélisation thermique et électromagnétique pour inverser ce genre de courbe pour déterminer des paramètres thermiques

Radar pour le suivi temporel

Le suivi des variations temporelles:

- ▶ robustesse et sensibilité accrue (mesures statiques en différentiel)
- ▶ étude de processus physiques dynamiques (gel/dégel, infiltrations)
- ▶ détermination de paramètres physiques autres que ε , σ ou μ

Suivi d'un front d'infiltration d'eau dans du sable

Sable de Fontainebleau: 99% quartz



Anneau simple



Porchet

Étude qualitative d'une infiltration type Porchet (2006-2007)

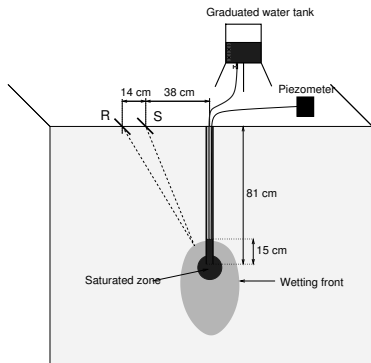
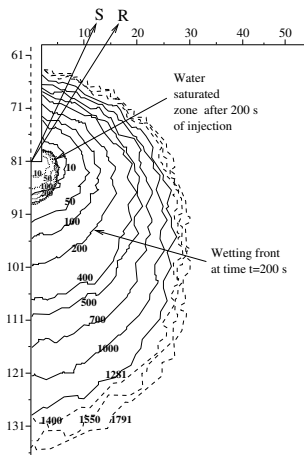


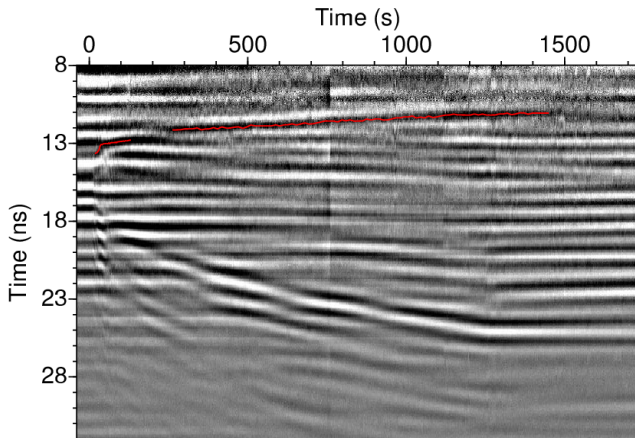
Schéma de l'expérience



Hydrus2D simulation

avec P. Tucholka (GEOPS) et S. Schneider

Données statiques 800 MHz

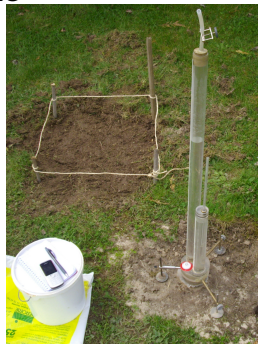


Sensibilité suffisante des mesures radar pour déterminer les limites d'un bulbe d'infiltration!

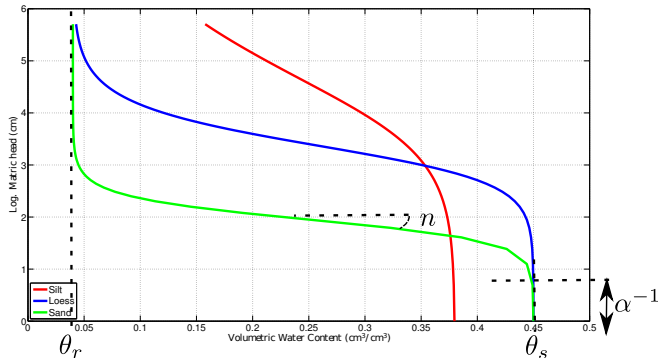
Obtenir la conductivité hydraulique

- ▶ infiltration en anneau simple ou double
- ▶ infiltromètre à disques (TRIMS)
- ▶ infiltration en petits forages (tests de Porchet ou Guelph)

mise en oeuvre: environ 1 h dans du sable



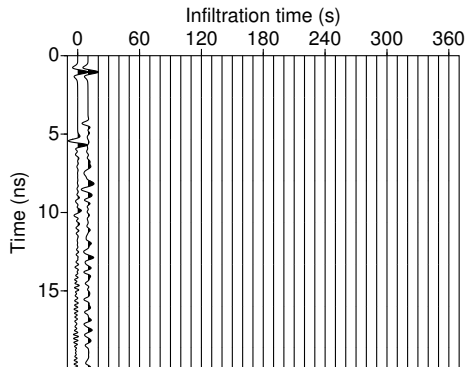
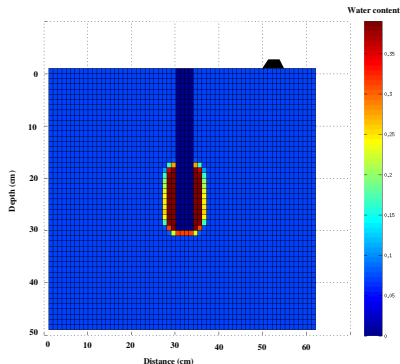
Courbe de rétention en eau (modèle de van Genuchten)



Mesures de laboratoire de plusieurs jours

Simulations numériques couplées hydrodynamiques/électromagnétiques

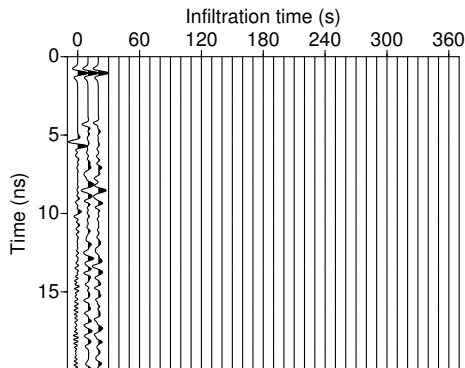
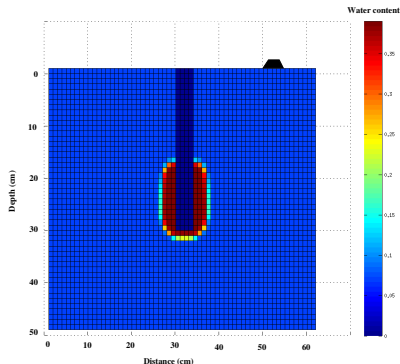
Temps d'infiltration: 10 s



→ Thèse d'Emmanuel Léger

Simulations numériques couplées hydrodynamiques/électromagnétiques

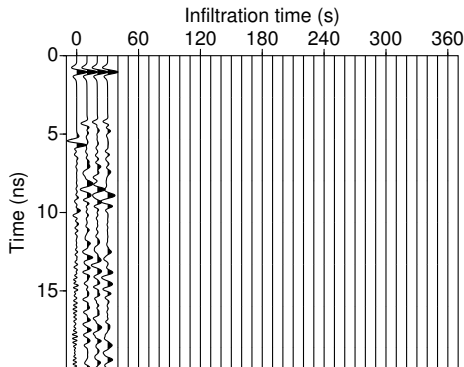
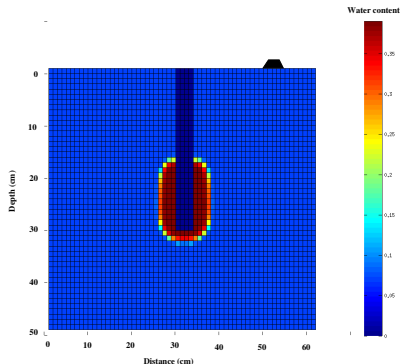
Temps d'infiltration: 20 s



→ Thèse d'Emmanuel Léger

Simulations numériques couplées hydrodynamiques/électromagnétiques

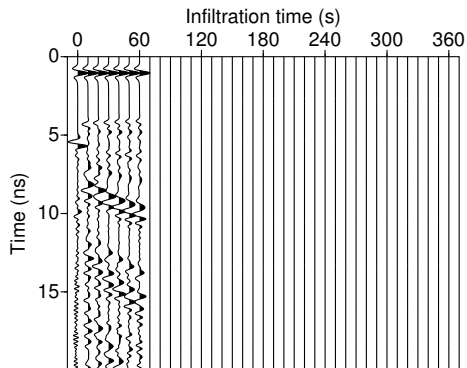
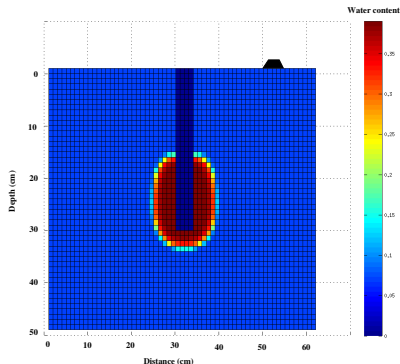
Temps d'infiltration: 30 s



→ Thèse d'Emmanuel Léger

Simulations numériques couplées hydrodynamiques/électromagnétiques

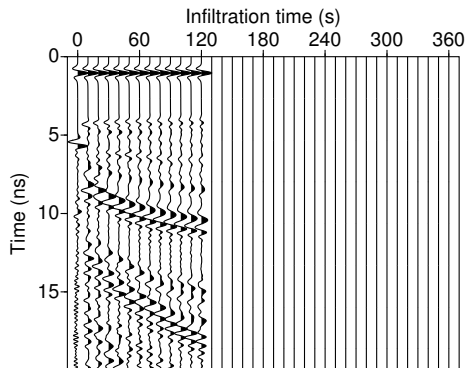
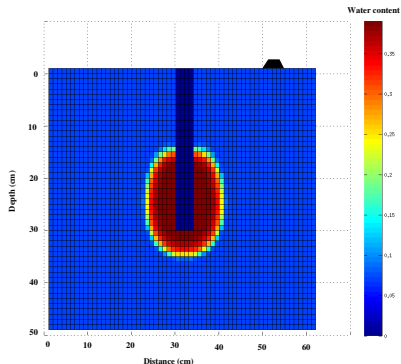
Temps d'infiltration: 1 min



→ Thèse d'Emmanuel Léger

Simulations numériques couplées hydrodynamiques/électromagnétiques

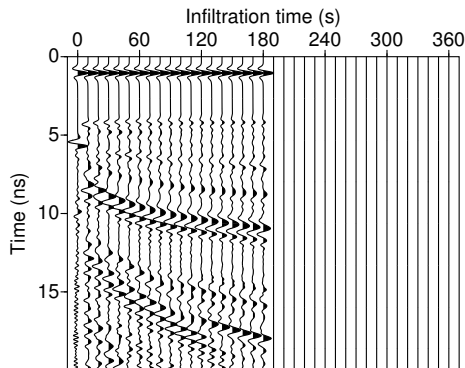
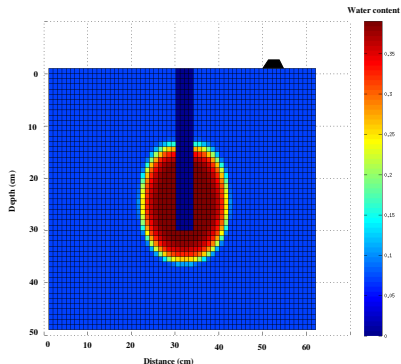
Temps d'infiltration: 2 min



→ Thèse d'Emmanuel Léger

Simulations numériques couplées hydrodynamiques/électromagnétiques

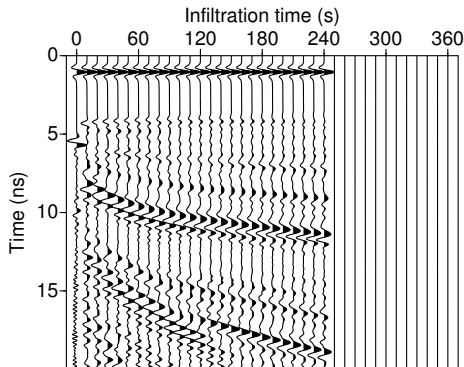
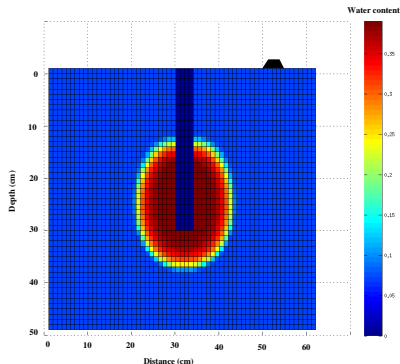
Temps d'infiltration: 3 min



→ Thèse d'Emmanuel Léger

Simulations numériques couplées hydrodynamiques/électromagnétiques

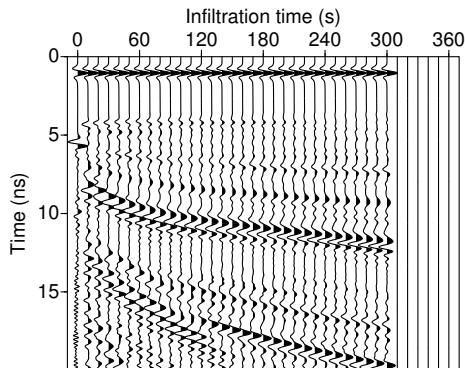
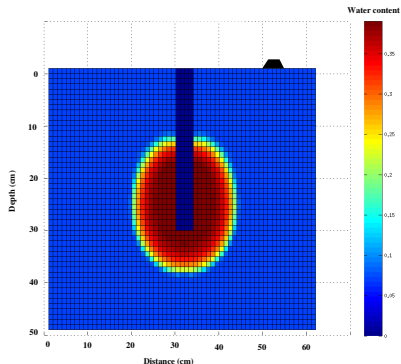
Temps d'infiltration: 4 min



→ Thèse d'Emmanuel Léger

Simulations numériques couplées hydrodynamiques/électromagnétiques

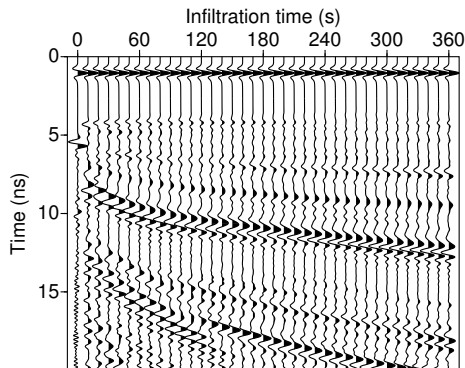
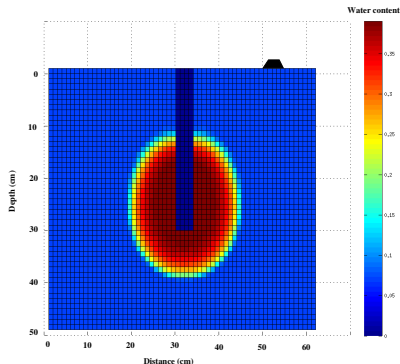
Temps d'infiltration: 5 min



→ Thèse d'Emmanuel Léger

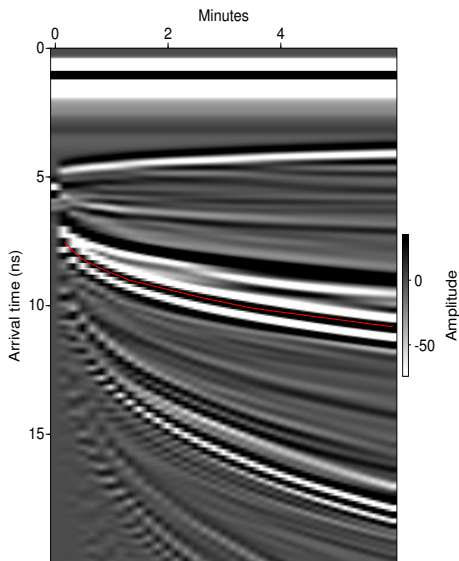
Simulations numériques couplées hydrodynamiques/électromagnétiques

Temps d'infiltration: 6 min



→ Thèse d'Emmanuel Léger

Inversion des données radar



Données:

Temps d'arrivée de la réflexion de forte amplitude.

Paramètres recherchés:

Mualem-van Genuchten

θ_r : teneur en eau résiduelle

θ_s : teneur en eau à saturation

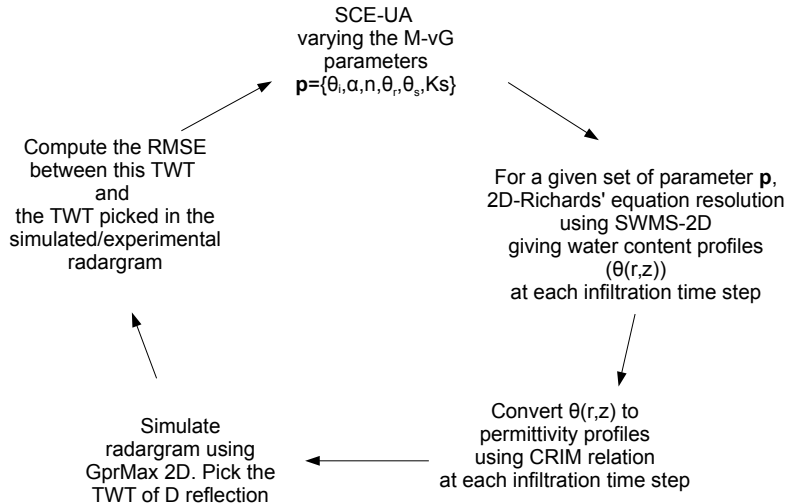
θ_i : teneur en eau initiale

α : lié à la valeur de l'entrée d'air

n : lié à la pente de la courbe de rétention en eau

K_s : conductivité hydraulique à saturation

Procédure d'optimization



Test sur données synthétiques

θ_r ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n	K_s (cm/min)	θ_i ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
--	--	----------------------------------	-----	-------------------------------------	--

Paramètres du modèle

0.06	0.39	0.023	6.71	0.120	0.07
------	------	-------	------	-------	------

Paramètres retrouvés

0.069	0.388	0.0218	6.71	0.113	0.076
-------	-------	--------	------	-------	-------

Données expérimentales



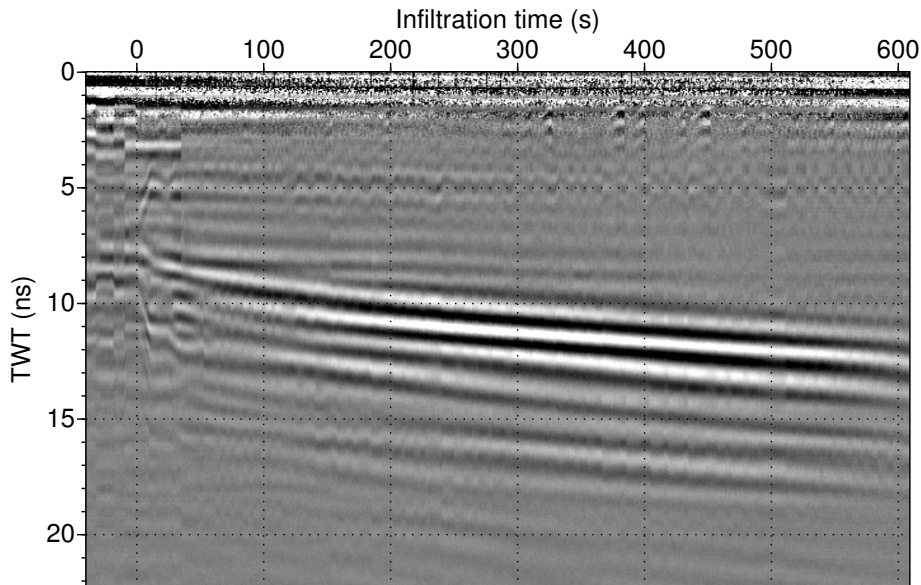
Système Malå Ramac 1600 MHz

Différentes profondeurs z

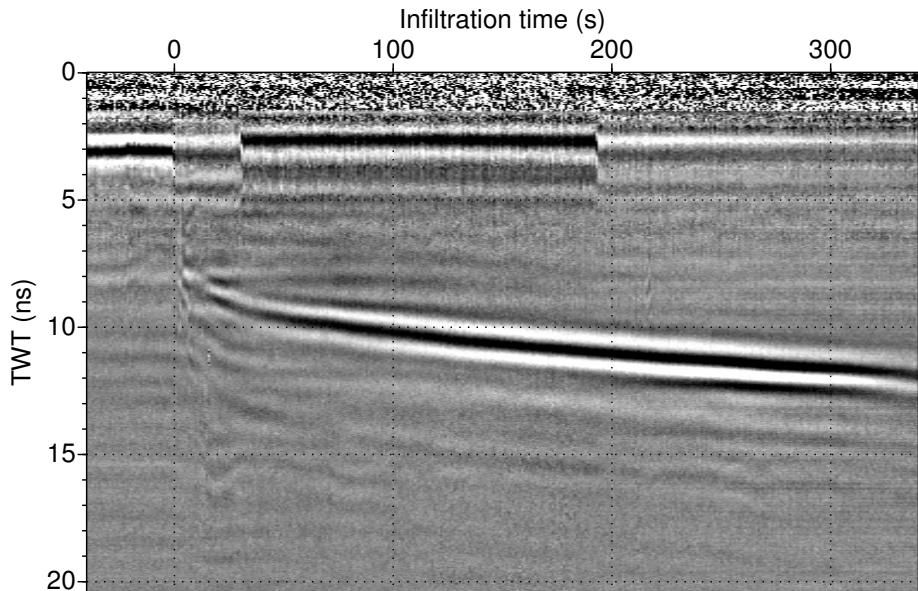
Différentes distances antennes-forage d

Différentes géométries: tangente ou radiale

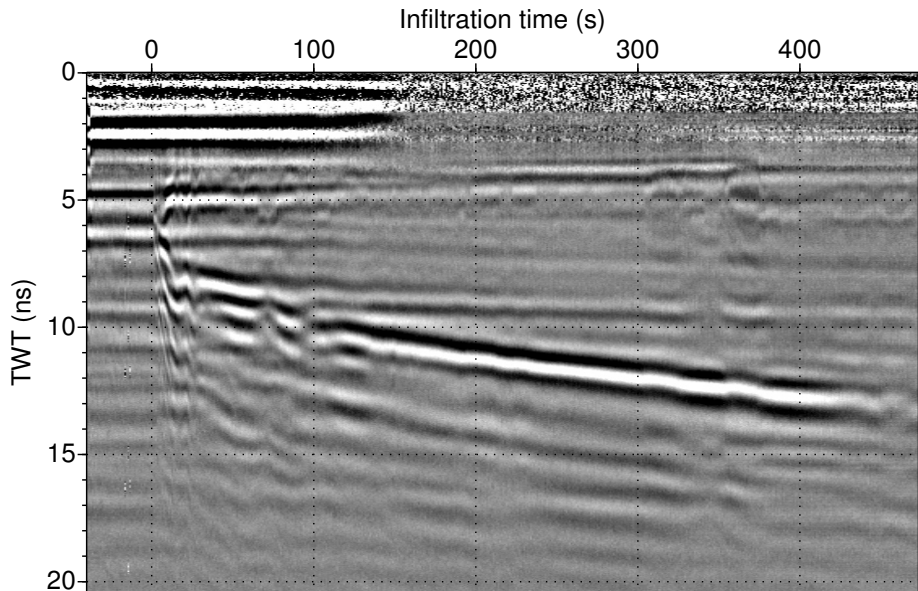
1600 MHz, $z=30$ cm, $d=20$ cm, tangente



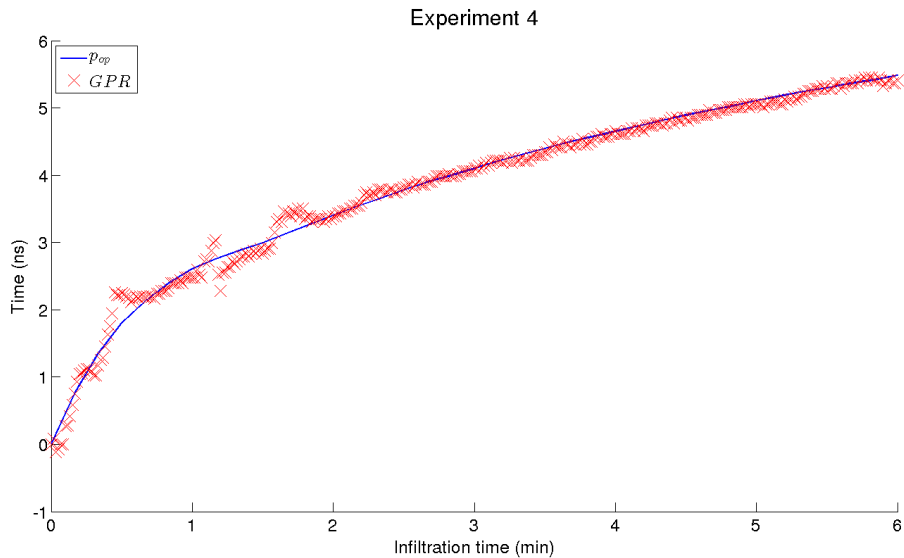
1600 MHz, $z=30$ cm, $d=20$ cm, tangente



1600 MHz, $z=30$ cm, $d=15$ cm, radiale



Données réelles vs synthétiques



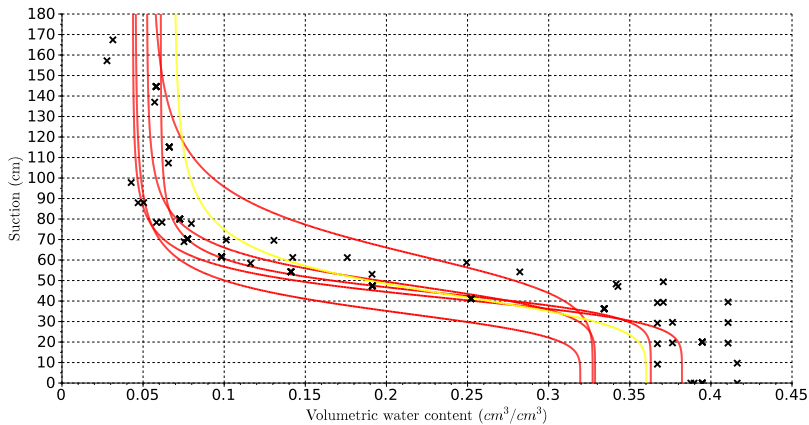
D/Y	θ_r $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	θ_s $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	α cm^{-1}	n	K_s cm min^{-1}	θ_i $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
-----	--	--	------------------------------	-----	-------------------------------	--

Suivis radar d'infiltration type Porchet

06/2006	0.07	0.36	0.023	5.0	0.1	-
06/2014	0.05	0.33	0.021	6.4	0.06	0.07
09/2014	0.06	0.36	0.023	7.3	0.11	0.07
09/2014	0.05	0.32	0.029	5.2	0.09	0.06
09/2014	0.04	0.38	0.024	6.5	0.24	0.05
09/2014	0.05	0.33	0.016	5.2	0.29	0.10

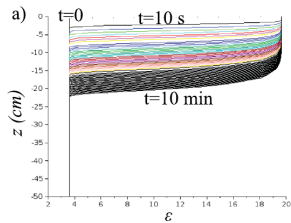
Labo. et infiltromètre à disques

Surface	0.06	0.39	0.023	6.71	[0.076;0.108]	[0.05;0.1]
30 cm	0.04	[0.37;0.39]	[0.015;0.016]	[8-10]	[0.188;0.216]	[0.075;0.1]
40 cm	[0.05;0.06]	[0.34;0.41]	[0.016;0.02]	[6.87;10]	-	0.1

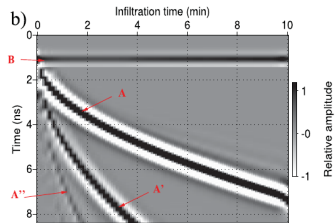


et avec des infiltrations en anneau?

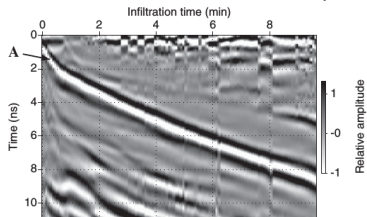




Simulation hydrodynamique
Hydrus1D puis CRIM



Simulation électromagnétique
(GprMax2D)



Données de terrain
(1600 MHz)

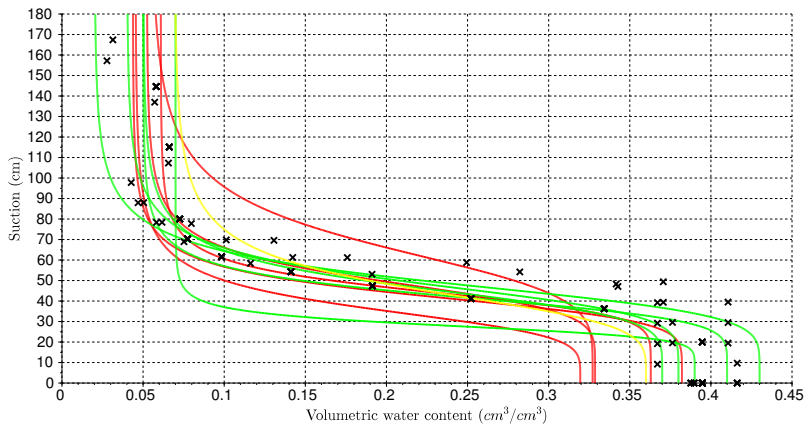
Date D/Y	θ_r $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	θ_s $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	α cm^{-1}	n	K_s cm min^{-1}	θ_i $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
-------------	--	--	------------------------------	-----	-------------------------------	--

Suivi radar d'infiltration en anneau

06/2011	0.07	0.39	0.036	9	0.03	0.07
01/2012	0.04	0.38	0.021	6	0.11	0.08
11/2012	0.02	0.43	0.021	6	0.02	0.04
11/2012	0.05	0.37	0.022	6	0.02	0.07
07/2013	0.05	0.41	0.024	7	0.13	0.06

Labo. et infiltromètre à disques

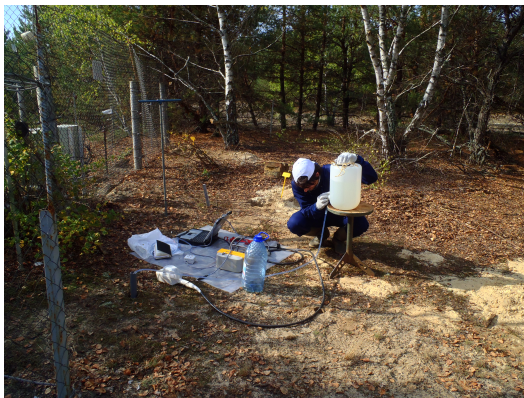
	0.06	0.39	0.023	6.71	[0.076;0.108]	[0.05;0.1]
--	------	------	-------	------	---------------	------------



Pour résumer:

- ▶ Les inversions de temps d'arrivées de réflexion radar acquises au long d'infiltration en anneau ou en forage permettent de retrouver des jeux de paramètres de Mualem-van Genuchten comparables à ceux estimés par des mesures classiques d'infiltrométrie...
- ▶ ... dans des sables...
- ▶ Pas besoin d'attendre un régime d'écoulement permanent
→ 5 minutes de mesures suffisent

Méthode de terrain pour estimer les paramètres hydrodynamiques



Pistes de recherche futures

- ▶ Évaluation des incertitudes
- ▶ Inversion de la forme d'onde (au lieu des temps d'arrivée seuls)
- ▶ Étude des effets d'hystérésis sur les courbes de rétention en eau
- ▶ Prise en compte d'autres modèles hydrodynamiques
- ▶ Étude de milieux hétérogènes et/ou anisotrope (utilisation de plusieurs antennes): étude des remblais.
- ▶ Changer d'échelle ? En utilisant des forages plus profond et des antennes basses fréquences.

Applications

- ▶ Fournir des mesures de surface utilisables dans des modélisations hydrologiques à l'échelle d'une parcelle
- ▶ Projet Chernobyl avec l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire)
- ▶ Projet KRITERRE avec ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des déchets radioactifs): couplage de méthodes géostatistiques avec des modélisations hydrodynamiques et d'évolution de radioactivité pour l'estimation du volume de sols pollués en prévision de démantèlement de centrales nucléaires.

Pour résumer

- ▶ Le radar de sol est un outil formidable pour caractériser les milieux froids! Attention aux milieux de grandes conductivités électriques.
- ▶ Validation de l'usage du radar pour faire du suivi temporel sur des processus déclenchés
- ▶ Mise au point d'une méthode rapide d'estimation de paramètres hydrodynamiques dans des sables

Merci!

