



Étude de l'impact des systèmes intercalaires sylvicoles-agricoles sur la dynamique de l'eau et la connectivité sédimentaire : suivi de terrain et modélisation numérique

Alain N. ROUSSEAU¹, Ph.D., ing., professeur-chercheur titulaire
Dennis W. HALLEMA¹, Silvio J. GUMIERE², Alain PAQUETTE³ et Alain OLIVIER⁴

¹Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement,
490 rue la de Couronne, Québec (Québec) G1K 9A9

²Université Laval, Département des Sols et de Génie Agroalimentaire,
2480 boulevard Hochelaga, Québec (Québec) G1V 0A6

³Centre d'étude de la forêt (CEF), Université du Québec à Montréal, Montréal (Québec)

⁴Université Laval, Pavillon Paul-Comtois, 2425, rue de l'agriculture, Québec (Québec) G1V 0A6

Courriel : alain.rousseau@ete.inrs.ca

Mots clefs : systèmes intercalaires, FDR, changement climatique, modélisation de l'eau souterrain, HYDRUS

Le système intercalaire est une pratique agroforestière dans laquelle des arbres sont plantés à des espacements larges, créant des couloirs pour la production de cultures associées. L'implantation des systèmes intercalaires a un impact sur le bilan d'énergie thermique et sur le bilan d'eau, ce qui conduit à des changements de la circulation d'air dans et autour du couvert végétal (Wilson et Shaw, 1977), du rayonnement net, de l'évapotranspiration et du flux de chaleur dans le sol. Une autre différence par rapport à la monoculture pratiquée dans la plupart des terres agricoles concerne l'absorption d'eau par les systèmes racinaires des plantes. Sous l'influence de l'évolution des conditions environnementales causées par un changement local du climat, l'objectif du présent projet est de quantifier et d'évaluer l'effet des systèmes de cultures intercalaires sur la dynamique de l'eau du sol et l'érosion hydrique.

La dynamique de l'eau ainsi que l'érosion du sol par le ruissellement de surface dépendent à divers degrés de l'espèce végétale (plus particulièrement la distribution racinaire, le stade de croissance), des variables météorologiques (telles que l'humidité relative, le rayonnement net, les précipitations, le vent), de la surface contributive en amont, des caractéristiques du sol (texture et type de sol, porosité). Selon les conditions locales de l'environnement dans lequel est pratiquée la culture intercalaire, on peut s'attendre à ce que les systèmes résultants influencent les variables météorologiques locales ainsi que la distribution de l'eau dans le sol et à la surface du sol. Par conséquent, il est possible que la culture intercalaire assure un certain niveau de résistance à la sécheresse et à l'augmentation anticipée de l'intensité des précipitations projetées pour le sud du Québec, Canada, par Mailhot *et al.* (2007).

Nous avons développé une approche pour quantifier et évaluer l'influence des systèmes de culture intercalaire sur la dynamique de l'eau du sol et l'érosion du sol par le ruissellement de surface. L'approche s'articule autour de quatre thèmes principaux, qui comprennent le suivi météorologique et le suivi de l'humidité du sol, la modélisation du mouvement de l'eau dans le sol, la simulation de l'érosion hydrique des sols et la simulation du comportement de la circulation de l'eau du sol dans des conditions climatiques différentes.

Lors des campagnes de terrain de 2011 et 2012, nous avons mesuré la pression atmosphérique, l'humidité relative, les précipitations, la température, le rayonnement photosynthétiquement actif (RPA), la vitesse et la direction du vent, à l'aide d'une station météorologique portable. Les données de l'humidité du sol sont importantes pour établir la courbe de rétention d'eau du sol dont nous avons besoin pour estimer le stockage

en eau dans le sol, l'approvisionnement en eau pour les plantes et la stabilité des agrégats du sol. Elles ont été obtenues en utilisant 45 capteurs FDR implantés dans le sol le long d'un transect de 12,4 m perpendiculaire aux rangées d'arbres du système de culture intercalaire. La campagne de 2011 a produit des données de haute qualité. Les données météorologiques ont été analysées de même que les données d'humidité du sol afin de préparer un modèle hydrologique pour la distribution de l'eau du sol. L'analyse des données de la campagne de 2012 viendra confirmer vraisemblablement notre compréhension du système.

Le modèle de distribution d'eau du sol du système de culture intercalaire est développé dans la plateforme de modélisation 2D/3D HYDRUS (Sejna *et al.*, 2011). Les équations à base physique et conceptuelles qui représentent les processus hydrologiques dans le modèle permettent de simuler les précipitations, l'infiltration, la dynamique de l'eau dans la zone non saturée du sol et l'écoulement en milieu saturé avec l'équation de Richards; la transpiration après absorption par les racines est simulée avec la fonction linéaire de réponse de stress hydrique de Feddes (Feddes *et al.*, 2001), et l'évaporation de la surface du sol et la transpiration réelle en utilisant l'équation de Penman-Monteith.

L'agriculture intensive est souvent la cause de l'érosion accélérée des sols avec des taux d'ablation plusieurs fois supérieurs à la vitesse des processus de formation (pédogenèse). La modélisation de l'érosion hydrique est potentiellement utile pour la mise en œuvre de pratiques de gestion bénéfiques sur les bassins versants agricoles, telle la culture intercalaire. Cela peut nous permettre de mieux conserver le sol et de réduire le transport des sédiments vers les ruisseaux. À cette fin, nous prévoyons de réaliser des simulations d'érosion d'un système de culture intercalaire sur la base de scénarios traditionnels de cultures en rangs en utilisant le modèle distribué d'érosion hydrique MHYDAS-Érosion développé par Gumiere *et al.* (2010) et de comparer les taux d'érosion résultant.

Dans cette contribution, nous présentons le dispositif de terrain (station météorologique et suivi hydrodynamique du sol) et les résultats de la modélisation hydrologique du système intercalaire sélectionné pour cette étude (Mauricie, Québec).

RÉFÉRENCES

- Feddes, R.A., H. Hoff, M. Bruen, T. Dawson, P. De Rosnay, P. Dirmeyer, R.B. Jackson, P. Kabat, A. Kleidon, A. Lilly et A.J. Pitman. 2001. Modeling root water uptake in hydrological and climate models. *Bulletin of the American Meteorological Society* **82** (12), 2797–2809.
- Gumiere, S.J., D. Raclot, B. Cheviron, G. Davy, X. Louchart, J.-C. Fabre, R. Moussa et Y. Le Bissonnais. 2010b. MHYDAS-Erosion: A distributed single-storm water erosion model for agricultural catchments. *Hydrological Processes* **25**, 1717–1728.
- Mailhot, A., S. Duchesne, D. Caya et G. Talbot. 2007. Assessment of future change in intensity-duration-frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrology* **347**, 197–210.
- Šejna, M., J. Šimůnek et M.T. Van Genuchten. 2011. The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. User manual, version 2.0. PC Progress, Prague, Czech Republic.
- Wilson, N.R. et R.H. Shaw. 1977. A higher order closure model for canopy flow. *Journal of Applied Meteorology* **16** (11), 1197–1205.

Étude de l'impact des
systèmes intercalaires sylvicoles-agricoles sur
la dynamique de l'eau et
la connectivité sédimentaire :
Suivi de terrain et modélisation numérique

ALAIN N. ROUSSEAU^[1], DENNIS W. HALLEMA^[1]

SILVIO J. GUMIERE^[2], YANN PÉRIARD-LARRIVÉE^[2]

GABRIEL HOULD-GOSSELIN^[1], ALAIN PAQUETTE^[3], ALAIN OLIVIER^[2]

*Contribution à la Journée scientifique – Agroforesterie organisée par le CRAAQ
7 février 2013 à Drummondville, Québec*

Centre - Eau Terre Environnement

Fondsvert Québec

OURANOS

UNIVERSITÉ L'AVANT-GARDE
LAVAL

UQÀM

INRS^[1]
Université d'avant-garde

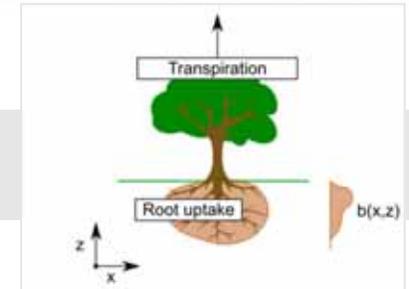
Plan de présentation

- État des connaissances et hypothèses
- Matériel et méthodes
 - Protocole de suivi expérimental
 - Outils de modélisation
 - Scénarios de changements climatiques
- Exemples de résultats
 - Dynamique de l'eau dans le sol
 - Suivi et modélisation
- Conclusion

État des connaissances et hypothèses

Dynamique de l'eau du sol

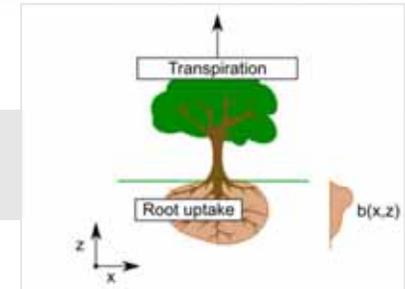
- Influence de la frondaison
 - Modifications des flux de chaleurs sensible, latente et dans le sol causées par des changements de conditions d'écoulements de l'air et d'apport en énergie solaire
 - Interception par le feuillage et écoulement de l'eau le long de la frondaison



État des connaissances et hypothèses

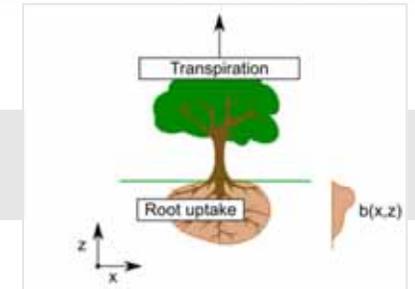
Dynamique de l'eau du sol

- Influence de la frondaison
 - Modifications des flux de chaleurs sensible, latente et dans le sol causées par des changements de conditions d'écoulements de l'air et d'apport en énergie solaire
 - Interception par le feuillage et écoulement de l'eau le long de la frondaison
- Influence du système racinaire
 - Modification de l'écoulement de l'eau dans le sol par la présence d'écoulement préférentiels et de gradients de succion



État des connaissances et hypothèses

Dynamique de l'eau du sol



- Influence de la frondaison
 - Modifications des flux de chaleurs sensible, latente et dans le sol causées par des changements de conditions d'écoulements de l'air et d'apport en énergie solaire
 - Interception par le feuillage et écoulement de l'eau le long de la frondaison
- Influence du système racinaire
 - Modification de l'écoulement de l'eau dans le sol par la présence d'écoulement préférentiels et de gradients de suction
- **Hypothèses sur les impacts potentiels**
 - Contribution des espèces sylvicoles à la résilience aux sécheresses par la rétention d'eau dans les couches supérieures du sol
 - Compétition accrue entre espèces sylvicoles et agricoles pour l'eau du sol

État des connaissances et hypothèses

Érosion hydrique du sol et connectivité sédimentaire

- Influence de la frondaison
 - Protection partielle de la culture – Réduction de l'érosivité
- Influence du système racinaire
 - Formation d'aggrégats de sol - Diminution de l'érodabilité du sol

État des connaissances et hypothèses

Érosion hydrique du sol et connectivité sédimentaire

- Influence de la frondaison
 - Protection partielle de la culture – Réduction de l'érosivité
- Influence du système racinaire
 - Formation d'aggrégats de sol - Diminution de l'érodabilité du sol
- **Hypothèse sur les impacts potentiels**
 - Contribution de l'aménagement (espèces sylvicoles perpendiculaires à la pente du champs) à la segmentation de la connectivité sédimentaire

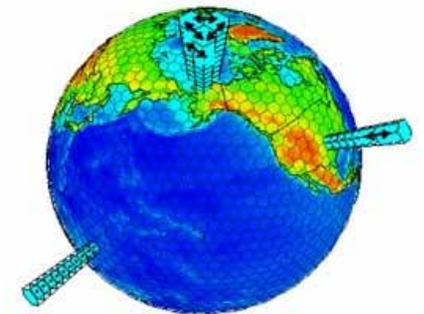


État des connaissances et hypothèses

Changements climatiques pour la région à l'étude

Sur la base de cinq simulations MGC (1) & MRC (4) issues d'une analyse *cluster* et la méthode des deltas (2041-2070 vs 1971-2000)

- **Températures**
 - Tmin: JFM 3,50; AMJ 2,62; JAS 2,65; OND 3,09 [°C]



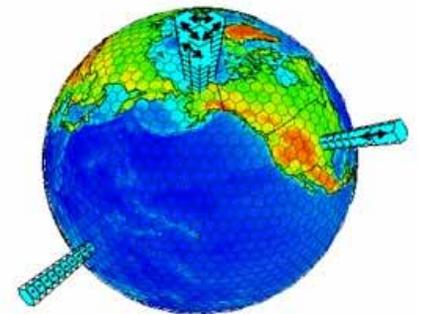
État des connaissances et hypothèses

Changements climatiques pour la région à l'étude

Sur la base de cinq simulations MGC (1) & MRC (4) issues d'une analyse *cluster* et la méthode des deltas (2041-2070 vs 1971-2000)

- **Températures**

- Tmin: JFM 3,50; AMJ 2,62; JAS 2,65; OND 3,09 [°C]
- Tmax: JFM 2,73; AMJ 2,48; JAS 2,73; OND 2,86 [°C]

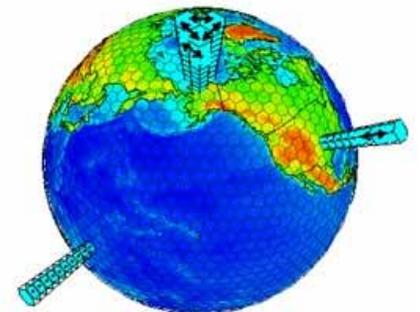


État des connaissances et hypothèses

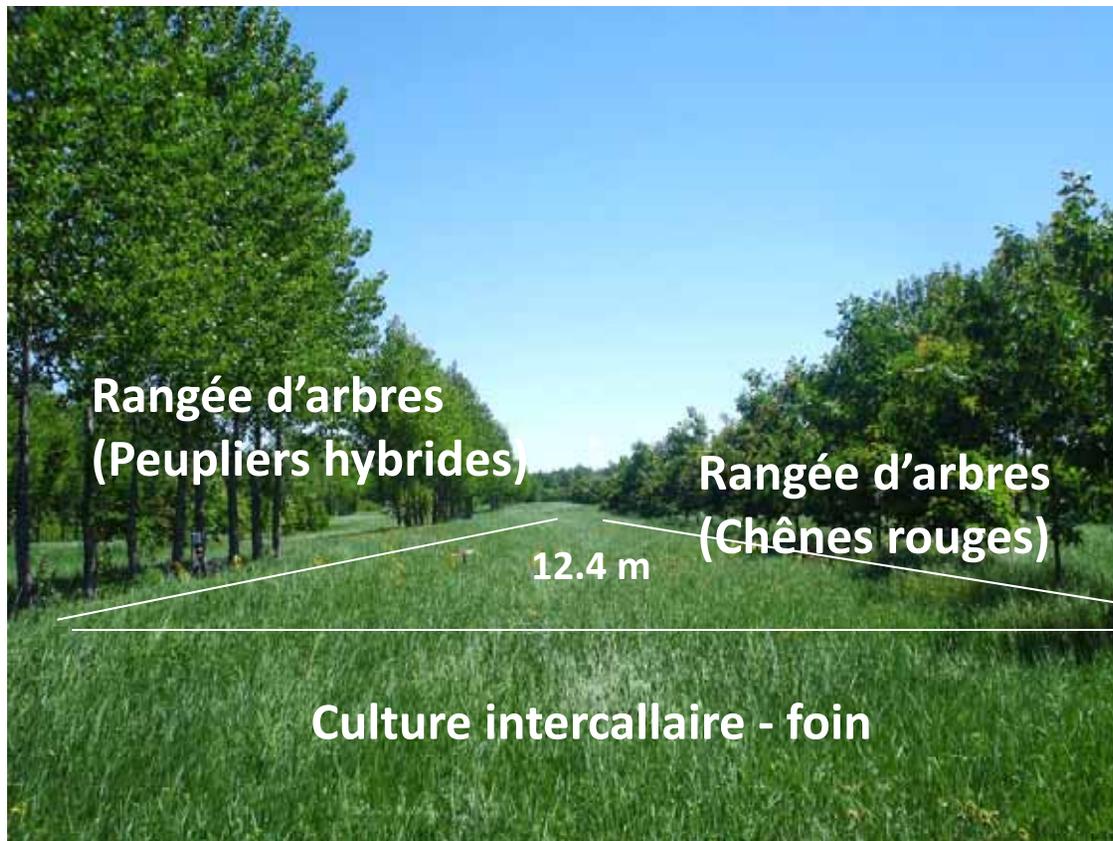
Changements climatiques pour la région à l'étude

Sur la base de cinq simulations MGC (1) & MRC (4) issues d'une analyse *cluster* et la méthode des deltas (2041-2070 vs 1971-2000)

- Températures
 - Tmin: JFM 3,50; AMJ 2,62; JAS 2,65; OND 3,09 [°C]
 - Tmax: JFM 2,73; AMJ 2,48; JAS 2,73; OND 2,86 [°C]
- Précipitation
 - JFM 1,15; AMJ 1,09; JAS 0,97; OND 1,16 [facteur multiplicatif]
- Vent, humidité relative et rayonnement solaire
 - Aucune modification significative



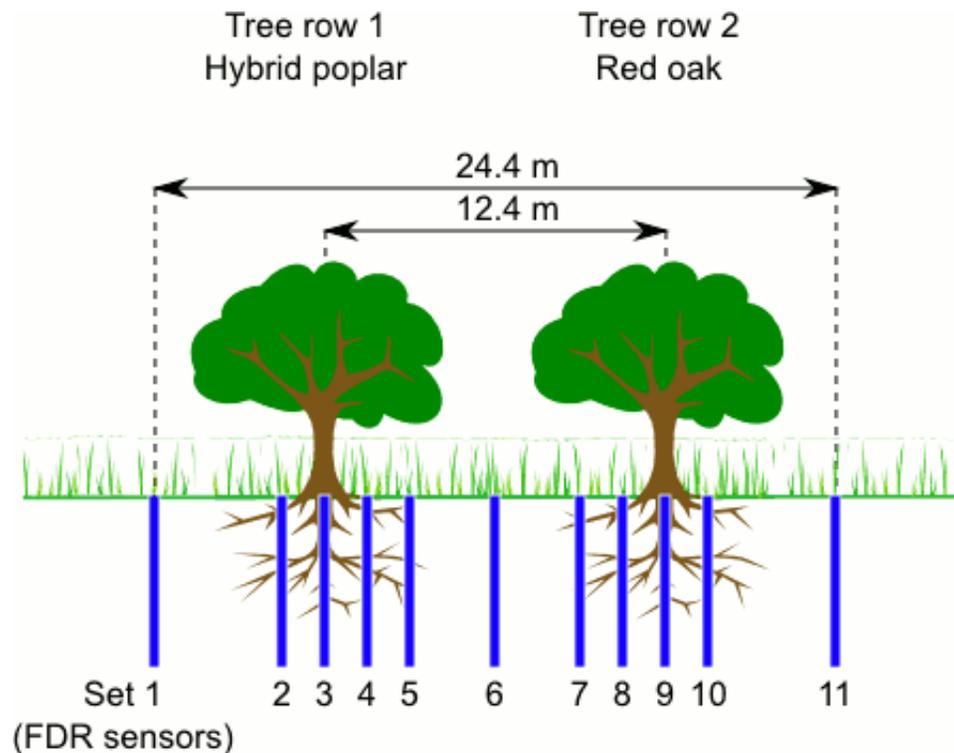
Étude de la dynamique de l'eau du sol du système de cultures intercalaires de St-Paulin en Mauricie



Matériel et Méthodes

Dynamique de l'eau dans le sol

Protocole expérimental



- Station météorologique
- 45 sondes FDR
- 11 séries de sonde le long de transects (< 2 m)
- Plan d'installation des sondes à 7, 25, 45, 75 et 100 cm de profondeurs
- 2011-2012 (MJJASON)

Systeme d'acquisition du dispositif des sondes FDR



Mise en place des sondes



Caractérisation du profil des sols du site

Profondeur [cm]	Classe texturale
1-15	Sable loameux
15-75	Sable
75-110	Loam
110-140	Loam argileux

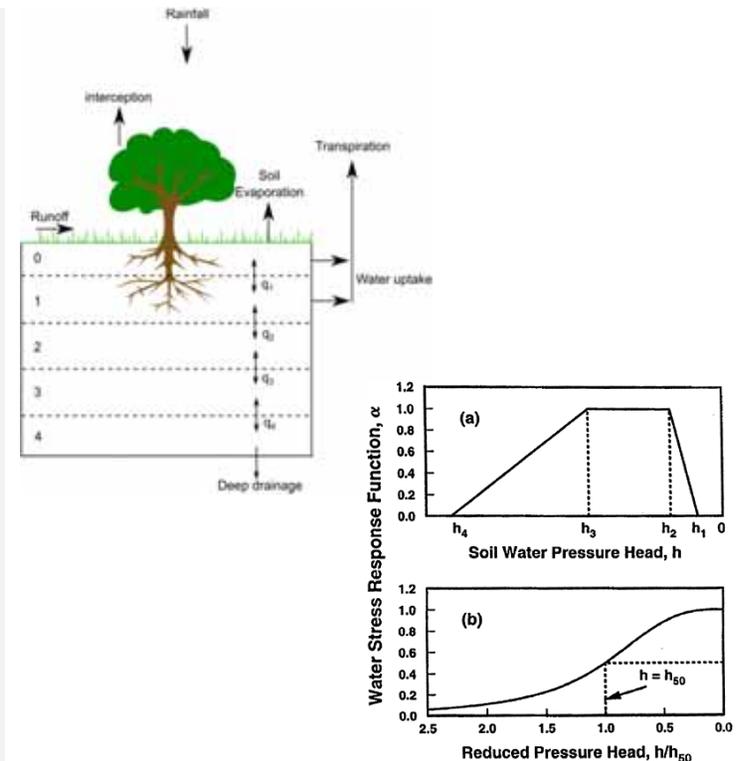
- Sol de type dytric brunisol avec un potentiel agricole modéré selon le Système Canadien de Classification des Sols
- Analyse granulométrique d'échantillons de sol en laboratoire

Matériel et Méthodes

Dynamique de l'eau dans le sol – Modélisation

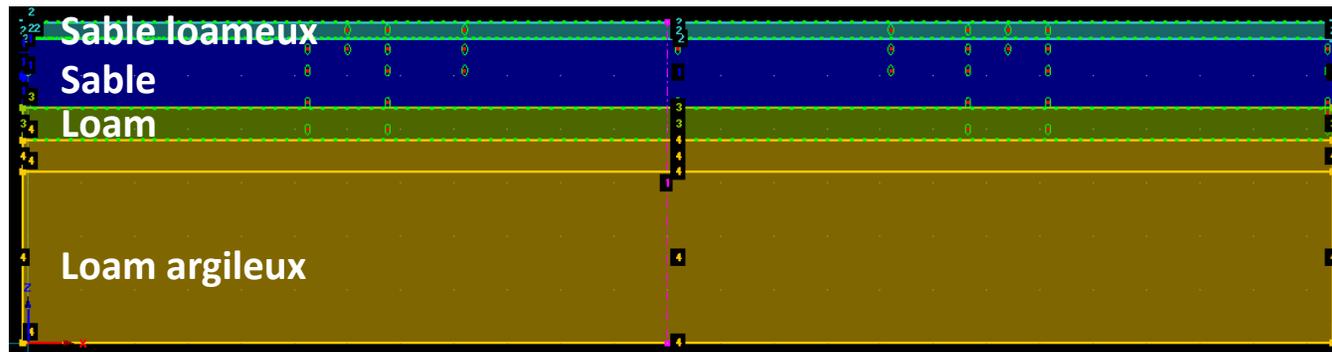
HYDRUS 2D/3D [1]

- Écoulement souterrain à saturation partielle
 - Équation de Richards
- Absorption par les racines
 - Équation de Feddes
- Évapotranspiration potentielle
 - Modèle de Penman-Monteith



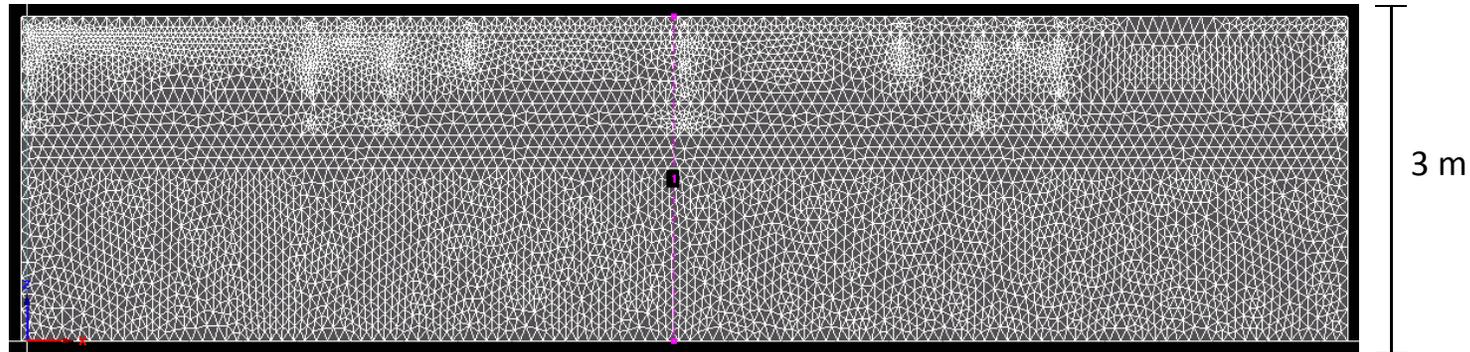
[1] Šimunek, J., Van Genuchten, M. T., Šejna, M., 2011. *The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media*. Technical manual, version 2.0. PC Progress, Prague, Czech Republic.

Modélisation du site de St-Paulin avec HYDRUS



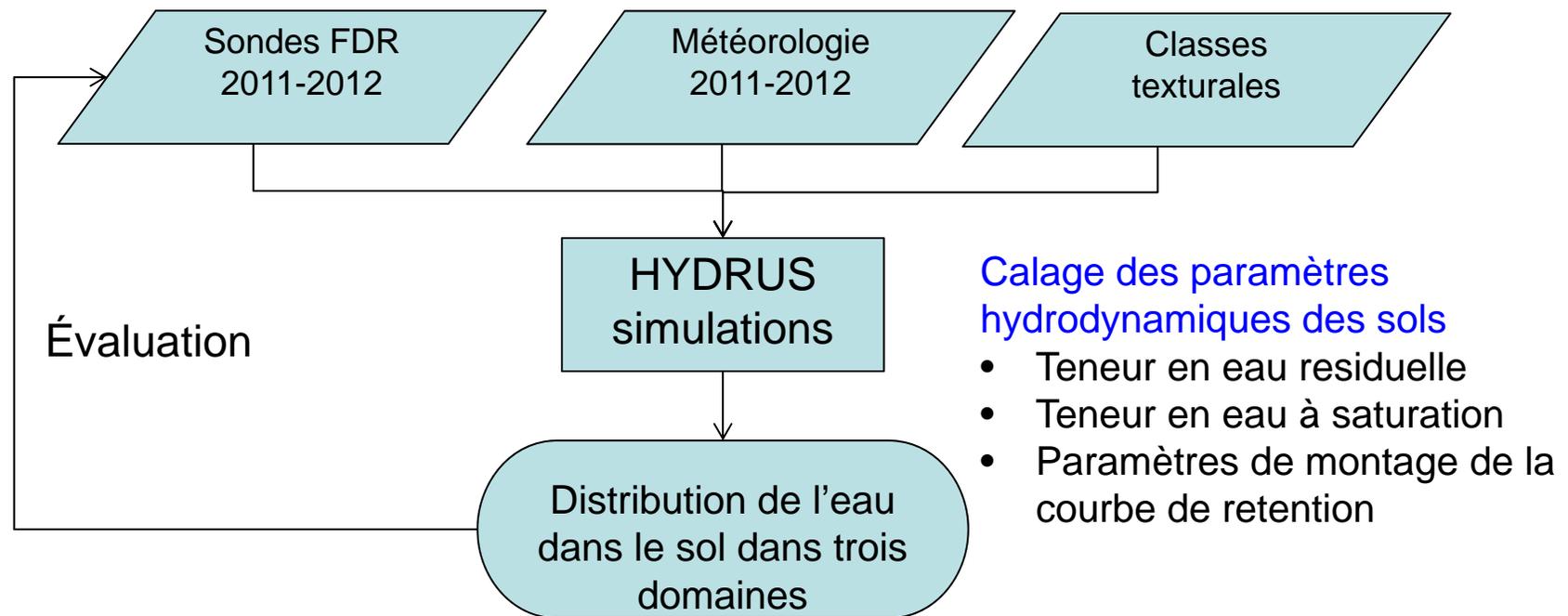
Distribution des couches de sols

24 m



Maillage triangulaire *Densification des mailles près des sondes et à l'interface des couches*

Calage et validation de la modélisation HYDRUS



Les trois domaines – Volumes des trois systèmes racinaires

- Évaluation pour la saison de croissance (MJJASO)
- Fonction de densité de distribution de fréquence (pdf) et fonction cumulative (F)

Matériel et Méthodes

Érosion hydrique des sols – Modélisation

Modèle MHYDAS-Erosion [1]

- Modèle à base physique spatialisé, évènementiel, simulant les processus d'érosions diffuse et linéaire

[1] Gumiere, S. J., D. Raclot, B. Cheviron, G. Davy, X. Louchart, J.-C. Fabre, R. Moussa, Y.L. Bissonais. (2011). MHYDAS-Erosion: a distributed single-storm water erosion model for agricultural catchments. *Hydrol. Process.* 25, 1717-1728.

Matériel et Méthodes

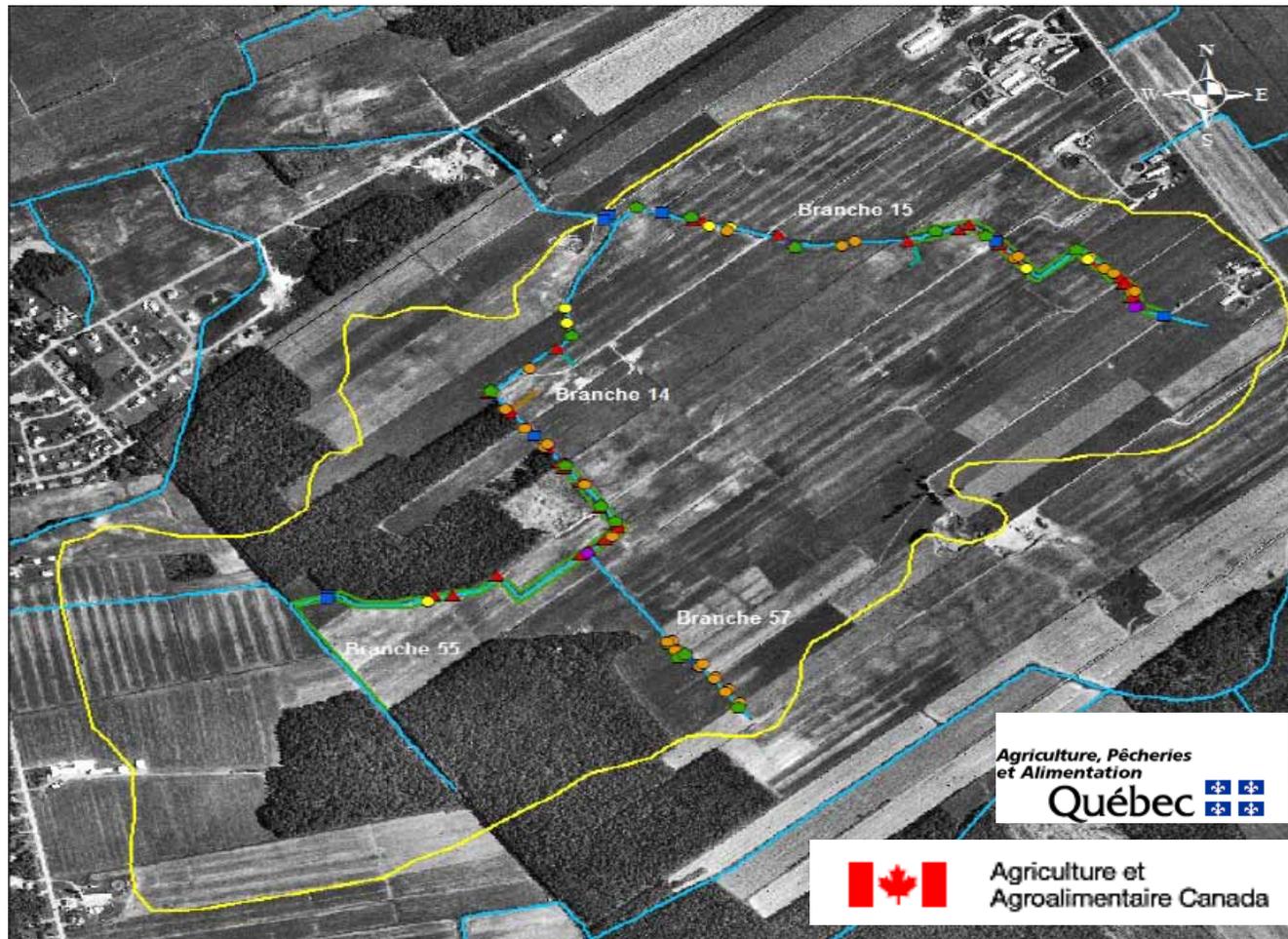
Érosion hydrique des sols – Modélisation

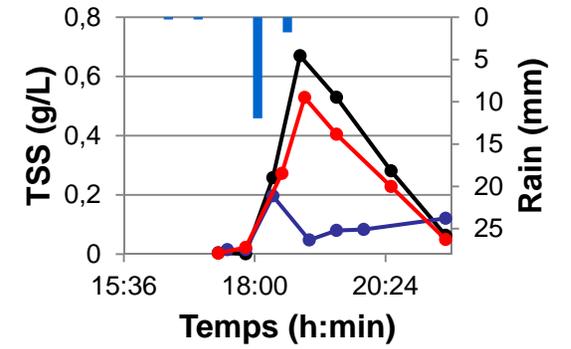
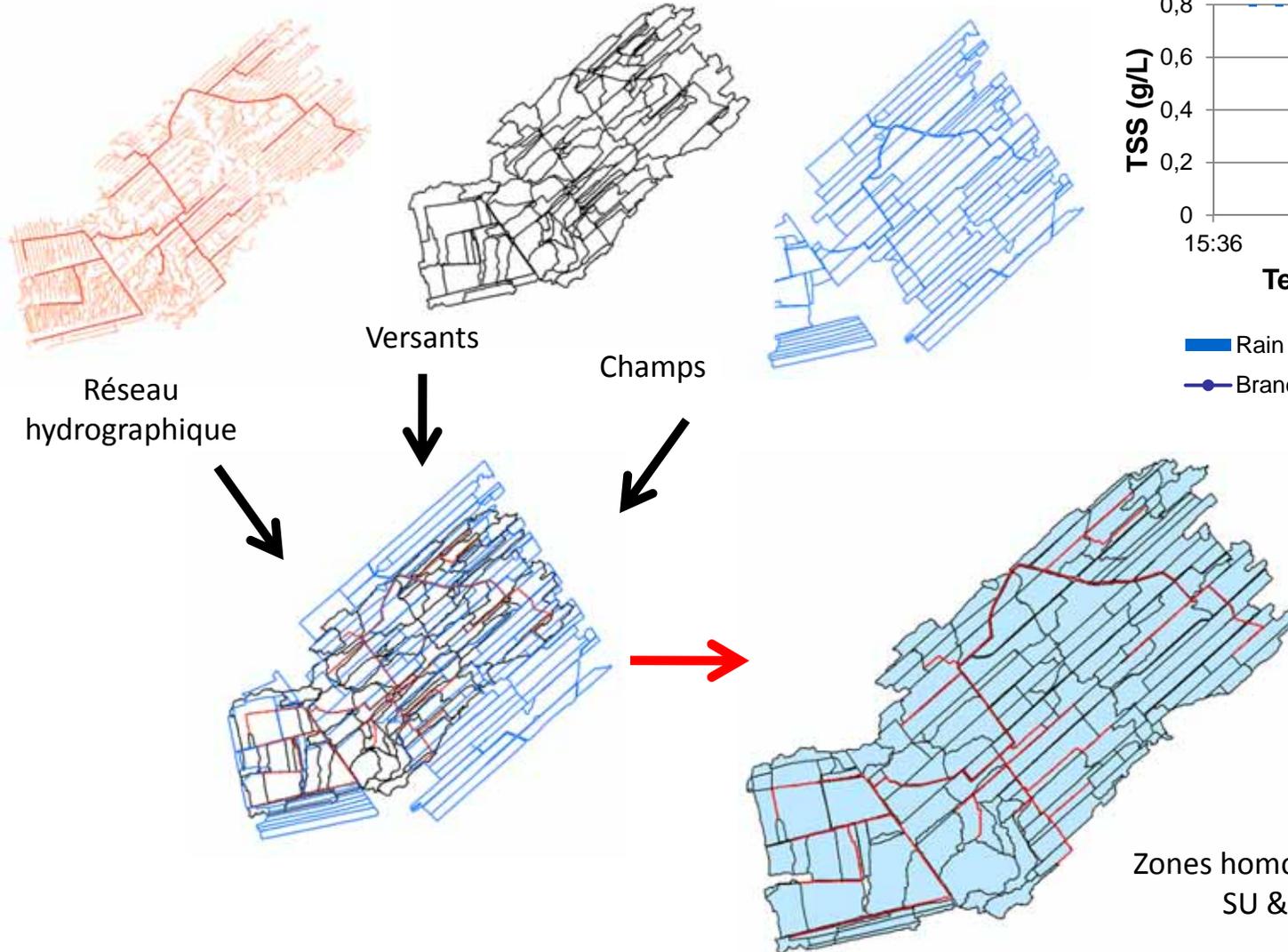
Modèle MHYDAS-Erosion [1]

- Modèle à base physique spatialisé, évènementiel, simulant les processus d'érosions diffuse et linéaire
- **Basé sur une segmentation spatiale du paysage**
 - Surface terrestre « unités de surface, SU »
 - Réseau hydrographique en « tronçons, RS »
 - Connexion de chaque SU à l'unité de surface en aval ou à un RS.
 - Permettant de représenter les discontinuités hydrologiques (ex. : PGB) et la variabilité de l'occupation du sol

[1] Gumiere, S. J., D. Raclot, B. Cheviron, G. Davy, X. Louchart, J.-C. Fabre, R. Moussa, Y.L. Bissonais. (2011). MHYDAS-Erosion: a distributed single-storm water erosion model for agricultural catchments. *Hydrol. Process.* 25, 1717-1728.

Microbassin intervention Bras d'Henri (3 km²)





■ Rain ● Branche 14
● Branche 15 ● Confluence

Matériel et Méthodes

Changements climatiques – Modélisation HYDRUS

Sur la base de cinq simulations de MGC (1) & MRC (4) issus d'un *cluster* et selon la méthode des deltas (2041-2070 vs 1971-2000)

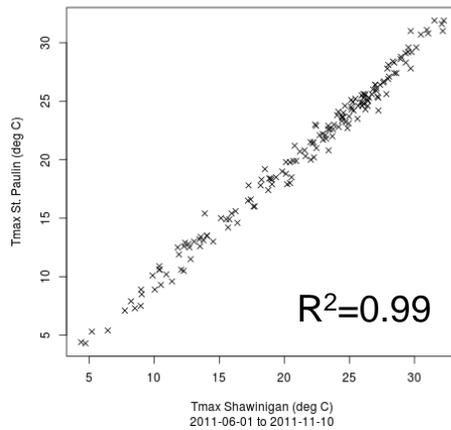
- Utilisation des données historiques de la station de Shawinigan (pseudo St-Paulin) pour l'application
 - St-Paulin, élévation 140 m (2011-2012)
 - Shawinigan, 7018000, élévation 122 m (1967-1996)
 - Shawinigan, 7018001, élévation 110 m (2011-2012)

Étude de corrélation entre les deux stations

2011

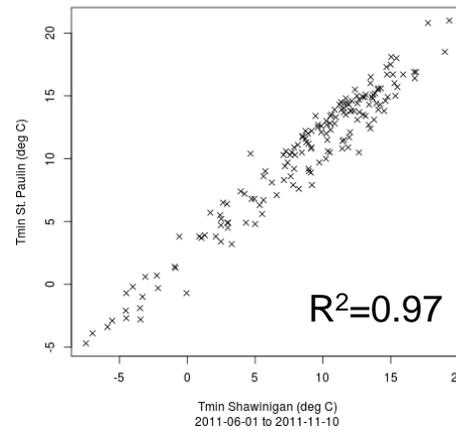
Tmax journalier

Daily Tmax at St. Paulin and Shawinigan
R2=0.993793729713053



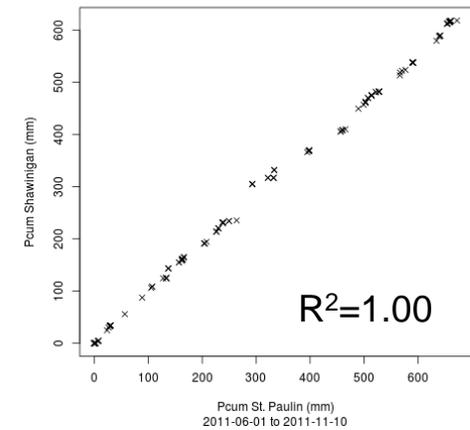
Tmin journalier

Daily Tmin at St. Paulin and Shawinigan
R2=0.972431313639407



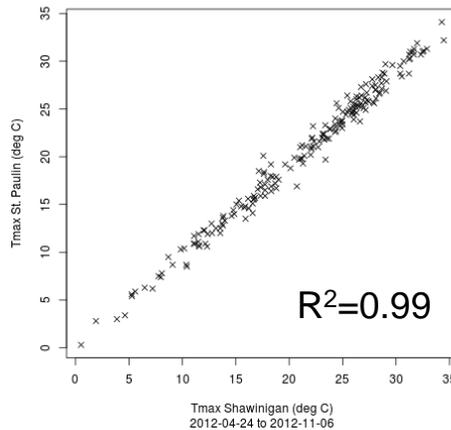
Précipitation cumulative

Cumulative prec. at St. Paulin and Shawinigan
R2=0.999111250427157

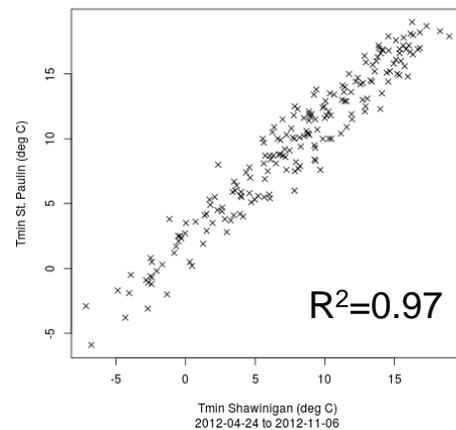


2012

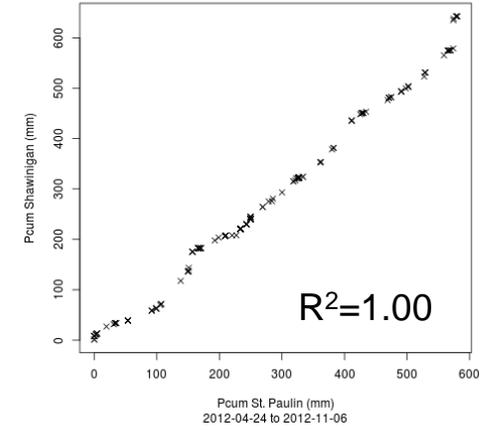
Daily Tmax at St. Paulin and Shawinigan
R2=0.992777077860691



Daily Tmin at St. Paulin and Shawinigan
R2=0.96786430351607

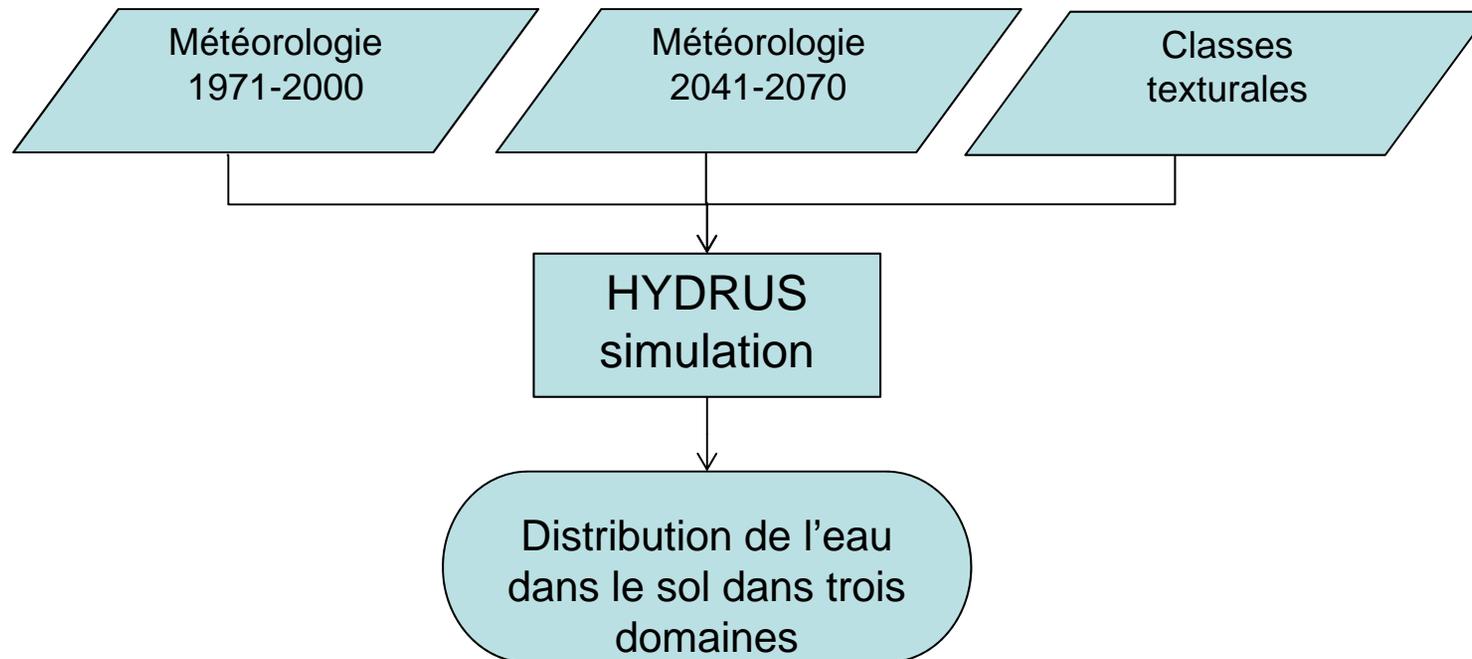


Cumulative prec. at St. Paulin and Shawinigan
R2=0.995877449665179



Matériel et Méthodes

Changements climatiques – Modélisation HYDRUS



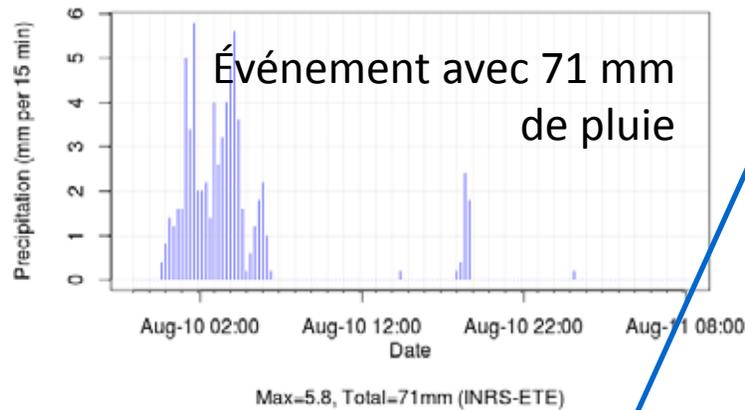
Les trois domaines – Volumes des trois systèmes racinaires

- Évaluation pour la saison de croissance (MJJASO)
- Fonction de densité de distribution de fréquence (pdf) et fonction cumulative (F)

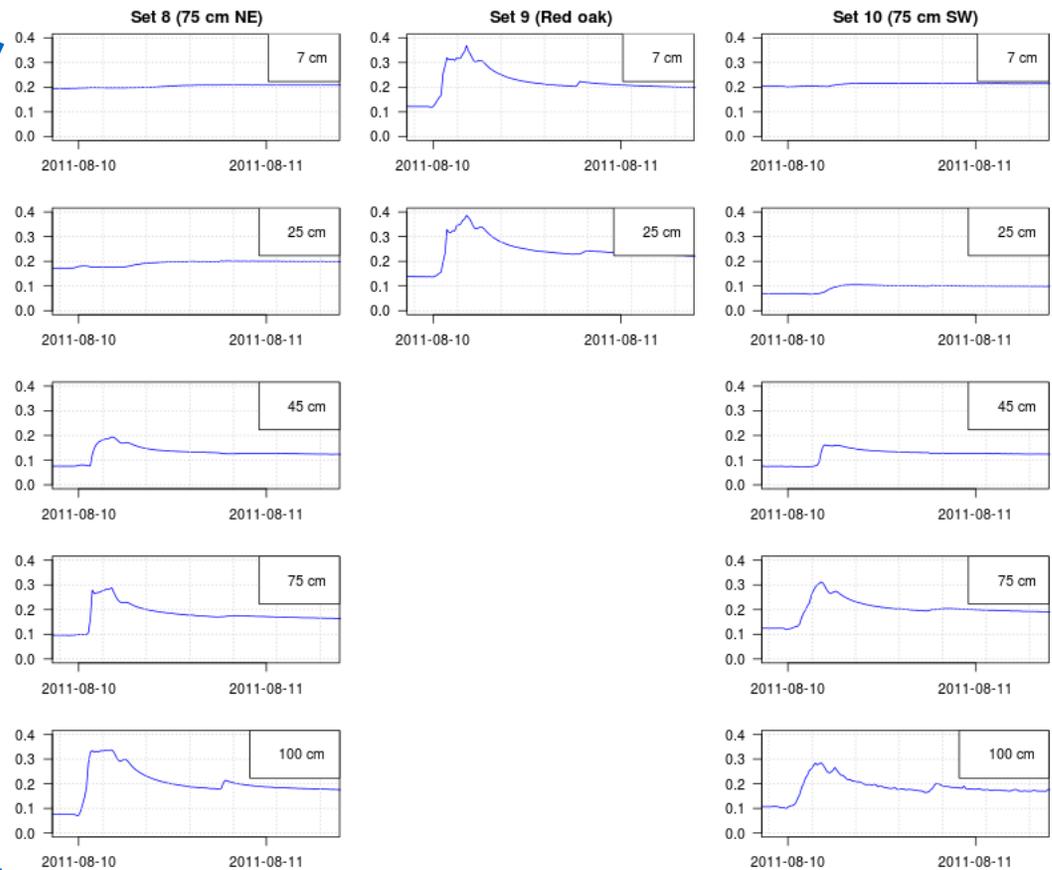
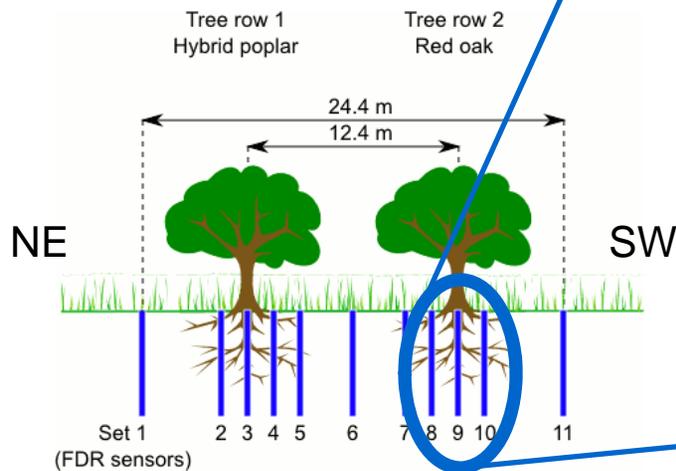
Dynamique de l'eau dans le sol

Exemples de résultats

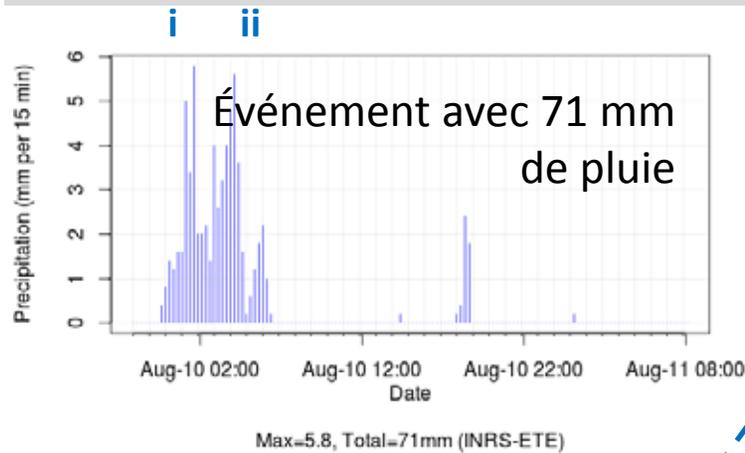
Infiltration à la base d'un chêne rouge – effet frondaison



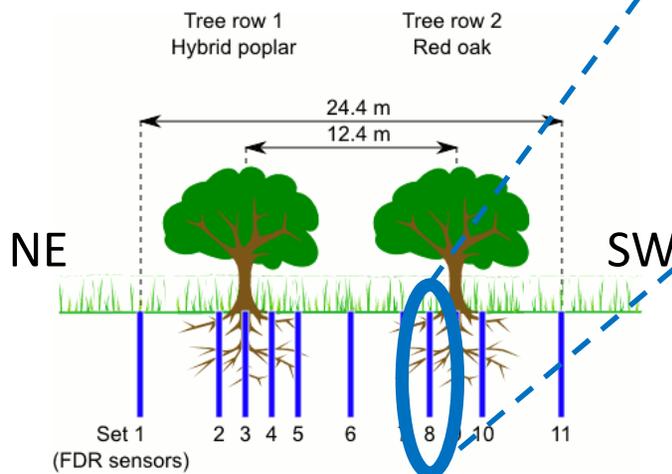
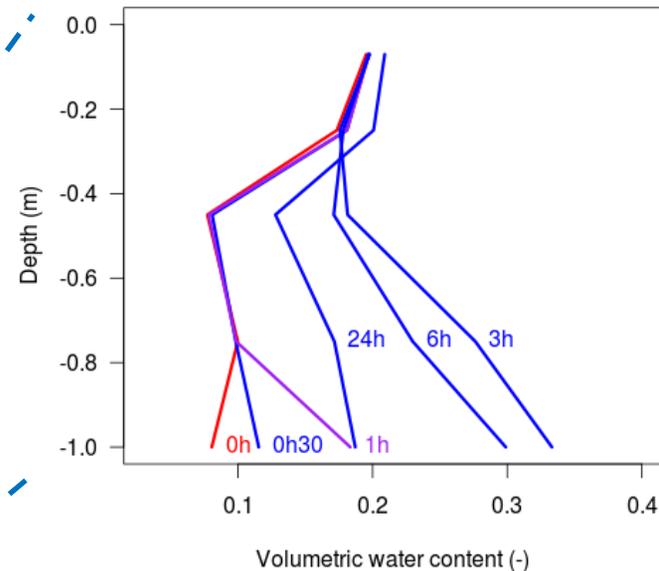
Contenu en eau volumétrique (-)



Infiltration à la base d'un chêne rouge – effet frondaison

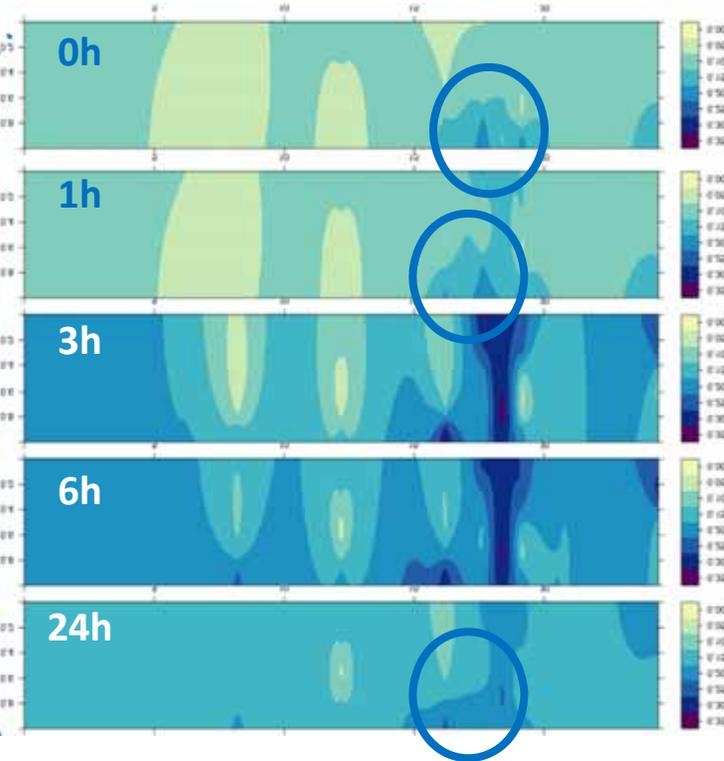
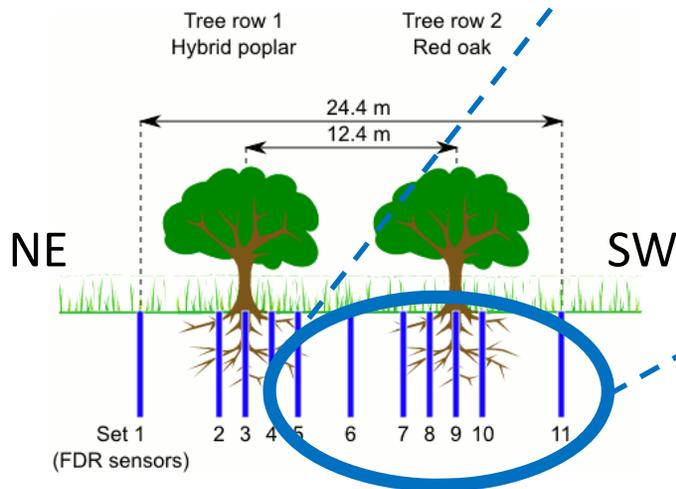
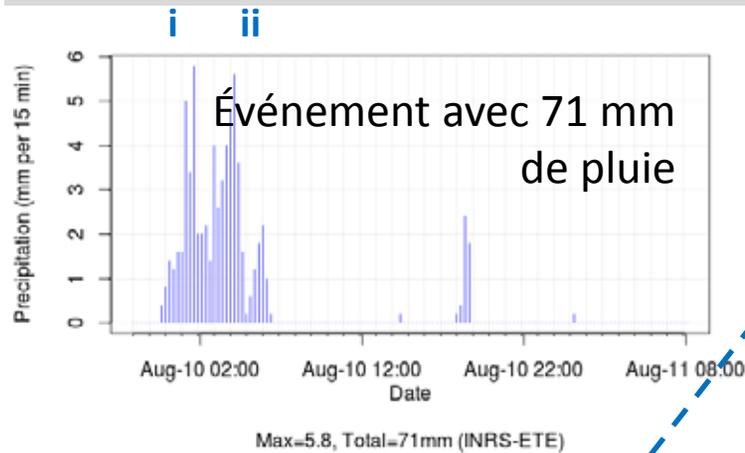


Soil water profiles set 8 2011-08-09 00:00



1. Infiltration dominante immédiatement après la première pluie: sol mouillé du bas vers le haut (à cause d'un écoulement préférentiel)
2. Saturation du bas de profil après 3h lors du deuxième pic de pluie
3. Drainage du sol dominant quand l'intensité de pluie diminue

Infiltration à la base d'un chêne rouge



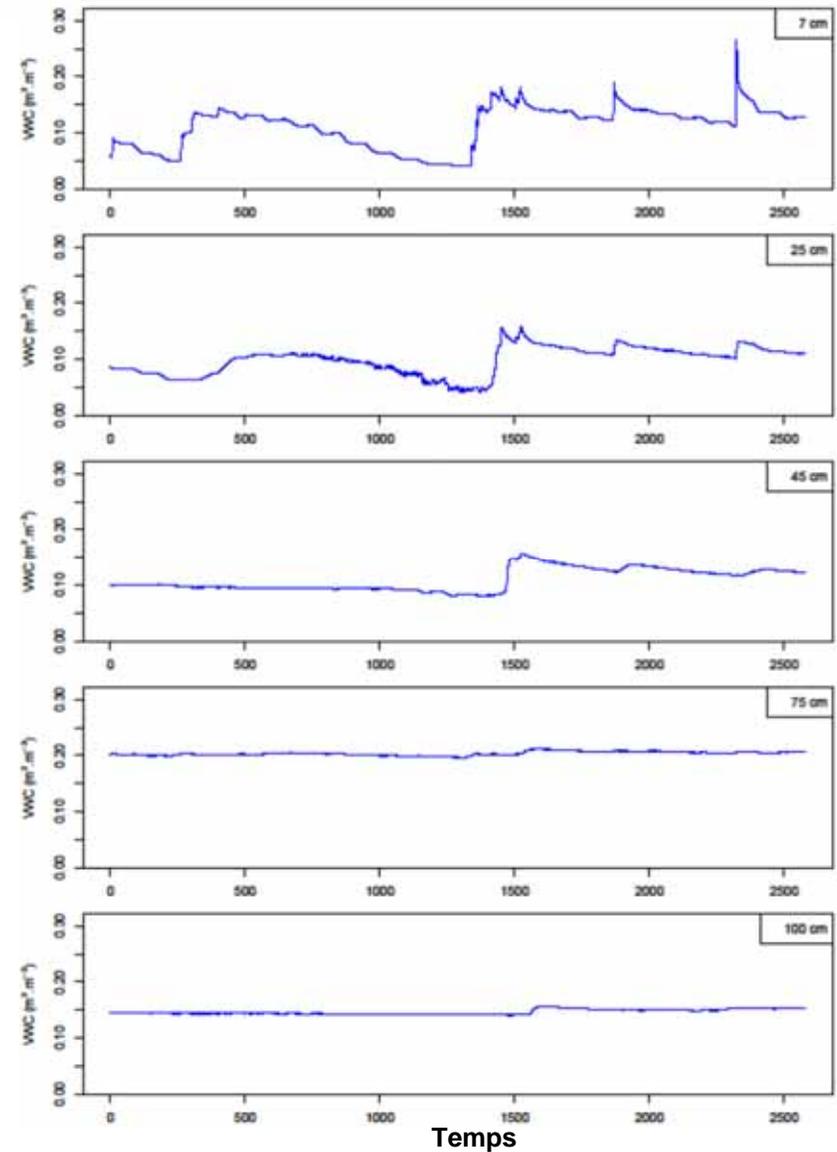
Représentation dynamique de la redistribution de l'eau dans le sol à l'aide de l'interpolation par krigeage

- Écoulement à la base du tronc (1-3h)
- Infiltration par écoulement préférentiel (1-6h)

Infiltration dans la prairie

Humidité du sol à cinq profondeurs (juin 2011)

- Variations temporelles suite aux événements pluvieux se produisant principalement dans les premiers 45 cm du sol



Modélisation du site de St-Paulin avec HYDRUS

Démonstration pour un événement pluvieux de juin 2011 autour du peuplier hybride

Données d'entrée

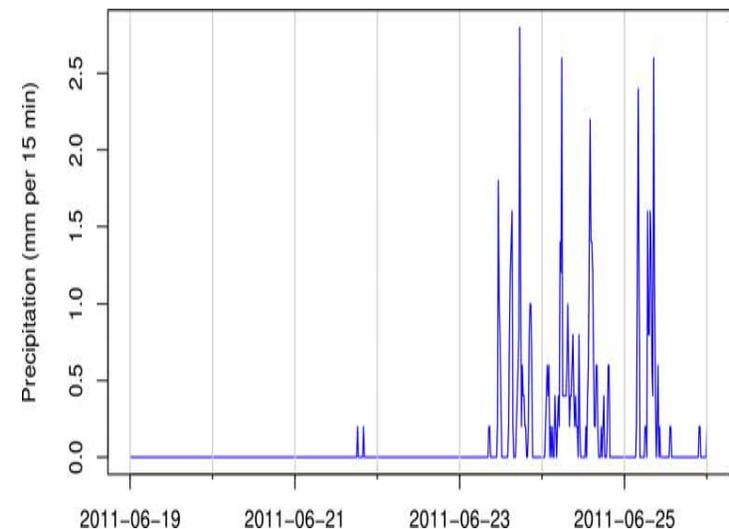
- Précipitations aux 15 minutes
- ET_p calculé avec Penman-Monteith
- Extraction racinaire maximale du peuplier hybride de 4.8 mm/jour (à capacité de champ)[1]

Propriétés du modèle

- Géométrie à quatre (4) couches de sol
- Densité racinaire maximale à 7.5 cm de profondeur, décroissance linéaire à 95 cm (non-distribuée en direction horizontale)
- Durée de simulation 161 jours (juin à novembre 2011), pas de temps de 15 min

Hyétogramme

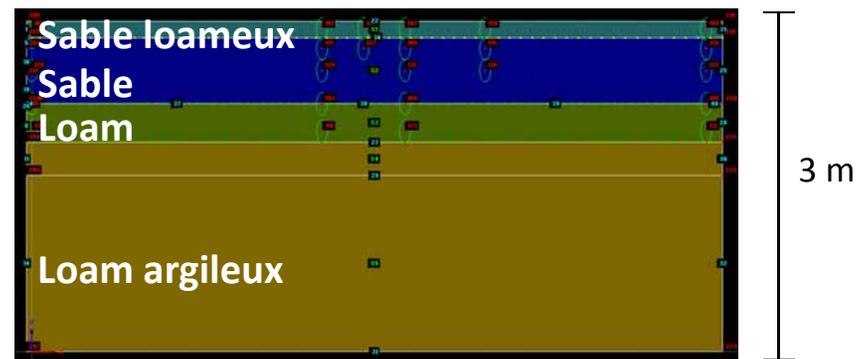
(période 19 juin au 3 juillet 2011)



[1] Hinckley TM, Brooks JR, Cermák J, Ceulemans R, Kucera J, Meinzer FC, Roberts DA., 1994. Water flux in a hybrid poplar stand. *Tree Physiol.* 14(7-9): 1005-1018.

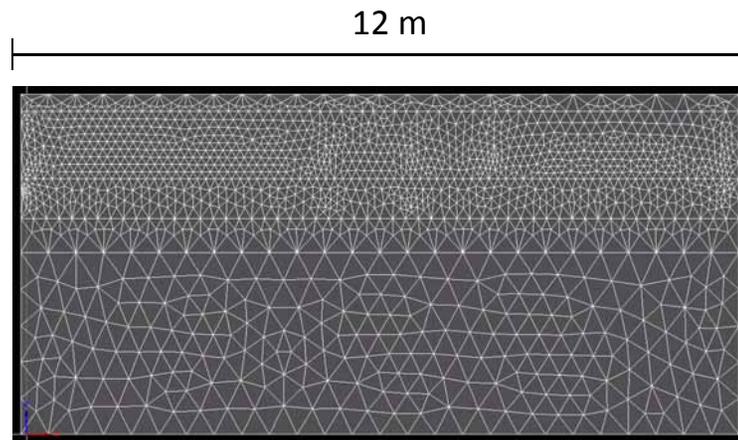
Modélisation du site de St-Paulin avec HYDRUS

Profondeur [cm]	Classe texturale
1-15	Sable loameux
15-75	Sable
75-110	Loam
110-140	Loam argileux



Conditions frontières

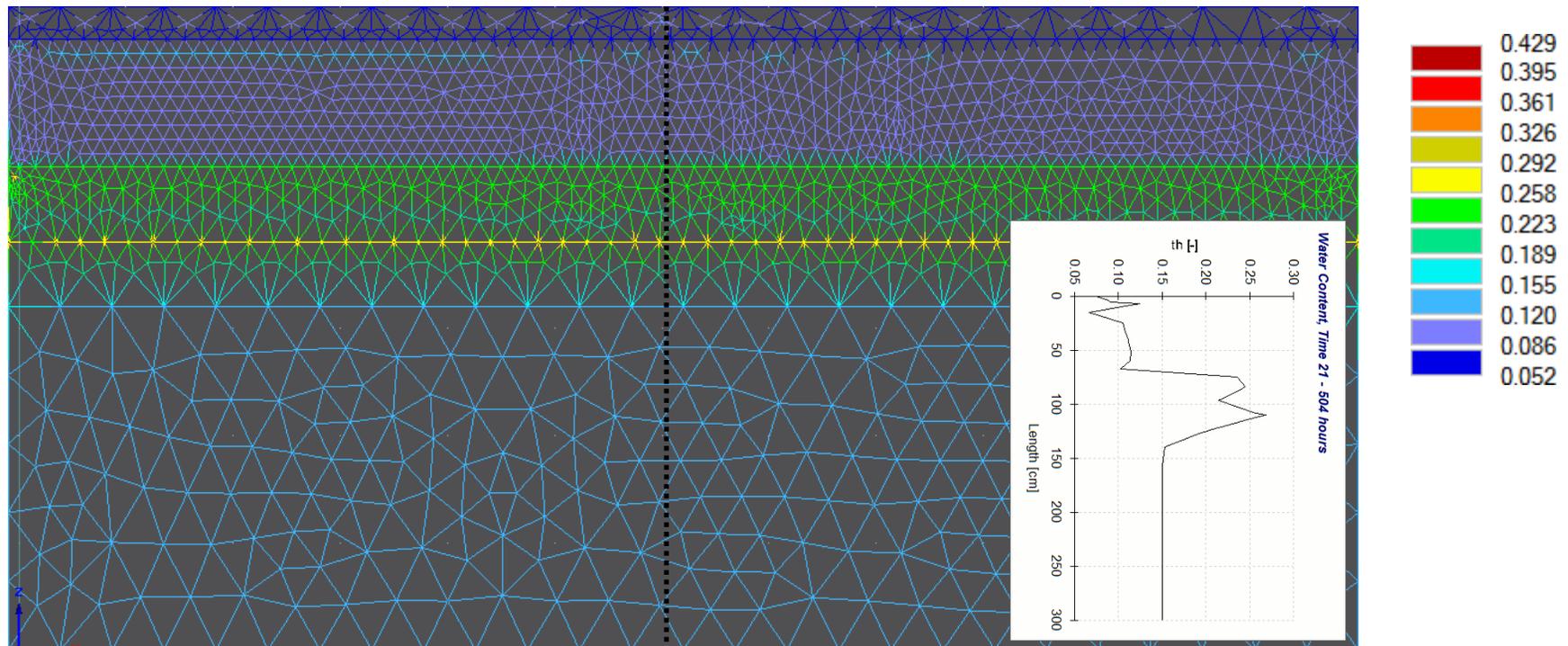
- Flux nul (EOS)
- Conditions atmosphériques (N) = P+ETP



Densification des mailles près des sondes (donc sur la verticale sous le tronc du peuplier hybride) et à l'interface des couches

Modélisation du site de St-Paulin avec HYDRUS

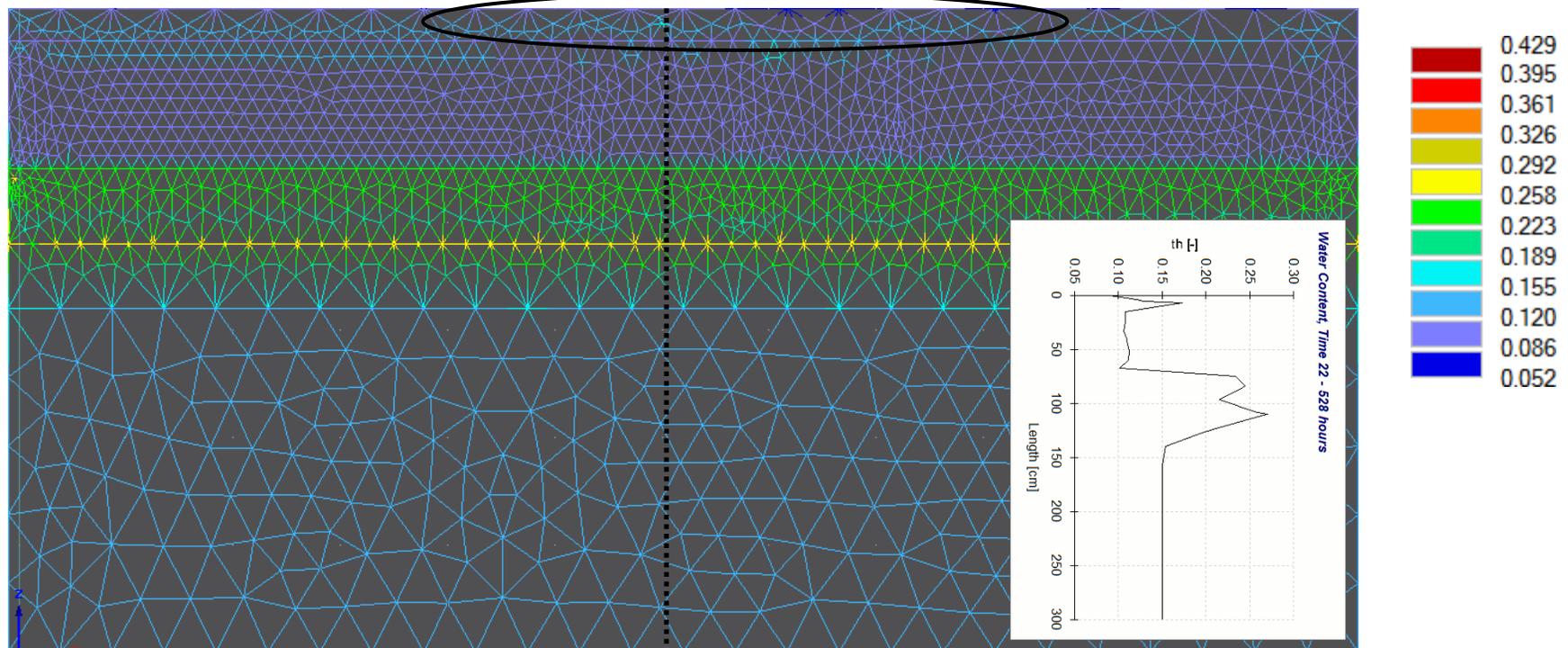
Teneur en eau au niveau du peuplier hybride 23 juin 2011, 12 AM



Avant la pluie: **sol sec près de la surface** (VWC=0.07)

Modélisation du site de St-Paulin avec HYDRUS

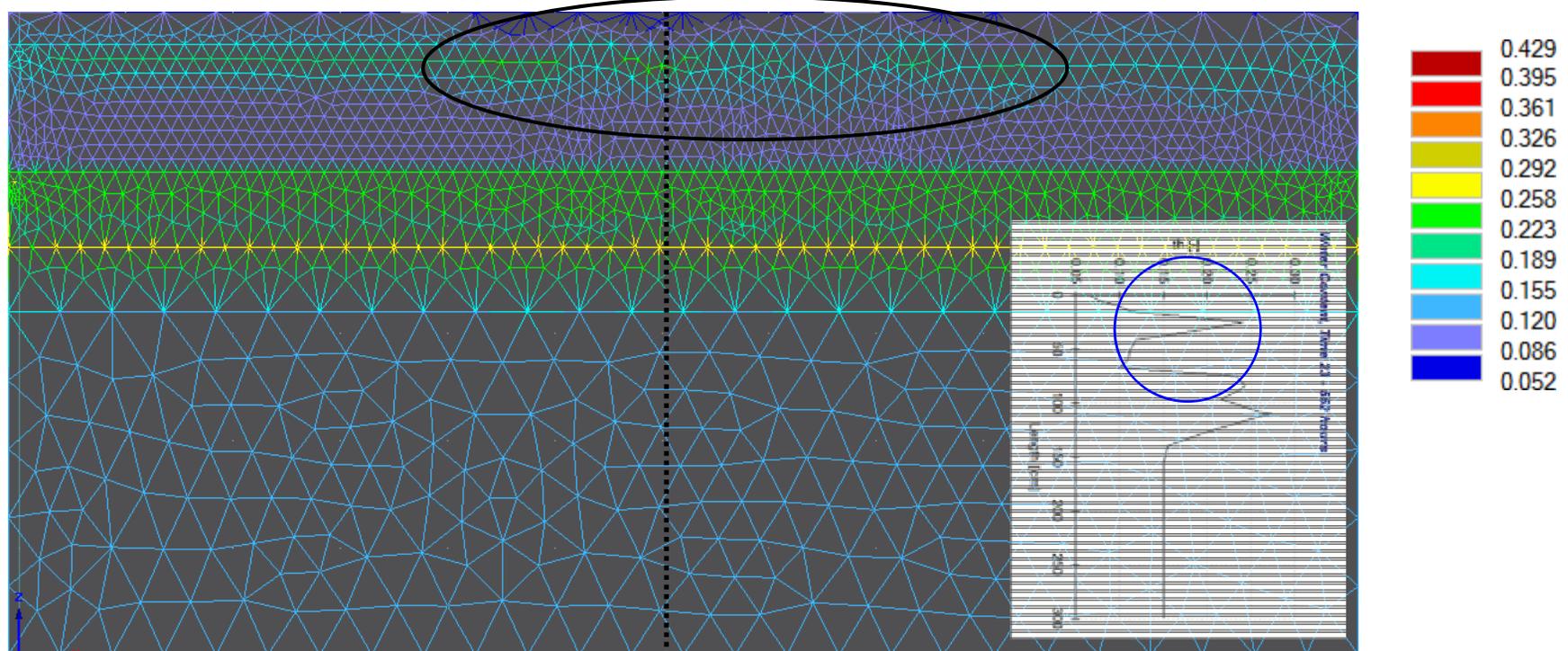
Teneur en eau au niveau du peuplier hybride 24 juin 2011, 12 AM



- Après 23 mm de pluie: **double le contenu en eau à la surface du sol (VWC=0.15)**
- **Teneur en eau plus grande à la profondeur où la densité racinaire = maximale (7.5 cm)**

Modélisation du site de St-Paulin avec HYDRUS

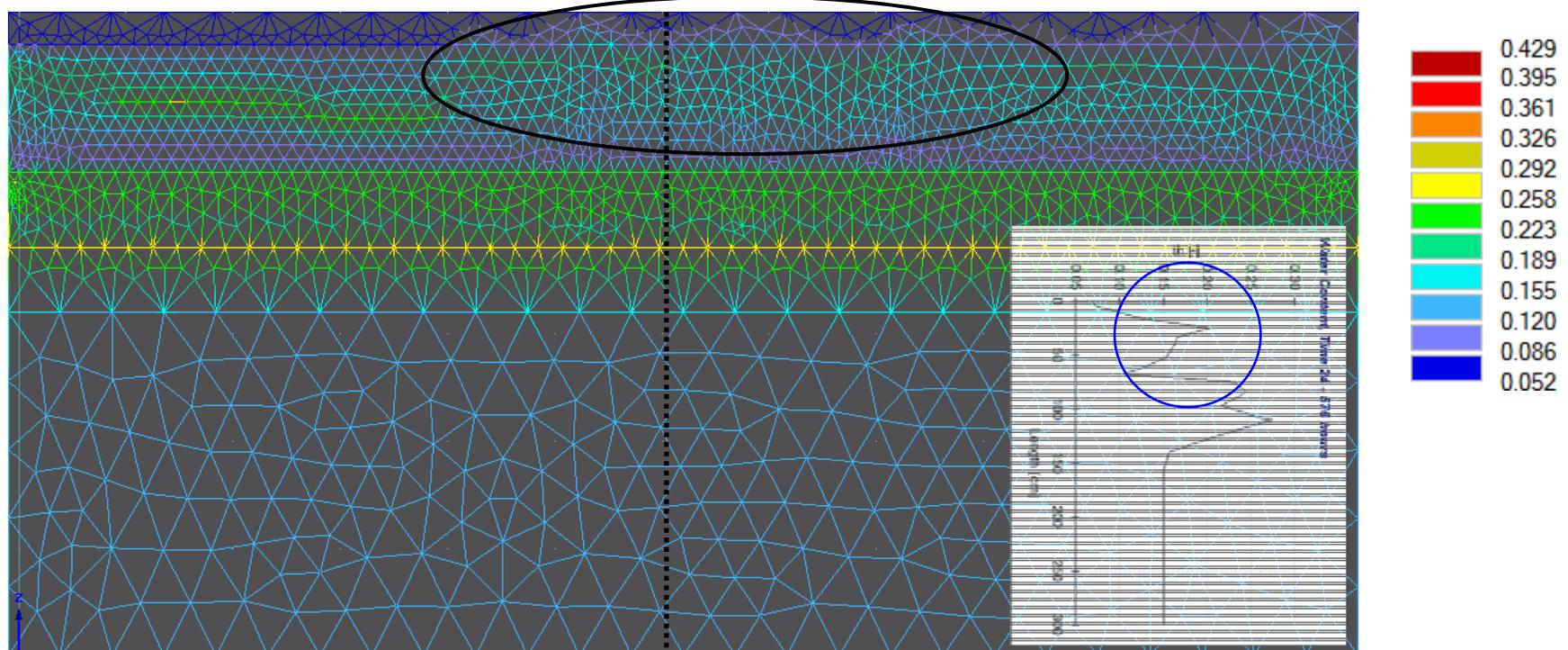
Teneur en eau au niveau du peuplier hybride 25 juin 2011, 12 AM



- Après 72 mm de pluie, poursuite de l'infiltration dans le sol
- **Absorption de l'eau par le peuplier au passage du front**

Modélisation du site de St-Paulin avec HYDRUS

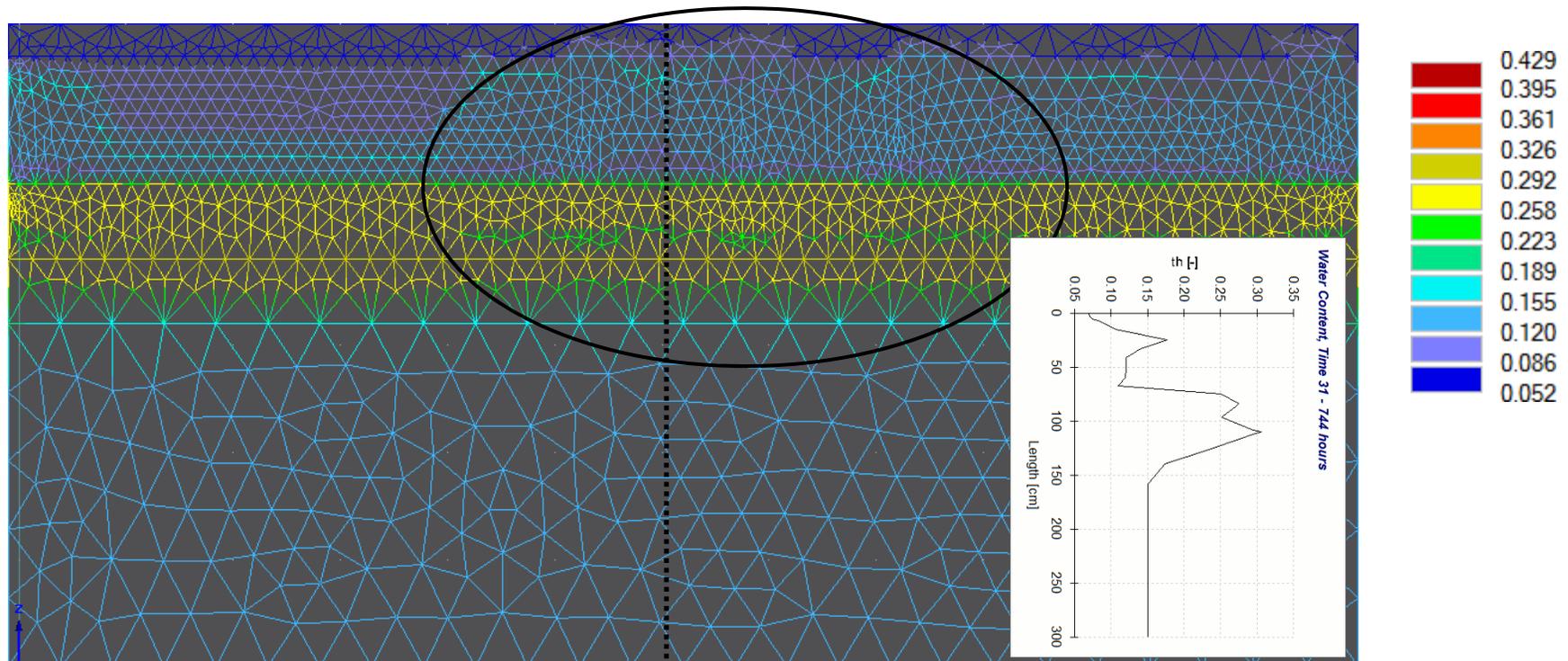
Teneur en eau au niveau du peuplier hybride 26 juin 2011, 12 AM



- Après 72 mm de pluie, **poursuite de l'infiltration dans le sol**
 - **Absorption de l'eau par le peuplier au passage du front**

Modélisation du site de St-Paulin avec HYDRUS

Teneur en eau au niveau du peuplier hybride 3 juillet 2011, 12 AM



Après 11 jours, **stagnation de l'eau infiltrée sur la couche de loam argileux à 110 cm de profondeur (en jaune), couche moins perméable**

Conclusion

- **Sondes FDR**
 - Illustration ponctuelle de la dynamique hydrique
 - Interpolation spatiale à l'aide du krigeage
 - Production de cartes illustrant la dynamique spatio-temporelle de l'écoulement préférentiel engendré par une infiltration rapide au niveau du système racinaire

Conclusion

- **Mise en œuvre du modèle d'HYDRUS**
 - Illustration spatio-temporelle de la dynamique hydrique
 - Calage et validation pour les saisons 2011-2012
 - Estimation des influences des paramètres hydrodynamiques du sol et de l'absorption racinaire sur la dynamique hydrique
 - Évaluation de l'impact de systèmes de cultures intercalaires sous différentes conditions climatiques

Conclusion

- **Mise en œuvre de MHYDAS-Erosion**
 - Calage et validation avec huit événements en 2012
 - Simulation de plusieurs PGB dont les systèmes de cultures intercalaires et les bandes riveraines

**Histoire à suivre et à compléter d'ici...
la fin du mois de mars 2013**



INRS

Université d'avant-garde

« L'impact des mutations sociales, économiques,
de la société québécoise. L'espace d'intervention
de l'action publique et des rapports sociaux.
L'impact de la technologie »

Les modèles climatiques

Modèle de climat global (MCG)

Simulation du climat sur toute la surface du globe

(Résolution *horizontale* : > 100 km)

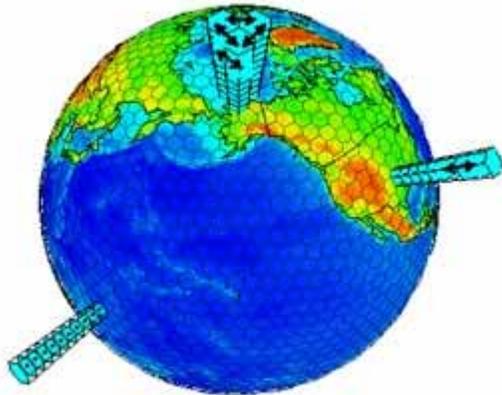


Image: U.S. Department of Energy, Office of Science

Modèles à bases physiques

- Résolution numérique des équations non-linéaires des comportements de l'atmosphère et des océans – *conservation de la masse (air, GES), de l'énergie, de la quantité de mouvement et équation des gaz parfaits (sous-modèles)*
 - Espace divisé en boîtes, définies par une grille horizontale et plusieurs niveaux verticaux – *modélisation des processus à large échelle* – besoin de paramétrisation pour représenter certains processus sous-grille
 - Variables d'intérêt telles que *la pression, l'humidité de l'air, la température, la vitesse des vents, ...*

Les modèles climatiques

Modèle régional de climat (MRC)

Simulation sur une région du globe

(Résolution horizontale : 15-45 km)

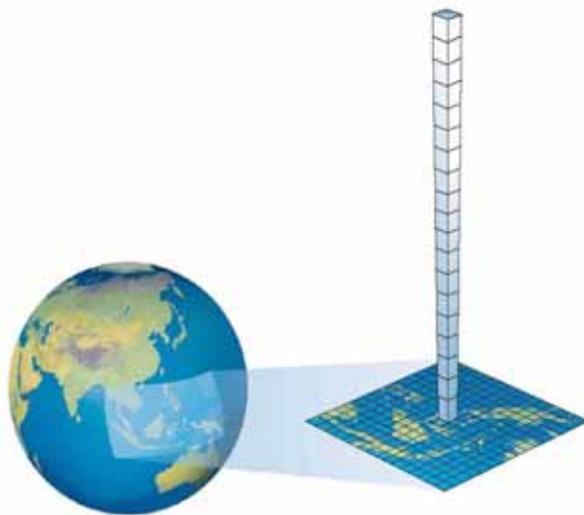


Image : Lebonnois (2006)

Modèles à bases physiques similaires aux MCG

- Nécessitant une période de rodage afin de devenir indépendant des conditions initiales
- Besoin de tenir compte de l'évolution des GES dans l'atmosphère (*notions de scénarios d'émissions*)
- Conditions aux frontières du domaine fournies des sorties de simulation d'un MCG ou dans le cas d'une simulation en passé récent, de réanalyses d'observations

Les scénarios climatiques

Expérience climatique de contrôle

- 30 années – 1961-1990
 - Capacité du modèle climatique à reproduire le climat
 - Comparaison avec des données de réanalyses météorologiques disponibles depuis les années 1950 (ex.: NCEP, ERA40)

Les scénarios climatiques

Expérience climatique future

- ++ années & horizons (2020-2050; 2070-2099, *etc.*)
- Scénarios d'émission de GES du GIEC
 - Scénarios A1, A2, B1, B2 (croissances économique et démographique; développements technologiques)
 - A2 & A1 (15 vs 9, 7 milliards, développement de technologies variés, de – à +)
 - B2 & B1 (10 vs 9, 7 milliards, développement de technologies variés, de – à +)
- Variations des conditions initiales + scénario d'émission de GES
 - Membres de la simulation d'ensemble

