



**Contribution à la modélisation des surfaces
continentales pour l'échelle globale**





1999 – 2002 Etudes universitaires
mathématique – physique – géophysique



2002 – 2005 Thèse « Développement et validation d'une modélisation hydrologique globale incluant les effets sous maille et la représentation des zones inondées »



2006 – 2007 Postdoctorat « Etude de l'interaction hydrologie de surface – atmosphère à méso-échelle dans le cadre du projet AMMA : couplage télédétection - modélisation. »



2008 ...



Encadrements

➤ Postdoctorats

- 2008 – 2010 *R. Alkama (RTRA CYMENT)*
- 2011 – 2012 *R. Alkama (ANR CLASSIQUE)*
- 2014 – 2016 *M. Minvielle (FP7 earthH2Observe)*

➤ Thèses

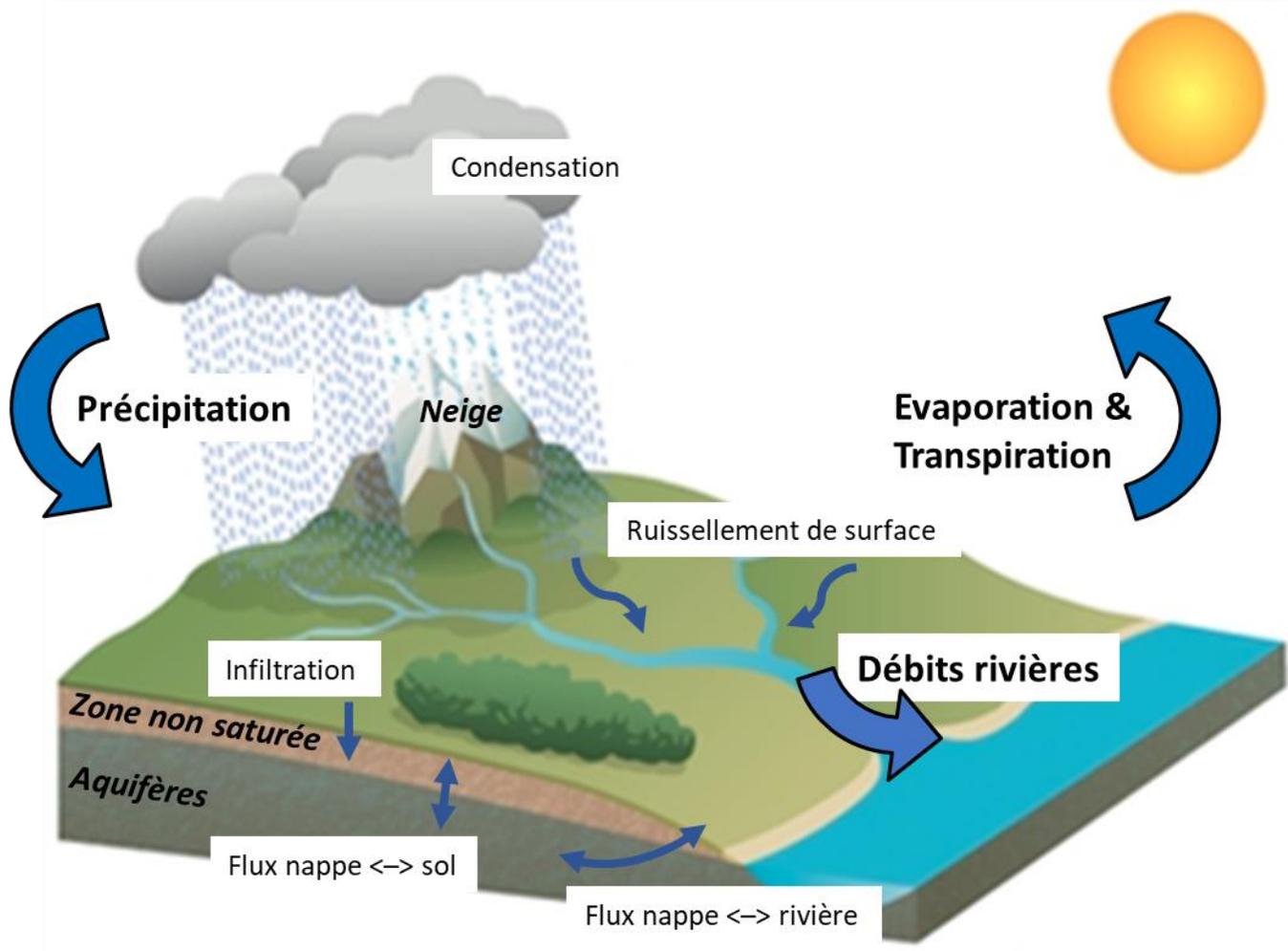
- 2009 – 2012 *JP. Vergnes (aquifères)*
- 2014 – 2018 *X. Morel (CH₄ – Projet APT)*
- 3 thèses vont débiter

➤ 6 Stages de M2

Activités

- 96 publications dont 13 en 1^{er} auteur
- 6 chapitres d'ouvrage ou de vulgarisation
- 70 communications orales dont 13 comme 1^{er} orateur
- 15 projets (7 avec financement & 8 sans)
- Responsable de l'équipe EST depuis 2016

Etudes & Modélisation des processus liés au cycle hydrologique continental



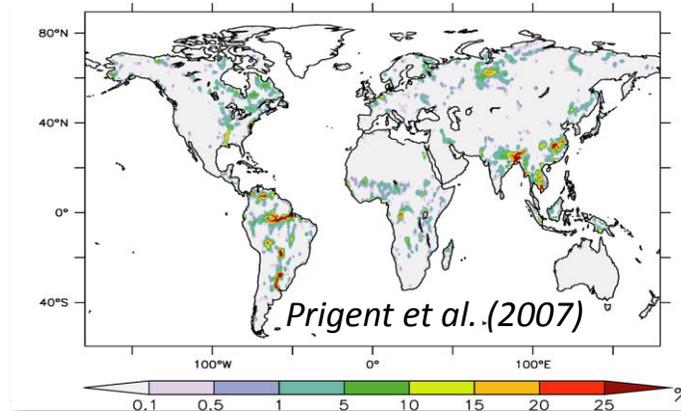
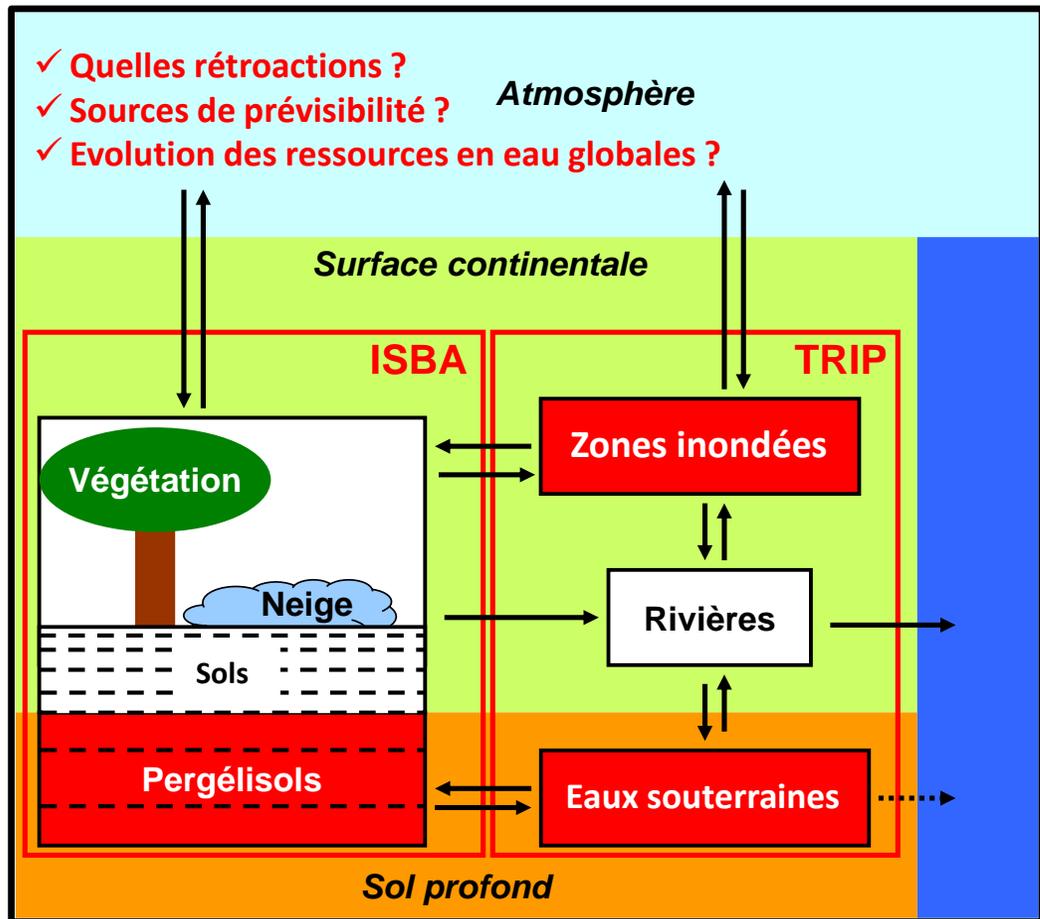
Enjeux

- Aspects sociétaux & environnementaux:
 - Evolution des ressources en eau
 - Evénements extrêmes (sécheresses, ...)
 - Etc...
- Etude du système climatique
 - Propriétés radiatives
 - Flux d'eau et d'énergie
 - Variabilité océanique & niveau de la mer
 - Relation hydrologie - biogéochimie
 - Emissions naturelles de gaz à effet de serre

Projet de recherche défendu au CNRS il y a 12 ans

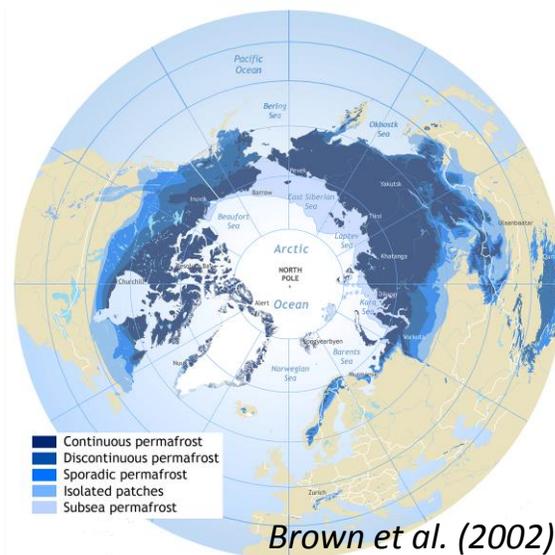
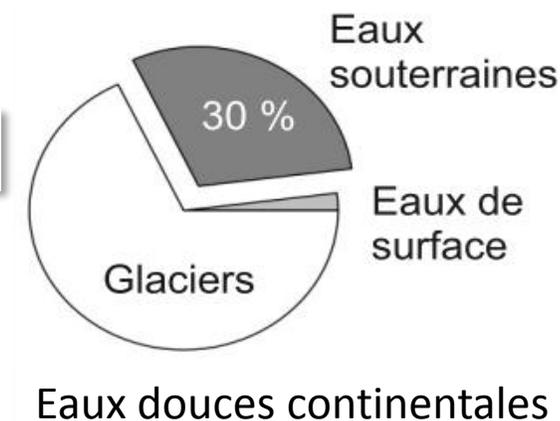
I – Etude des rétroactions climatiques associées aux réservoirs hydrologiques « lents » non représentés dans les modèles climatiques globaux

- ✓ Quelles rétroactions ?
- ✓ Sources de prévisibilité ?
- ✓ Evolution des ressources en eau globales ?



Distribution globale des surfaces inondées (1993-2007)

Les Aquifères



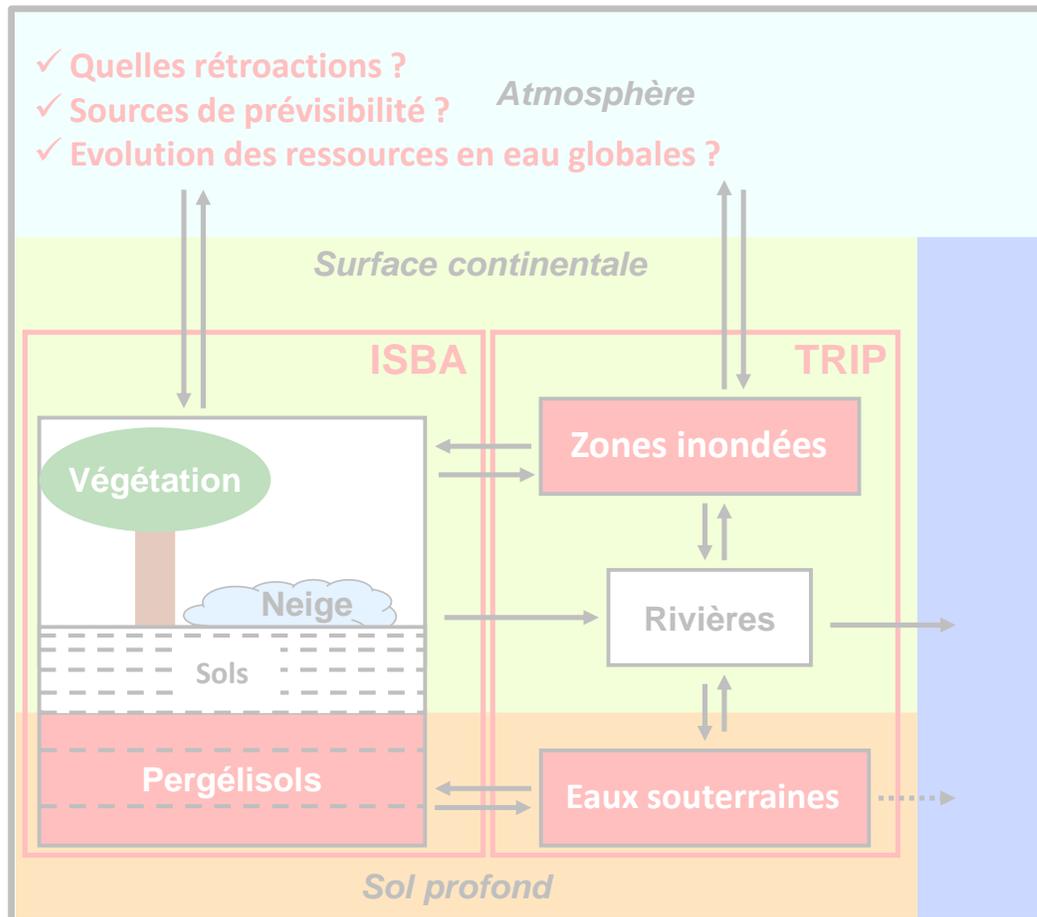
Le pergélisol

¼ de la superficie des continents de l'hémisphère Nord

Projet de recherche défendu au CNRS il y a 12 ans

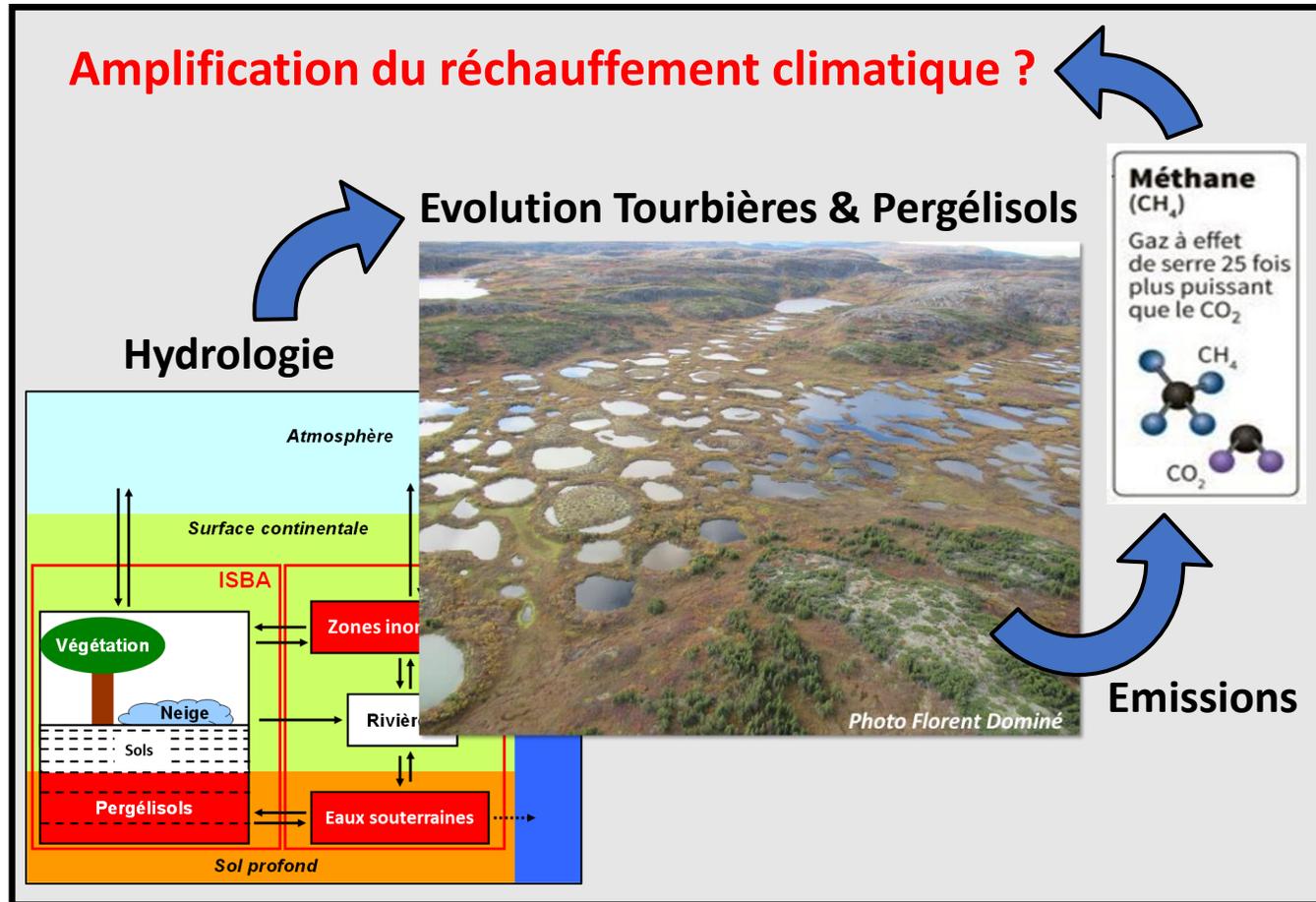
I – Etude des rétroactions climatiques associées aux réservoirs hydrologiques « lents » non représentés dans les modèles climatiques globaux

- ✓ Quelles rétroactions ?
- ✓ Sources de prévisibilité ?
- ✓ Evolution des ressources en eau globales ?



II – Etude du lien entre l'évolution du climat, de l'hydrologie et des processus biogéochimiques responsable des émissions naturelles de gaz à effet de serre dans les régions boréales.

Amplification du réchauffement climatique ?



Le modèle de surface ISBA « Force-Restore »

ISBA_{FR}

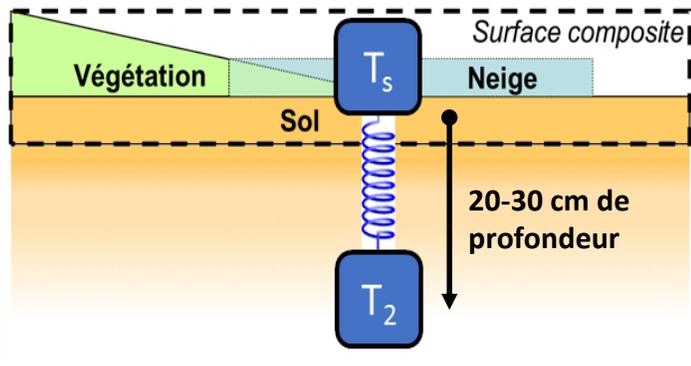
➤ 2 températures de sol via approche « *force-restore* »

➤ Noilhan & Planton (1989)

➤ Gel du sol superficiel (~20-30cm)

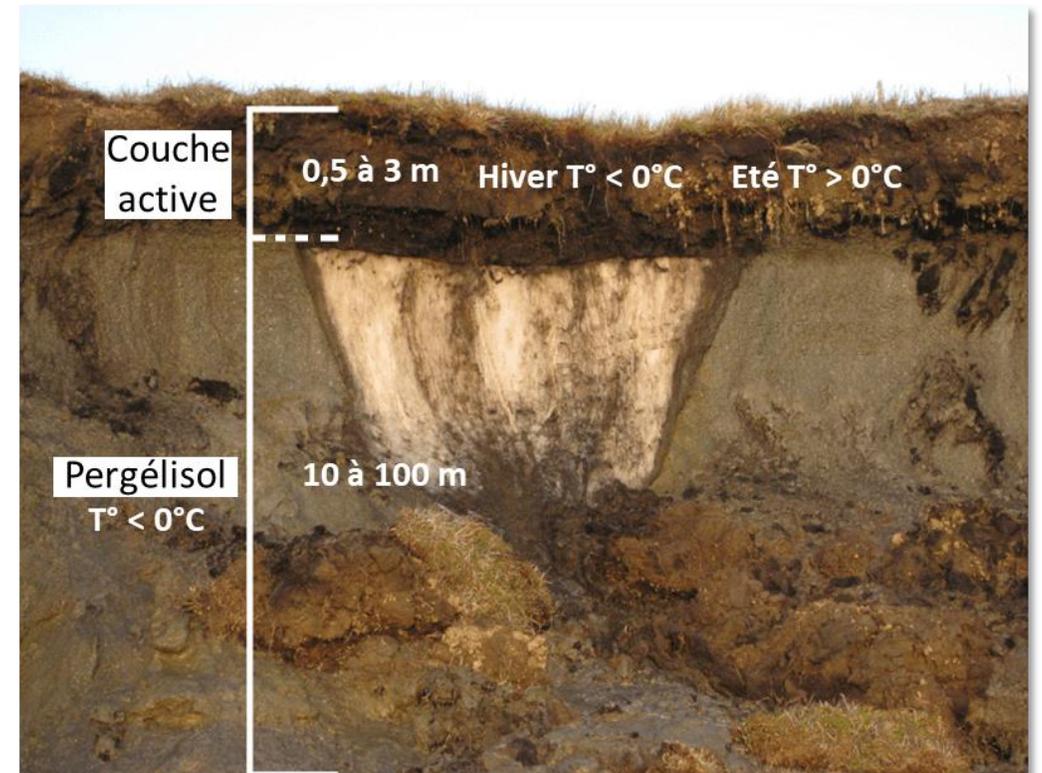
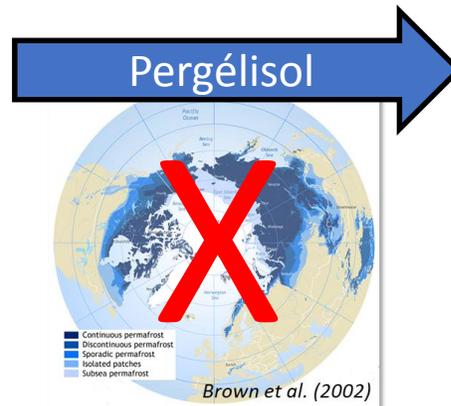
➤ Giard & Bazile (2000)

➤ Boone et al. (2000)

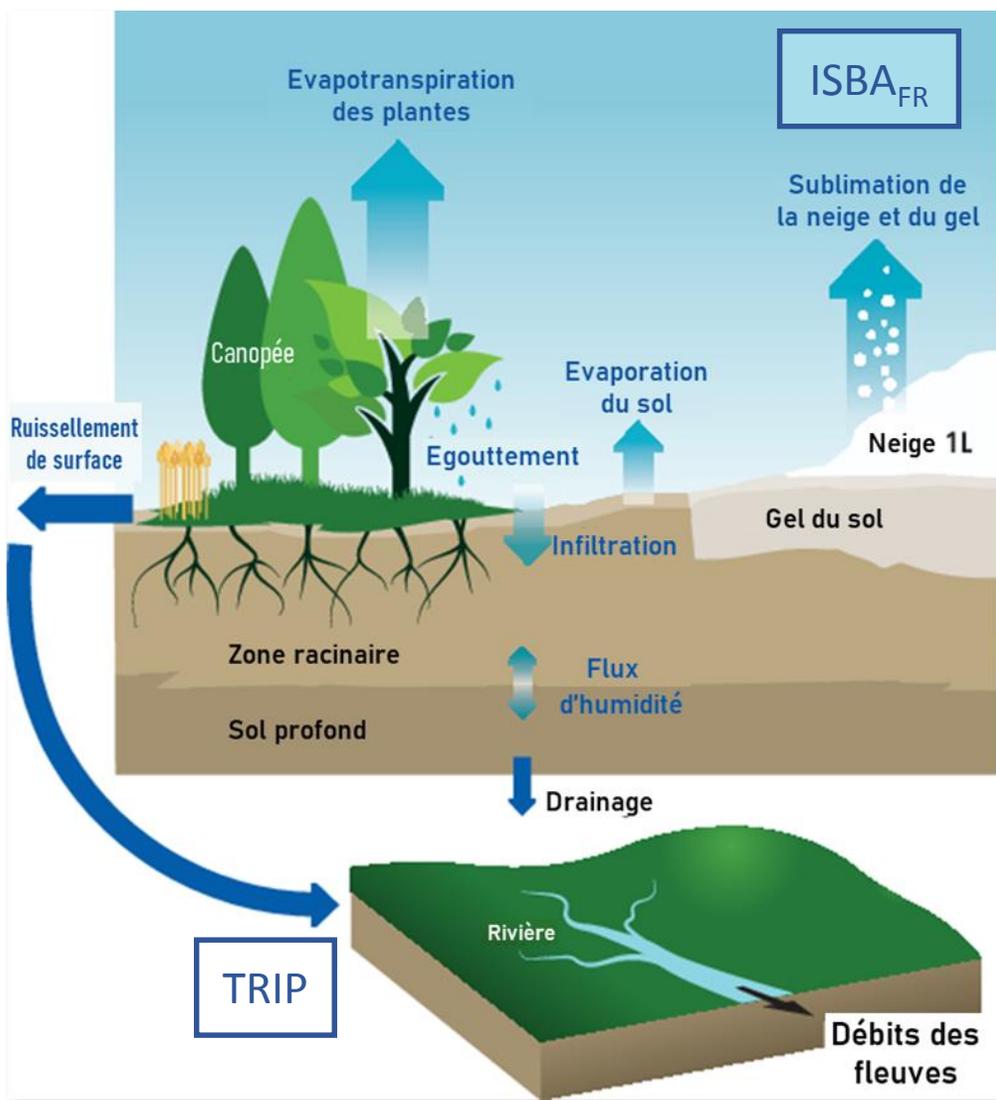


✓ Surface composite = mélange Végétation-Sol-Neige

✓ T_s rappelée vers sa moyenne journalière T_2



Le système hydrologique global ISBA-TRIP il y a 12 ans



➤ 2 températures de sol via approche « *force-restore* »

➤ *Noilhan & Planton (1989)*

➤ Gel du sol superficiel (~20-30cm)

➤ *Giard & Bazile (2000)*

➤ *Boone et al. (2000)*

➤ Neige 1 couche (D95) mais pas isolation thermique du sol

➤ *Douville et al. (1995)*

➤ Humidité du sol dans la zone non saturée via approche « *force-restore* »

➤ *Noilhan & Planton (1989)*

plus à « l'état de l'art »

➤ *Boone et al. (1999)*

➤ Simple routage de l'eau en rivière via TRIP sans inondation ni aquifères

➤ *Oki & Sud (1998)*

1) Une nouvelle modélisation hydrologique

- ✓ *Les processus hydrologiques (inondations & aquifères)*
- ✓ *La zone non saturée du sol*
- ✓ *Le continuum neige-sol*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

2) Cette modélisation à l'échelle globale

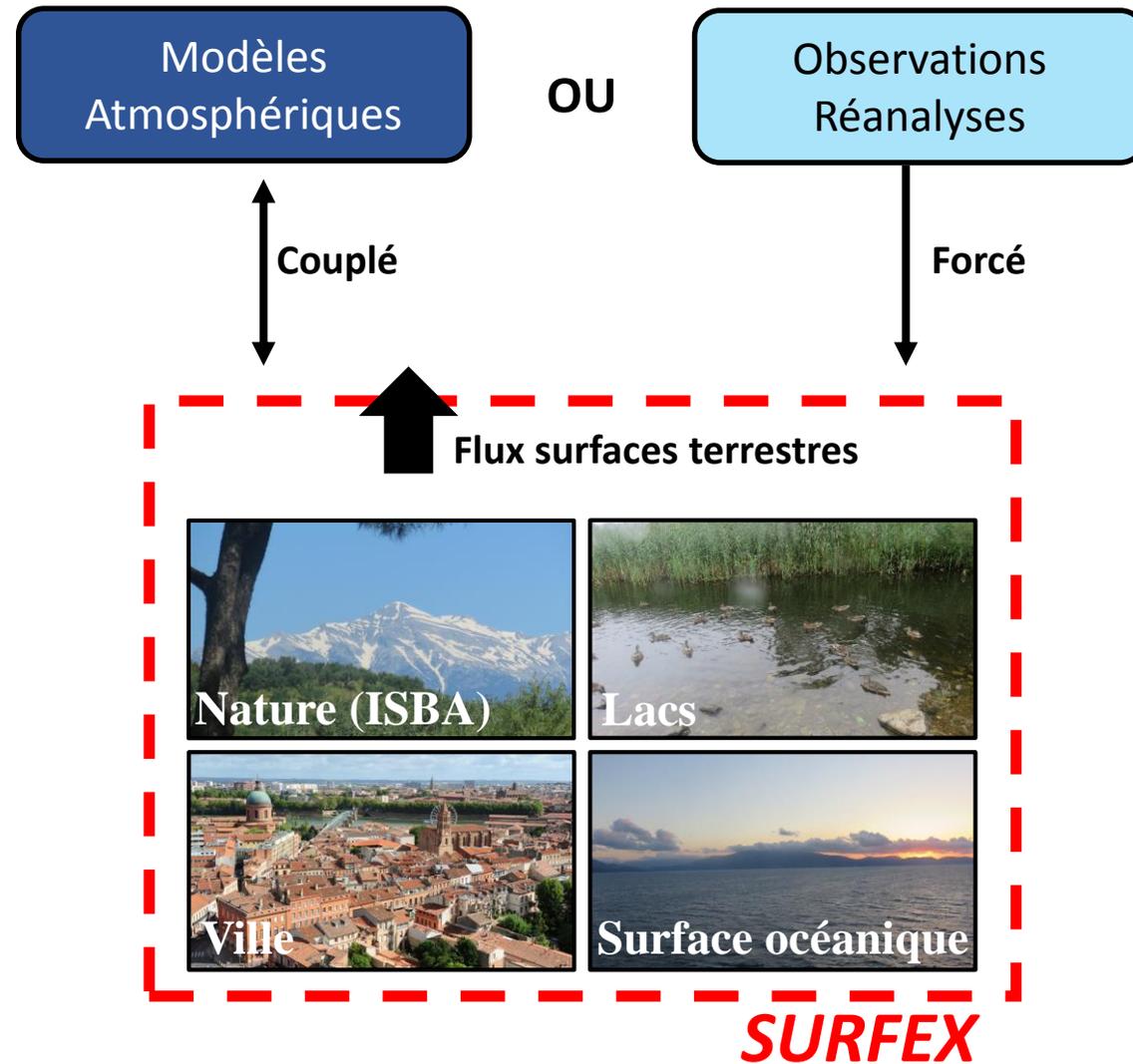
- ✓ *Evaluation*
- ✓ *Est-elle utile dans CNRM-CM6 ?*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

3) Le lien hydrologie – biogéochimie dans les régions boréales

- ✓ *Méthane, Tourbières & Pergélisols*
- ✓ *Dynamique du carbone du sol & des gaz*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

Synthèse générale

Outil – La plateforme de modélisation des surfaces terrestres SURFEX (SURFace EXternalisée)



1) Une nouvelle modélisation hydrologique

- ✓ *Les processus hydrologiques (inondations & aquifères)*
- ✓ *La zone non saturée du sol*
- ✓ *Le continuum neige-sol*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

2) Cette modélisation à l'échelle globale

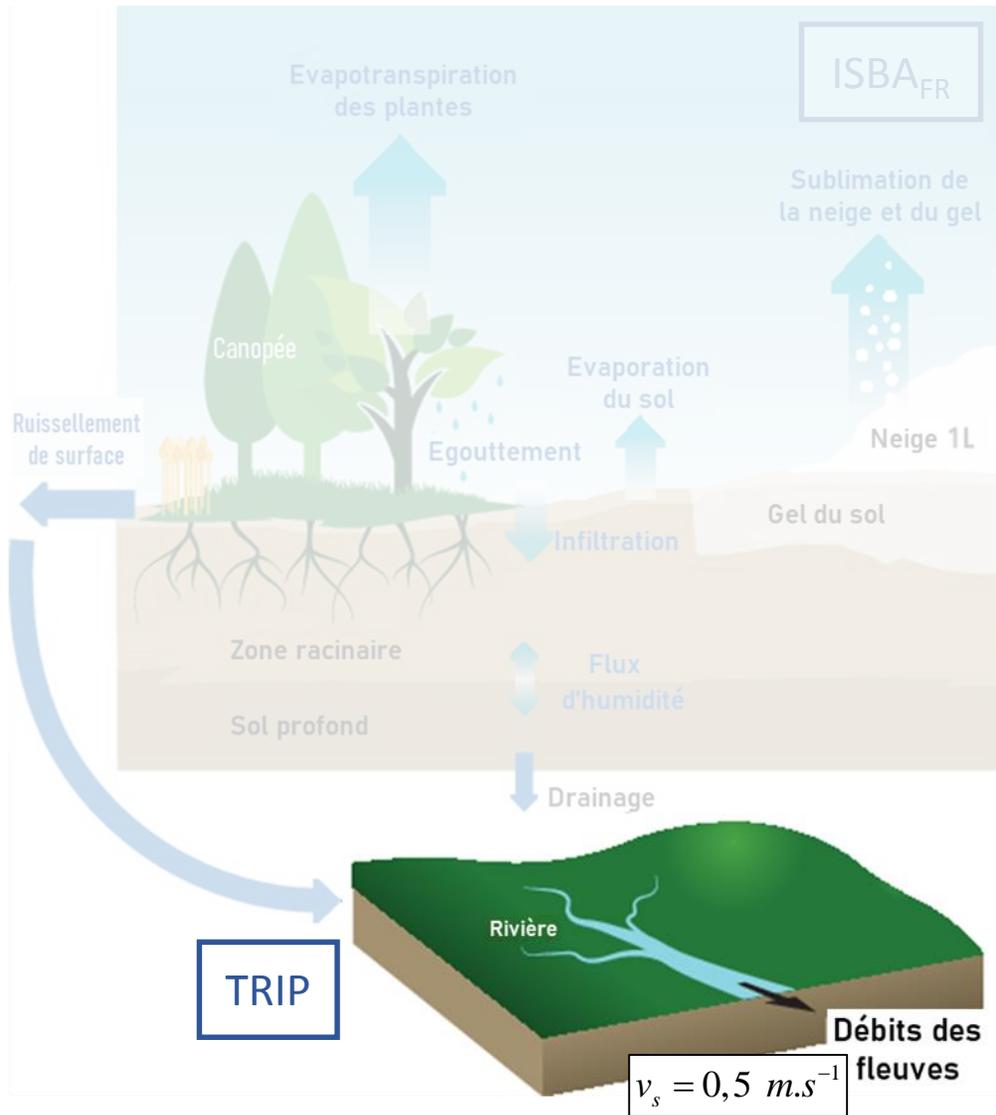
- ✓ *Evaluation*
- ✓ *Est-elle utile dans CNRM-CM6 ?*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

3) Le lien hydrologie – biogéochimie dans les régions boréales

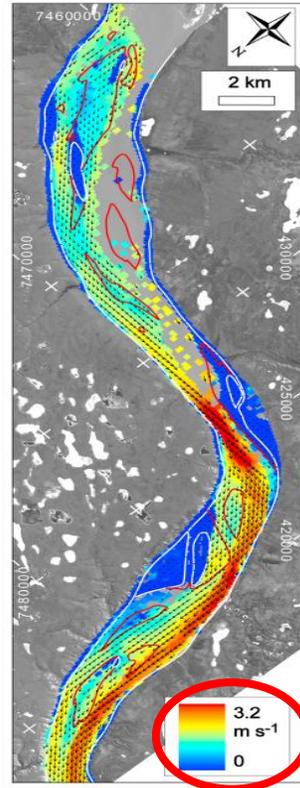
- ✓ *Méthane, Tourbières & Pergélisols*
- ✓ *Dynamique du carbone du sol & des gaz*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

Synthèse générale

Les processus hydrologiques – Les inondations saisonnières

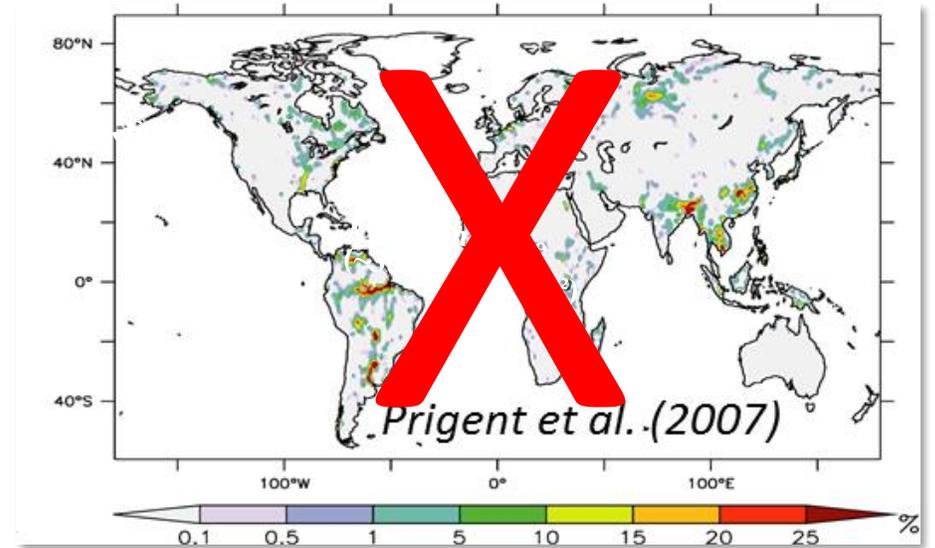


Vitesses d'écoulement du Mackenzie (Canada) observées par satellite

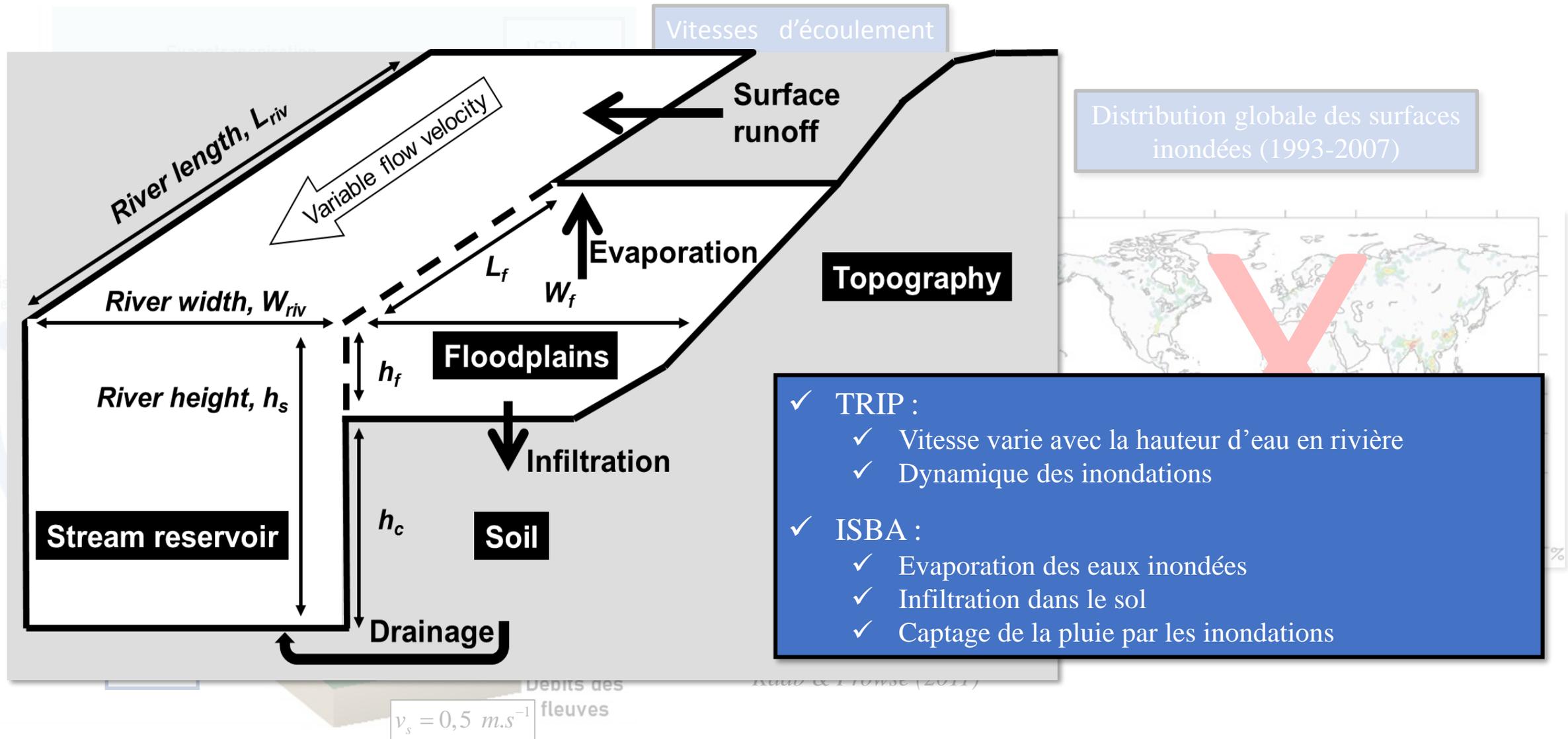


Käab & Prowse (2011)

Distribution globale des surfaces inondées (1993-2007)



Les processus hydrologiques – Les inondations saisonnières



Les processus hydrologiques – Les inondations saisonnières – Echelle globale

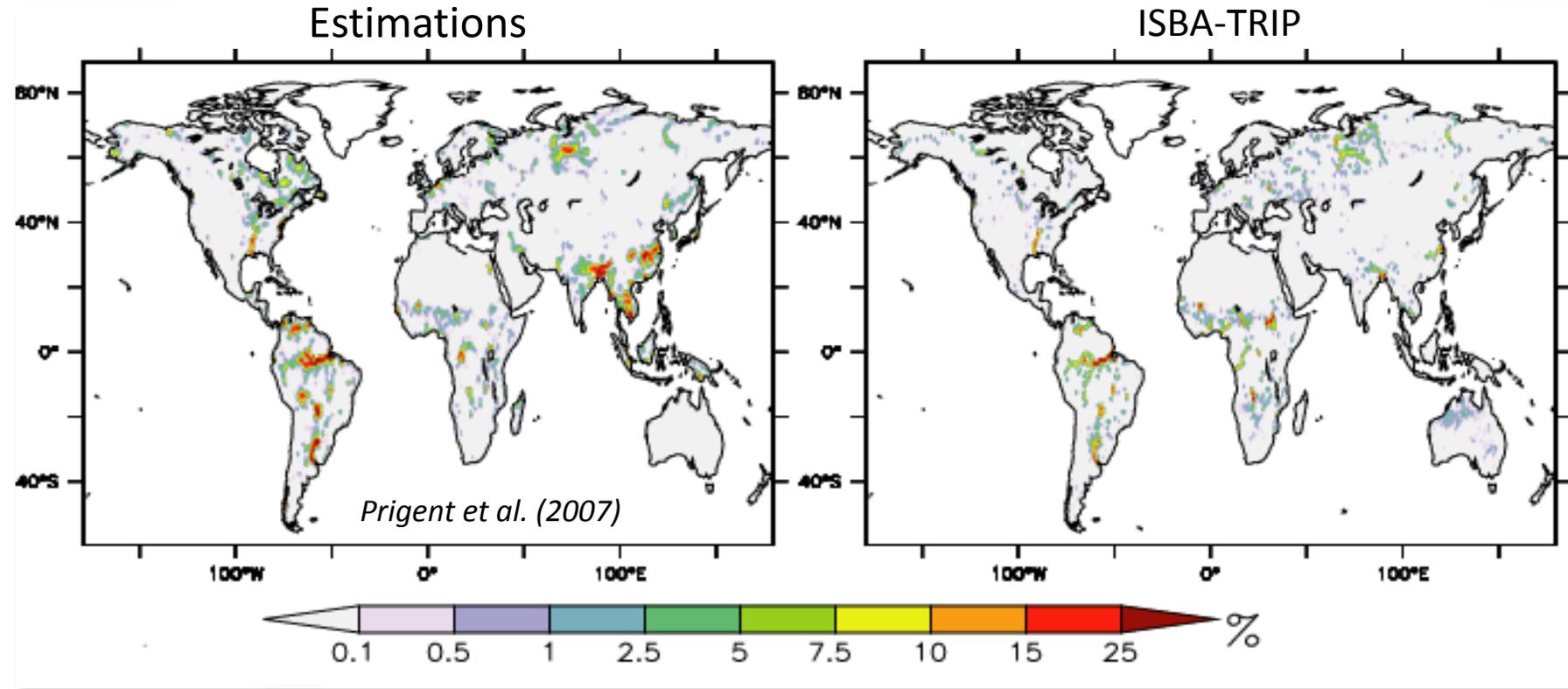
Forçages atm. 3-hr à 1°
PGF (NCEP/NCAR & GPCC)
1979 - 2010

SURFEX
ISBA - TRIP

Superficies
Inondées

Estimations

Distribution des plaines inondées à l'échelle globale (% d'occupation dans la maille)



Les processus hydrologiques – Les inondations saisonnières – Echelle globale

Forçages atm. 3-hr à 1°
PGF (NCEP/NCAR & GPCC)
1979 - 2010

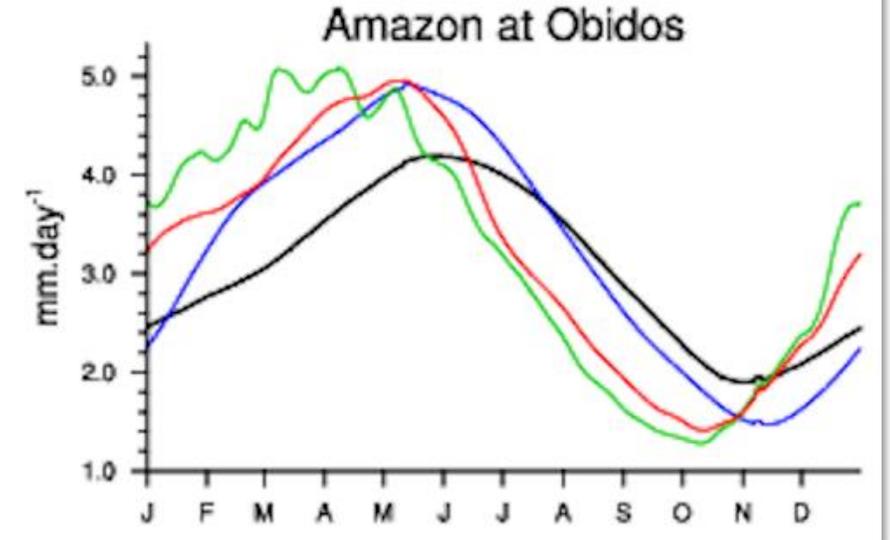
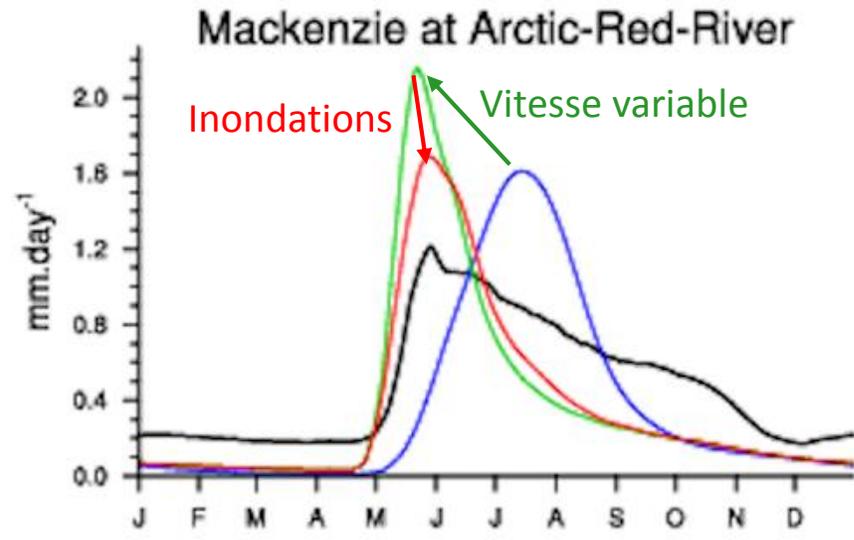
SURFEX
ISBA - TRIP

Débits

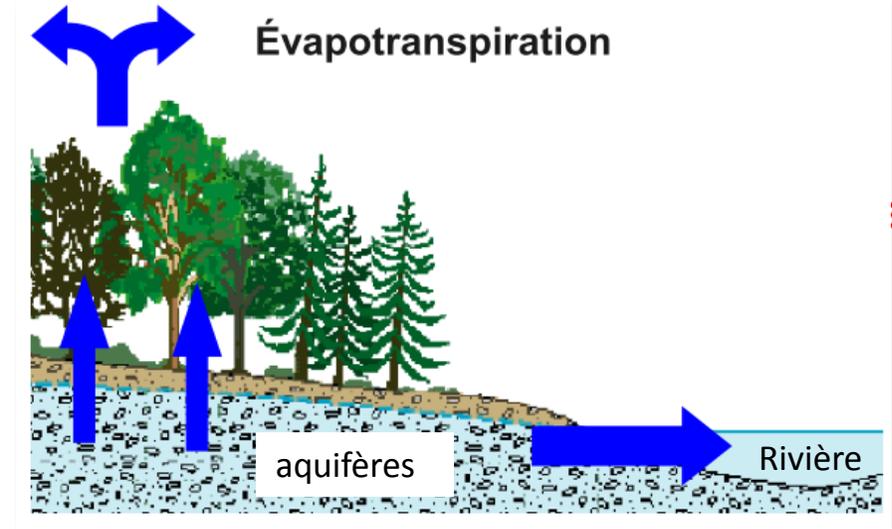
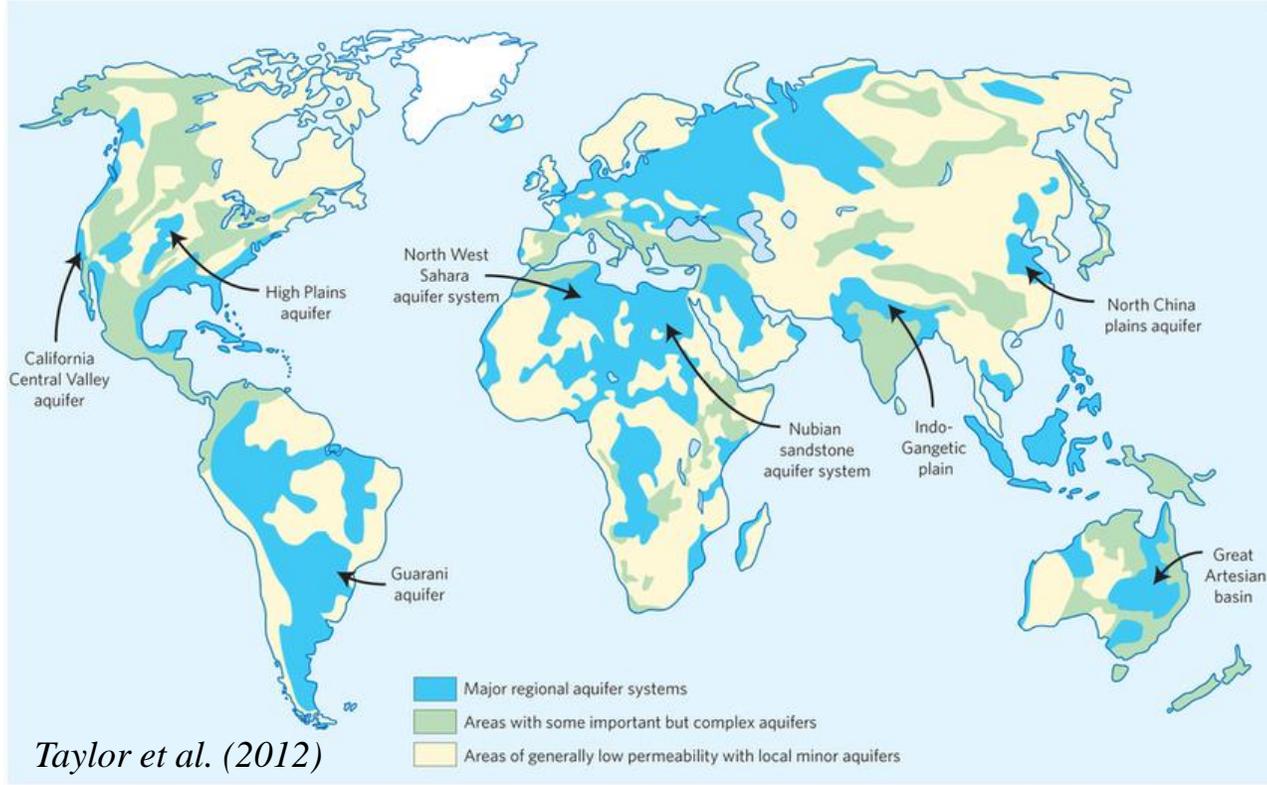
In-situ

Cycles saisonniers climatologiques des débits

— Vvar+Flood
— Vvar
— Ctl
— Obs

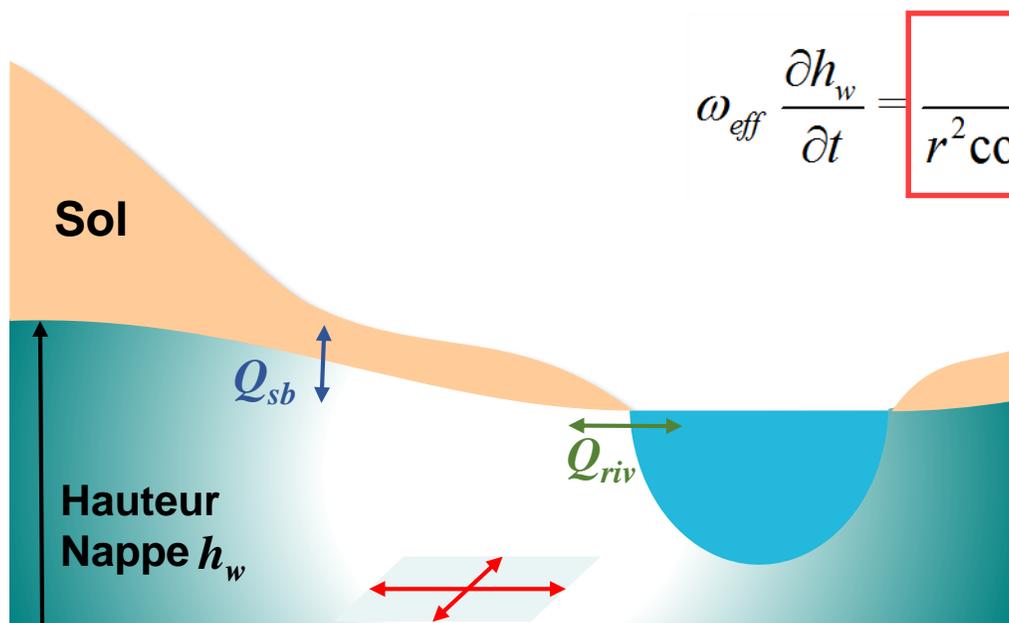


Les principaux systèmes aquifères à l'échelle globale



- ✓ **Interactions avec**
 - ✓ les sols via les remontées capillaires
 - ✓ l'atmosphère via l'évapotranspiration
 - ✓ les rivières en soutenant les débits d'étiages

- ✓ Aquifères non-confinés (nappes libres & alluviales)
- ✓ Approche hydrogéologique basée sur MODCOU
- ✓ Modélisation mono-couche

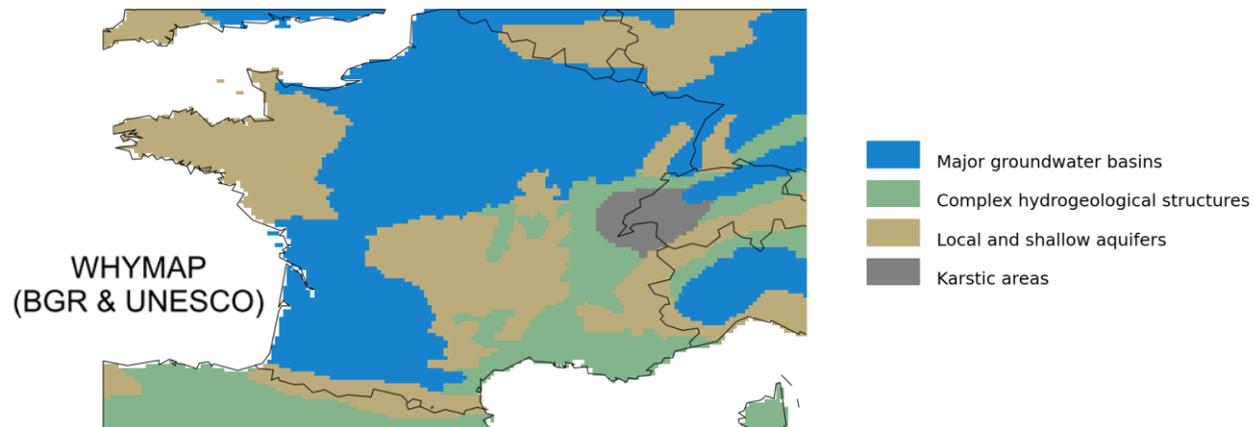


$$\omega_{eff} \frac{\partial h_w}{\partial t} = \frac{1}{r^2 \cos(\varphi)} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{T_\theta}{\cos(\varphi)} \frac{\partial h_w}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(T_\varphi \cos(\varphi) \frac{\partial h_w}{\partial \varphi} \right) \right] + \frac{1}{\rho_w} [Q_{sb} - Q_{riv}]$$

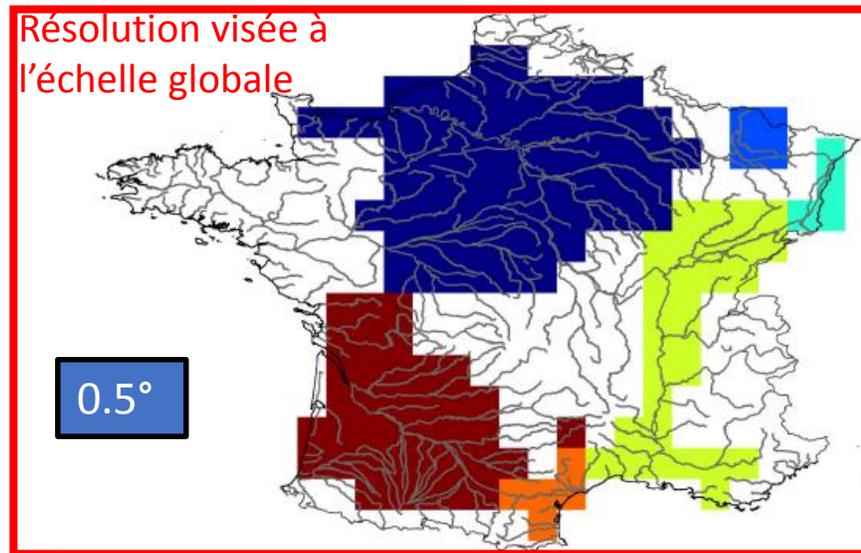
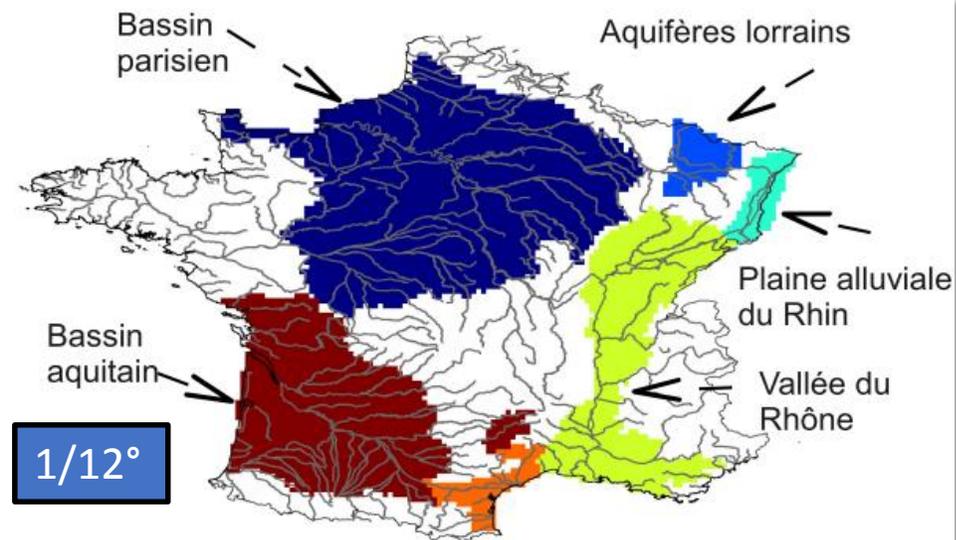
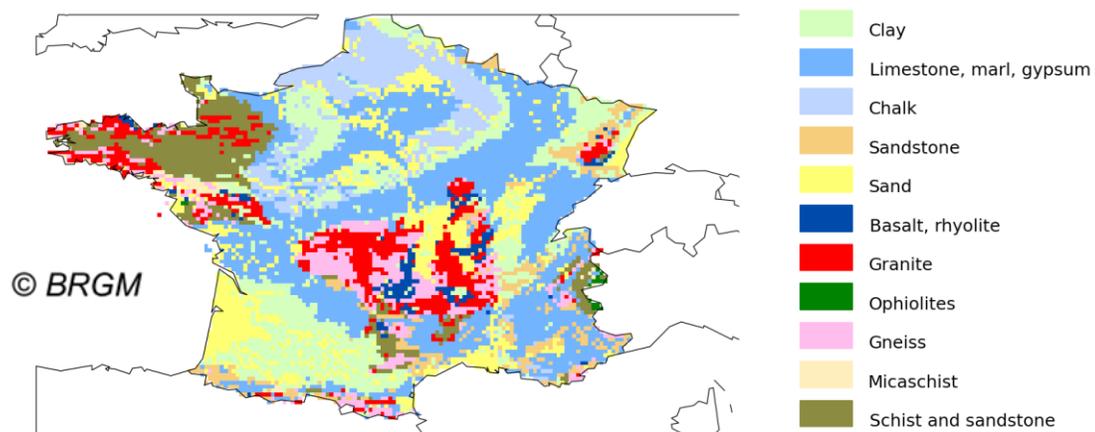
- ✓ Diffusion horizontale
- ✓ Echange nappe – rivière
- ✓ Echange nappe – sol

Les processus hydrologiques – Les aquifères – La France

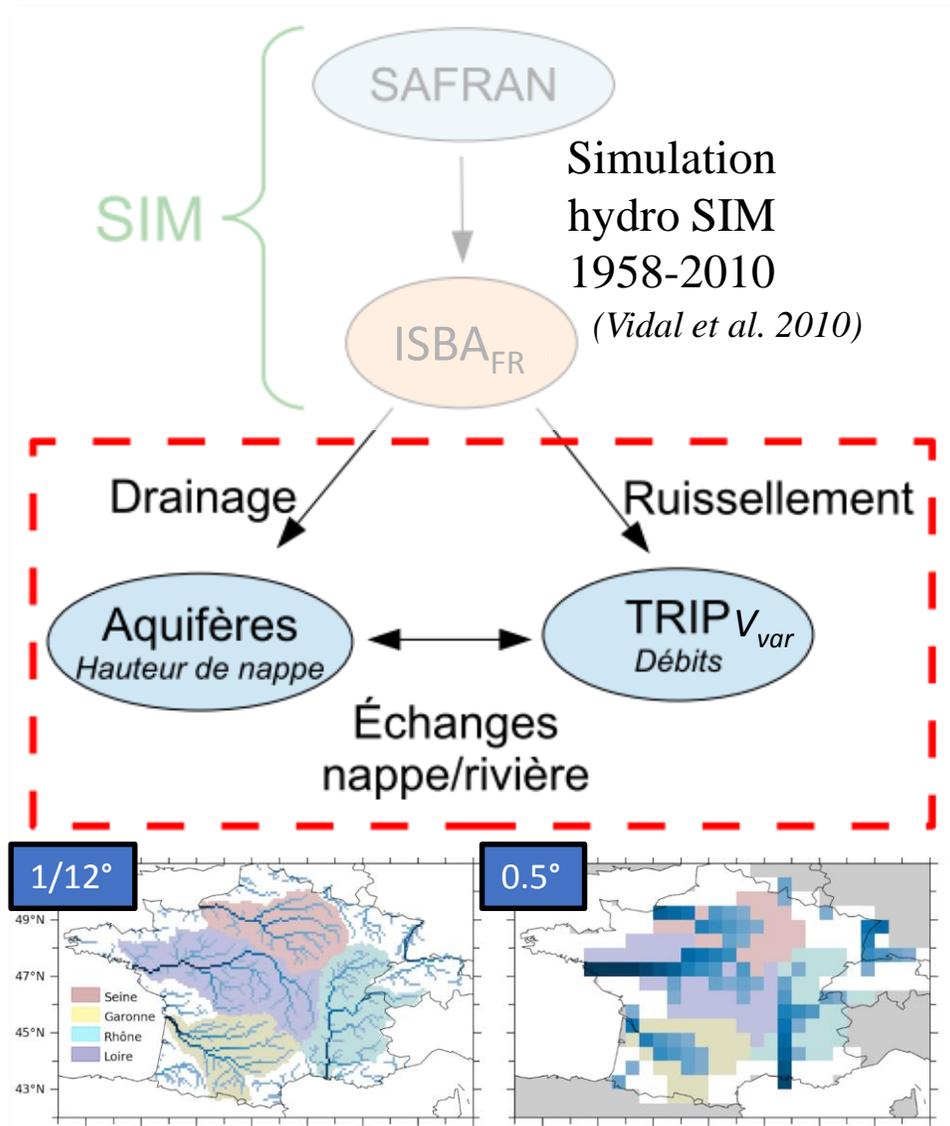
Principaux systèmes aquifères



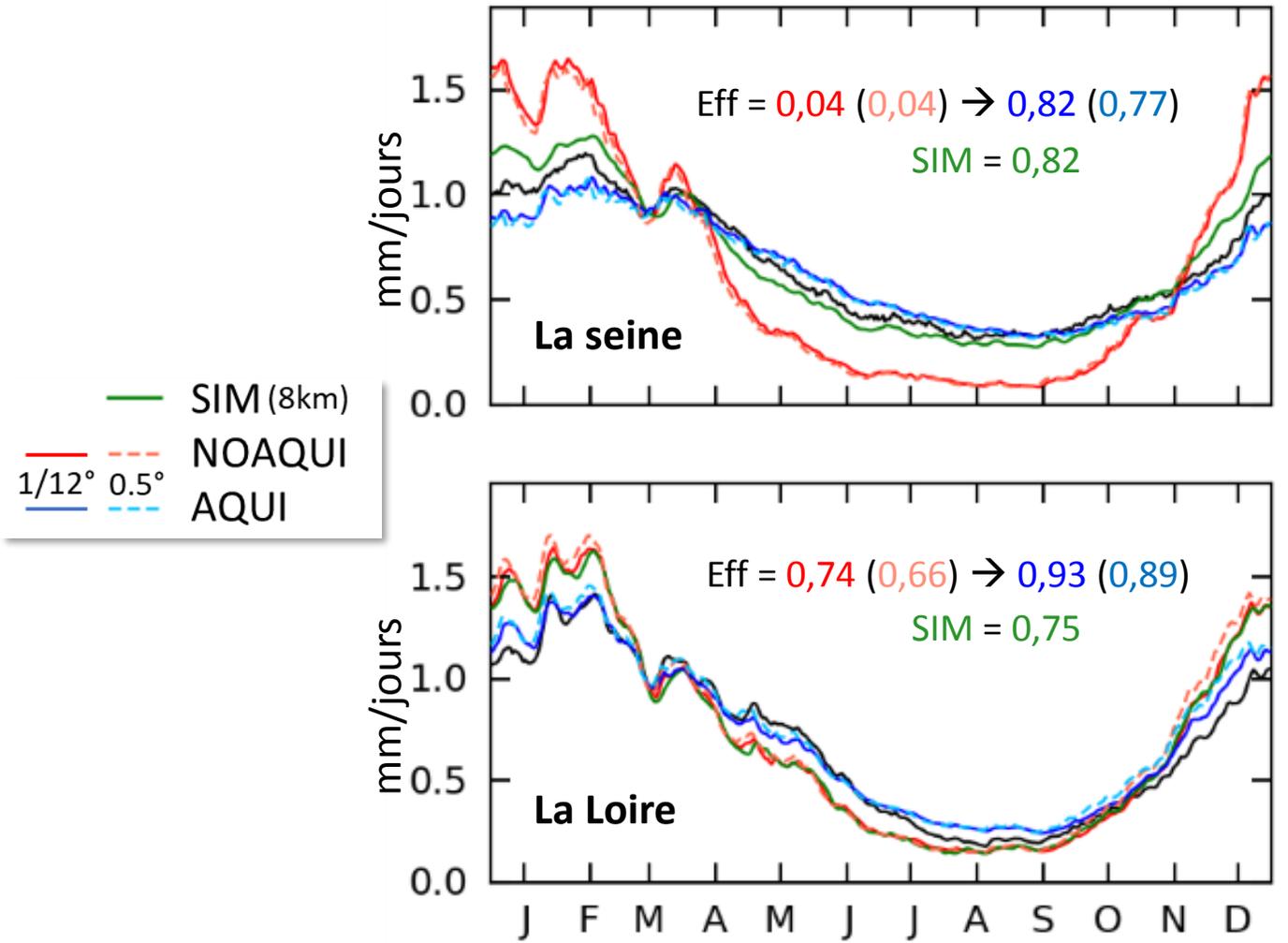
Lithologie (type de roche)



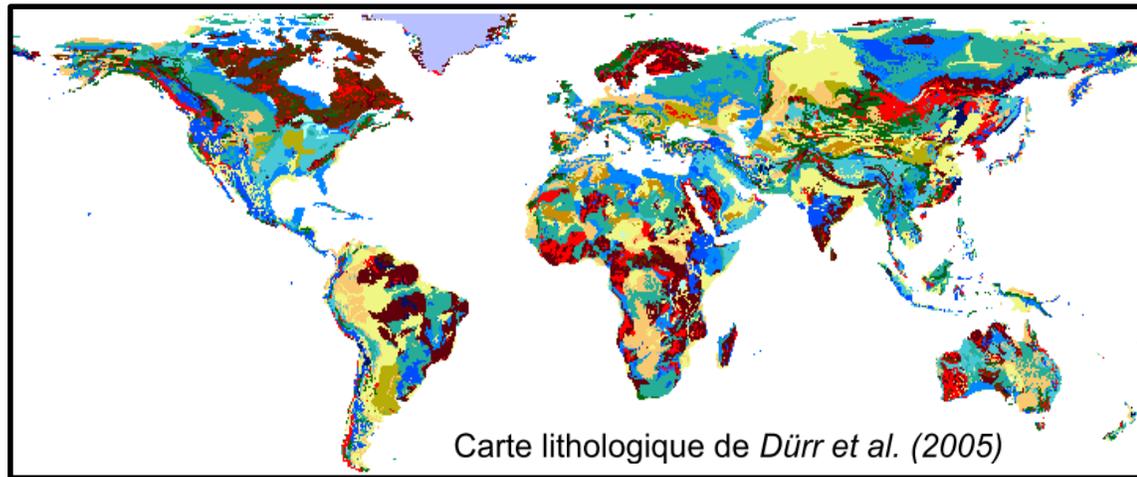
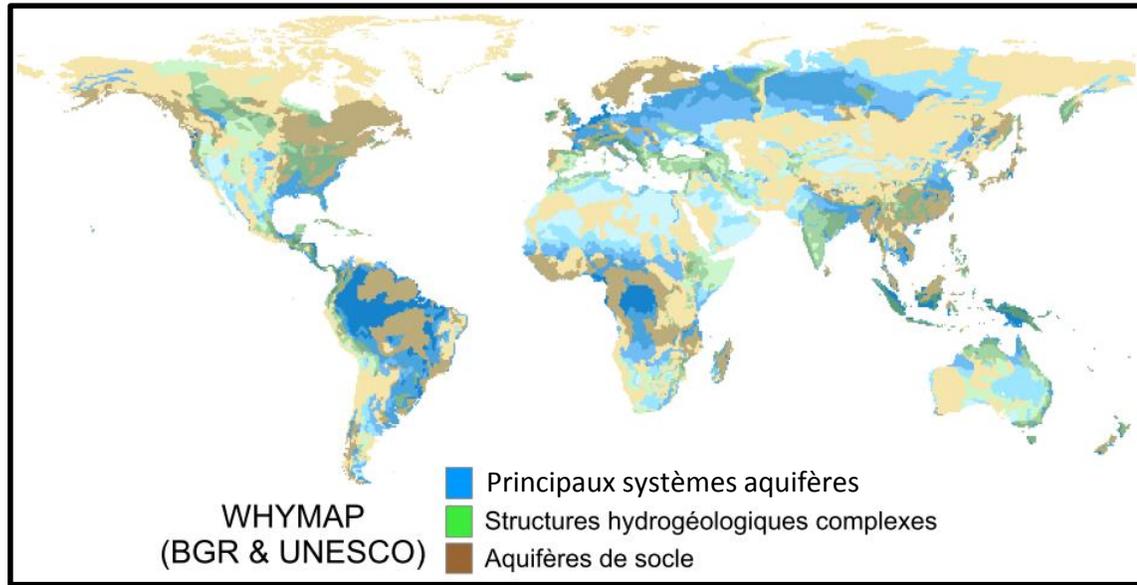
Les processus hydrologiques – Les aquifères – La France



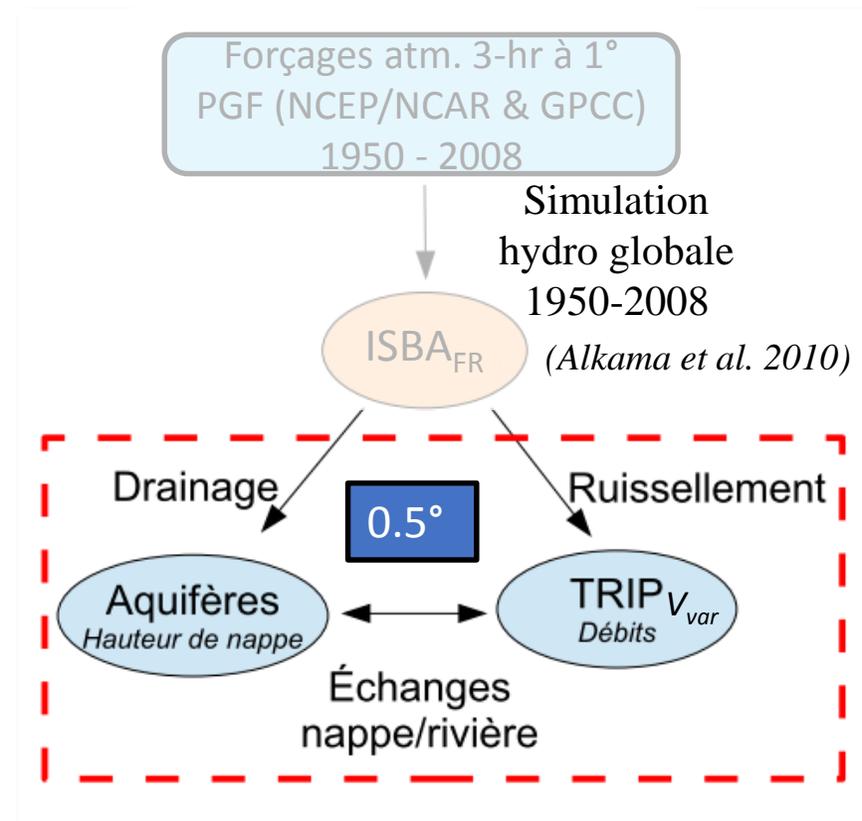
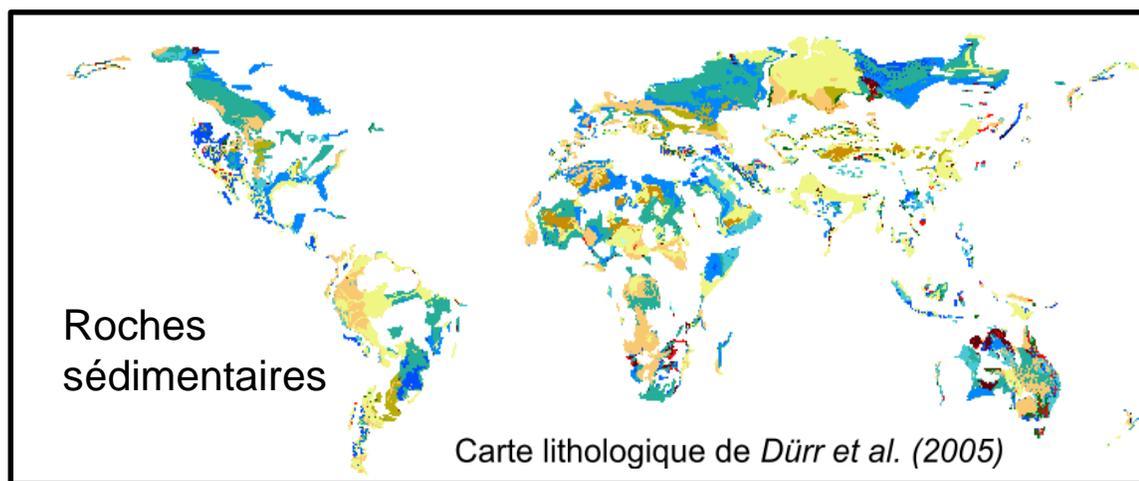
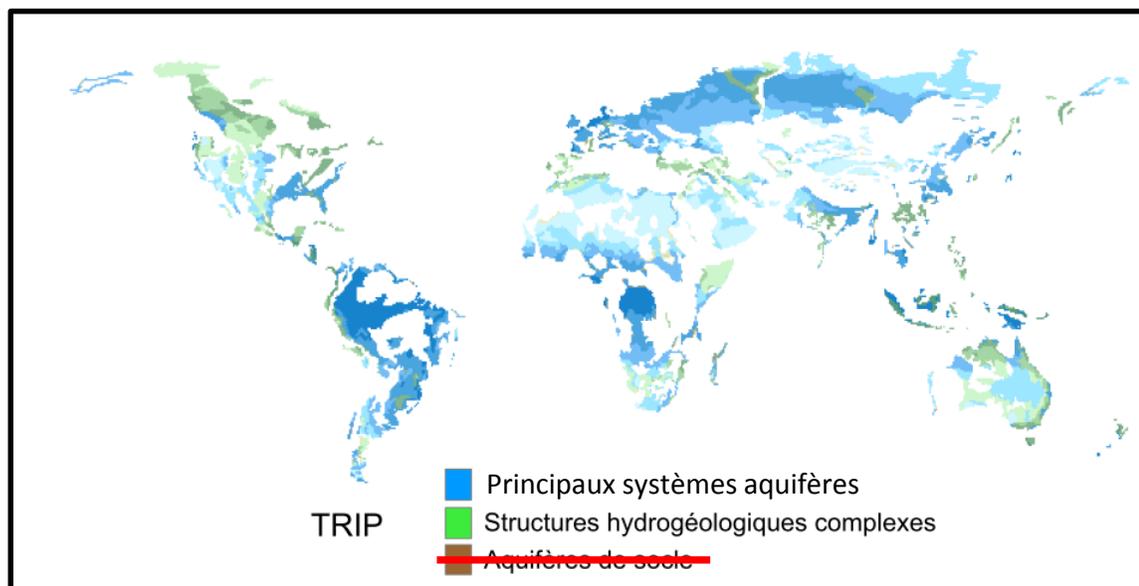
Cycles saisonniers climatologiques des débits (1970-2010)



Les processus hydrologiques – Les aquifères – L'échelle globale

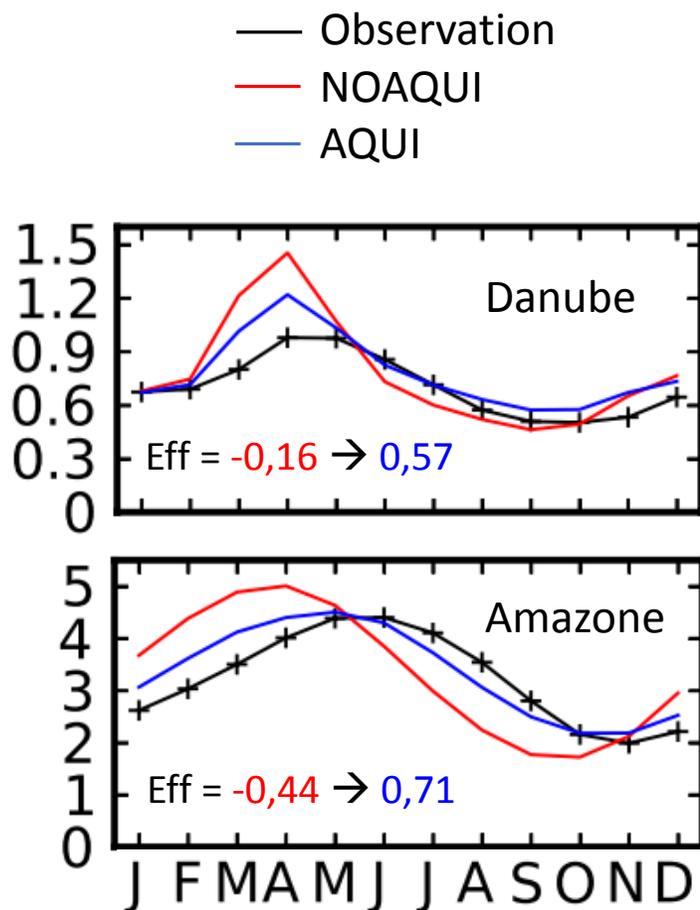


Les processus hydrologiques – Les aquifères – L'échelle globale

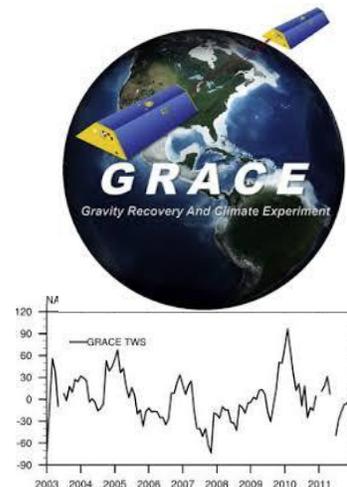


Les processus hydrologiques – Les aquifères – L'échelle globale

Débits – Cycles saisonniers climatologiques

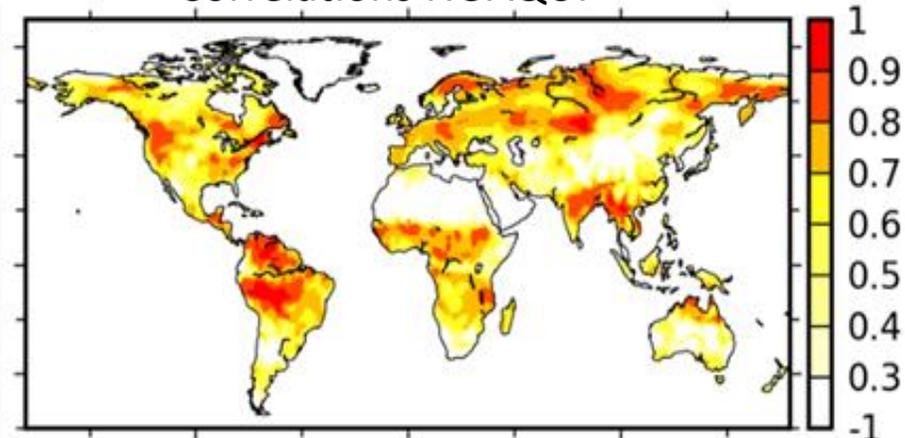


Variations des stocks d'eau continentaux (2002 – 2008)

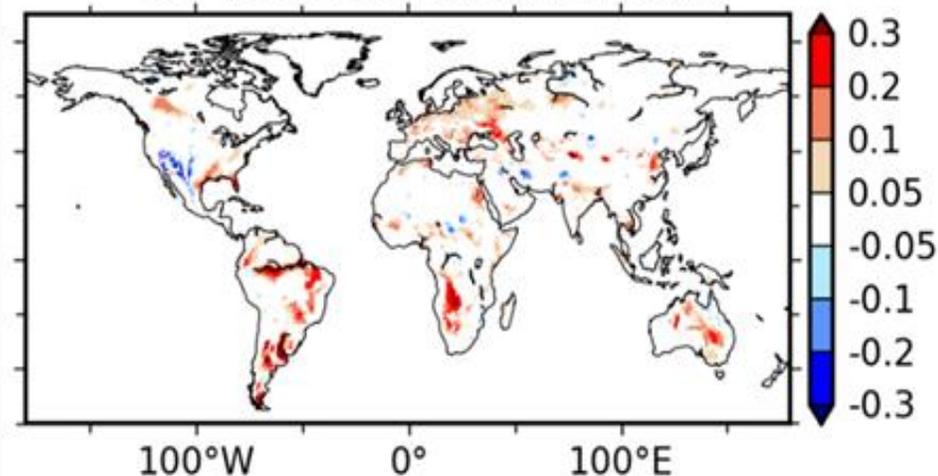


ISBA-TRIP =
neige + végétation
+
Humidité du sol
+
Eaux souterraines

Corrélations NOAQUI

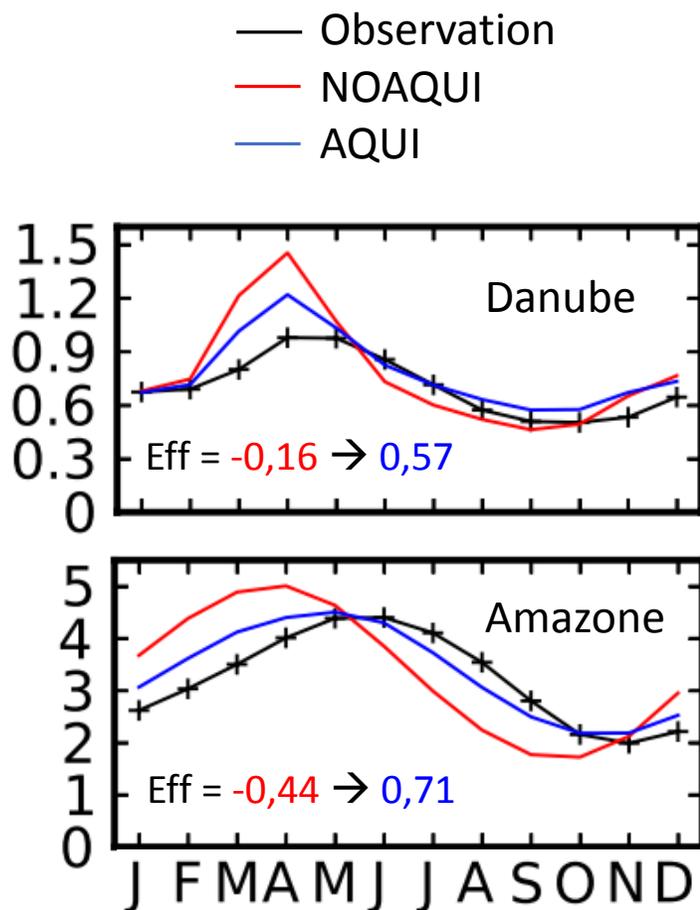


Différence des corrélations AQUI - NOAQUI

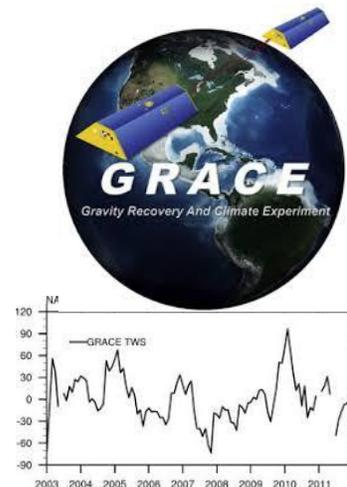


Les processus hydrologiques – Les aquifères – L'échelle globale

Débits – Cycles saisonniers climatologiques

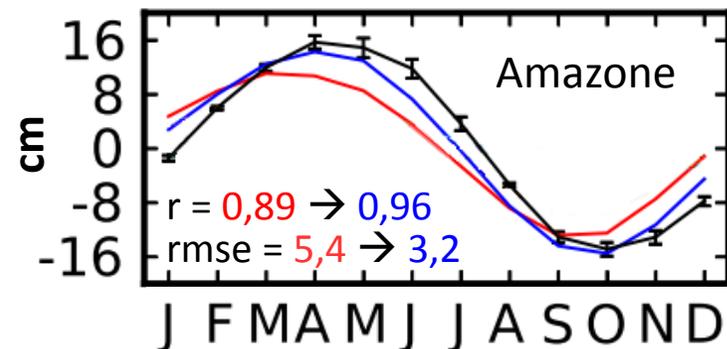


Variations des stocks d'eau continentaux (2002 – 2008)

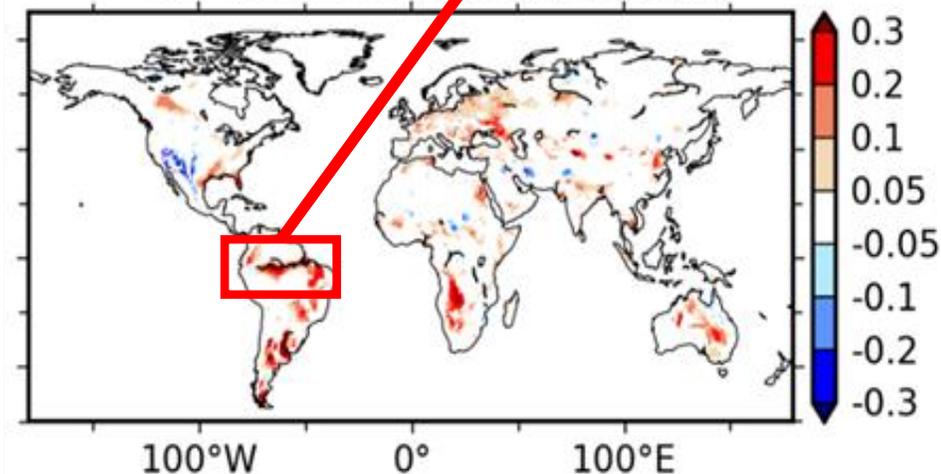


ISBA-TRIP =
neige + végétation
+
Humidité du sol
+
Eaux souterraines

Corrélations NOAQUI



Différence des corrélations AQUI - NOAQUI



1) Une nouvelle modélisation hydrologique

- ✓ *Les processus hydrologiques (inondations & aquifères)*
- ✓ *La zone non saturée du sol*
- ✓ *Le continuum neige-sol*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

2) Cette modélisation à l'échelle globale

- ✓ *Evaluation*
- ✓ *Est-elle utile dans CNRM-CM6 ?*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

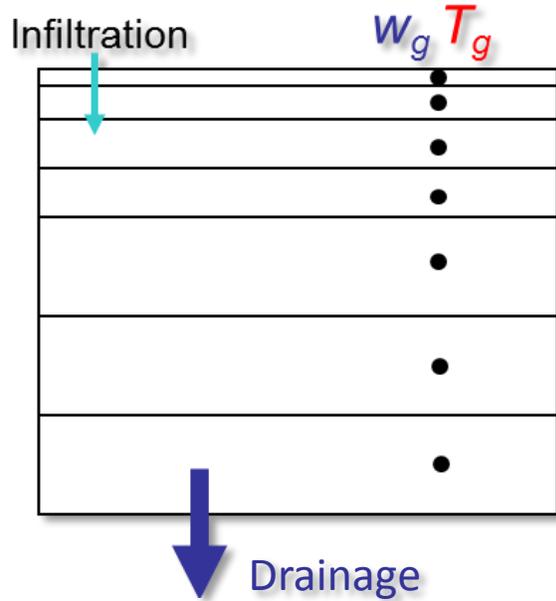
3) Le lien hydrologie – biogéochimie dans les régions boréales

- ✓ *Méthane, Tourbières & Pergélisols*
- ✓ *Dynamique du carbone du sol & des gaz*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

Synthèse générale

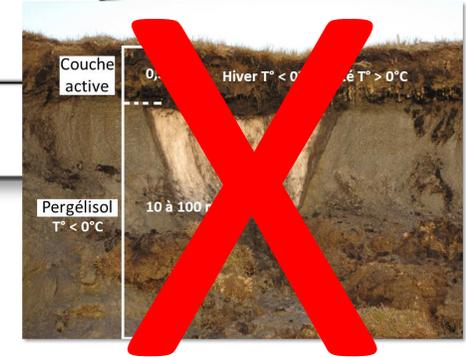
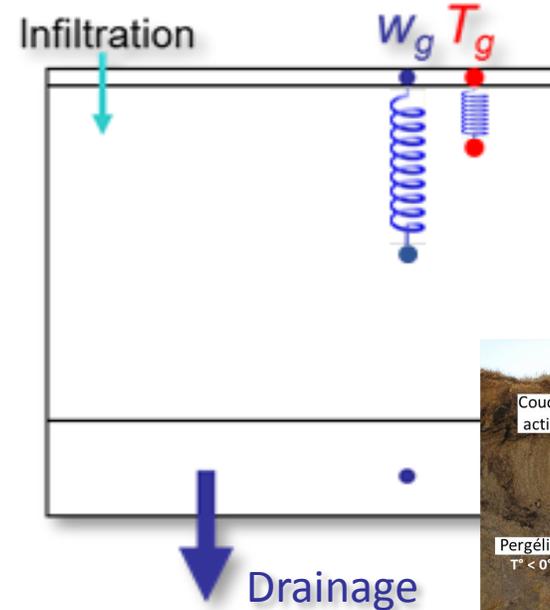
La zone non saturée du sol – ISBA_{DF}

Schéma de sol explicite ISBA_{DF}



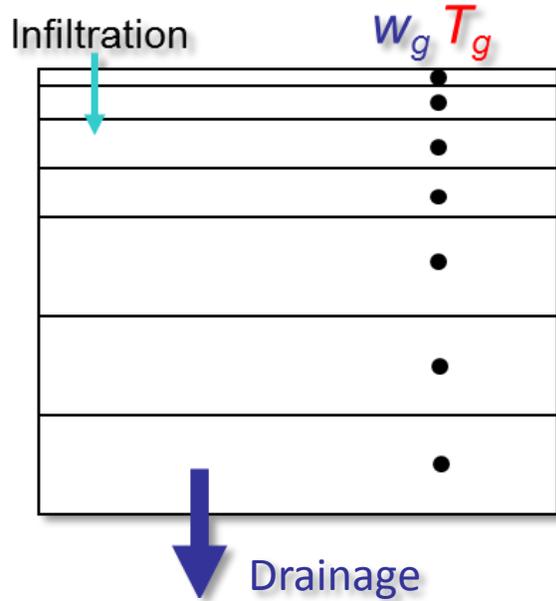
- ✓ 14 couche de sols (12m)
 - ✓ Diffusion de l'eau (forme mixte éq. de Richards)
 - ✓ Diffusion de l'énergie (loi de Fourier)
- ✓ Eau (w_g) & Température (T_g) colocalisées
- ✓ Changements de phase (gel du sol)

Schéma de sol « force-restore » ISBA_{FR}



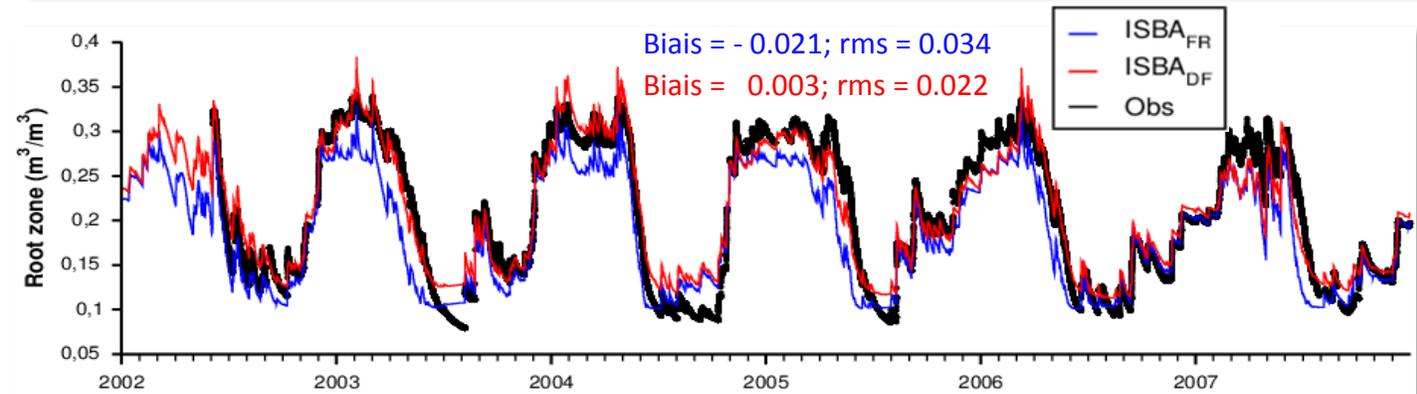
La zone non saturée du sol – ISBA_{DF} – Evaluation à l'échelle locale

Schéma de sol explicite ISBA_{DF}

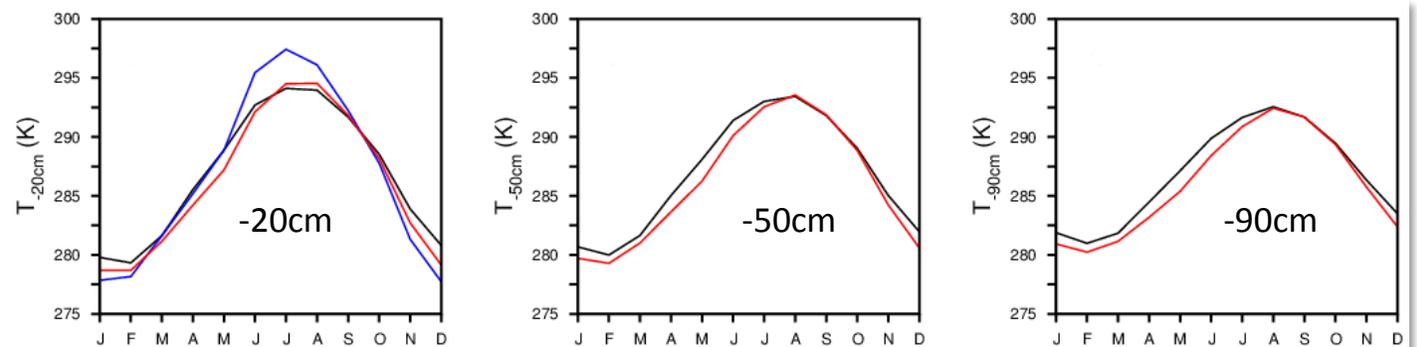


- ✓ 14 couche de sols (12m)
 - ✓ Diffusion de l'eau (forme mixte eq. de Richards)
 - ✓ Diffusion de l'énergie (loi de Fourier)
- ✓ Eau (w_g) & Température (T_g) colocalisées
- ✓ Changements de phase (gel du sol)

Humidité du sol simulées à SMOSREX (2002 – 2007)



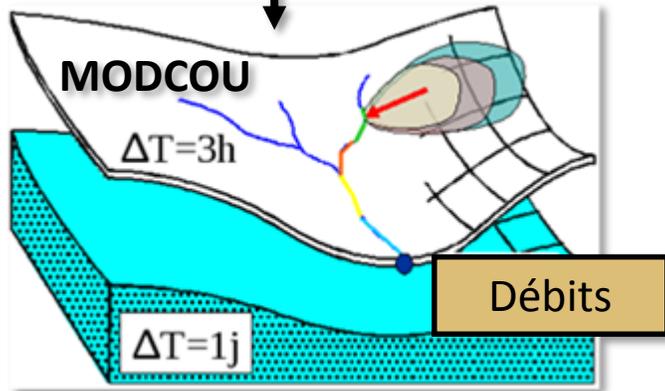
Cycle saisonnier moyen de la Température du sol observées simulées à SMOSREX (2002 – 2007)



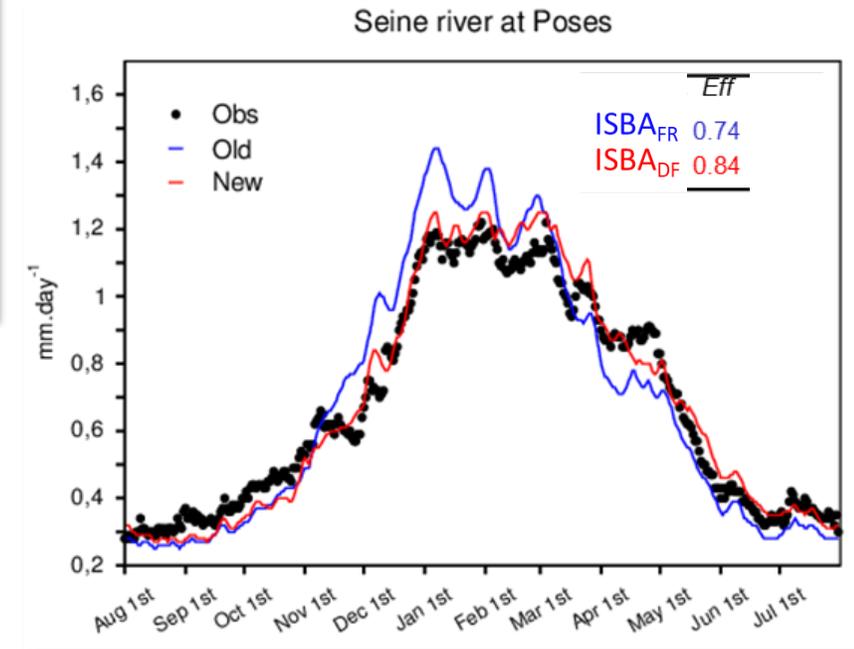
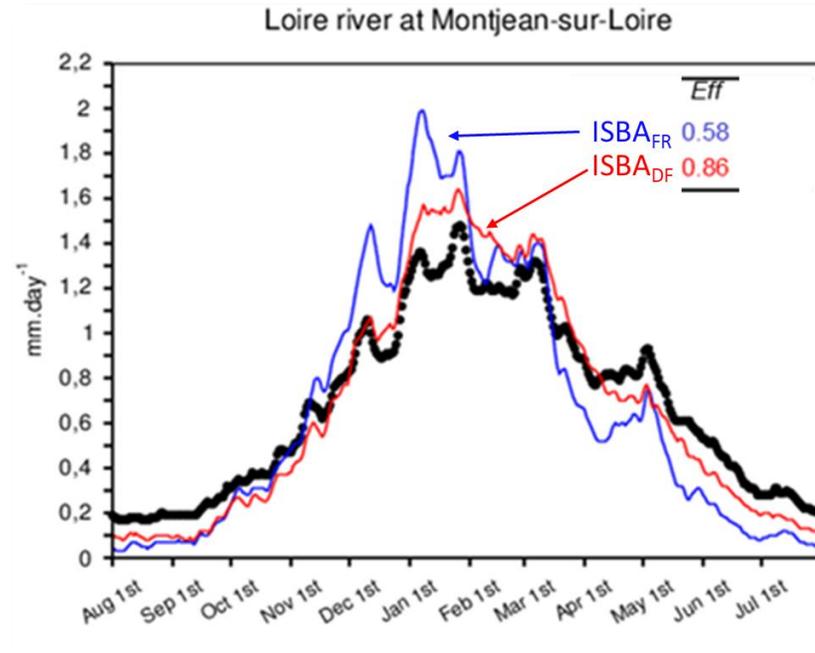
La zone non saturée du sol – ISBA_{DF} – Evaluation sur la France – Débits

Forçages SAFRAN 1-hr à 8km
1992 - 2012

SURFEX
ISBA_{DF} vs. ISBA_{FR}



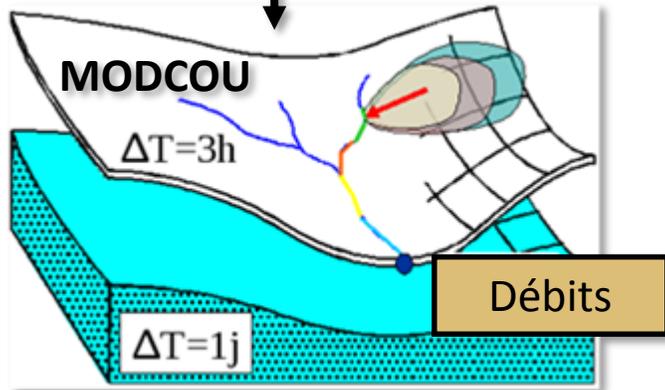
Cycles saisonniers climatologiques des débits (1992 – 2012)



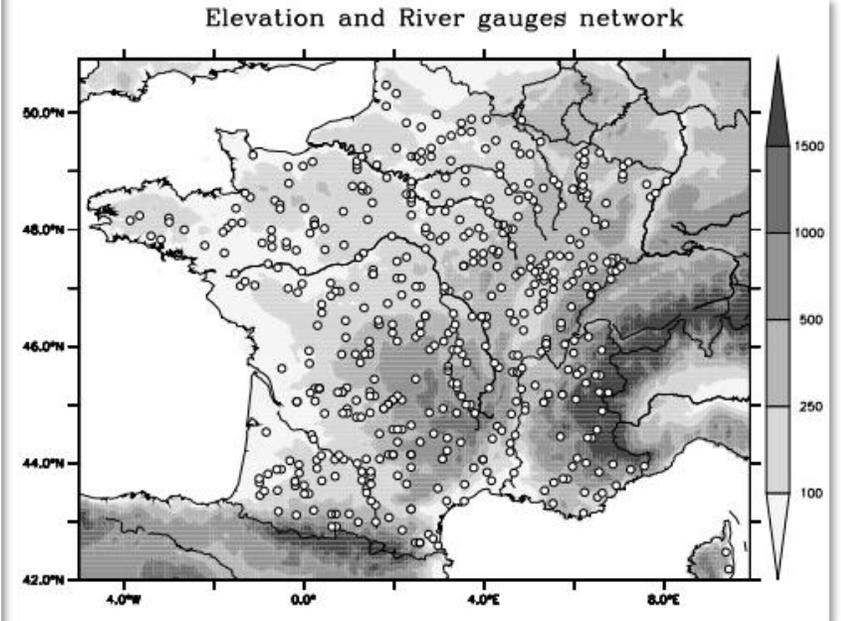
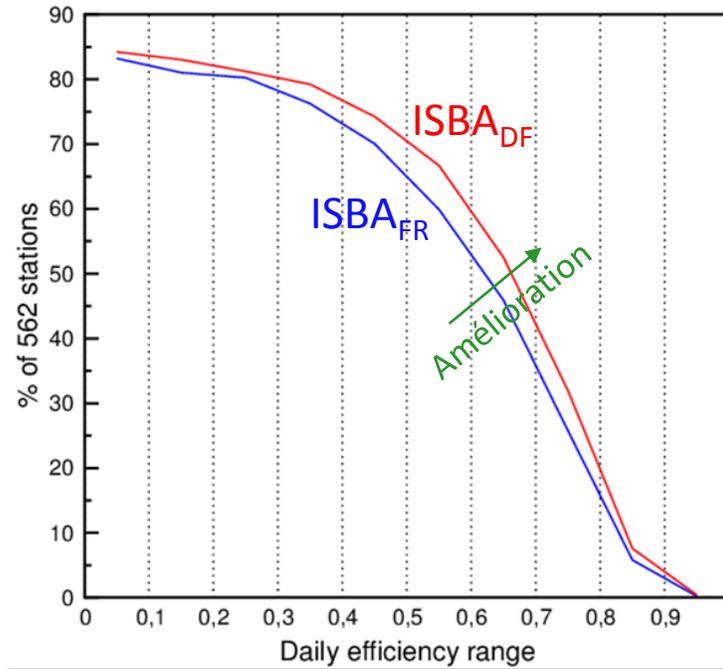
La zone non saturée du sol – ISBA_{DF} – Evaluation sur la France – Débits

Forçages SAFRAN 1-hr à 8km
1992 - 2012

SURFEX
ISBA_{DF} vs. ISBA_{FR}



Distribution cumulée des efficacités – 562 stations réparties sur la France



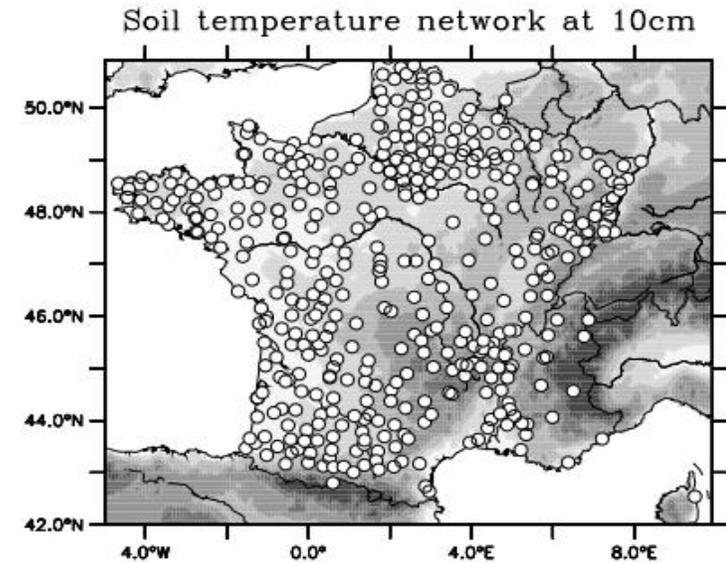
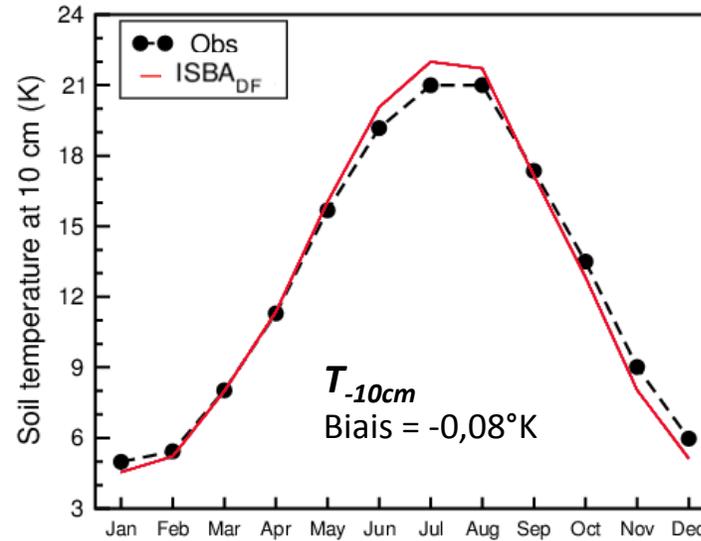
La zone non saturée du sol – ISBA_{DF} – Evaluation sur la France – Température

Forçages SAFRAN 1-hr à 8km
1992 - 2012

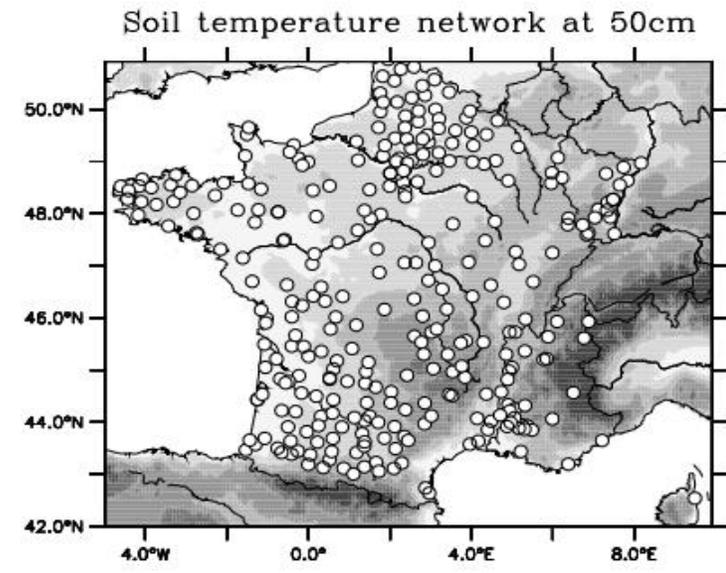
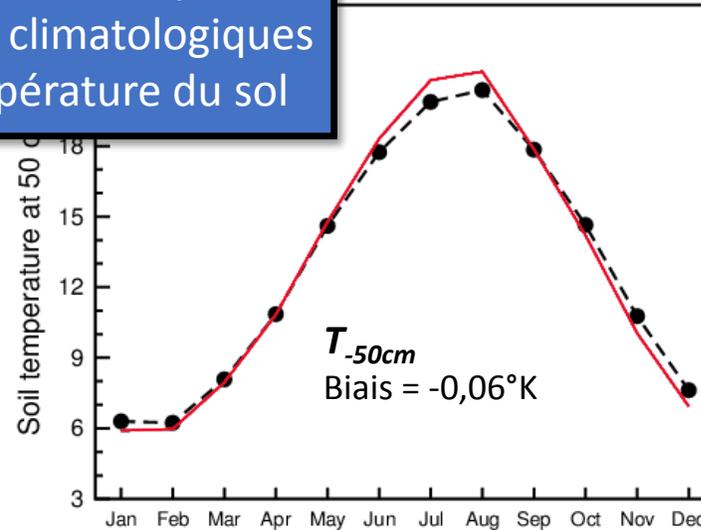
SURFEX
ISBA_{DF} vs. ISBA_{FR}

T° du sol

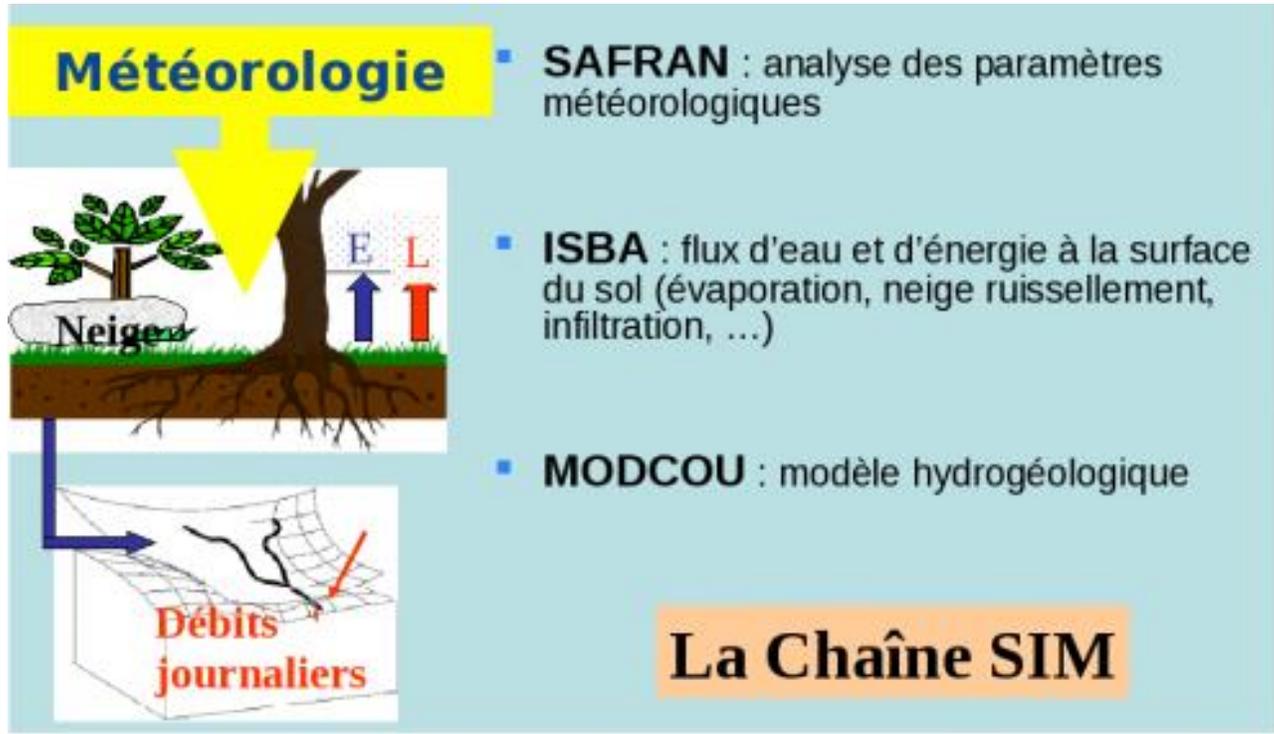
Obs In-situ



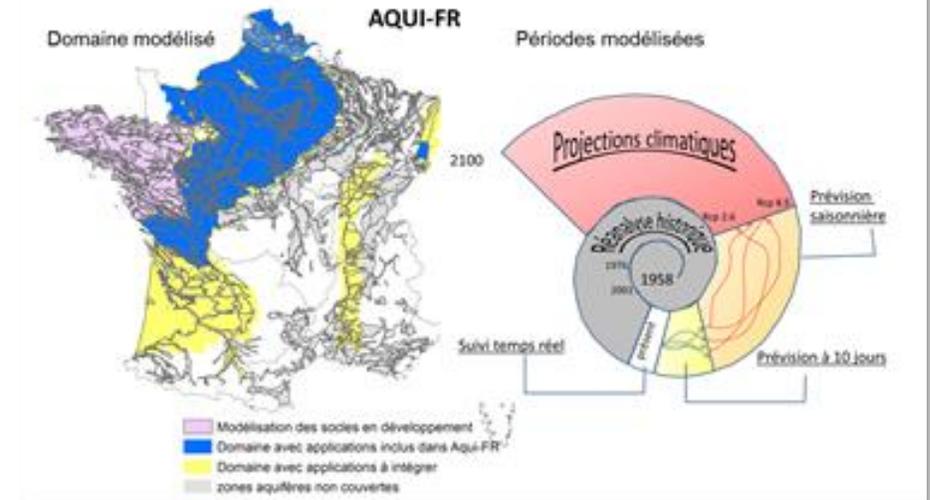
Composites des Cycles
saisonniers climatologiques
de la Température du sol



SIM – Suivi hydrométéorologique sur la France



Aqui-FR – Suivi Eaux Souterraines



1) Une nouvelle modélisation hydrologique

- ✓ *Les processus hydrologiques (inondations & aquifères)*
- ✓ *La zone non saturée du sol – ISBA_{DF}*
- ✓ *Le continuum neige-sol*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

2) Cette modélisation à l'échelle globale

- ✓ *Evaluation*
- ✓ *Est-elle utile dans CNRM-CM6 ?*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

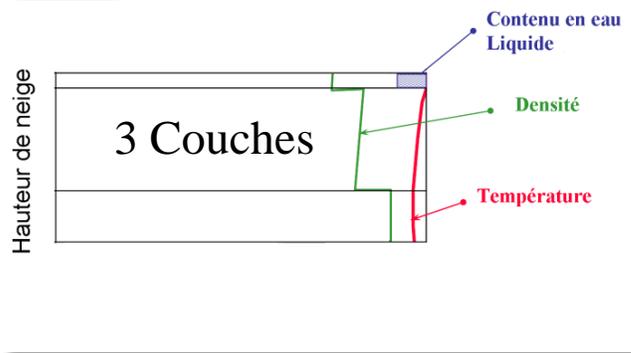
3) Le lien hydrologie – biogéochimie dans les régions boréales

- ✓ *Méthane, Tourbières & Pergélisols*
- ✓ *Dynamique du carbone du sol & des gaz*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

Synthèse générale

Le continuum neige-sol – La neige – Le schéma ES

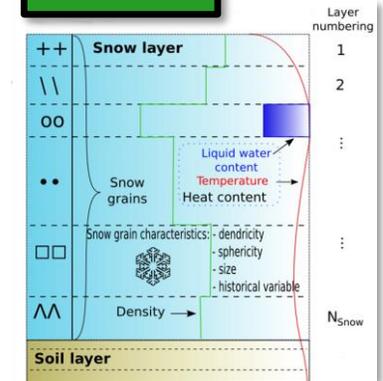
ES



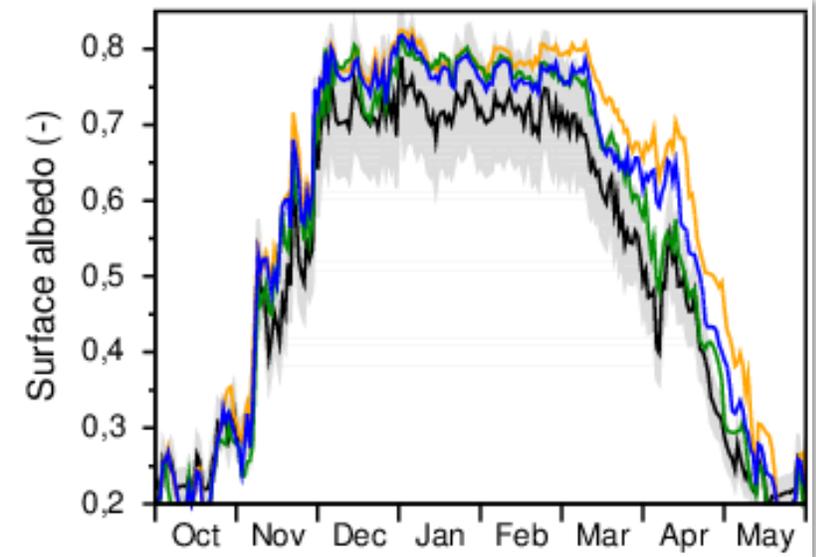
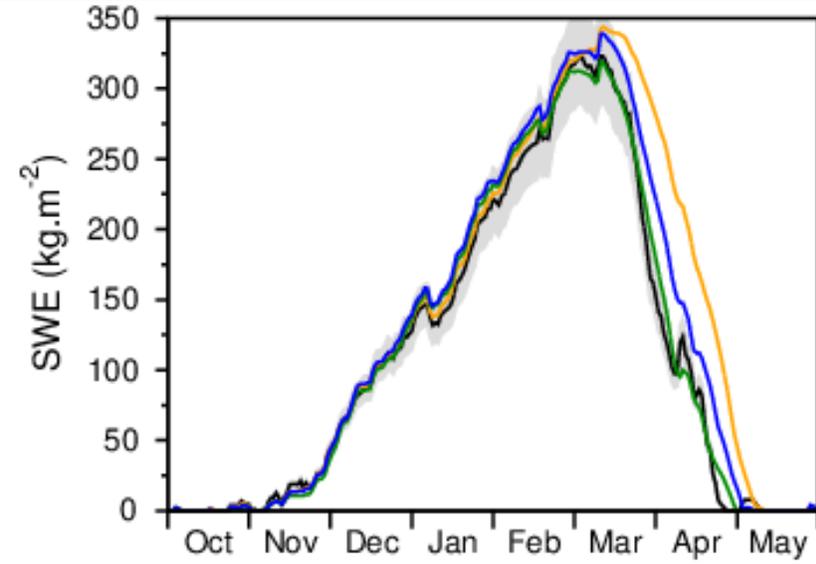
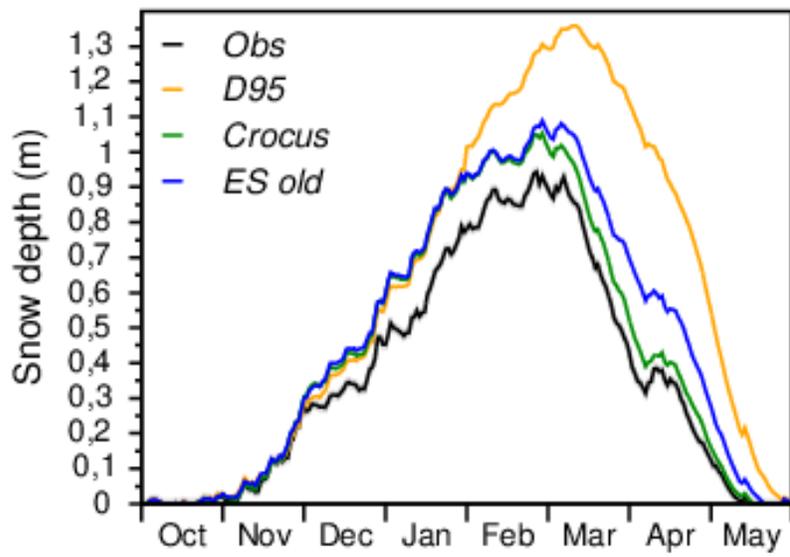
D95



Crocus

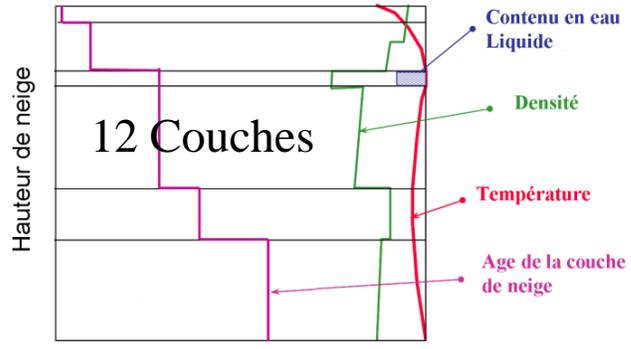


Hauteur, masse et albédo de la neige simulés au Col de Porte sur la période 1993-2011



Le continuum neige-sol – La neige – Le schéma ES

ES basé sur Crocus



- ✓ Age
- ✓ Albédo
- ✓ Compaction
- ✓ Cond. thermique

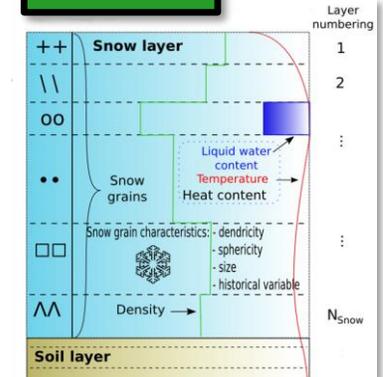
vs.

D95

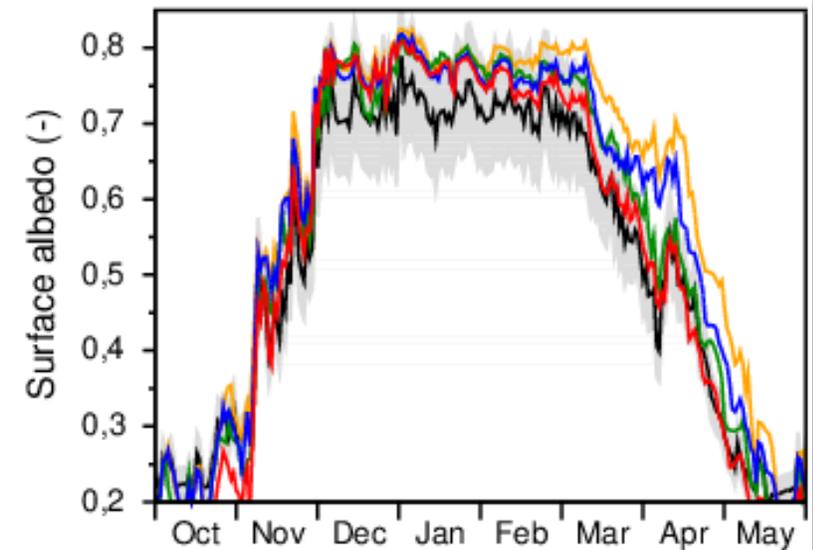
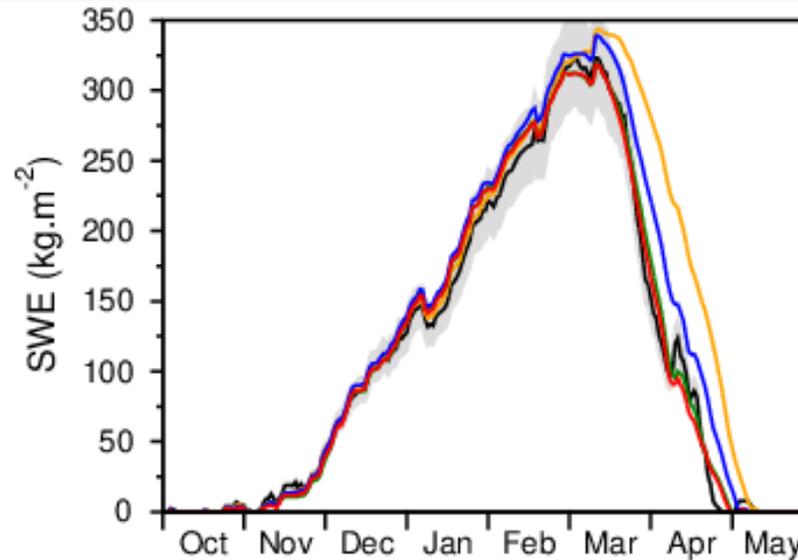
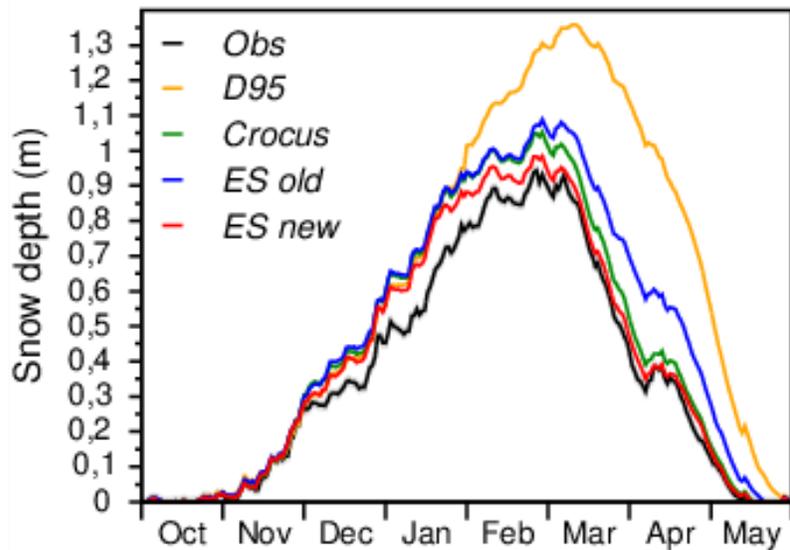


vs.

Crocus



Hauteur, masse et albédo de la neige simulés au Col de Porte sur la période 1993-2011



Le continuum neige-sol – La neige – Le schéma ES

Forçages ERA-I 3-hr
1979 - 1993

Cycles saisonniers
moyens Composites

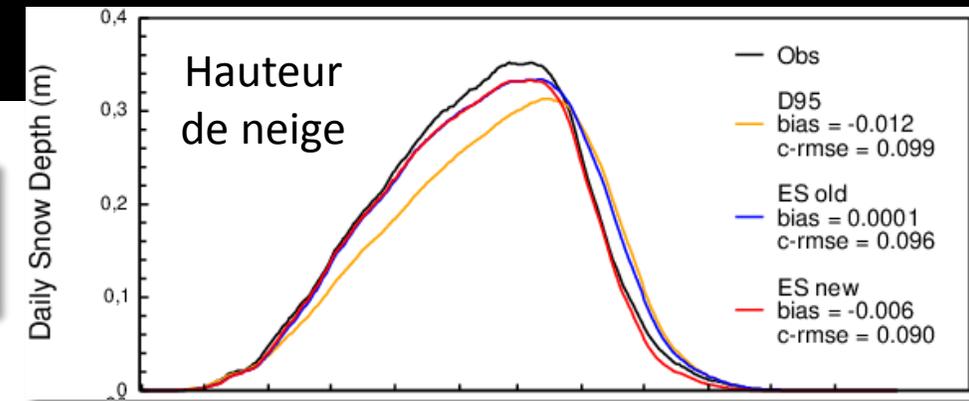
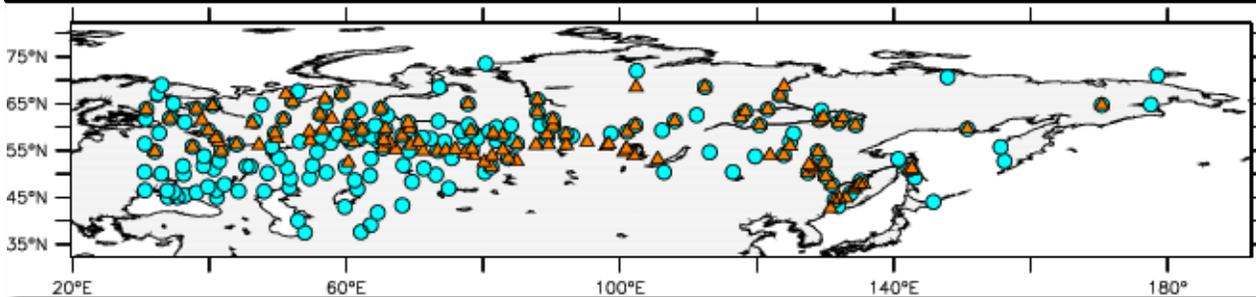
SURFEX

D95 vs. ES-old vs. ES-New

Hauteurs
de neige 

Profil T°
de sol 

Réseau d'observations in-situ sur l'Eurasie



Le continuum neige-sol – La neige – Le schéma ES

Forçages ERA-I 3-hr
1979 - 1993

SURFEX

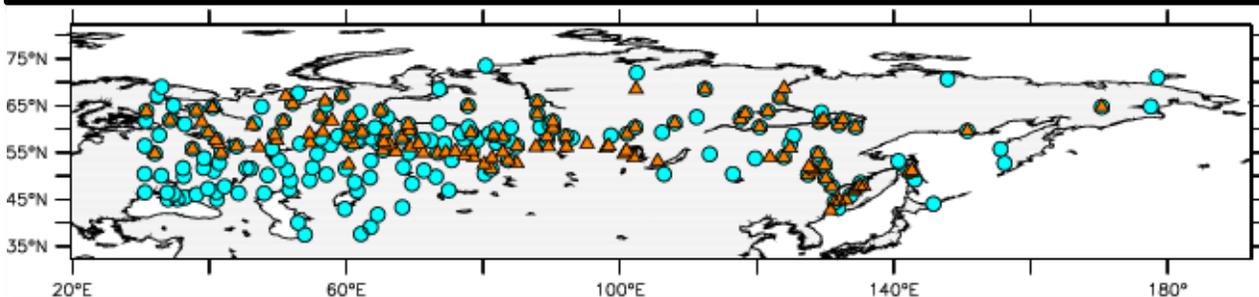
D95 vs. ES-old vs. ES-New

Hauteurs
de neige 

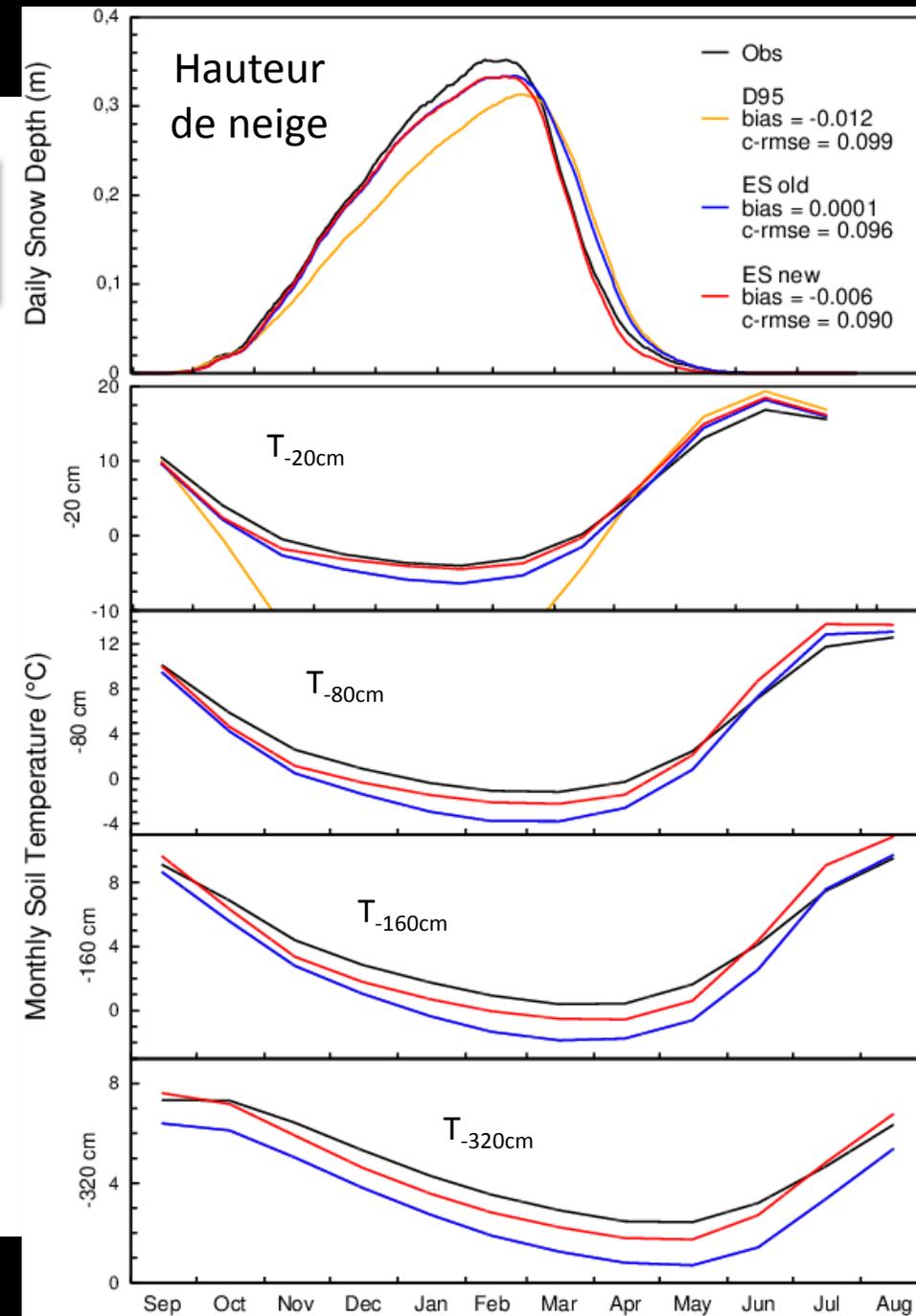
Profil T°
de sol 

Cycles saisonniers
moyens Composites

Réseau d'observations in-situ sur l'Eurasie



Decharme et al. (2016)



Le continuum neige-sol – La neige – Le schéma ES

Forçages ERA-I 3-hr
1979 - 1993

SURFEX

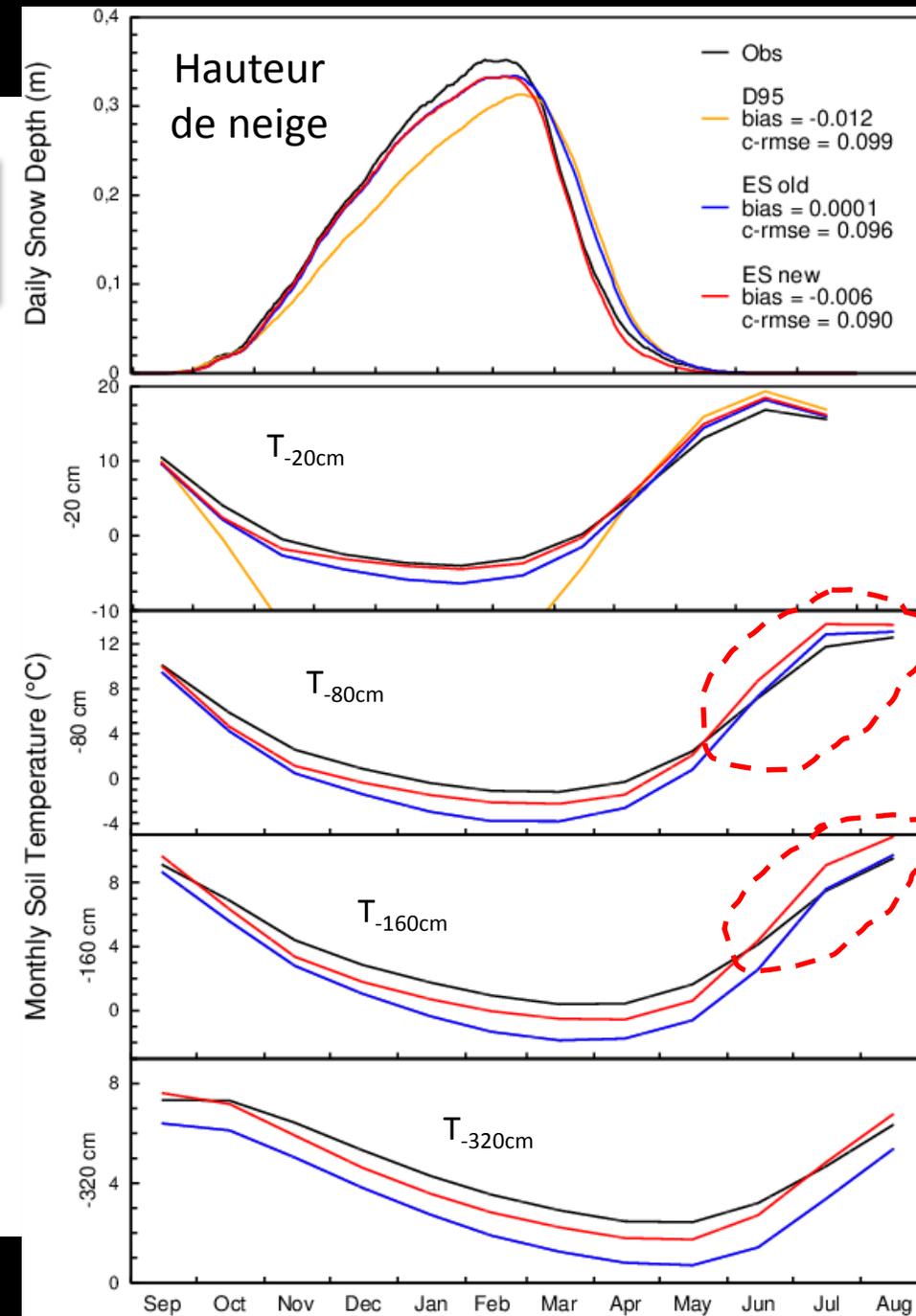
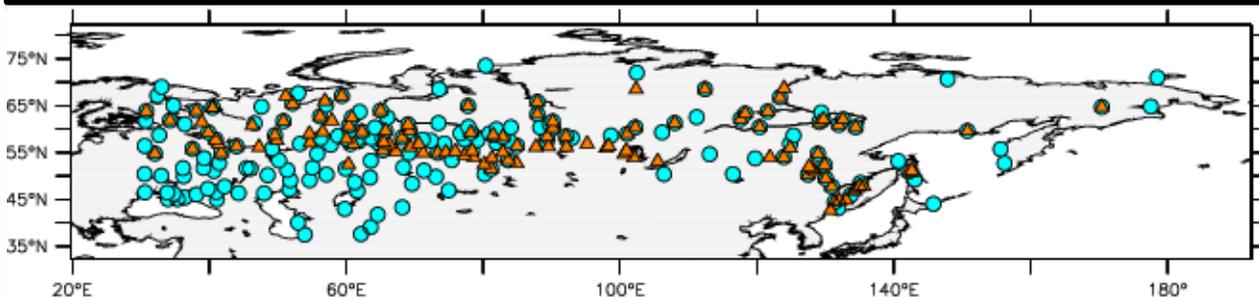
D95 vs. ES-old vs. ES-New

Hauteurs
de neige 

Profil T°
de sol 

Cycles saisonniers
moyens Composites

Réseau d'observations in-situ sur l'Eurasie



Le continuum neige-sol – La neige – Le schéma ES

Forçages ERA-I 3-hr
1979 - 1993

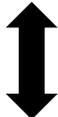
Cycles saisonniers
moyens Composites

SURFEX

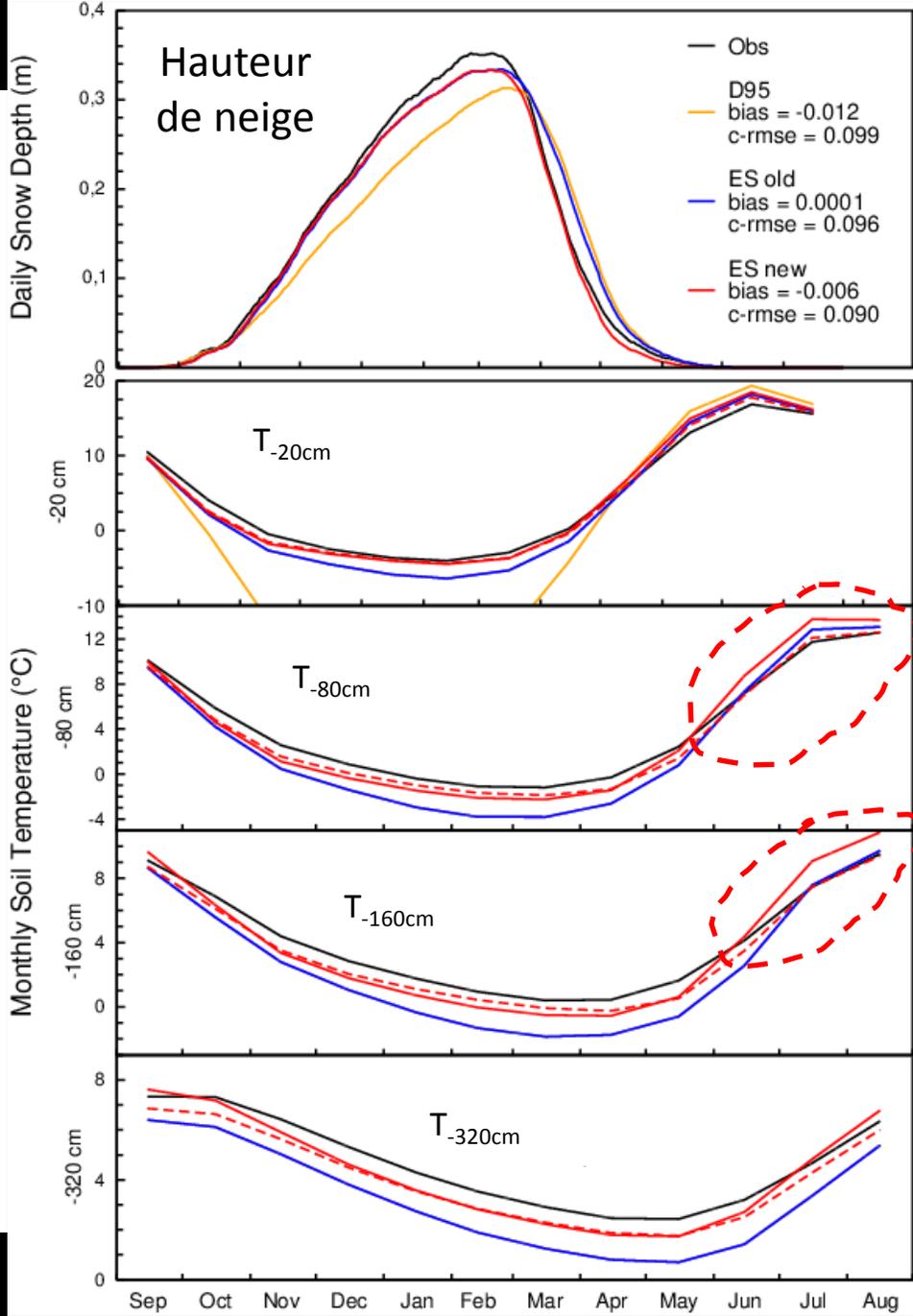
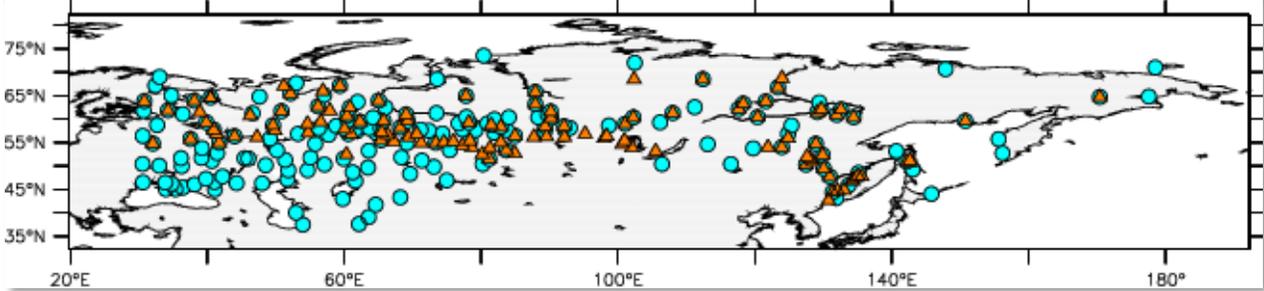
D95 vs. ES-old vs. ES-New

Hauteurs
de neige 

Profil T°
de sol 

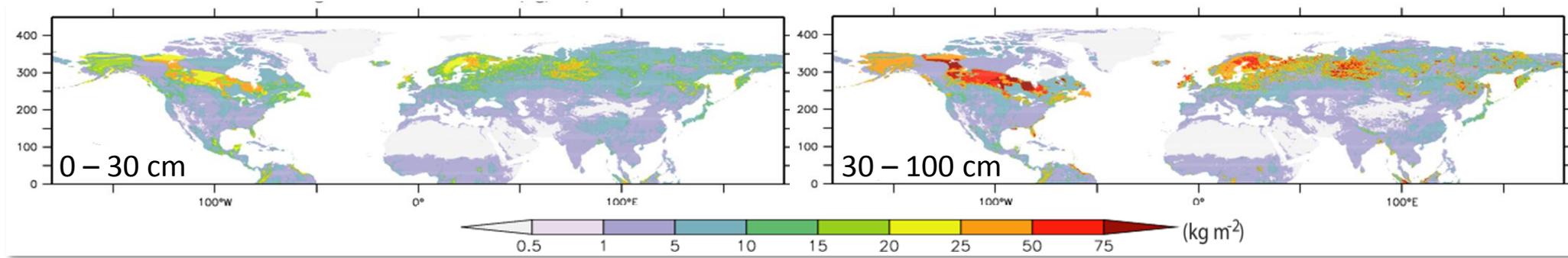


Réseau d'observations in-situ sur l'Eurasie



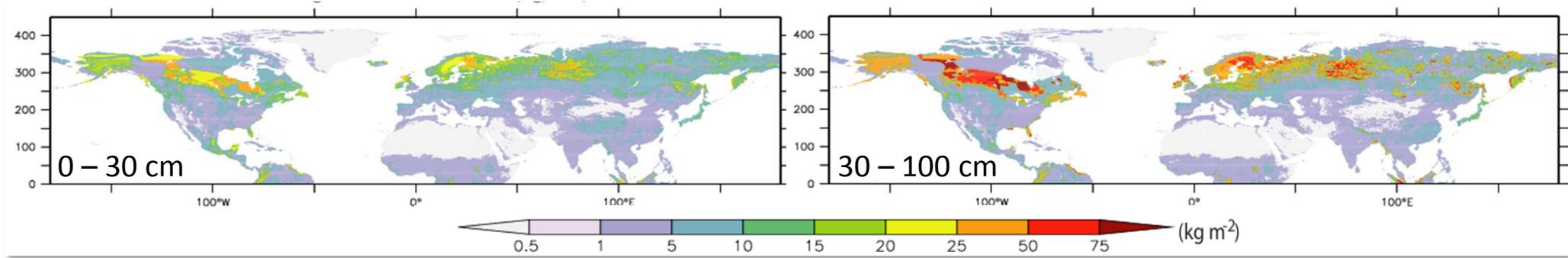
Le continuum neige-sol – Sols organiques vs. Sols minéraux

Répartition spatiale
du carbone dans les
sols (HWSD)



Le continuum neige-sol – Sols organiques vs. Sols minéraux

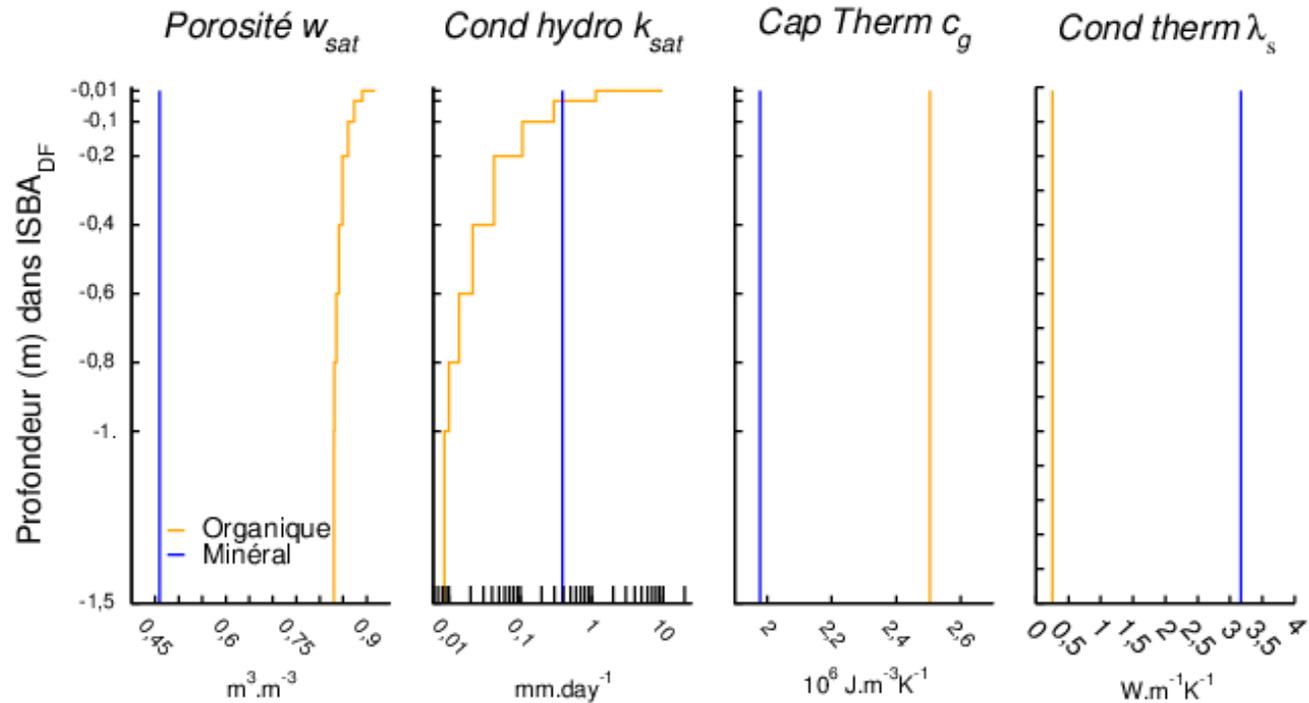
Répartition spatiale
du carbone dans les
sols (HWSD)



Sol minéral

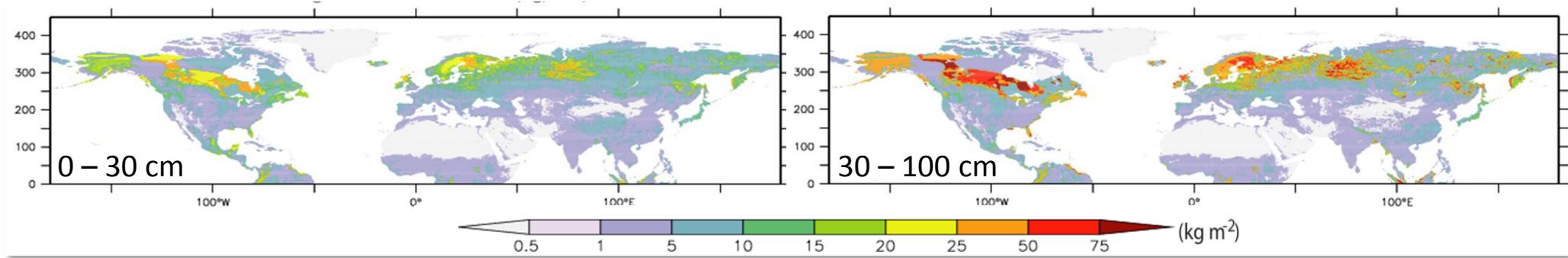


Sol organique



Le continuum neige-sol – Sols organiques vs. Sols minéraux

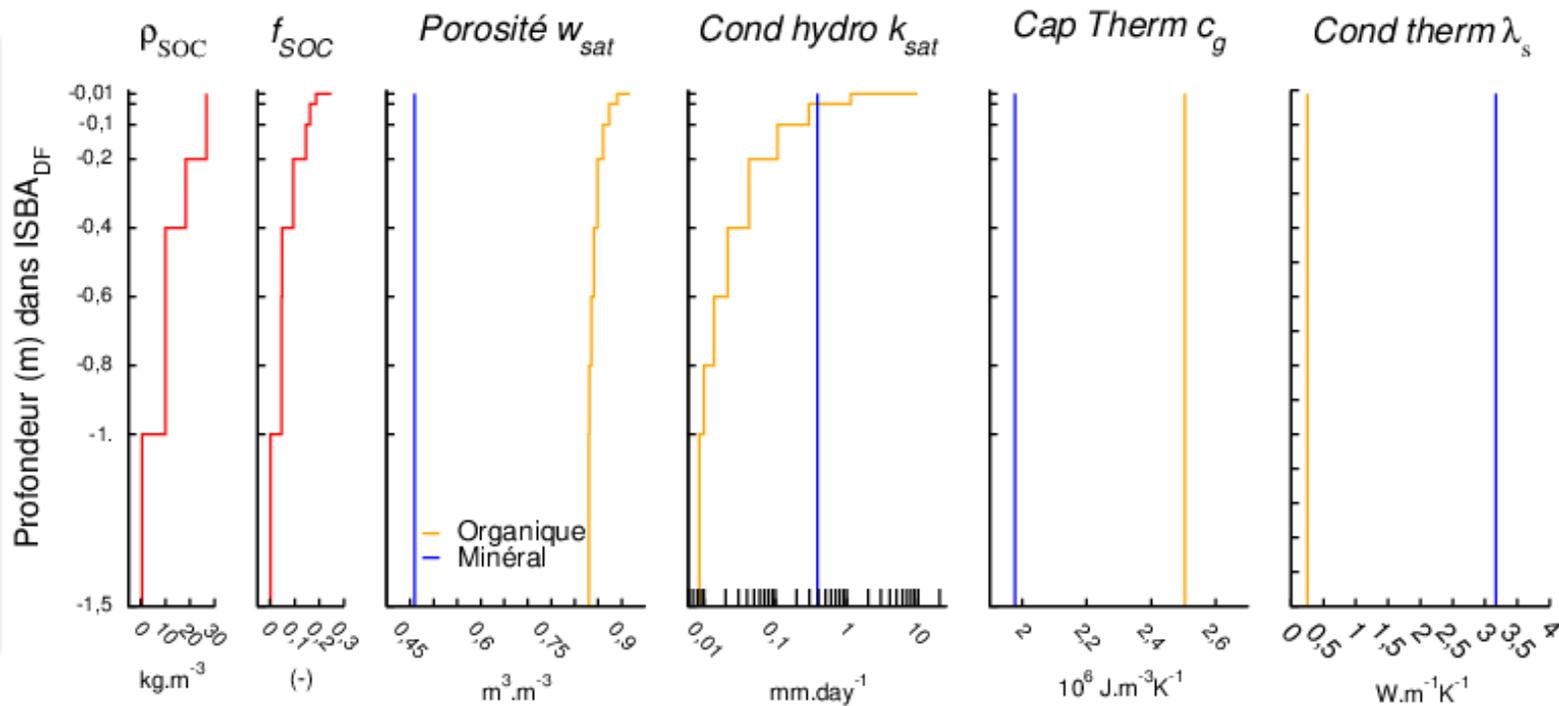
Répartition spatiale du carbone dans les sols (HWSD)



Sol minéral

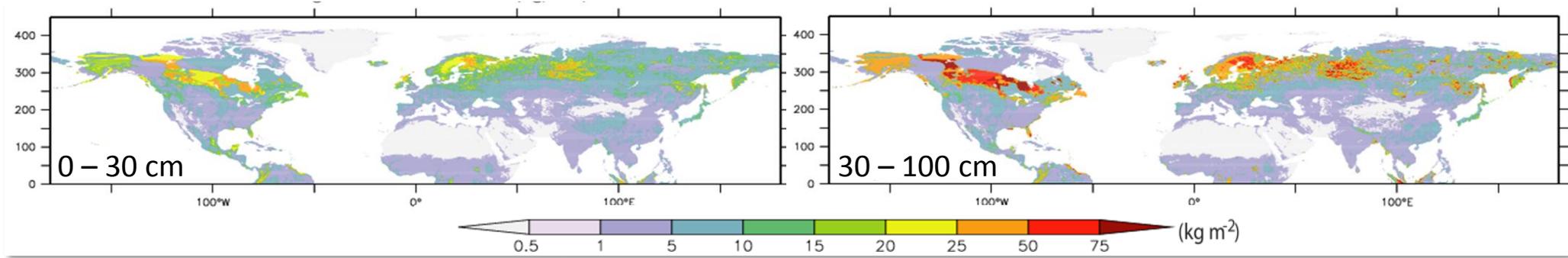


Sol organique



Le continuum neige-sol – Sols organiques vs. Sols minéraux

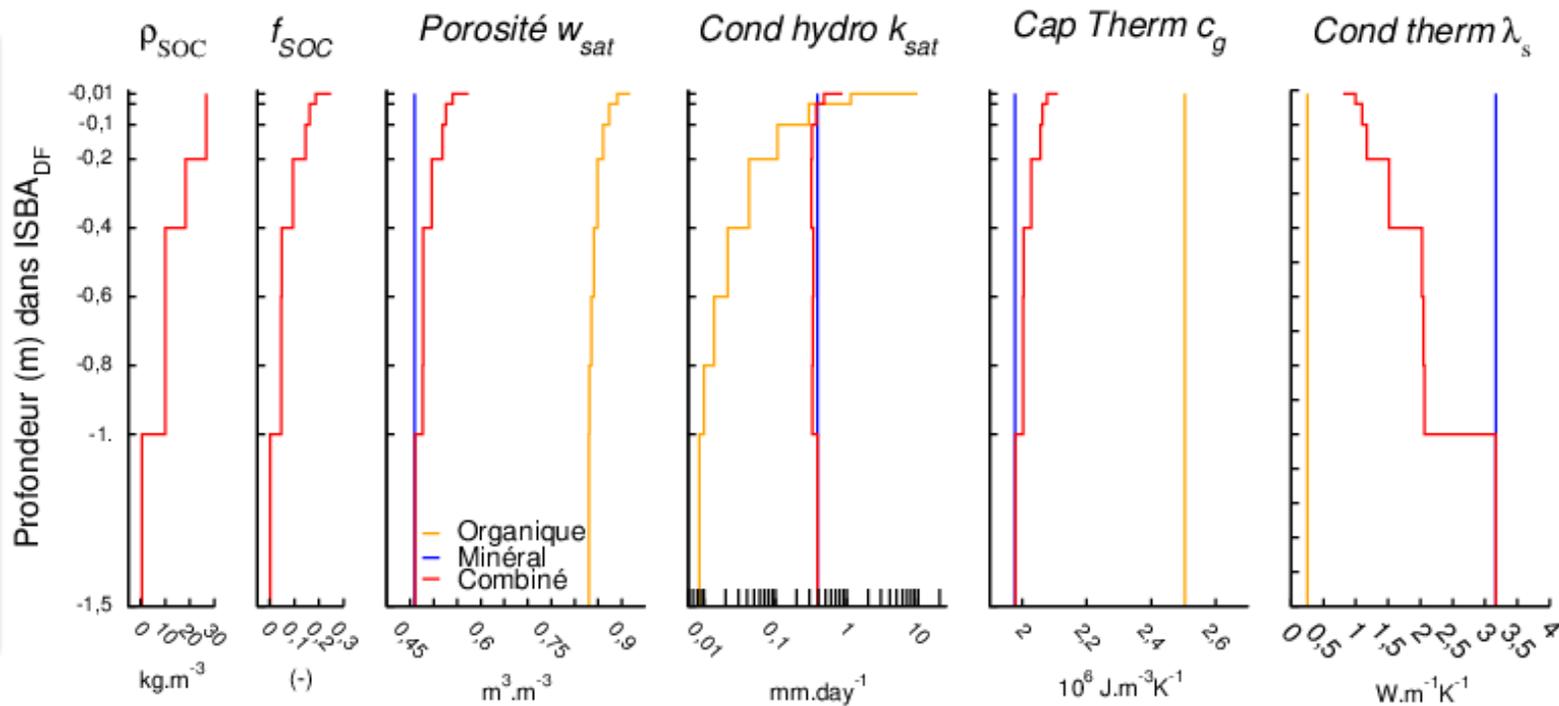
Répartition spatiale du carbone dans les sols (HWSD)



Sol minéral



Sol organique



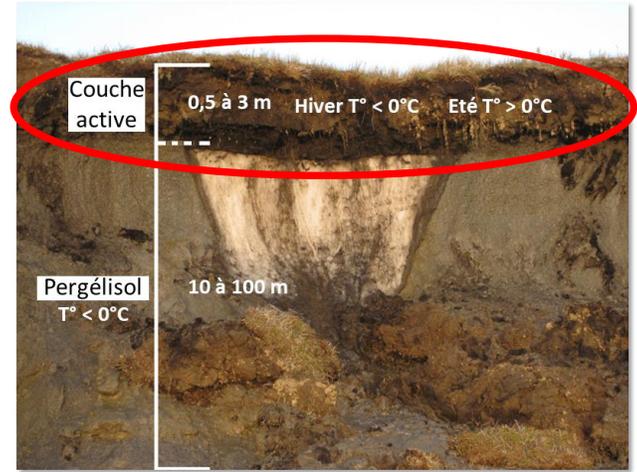
Le continuum neige-sol – Sols organiques vs. Sols minéraux – La couche active du pergélisol

Forçages ERA-I 3-hr
0,5° 1979 - 1993

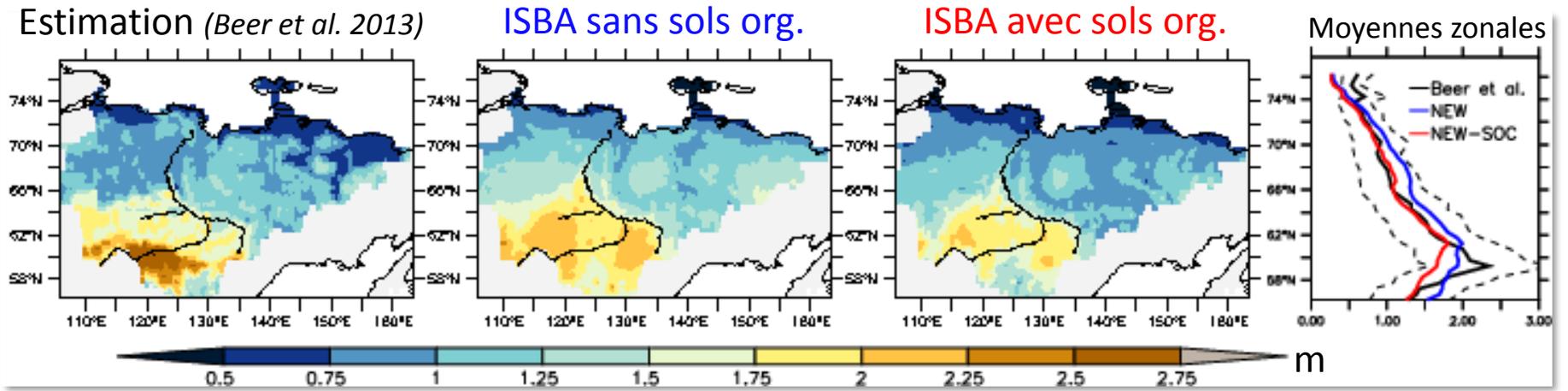
SURFEX
ISBA_{DF}

Profondeur
couche active

Estimations



Estimations et simulation de la couche active du pergélisol en Yakoutie



1) Une nouvelle modélisation hydrologique

- ✓ *Les processus hydrologiques (inondations & aquifères)*
- ✓ *La zone non saturée du sol – ISBA_{DF}*
- ✓ *Le continuum neige-sol*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

2) Cette modélisation à l'échelle globale

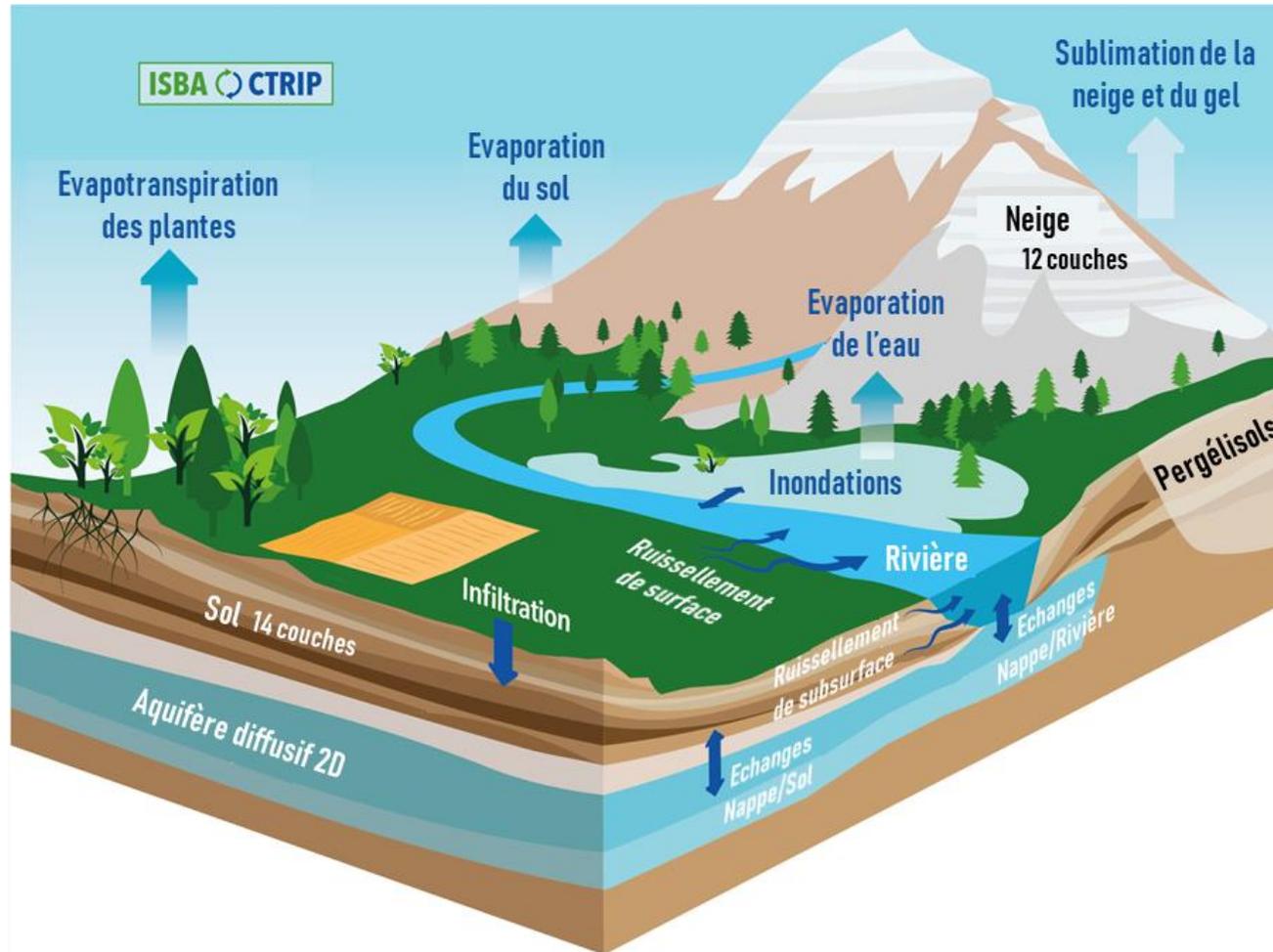
- ✓ *Evaluation*
- ✓ *Est-elle utile dans CNRM-CM6 ?*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

3) Le lien hydrologie – biogéochimie dans les régions boréales

- ✓ *Méthane, Tourbières & Pergélisols*
- ✓ *Dynamique du carbone du sol & des gaz*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

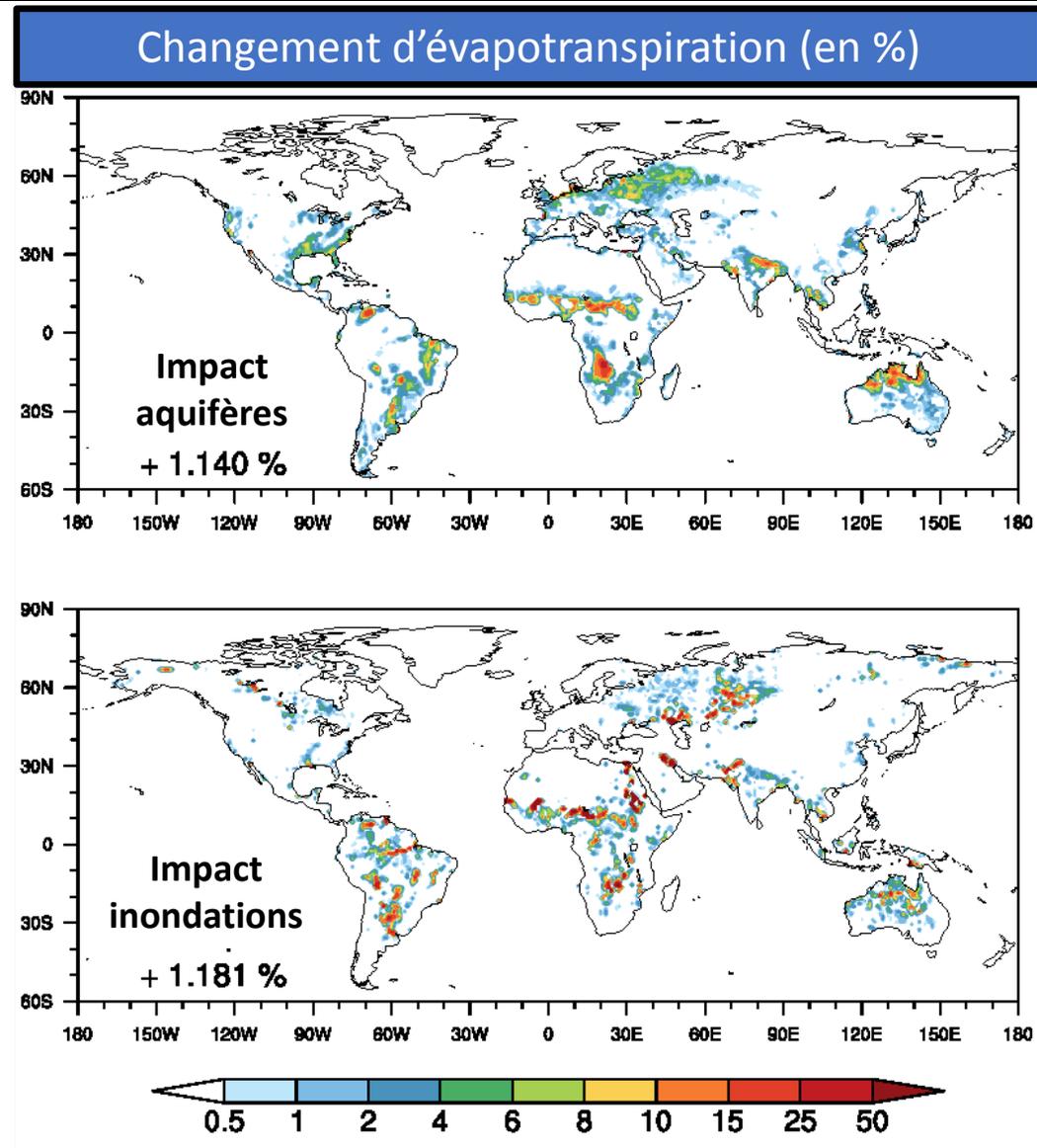
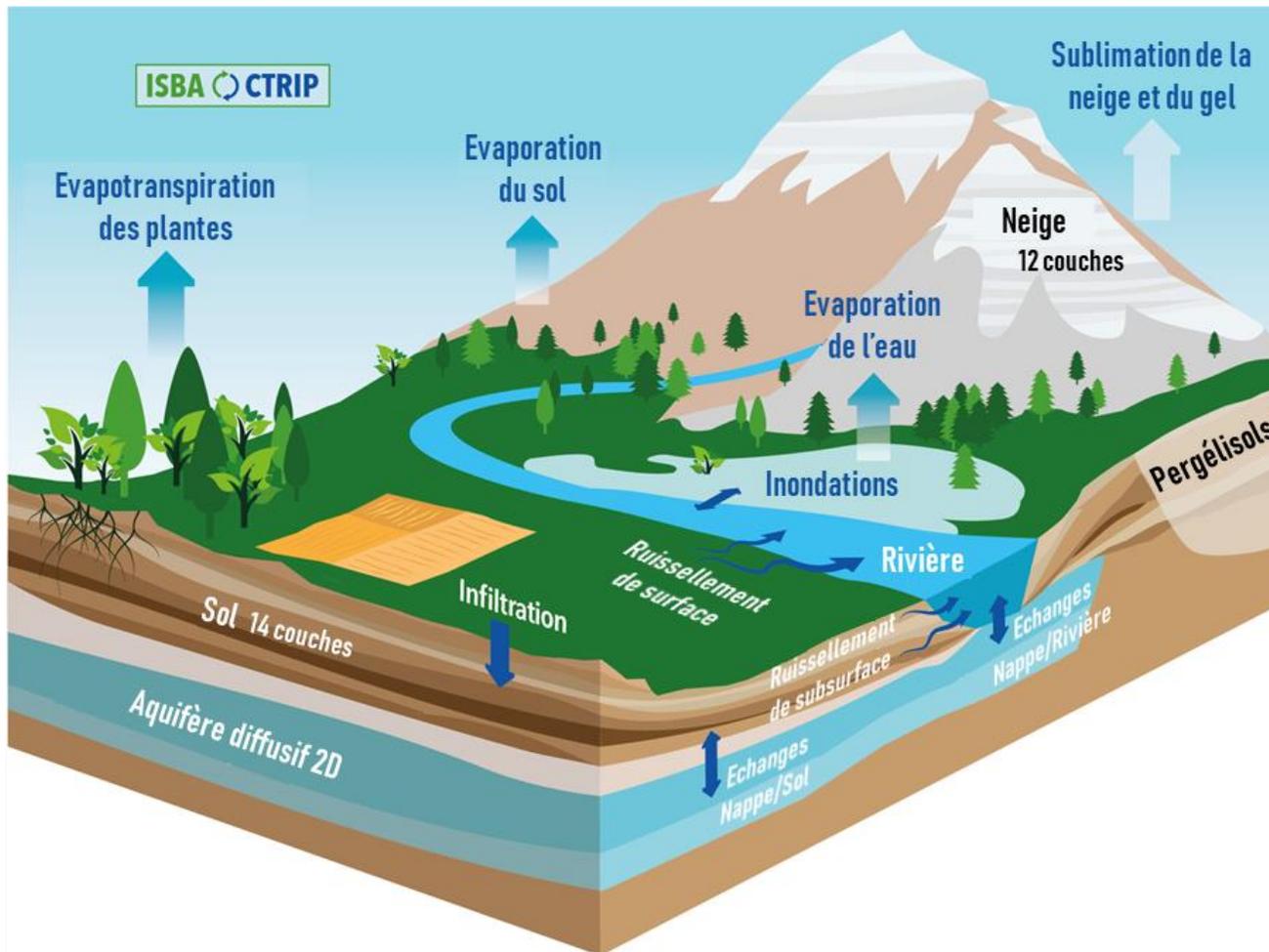
Synthèse générale

Une nouvelle modélisation hydrologique – Synthèse – ISBA-CTRIP



- **ISBA_{DF}** – 14 couches de sol (diffusion énergie et humidité) avec effet de la matière organique sur les propriétés du sol
 - *Boone et al., 2000*
 - *Decharme et al., 2011, 2013 & 2016*
- **Schéma ES** – 12 couche de neige (âge, masse, densité et énergie)
 - *Boone and Etchevers, 2001*
 - *Decharme et al., 2016*
- **CTRIP** – Réseau à 0,5° avec une vitesse d'écoulement variable
 - *Decharme et al., 2010*
- **Couplage explicite « aller-retour »** (1h) entre ISBA et CTRIP via une interface standardisée dans SURFEX utilisant OASIS-MCT
 - *Voldoire et al. 2017*
- **Dynamique des inondations saisonnières** permettant l'évaporation et la ré-infiltration dans le sol des eaux de crue
 - *Decharme et al., 2008 & 2012*
- **Aquifère non confinés**, schéma diffusif 2D permettant des échanges avec les rivières et le sol superficiel
 - *Vergnes et al., 2012 & 2014*
 - *Vergnes and Decharme, 2012*

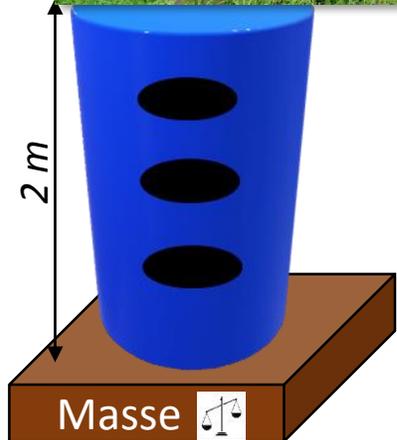
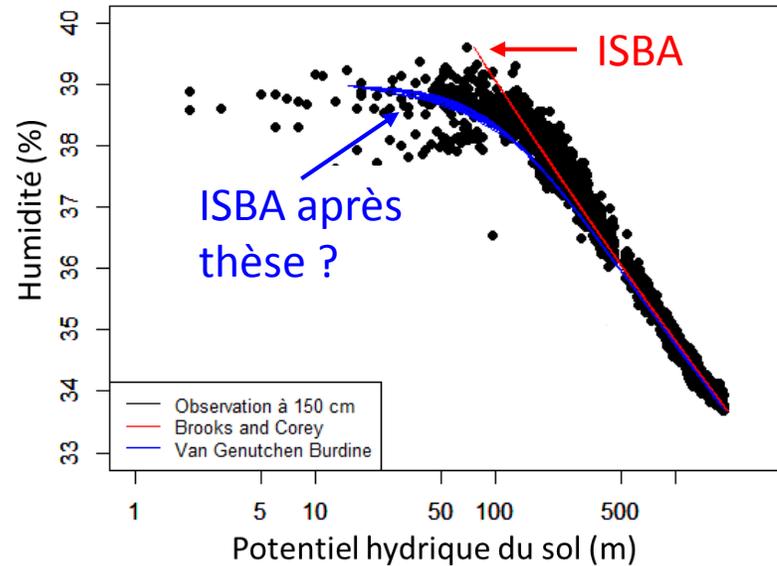
Une nouvelle modélisation hydrologique – Synthèse – ISBA-CTRIP



« Amélioration de l'estimation des écoulements lors des précipitations extrêmes : focus sur l'infiltration via l'analyse de données lysimétriques »



GISFI, Homécourt (LIEC)



- 5 lysimètres
- Herbe – trèfle – Raygrass – Nu
- Infiltration – Masse – teneur en eau – pression – Température
- fréquence horaire

1) Améliorer notre compréhension des transferts d'eau dans les sols suite aux précipitations extrêmes

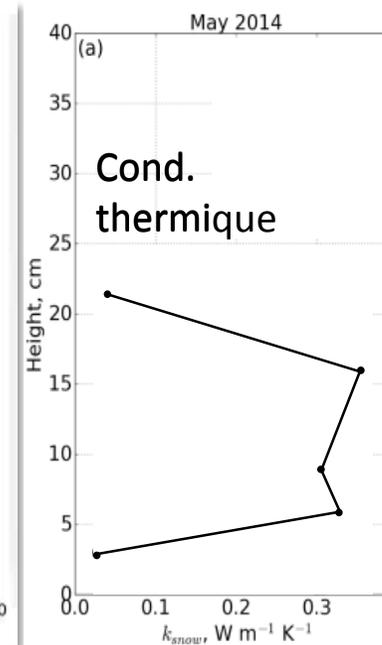
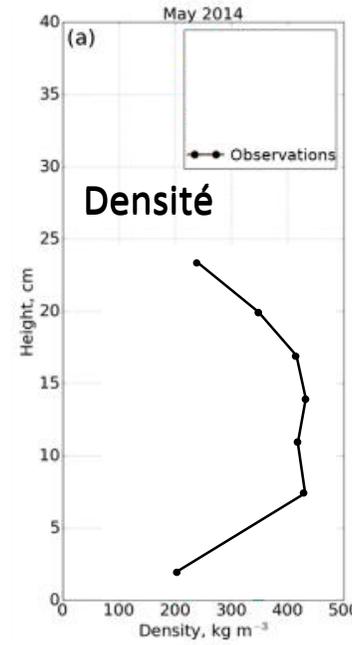
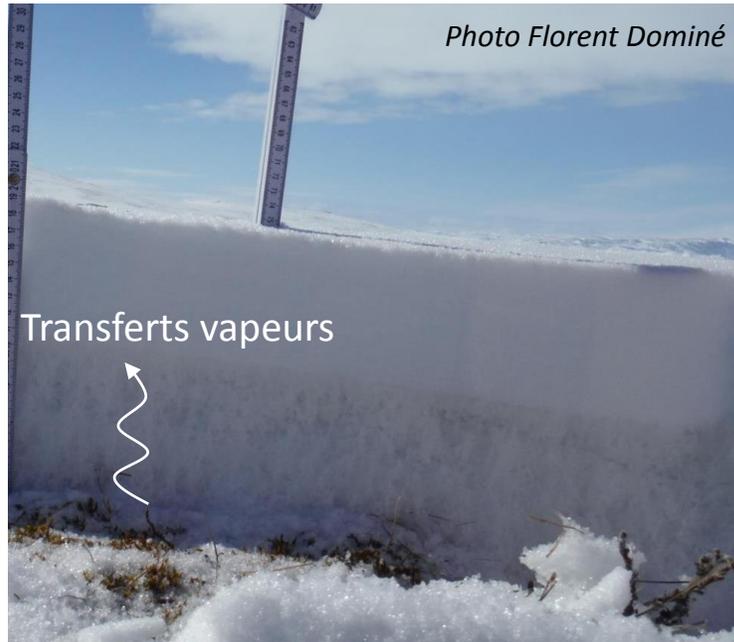
2) Améliorer la simulation de la dynamique de l'eau du sol dans ISBA_{DF}

3) Applications sociétales :

- ✓ Identifier les occupations du sol les plus résilientes à la fois aux inondations et aux sécheresses
- ✓ La prévision des crues rapides
- ✓ Le suivi de l'eau du sol via SIM
- ✓ Le suivi des eaux souterraines via AQUI-FR

Perspectives – Le continuum neige-sol

Profils verticaux de densité et de conductivité thermique de la neige mesurés à l'île Bylot (Canada)

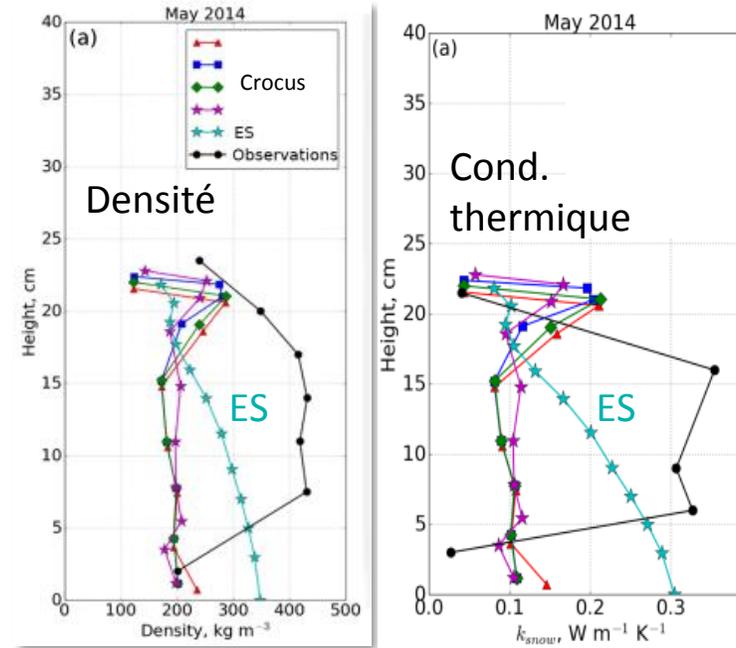
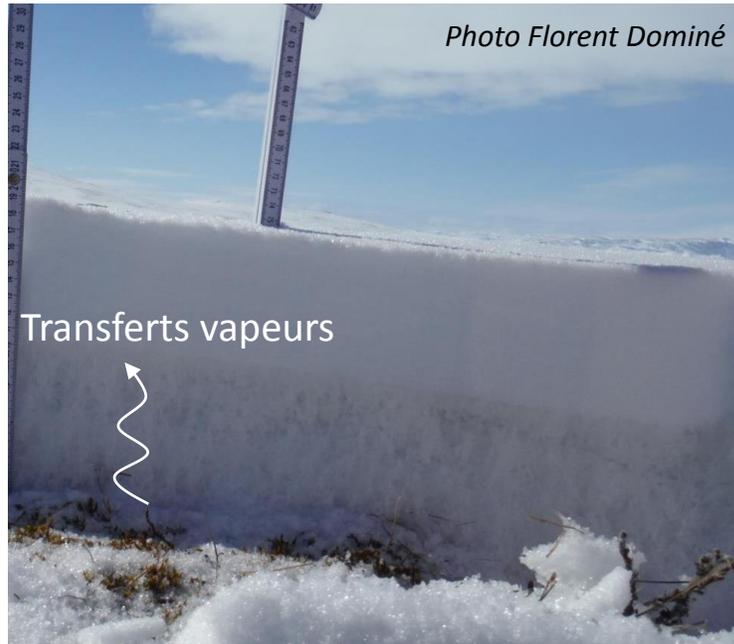


Neige Arctique

- ✓ Forts gradients thermiques
- ✓ Densité faible à la base du manteau
- ✓ Isolation thermique sol importante

Perspectives – Le continuum neige-sol

Profils verticaux de densité et de conductivité thermique de la neige mesurés à l'île Bylot (Canada) et simulés par Crocus et ISBA-ES



Neige Arctique

- ✓ Forts gradients thermiques
- ✓ Densité faible à la base du manteau
- ✓ Isolation thermique sol importante

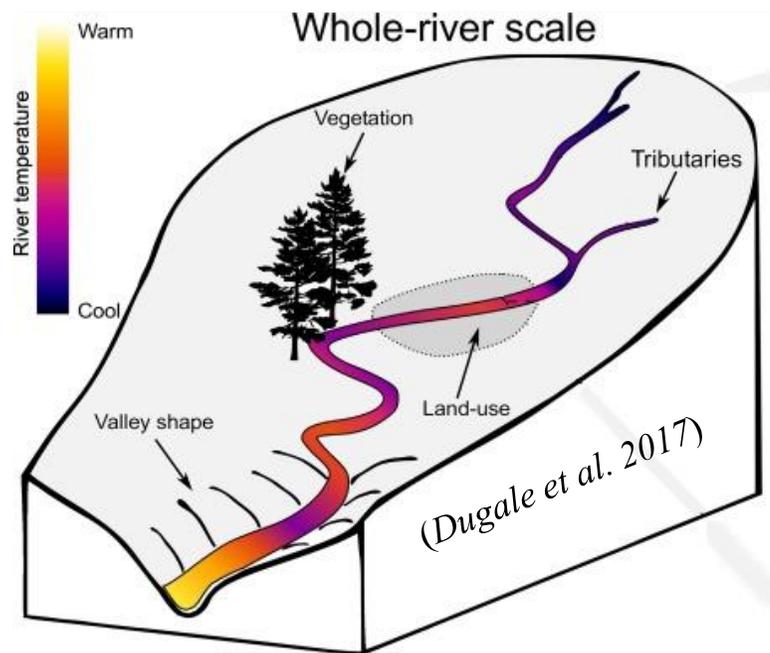
Schéma ES & autres (neige alpine)

- ✓ Densité trop forte
- ✓ Isolation thermique trop faible
- ✓ Pergélisol trop froid ?

Sous-estimation du dégel du pergélisol dans les scénarios du GIEC ?

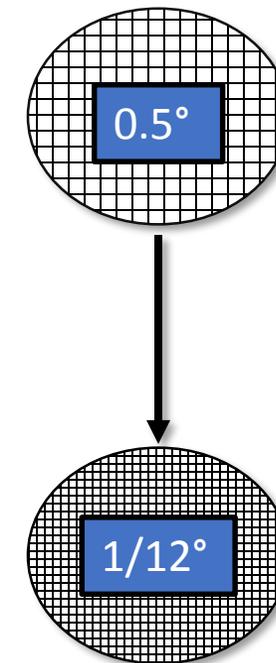
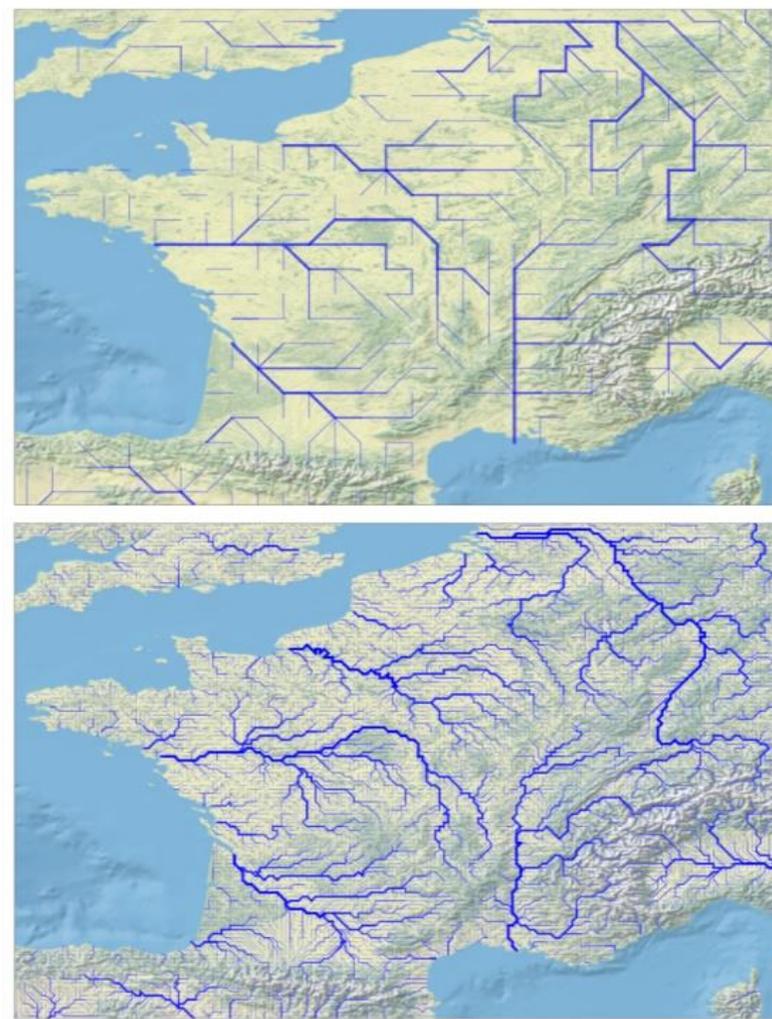
Perspectives – Le système ISBA-CTRIP

Modélisation de la température de l'eau



- Qualité de l'eau
- Ecosystème
- Flux de carbone
- Couplage avec l'océan

Vers une plus haute résolution (Stage M1 M. Lessafre 2019)



+ Barrages
+ Lacs

1) Une nouvelle modélisation hydrologique

- ✓ *La zone non saturée du sol – ISBA_{DF}*
- ✓ *Le continuum neige-sol*
- ✓ *Les processus hydrologiques (inondations & aquifères)*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

2) Cette modélisation à l'échelle globale

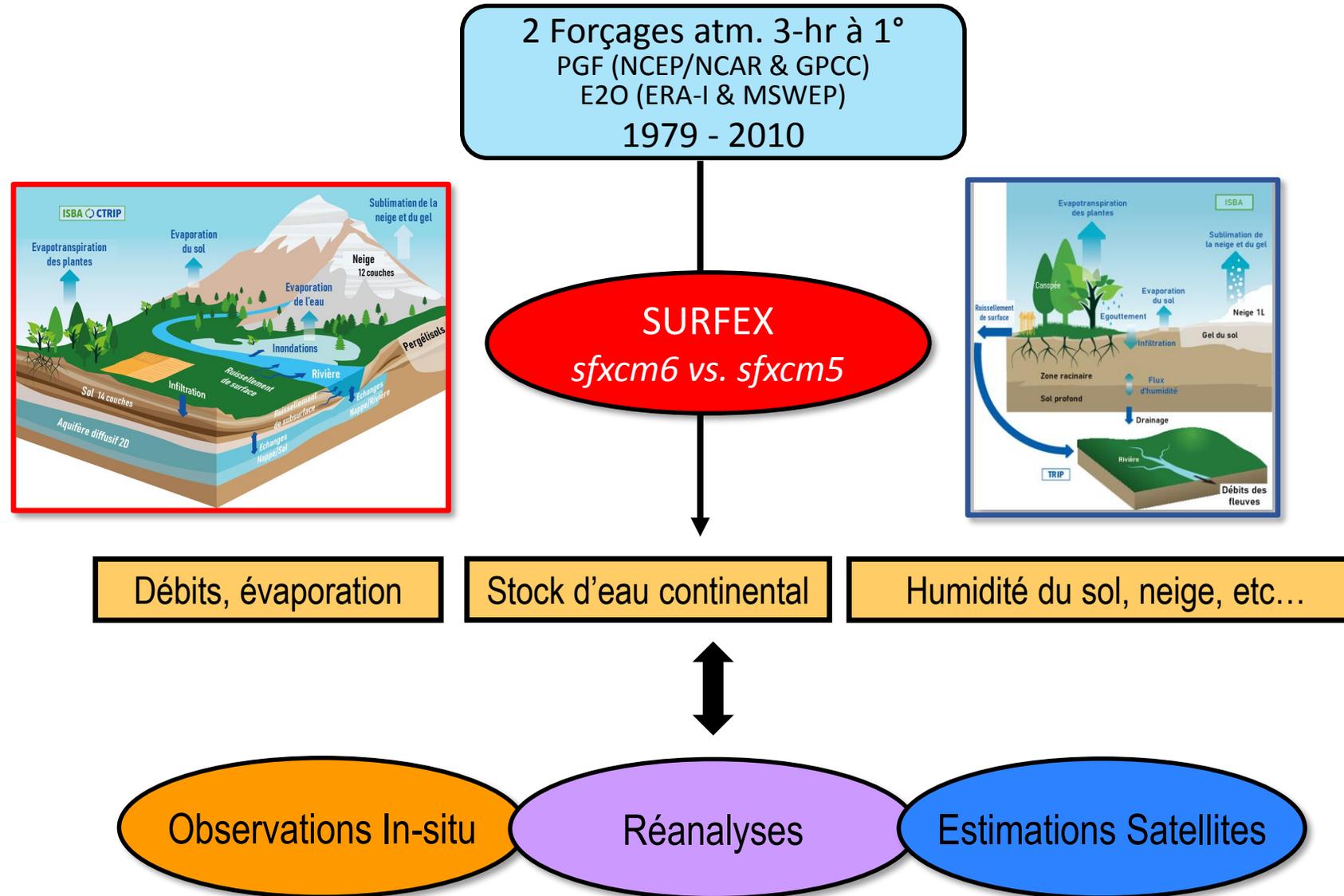
- ✓ *Evaluation*
- ✓ *Est-elle utile dans CNRM-CM6 ?*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

3) Le lien hydrologie – biogéochimie dans les régions boréales

- ✓ *Méthane, Tourbières & Pergélisols*
- ✓ *Dynamique du carbone du sol & des gaz*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

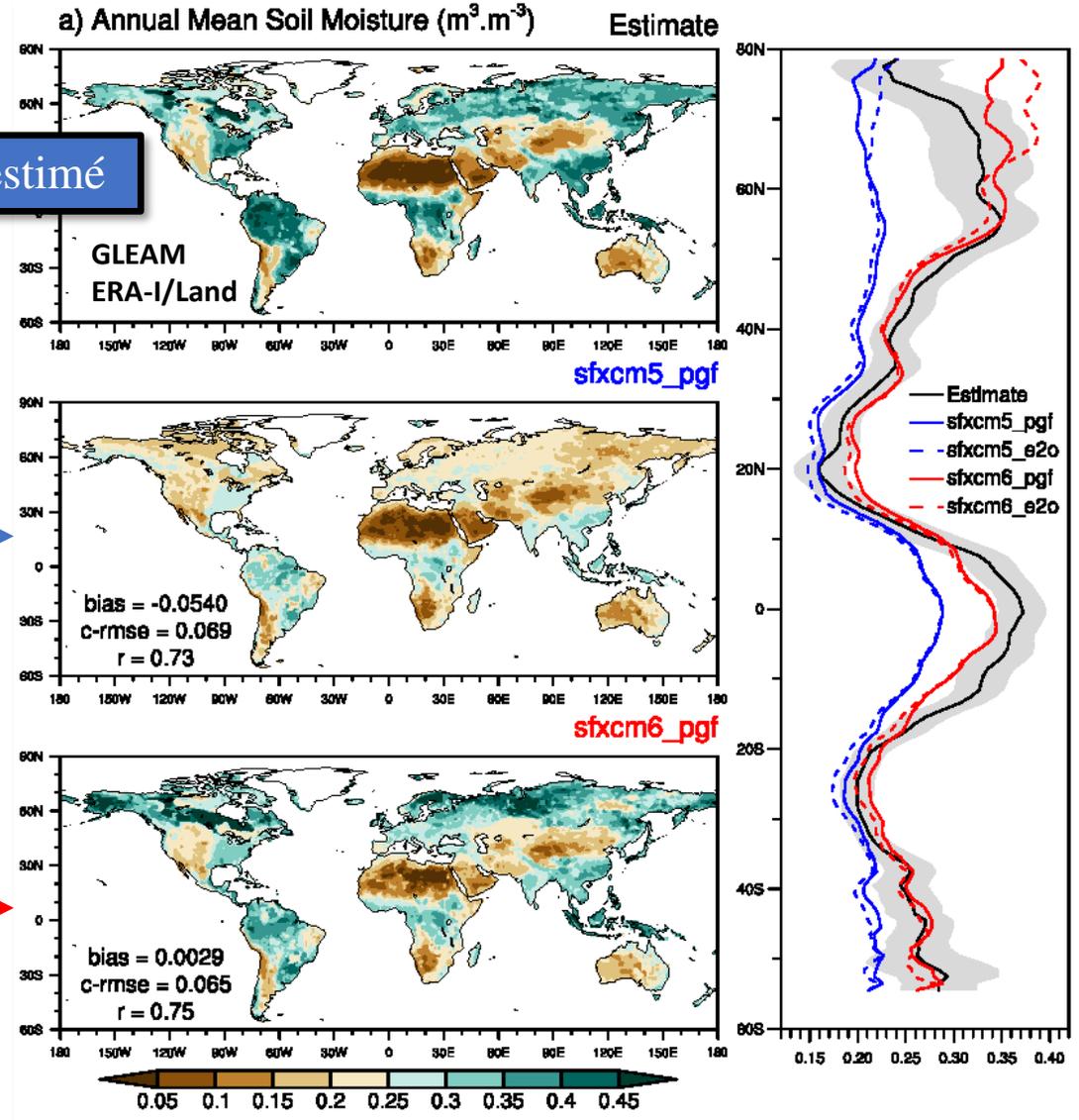
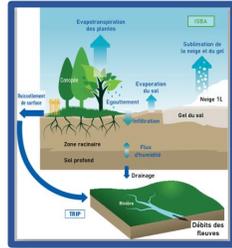
Synthèse générale

ISBA-CTRIP – Protocole d'évaluation – Postdoctorat Marie Minvielle (2014 – 2016)



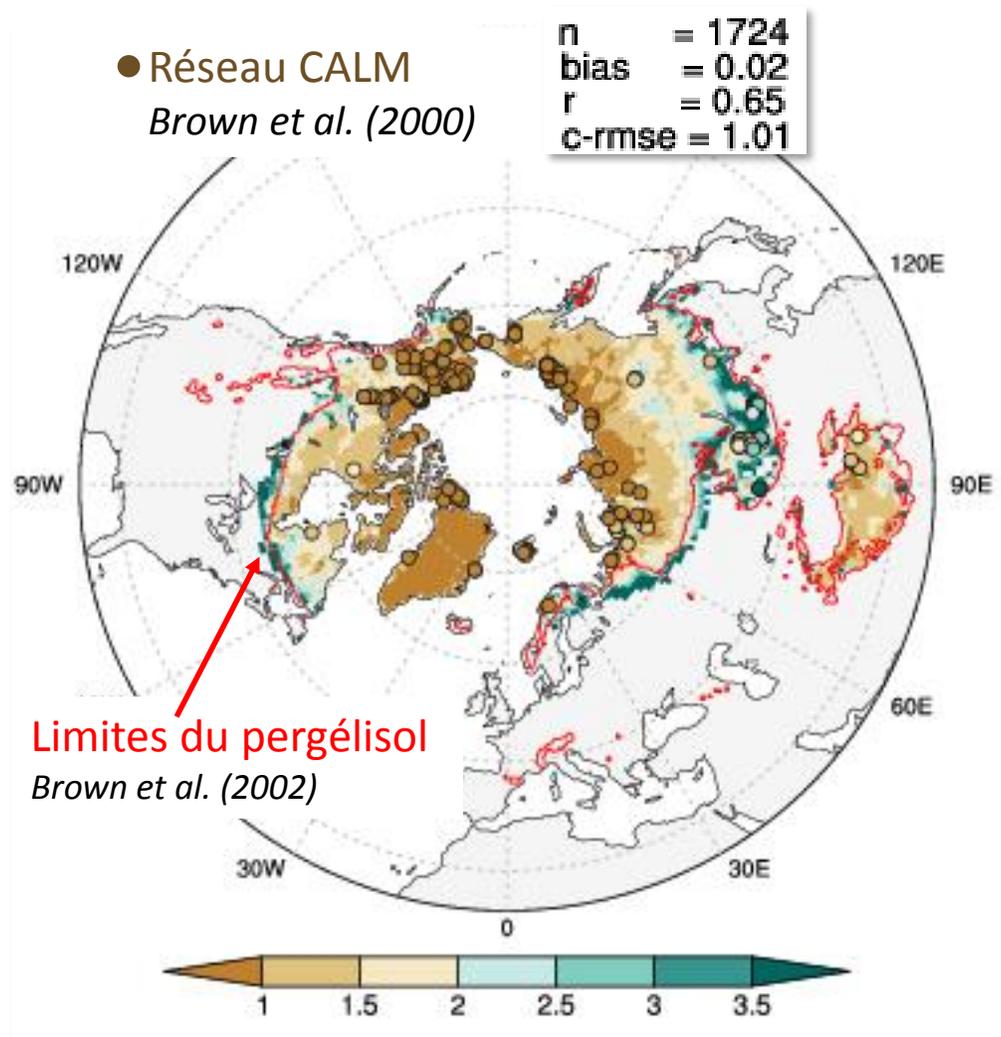
ISBA-CTRIP – Evaluation à l'échelle globale – Humidité du sol

Taux d'humidité du sol estimé



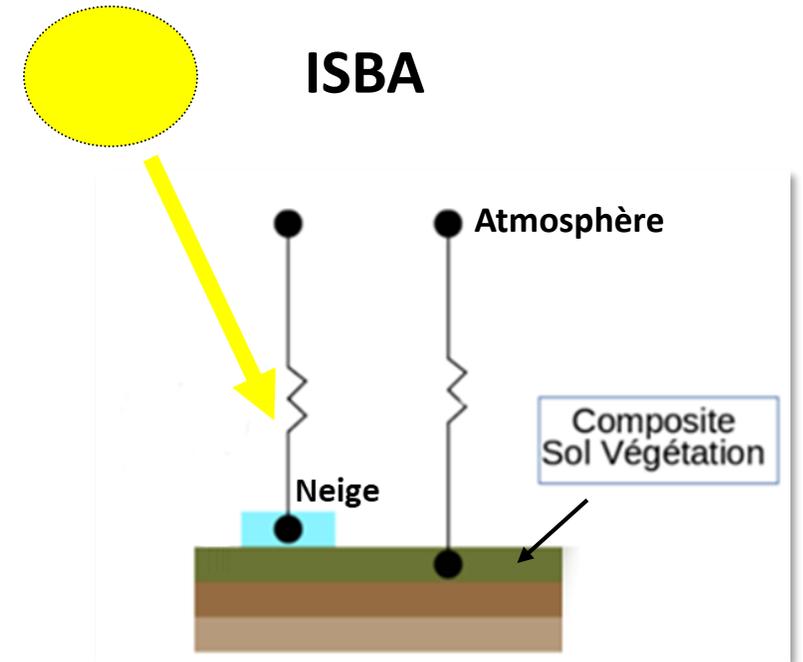
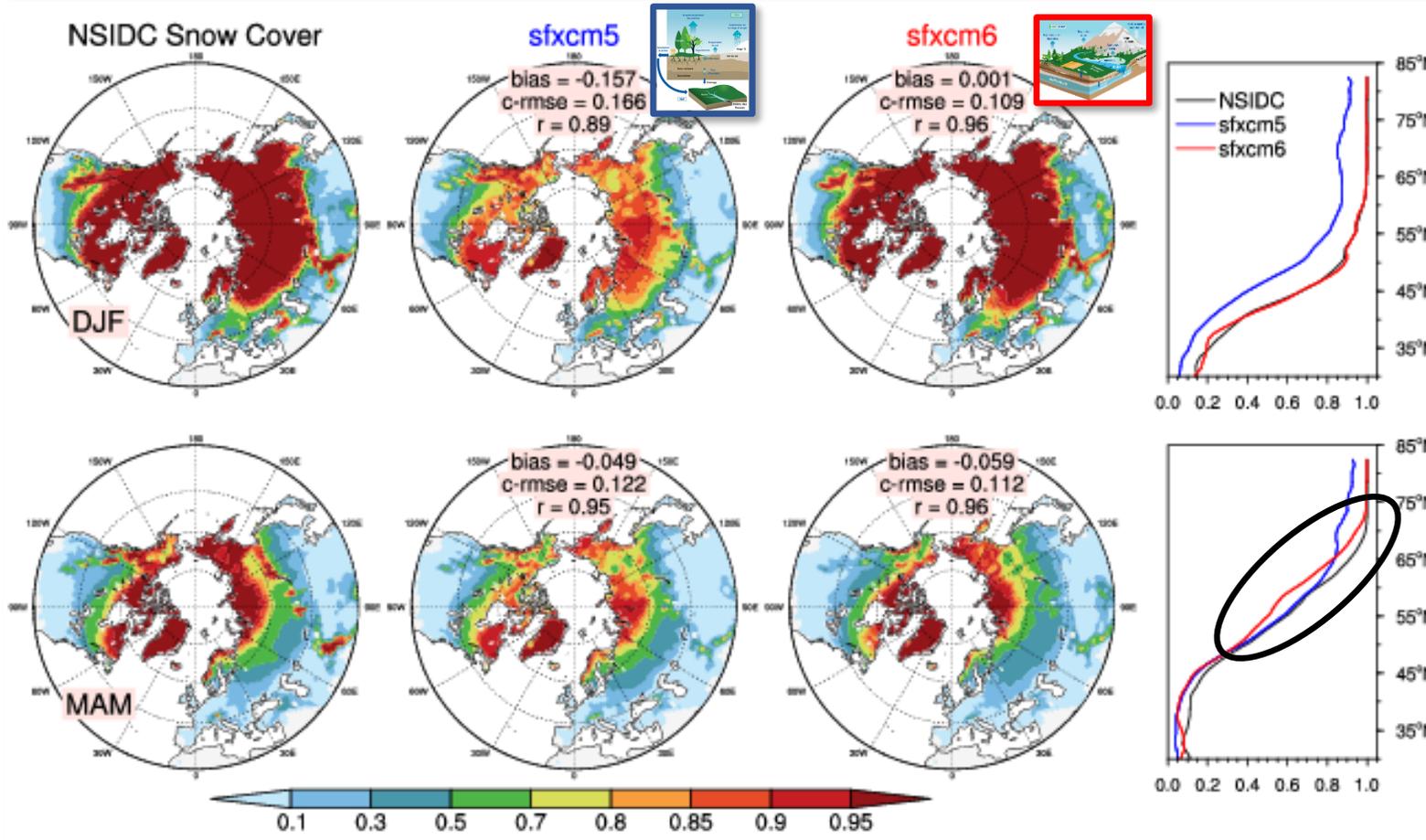
ISBA-CTrip – Evaluation à l'échelle globale – Pergélisol

Estimation et simulation de la limite du pergélisol & de sa couche active sur la période 1990-2010



ISBA-CTRIP – Evaluation à l'échelle globale – Couverture de neige

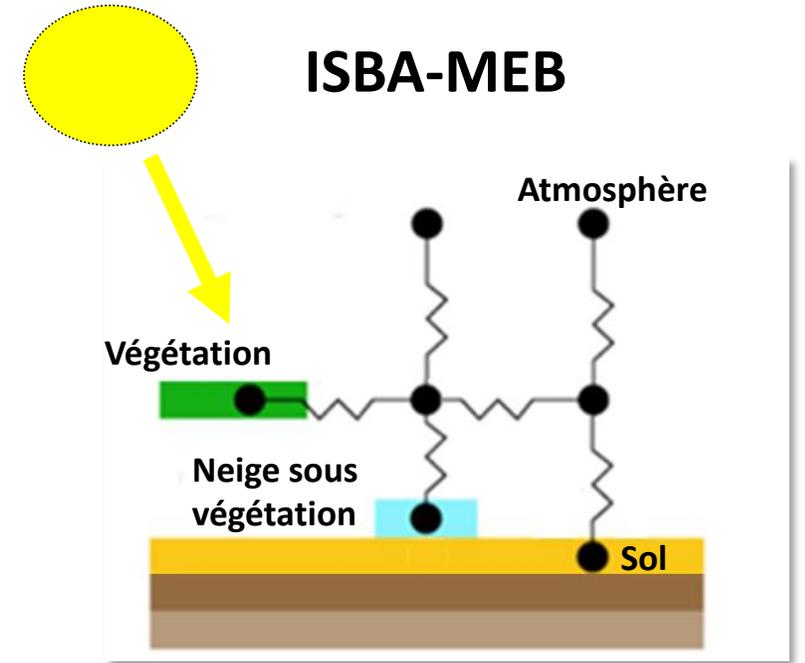
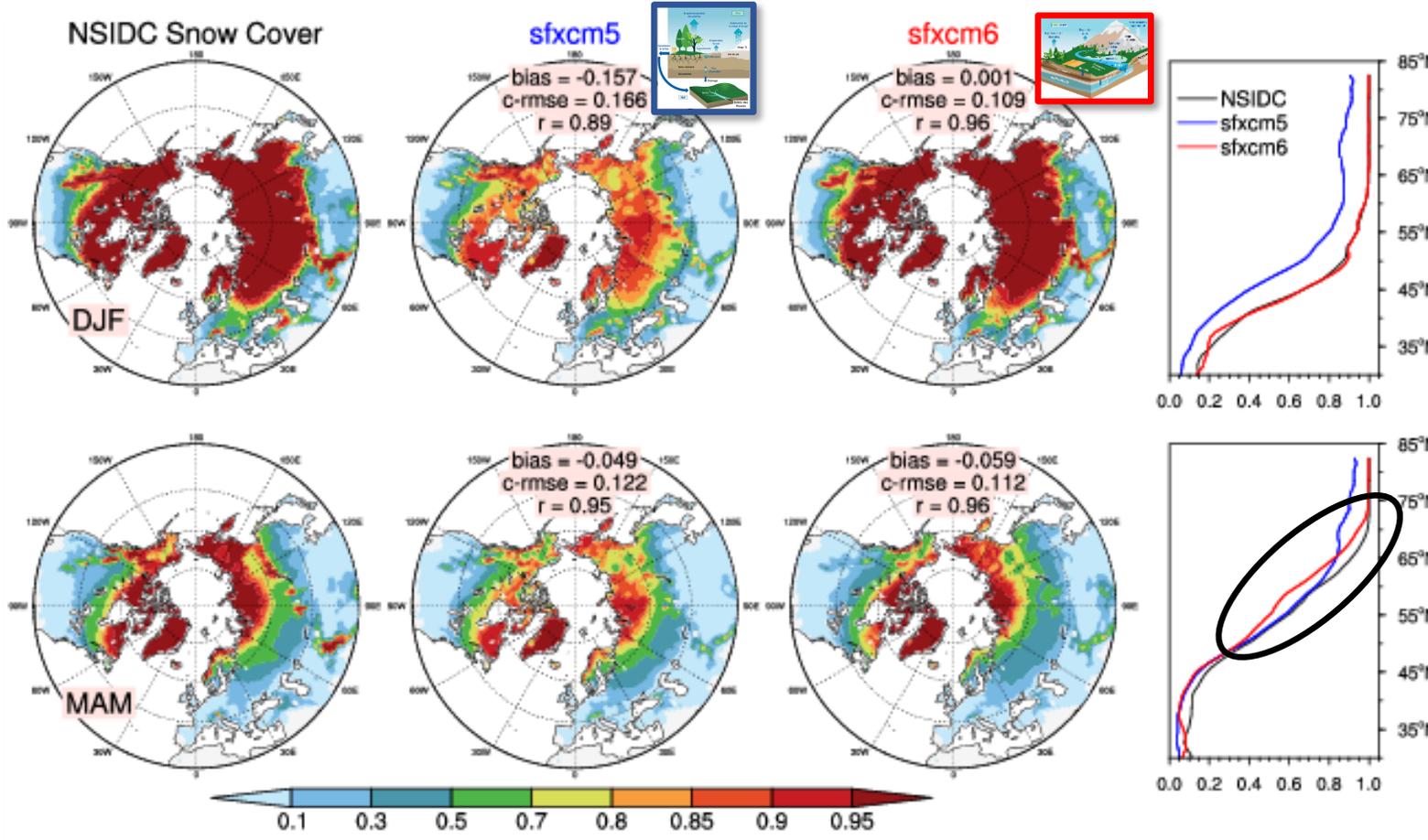
Couverture de neige simulée en **hiver** (DJF) & au **printemps** (MAM) comparée aux estimations satellites du NSIDC (*Brodzik & Armstrong, 2013*) – Climatologie 1979-2010



➤ Fonte trop précoce du manteau neigeux au niveau de la forêt boréale

ISBA-CTrip – Evaluation à l'échelle globale – Couverture de neige

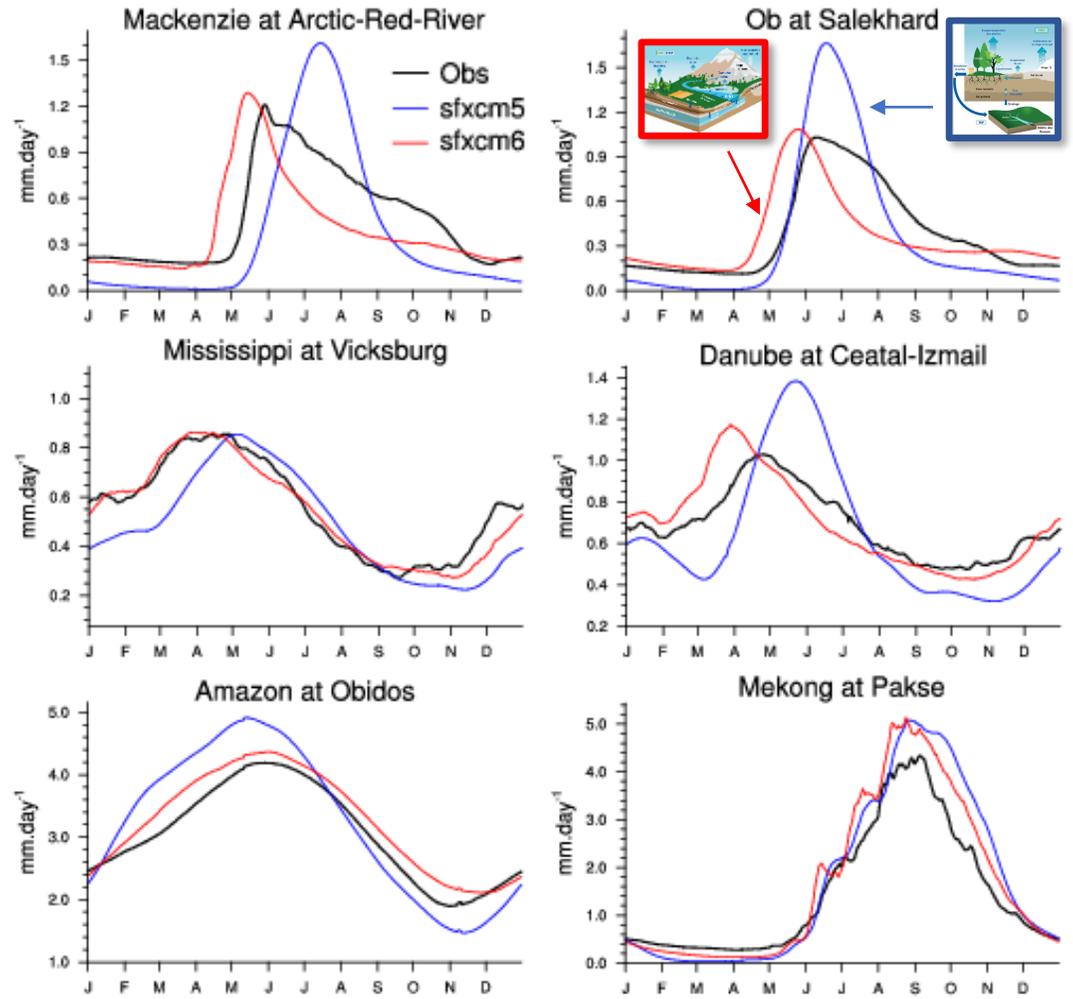
Couverture de neige simulée en hiver (DJF) & au printemps (MAM) comparée aux estimations satellites du NSIDC (Brodzik & Armstrong, 2013) – Climatologie 1979-2010



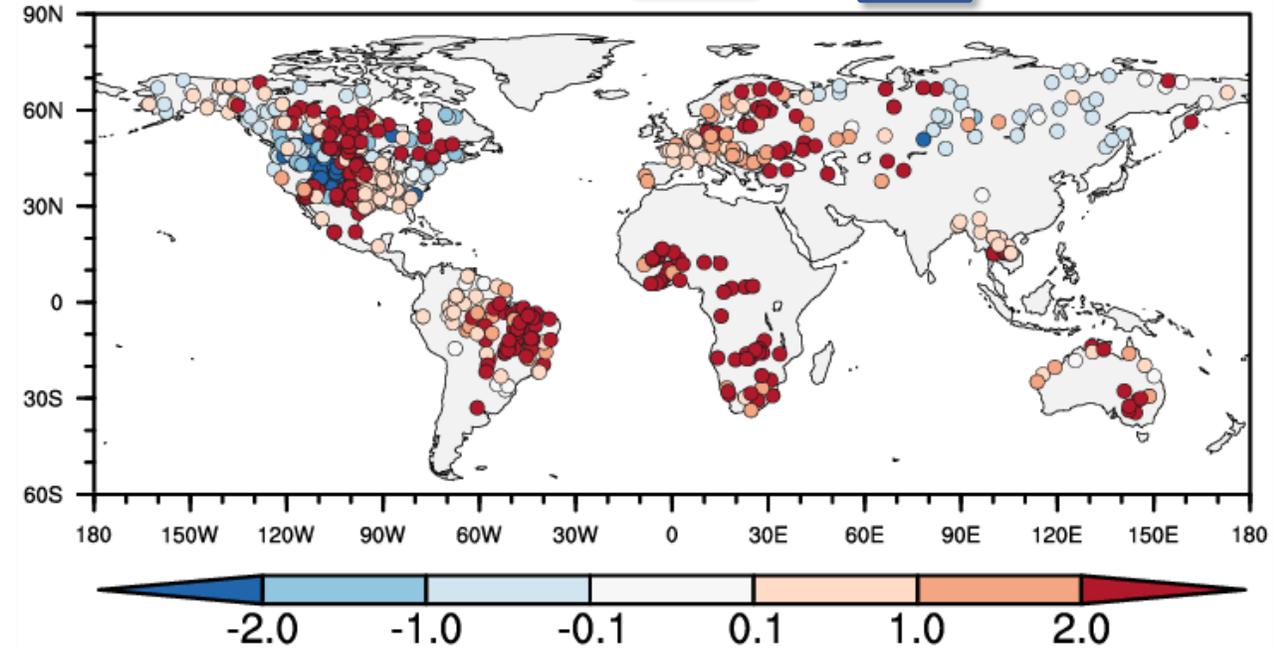
➤ Fonte trop précoce du manteau neigeux au niveau de la forêt boréale

ISBA-CTrip – Evaluation à l'échelle globale – Débits

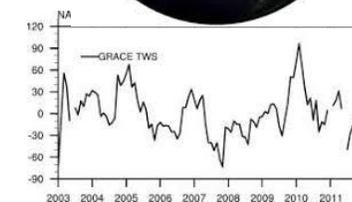
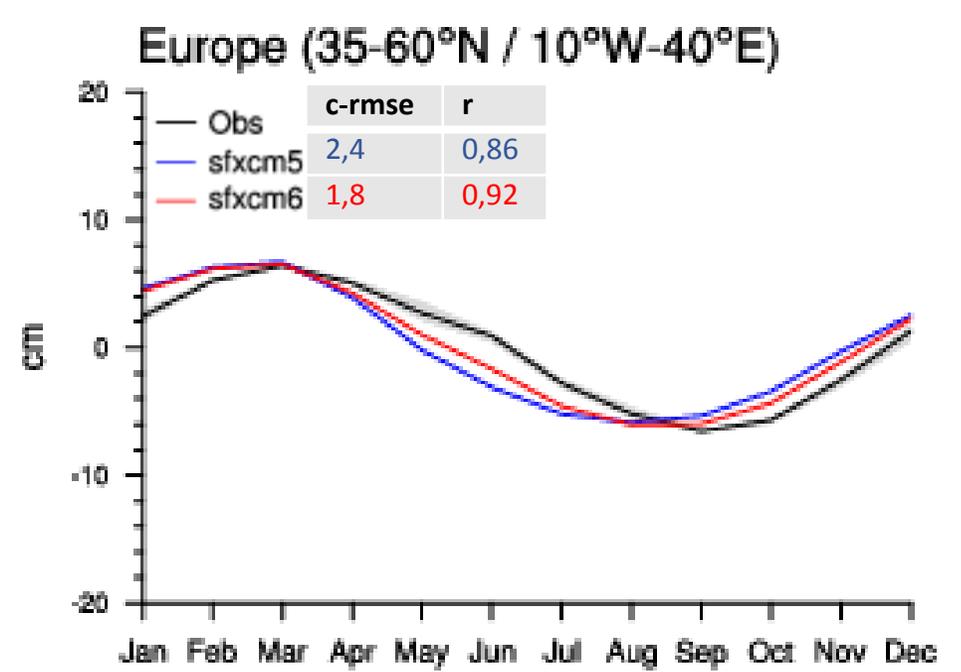
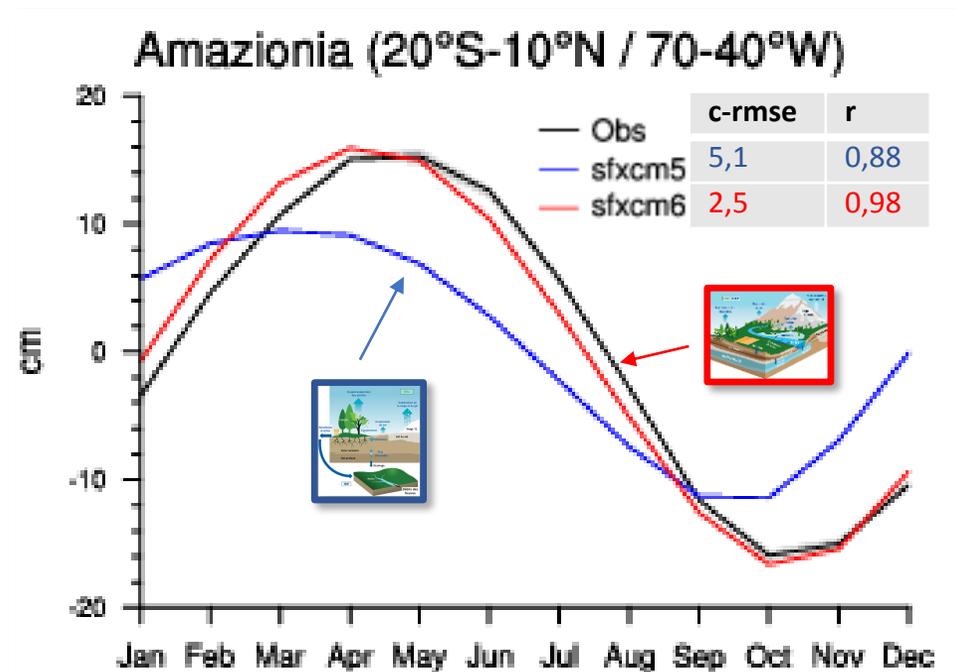
Comparaison des débits observés et simulés à 698 stations sélectionnées sur la période 1979-2010 (seulement grand bassins)



Différence d'efficacités



Cycles saisonniers climatologiques des variations estimées et simulées des stocks d'eau continentaux (2002 – 2010)



ISBA-CTrip =
neige + végétation
+
Humidité du sol
+
Plaines inondées
+
Eaux souterraines

1) Une nouvelle modélisation hydrologique

- ✓ *La zone non saturée du sol – ISBA_{DF}*
- ✓ *Le continuum neige-sol*
- ✓ *Les processus hydrologiques (inondations & aquifères)*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

2) Cette modélisation à l'échelle globale

- ✓ *Evaluation*
- ✓ *Est-elle utile dans CNRM-CM6 ?*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

3) Le lien hydrologie – biogéochimie dans les régions boréales

- ✓ *Méthane, Tourbières & Pergélisols*
- ✓ *Dynamique du carbone du sol & des gaz*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

Synthèse générale

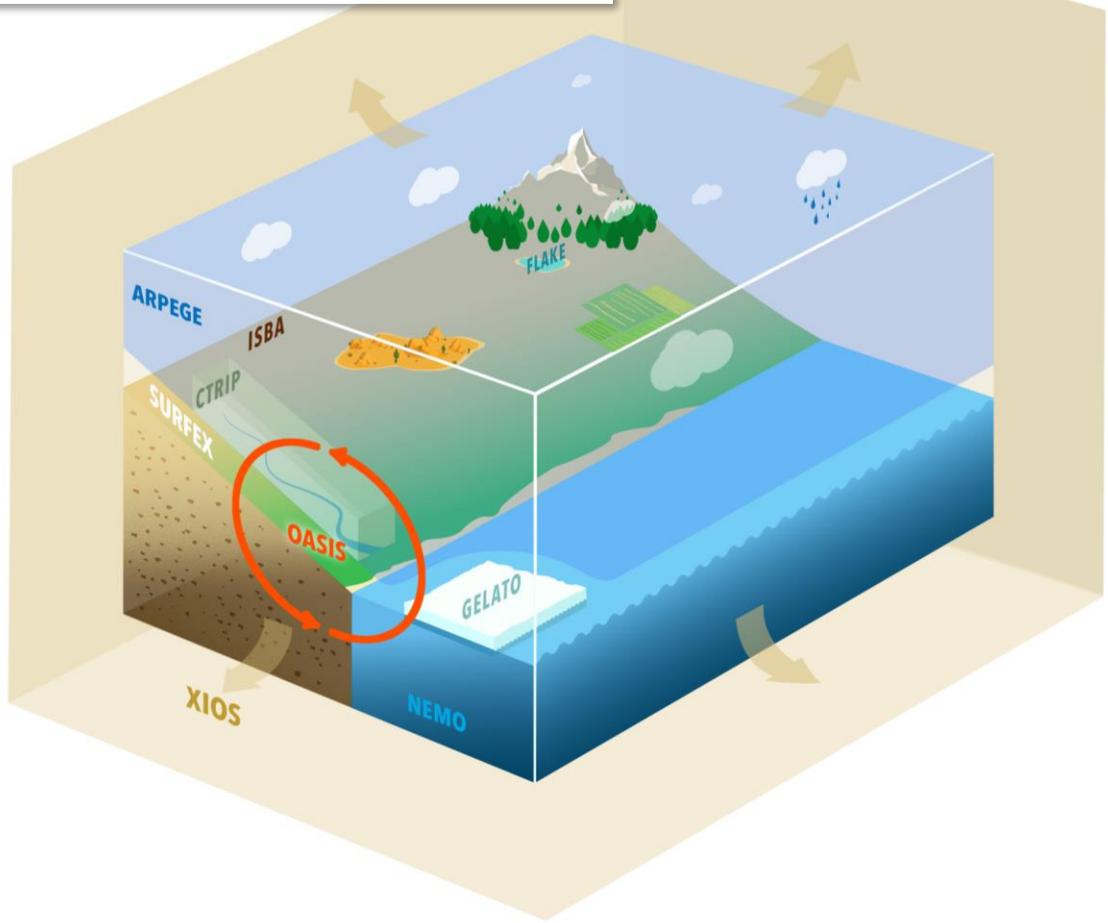
ISBA-CTRIP est-il utile dans CNRM-CM6 ? – Hydrologie continentale

CNRM-CM6

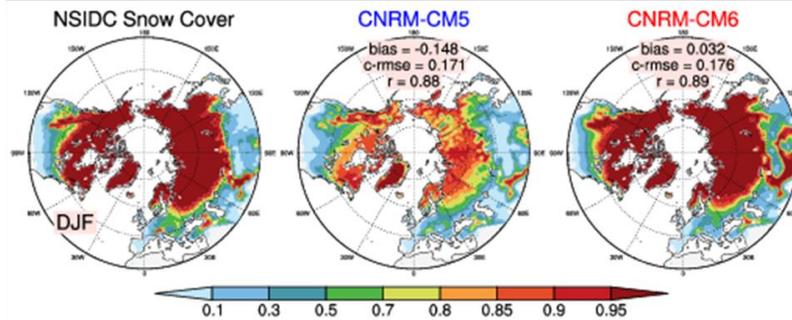
ARPEGEv6-SURFEXv8 = T127 (~1,4°)

NEMO-GELATO = 1° ou 0,25°

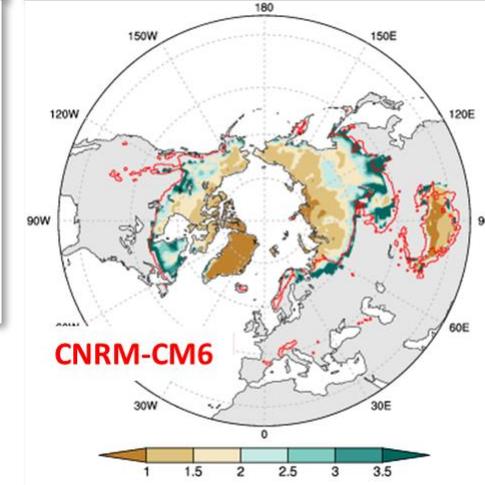
CTRIP = 0,5°



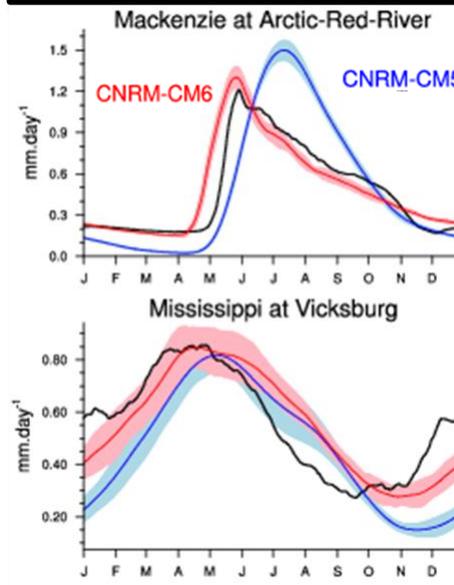
Couverture de neige DJF



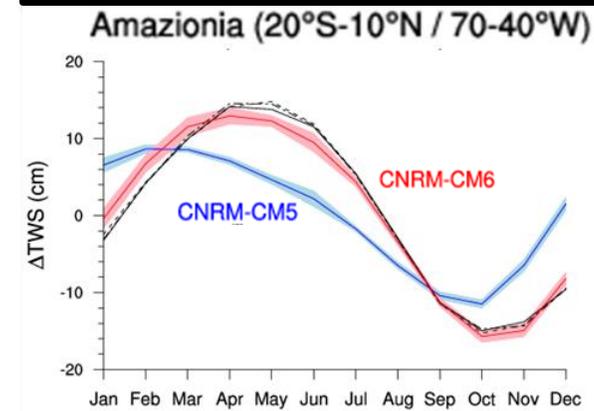
Limites du Pergélisol



Débits



Stock d'eau continentaux

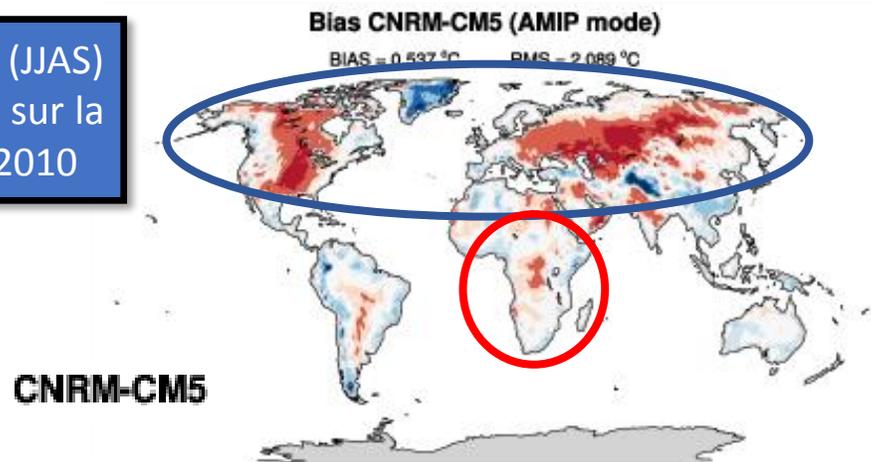


ISBA-CTIP est-il utile dans CNRM-CM6 ? – Température de l'air – Biais JJAS

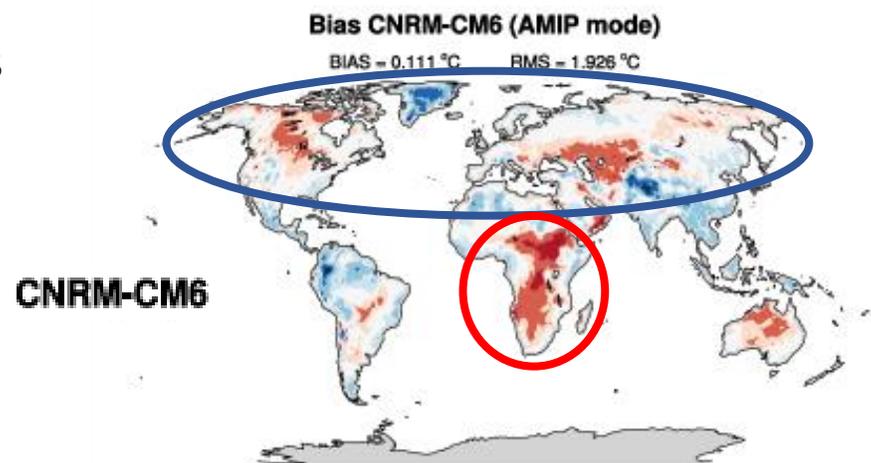
Biais estivaux (JJAS)
de la Tair à 2m sur la
période 1981-2010

Observations :

- ✓ BEST
- ✓ CRU-TS4
- ✓ GHCN-CAMS



CNRM-CM5

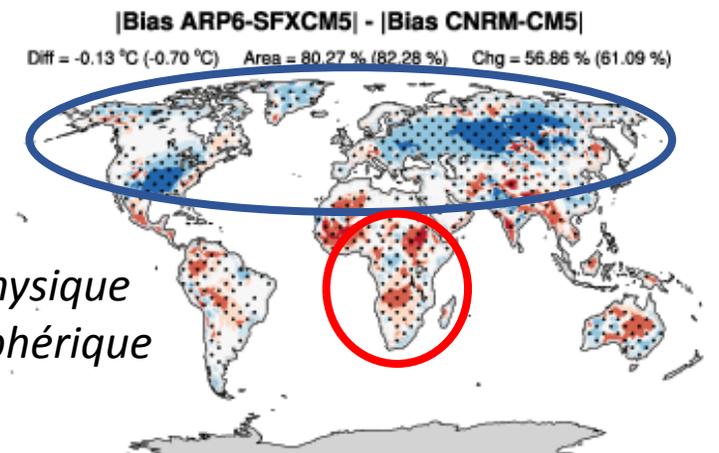


CNRM-CM6

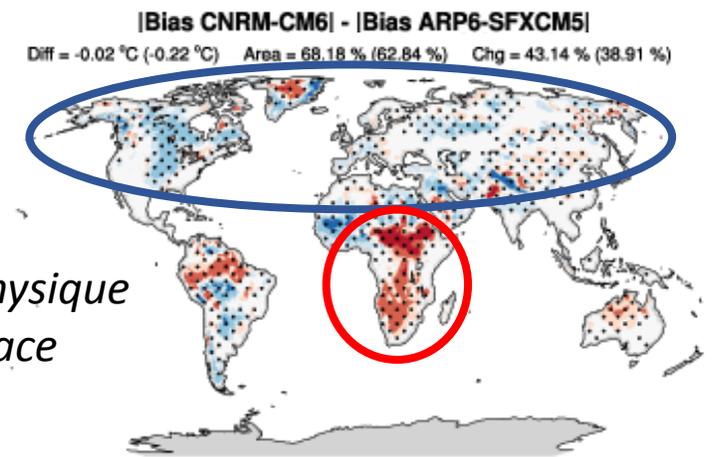


Différence de la valeur
absolue des Biais

- Biais réduits
- Biais amplifiés



*Effet physique
atmosphérique*



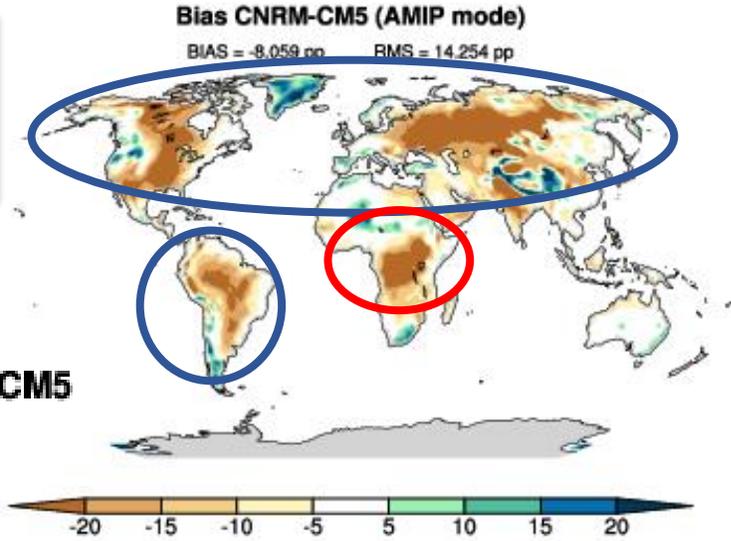
*Effet physique
de surface*



ISBA-CTIP est-il utile dans CNRM-CM6 ? – Humidité relative de l'air – Biais JJAS

Biais estivaux (JJAS)
de HuR à 2m sur la
période 1981-2010

CNRM-CM5



Observations :

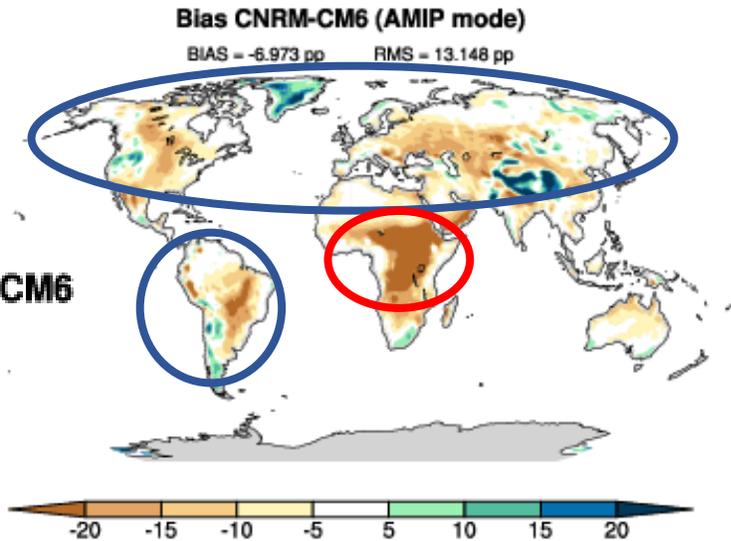
✓ CRU-TS4

Réanalyses :

✓ ERA-I

✓ NCEP/NCAR

CNRM-CM6



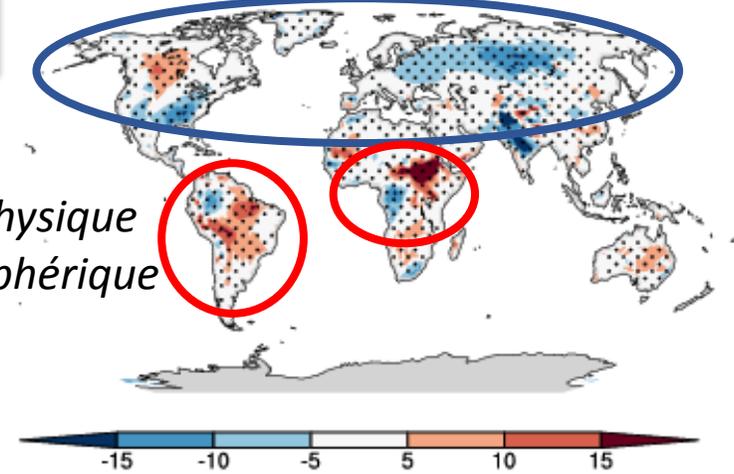
Différence de la valeur
absolue des Biais

○ Biais réduits
○ Biais amplifiés

|Bias ARP6-SFXCM5| - |Bias CNRM-CM5|

Diff = 0.00 pp (-1.96 pp) Area = 74.34 % (78.37 %) Chg = 52.77 % (47.14 %)

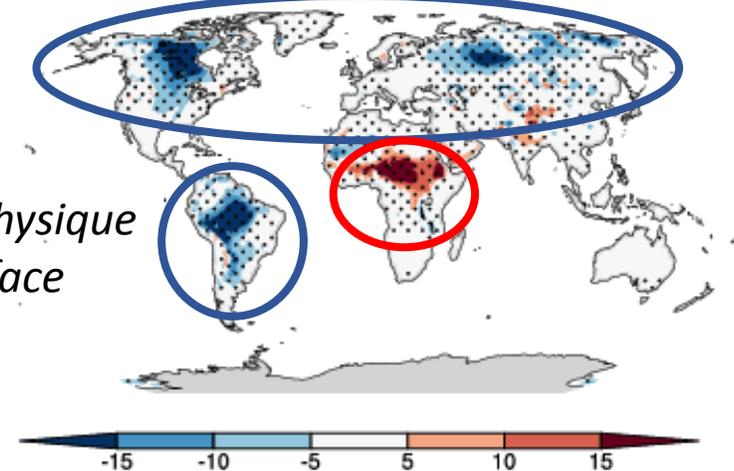
*Effet physique
atmosphérique*



|Bias CNRM-CM6| - |Bias ARP6-SFXCM5|

Diff = -1.59 pp (-3.54 pp) Area = 66.40 % (80.56 %) Chg = 47.23 % (52.86 %)

*Effet physique
de surface*



1) Une nouvelle modélisation hydrologique

- ✓ *La zone non saturée du sol – ISBA_{DF}*
- ✓ *Le continuum neige-sol*
- ✓ *Les processus hydrologiques (inondations & aquifères)*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

2) Cette modélisation à l'échelle globale

- ✓ *Evaluation*
- ✓ *Est-elle utile dans CNRM-CM6 ?*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

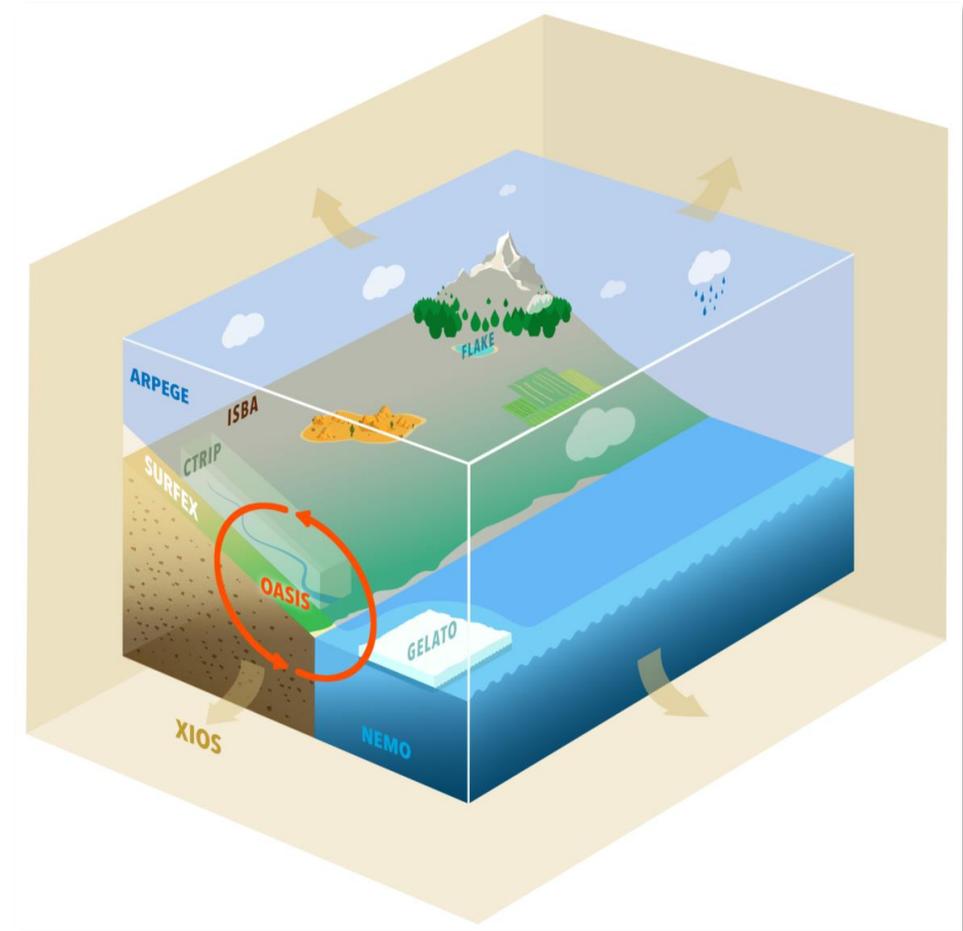
3) Le lien hydrologie – biogéochimie dans les régions boréales

- ✓ *Méthane, Tourbières & Pergélisols*
- ✓ *Dynamique du carbone du sol & des gaz*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

Synthèse générale

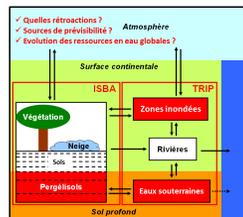
ISBA-CTrip à l'échelle globale – Synthèse

- Une modélisation hydrologique globale à « l'état de l'art » :
 - *Humidité du sol plus proche des estimations*
 - *Couverture de neige hivernal mieux simulée*
 - *La physique du pergélisol enfin modélisé*
 - *Une hydrologie largement améliorée (Débits & Stock d'eau)*
- ISBA-CTrip est-il utile dans CNRM-CM6 ?
 - *Hydrologie bien plus réaliste qu'avant*
 - *Impact physique atmosphérique > physique de surface*
 - *Impact positif sur les biais (surtout HuR) à part sur l'Afrique*
 - *Une humidité de l'air trop faible dans Arpège ?*
- Outil intéressant pour étudier les rétroactions climatiques & les ressources en eau à l'échelle globale
- Participation à CMIP6 → contribution au 6^e rapport du GIEC

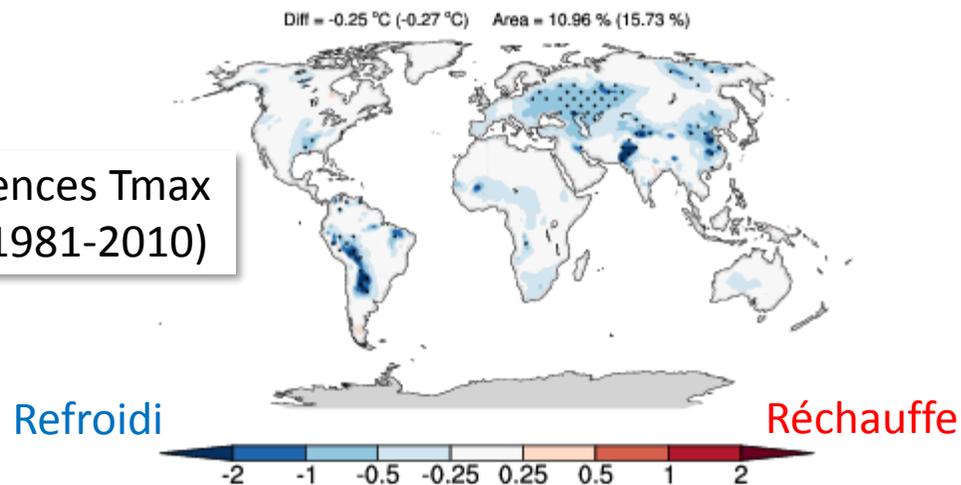


Perspectives – Impact des « réservoirs lents » sur la climat

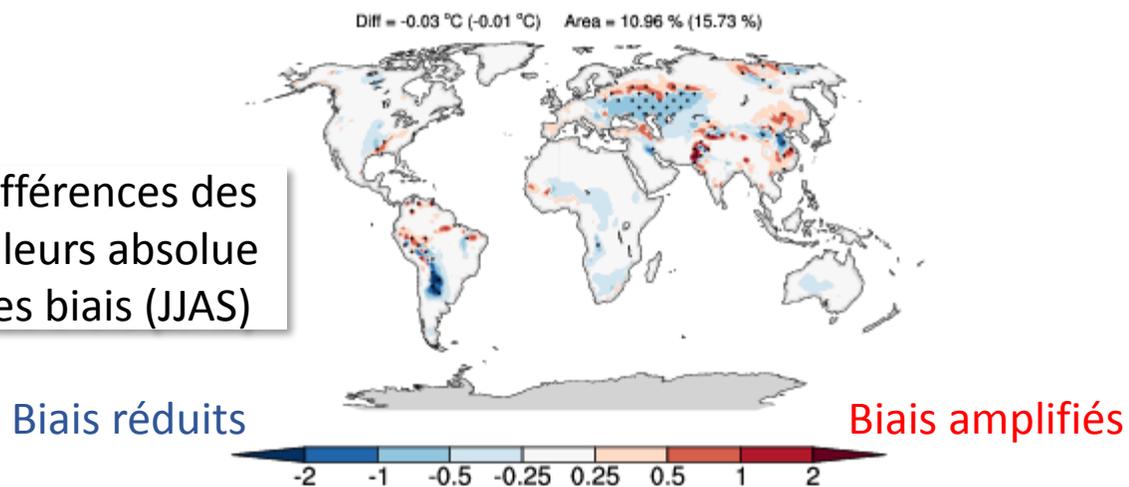
Quel est l'impact des inondations saisonnières & des eaux souterraines sur le climat présent ? (stage M2 D. Sigler 2019)



Différences Tmax JJAS (1981-2010)



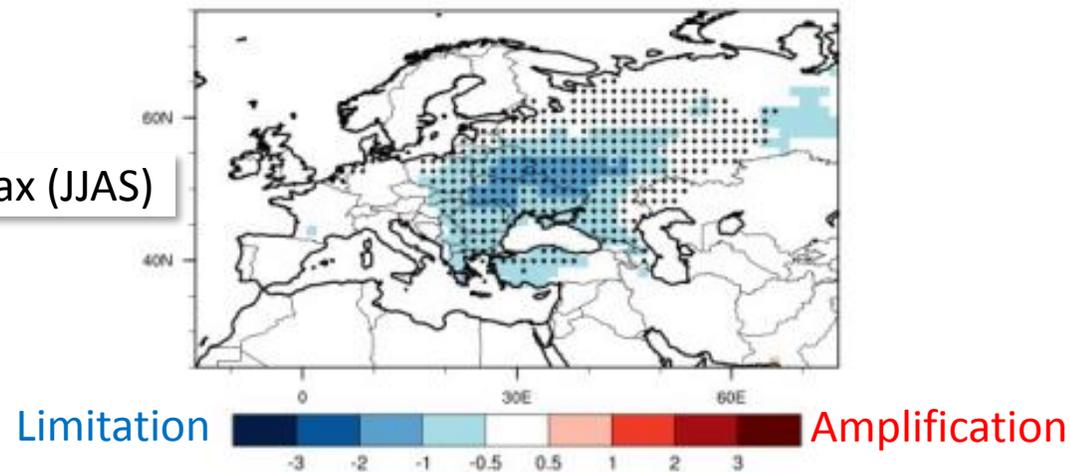
Différences des valeurs absolue des biais (JJAS)



Decharme & Colin (in prep.)

Quel est l'impact des eaux souterraines sur le climat futur ? – 4xCO₂ vs. Pré-industriel

Tmax (JJAS)

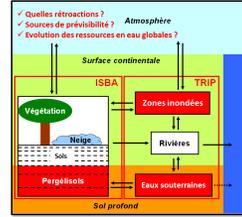


- ✓ Limitation du réchauffement de 0,5 à 1,5°
- ✓ 3x moins de vagues de chaleurs détectées
- ✓ Sévérité diminuée de 60%

Colin et al. (in prep.)

Ressource en eau mondiale : enjeu sociétal majeur

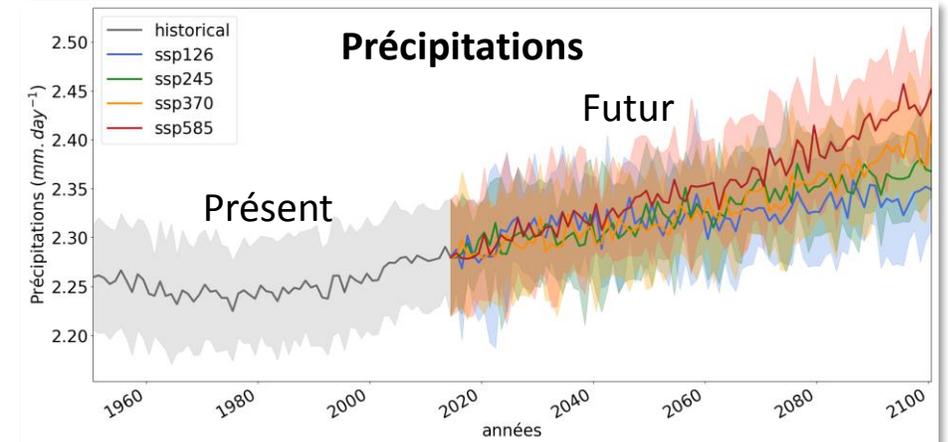
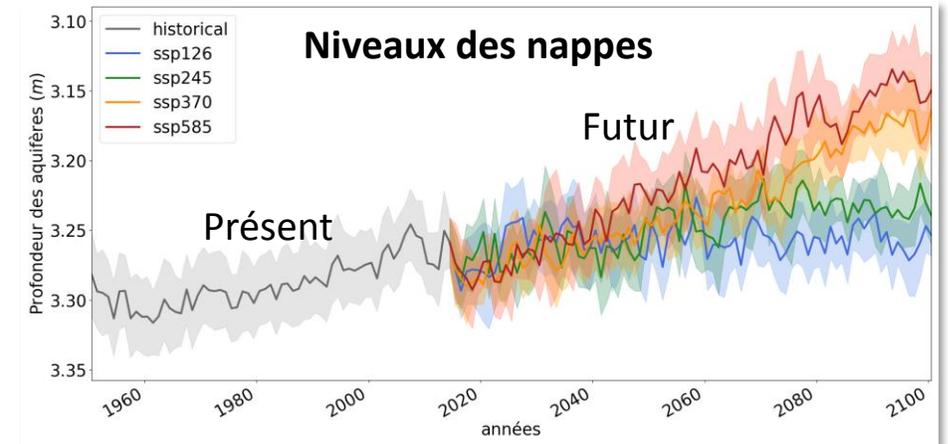
- Utilisation domestique
- Agriculture
- Industrie
- Biodiversité
- Écosystèmes



1^{ère} partie de la thèse :

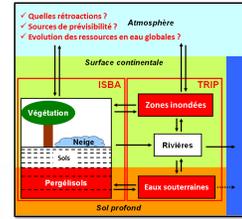
- Analyse multi-modèles de l'évolution de la ressource en eau et des zones humides dans les scénarios climatiques réalisés pour CMIP6

Projections climatiques – CNRM-CM6
(stage M2 M. Costantini 2020)



Ressource en eau mondiale : enjeu sociétal majeur

- Utilisation domestique
- Agriculture
- Industrie
- Biodiversité
- Écosystèmes



1^{ère} partie de la thèse :

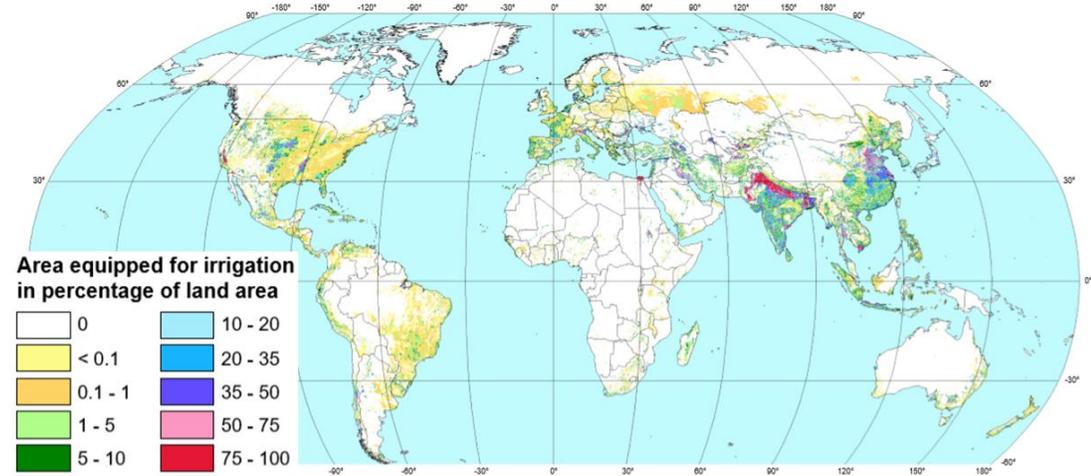
- Analyse multi-modèles de l'évolution de la ressource en eau et des zones humides dans les scénarios climatiques réalisés pour CMIP6

2^{nde} partie de la thèse :

- Implémentation d'une paramétrisation simplifiée de l'irrigation dans les modèles de climat du CNRM
- Réalisation de nouveaux scénarios climatiques

The digital global map of irrigation areas

October 2013



1) Une nouvelle modélisation hydrologique

- ✓ *La zone non saturée du sol – ISBA_{DF}*
- ✓ *Le continuum neige-sol*
- ✓ *Les processus hydrologiques (inondations & aquifères)*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

2) Cette modélisation à l'échelle globale

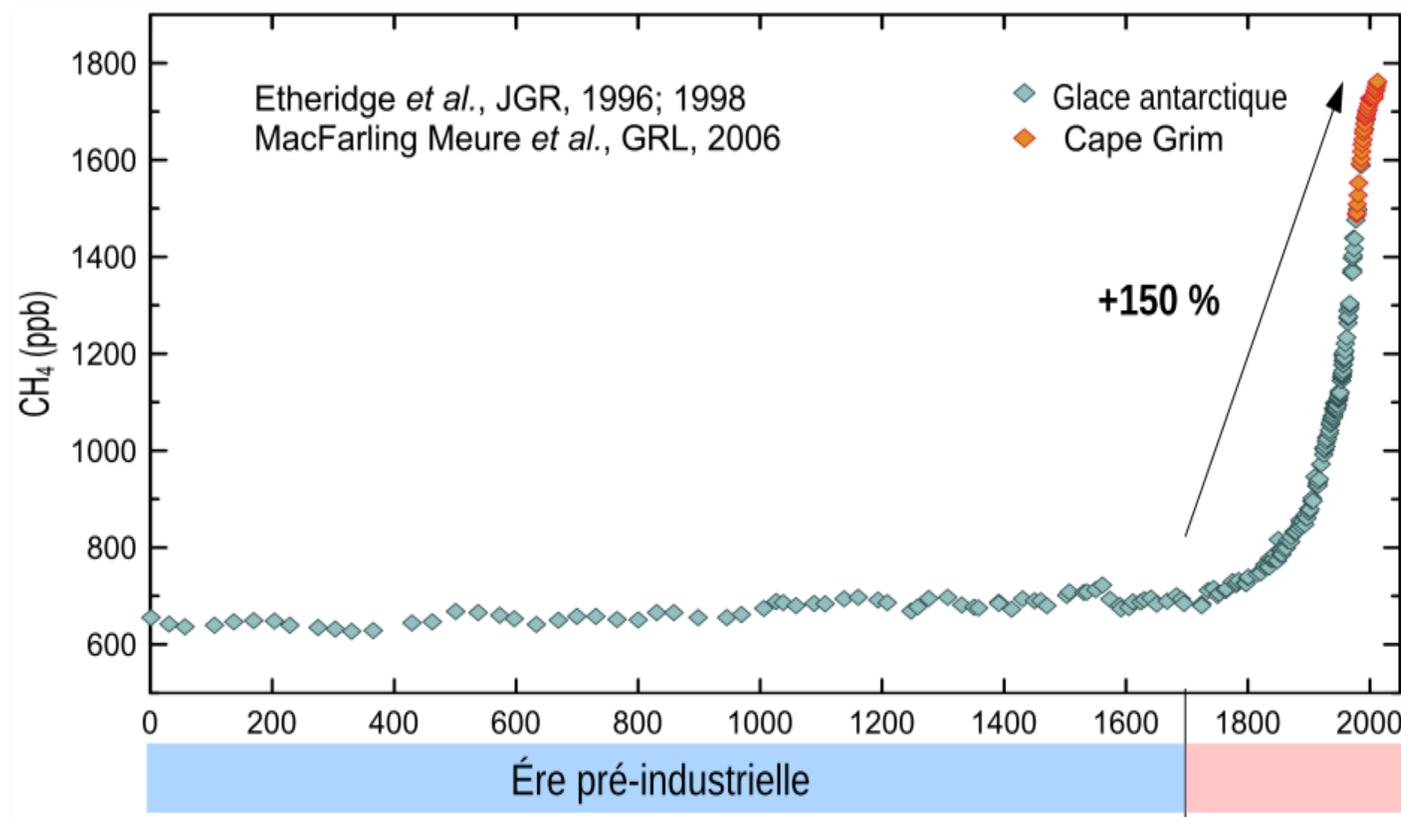
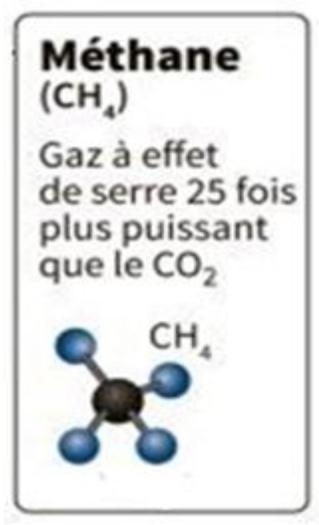
- ✓ *Evaluation*
- ✓ *Est-elle utile dans CNRM-CM6 ?*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

3) Le lien hydrologie – biogéochimie dans les régions boréales

- ✓ *Méthane, Tourbières & Pergélisols*
- ✓ *Dynamique du carbone du sol & des gaz*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

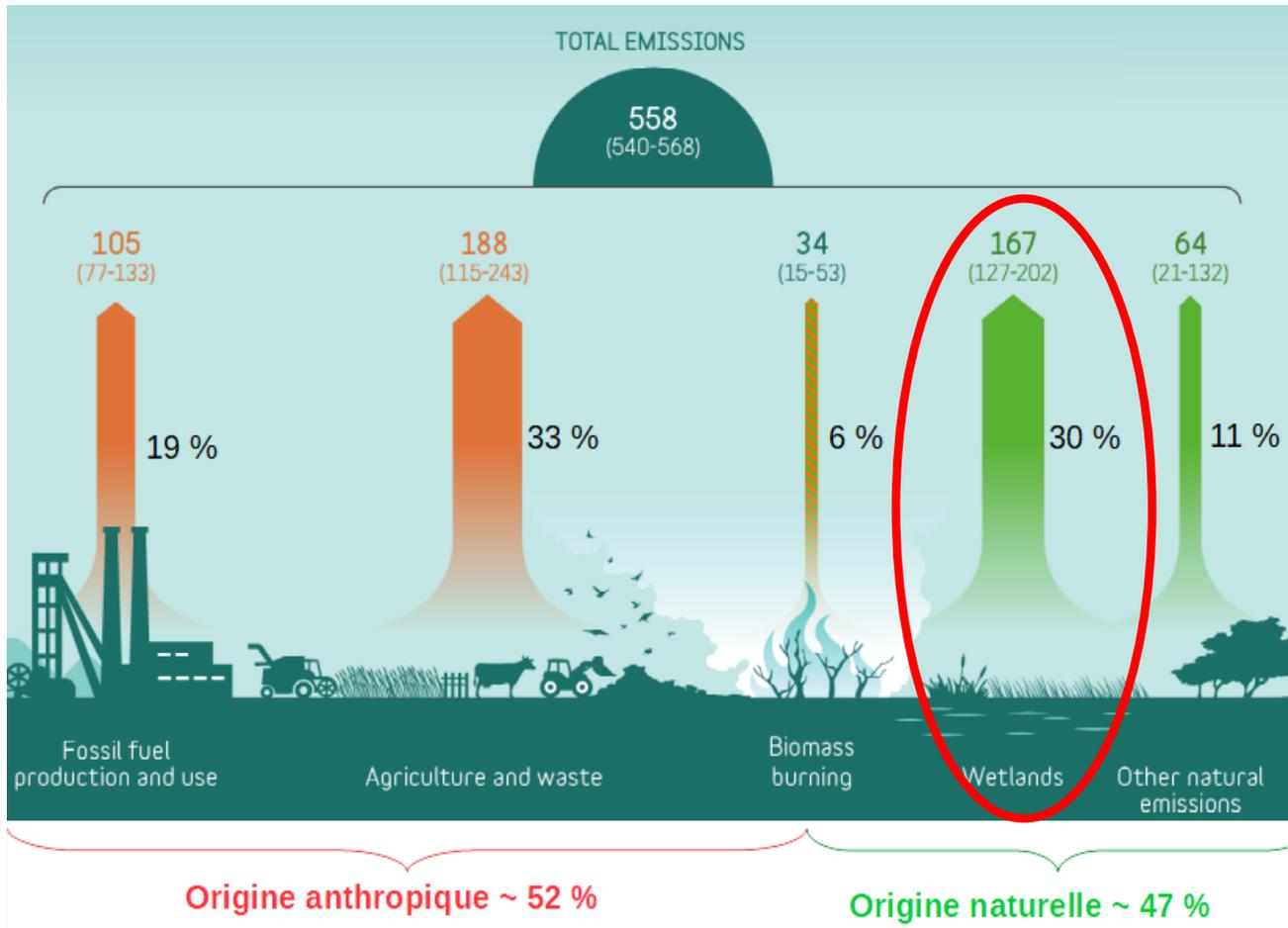
Synthèse générale

Concentration atmosphérique en méthane passée (0 – 2000) mesurée dans la glace antarctique puis à la station australienne de Cape Grim



Hydrologie & biogéochimie – Méthane, Tourbières

Estimations des sources de méthane ($10^9 \text{ kg}\cdot\text{an}^{-1}$)

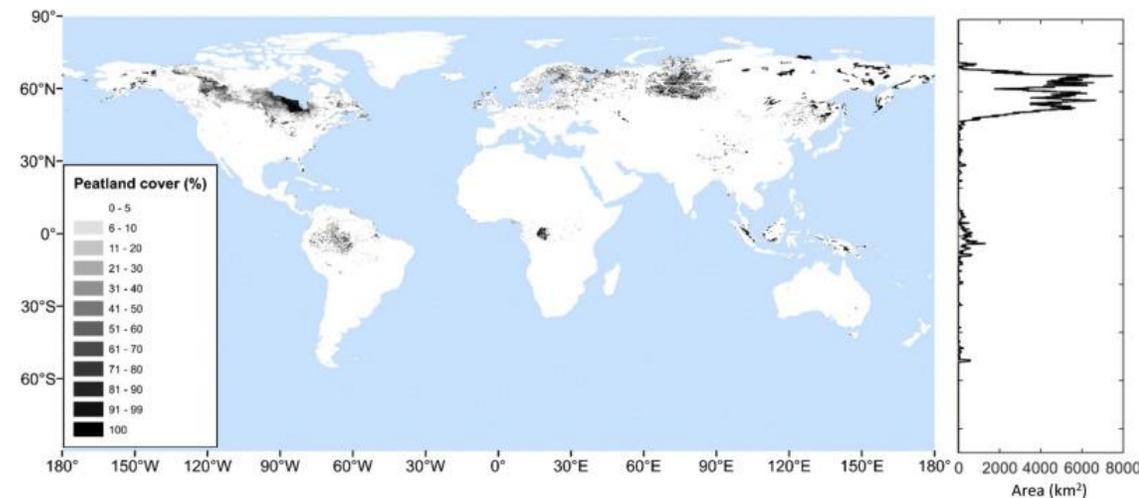


Saunois et al. (2016)

Tourbières

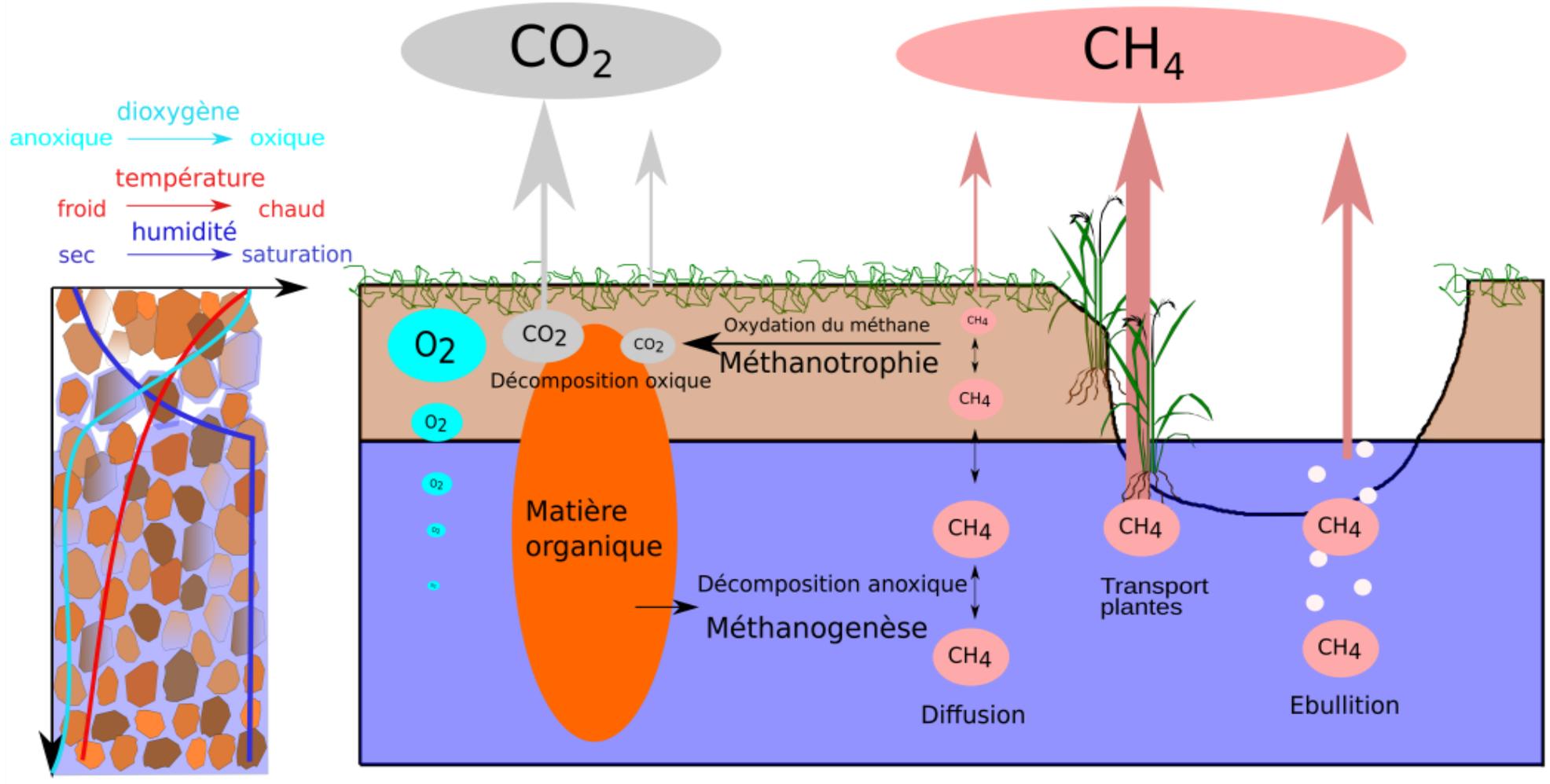


25% – 30%
du stock de
carbone des
sols à l'échelle globale



Xu et al. (2018)

Les processus physiques et biogéochimiques dans les tourbières



Hydrologie & biogéochimie – Méthane, Tourbières & Pergélisols

Dégel saisonnier du pergélisol à Umiujaq (Canada, 55°)

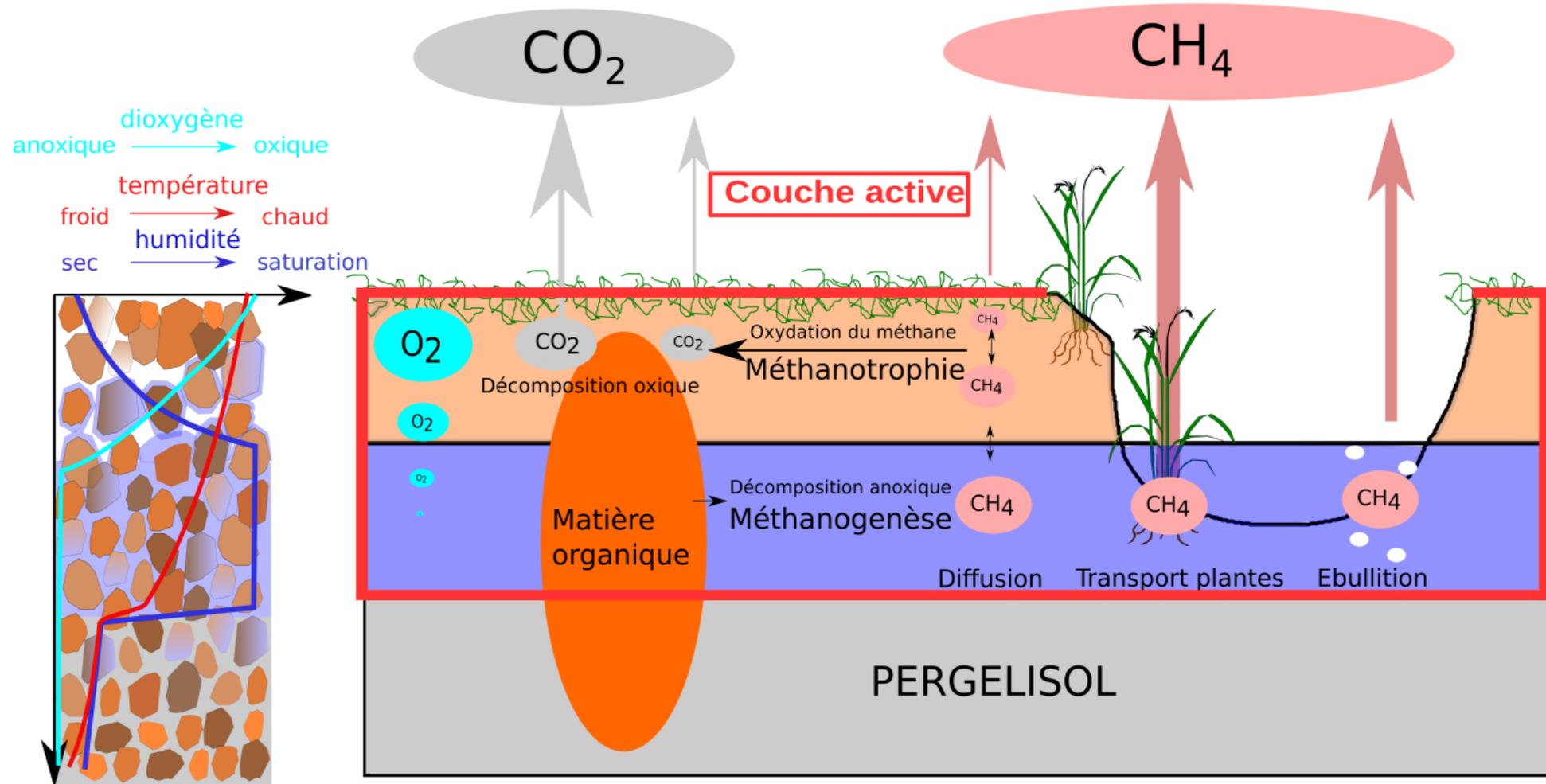


Photo Florent Dominé

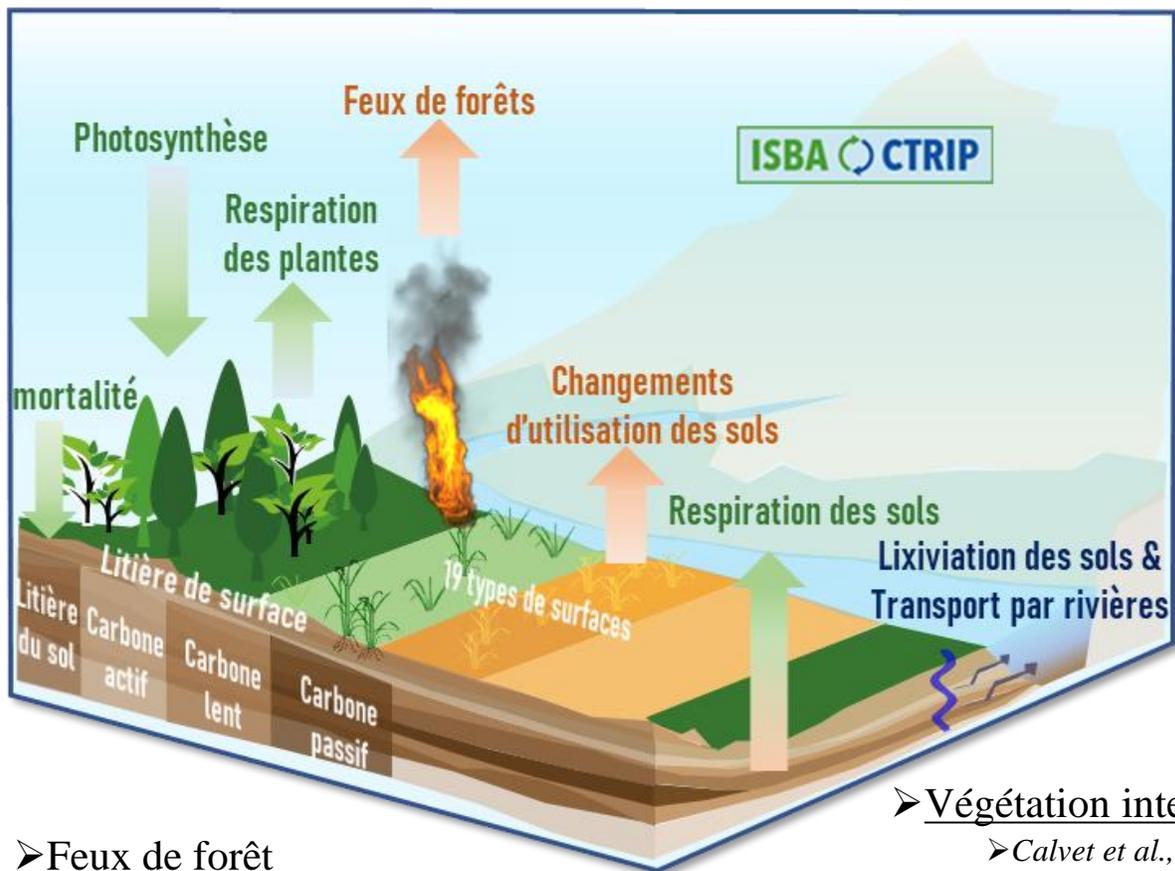
renferme
1 700
milliards de tonnes
de carbone,
soit le double
du CO₂ de
l'atmosphère

Hydrologie & biogéochimie – Méthane, Tourbières & Pergélisols

Les processus physiques et biogéochimiques dans la couche active du pergélisol

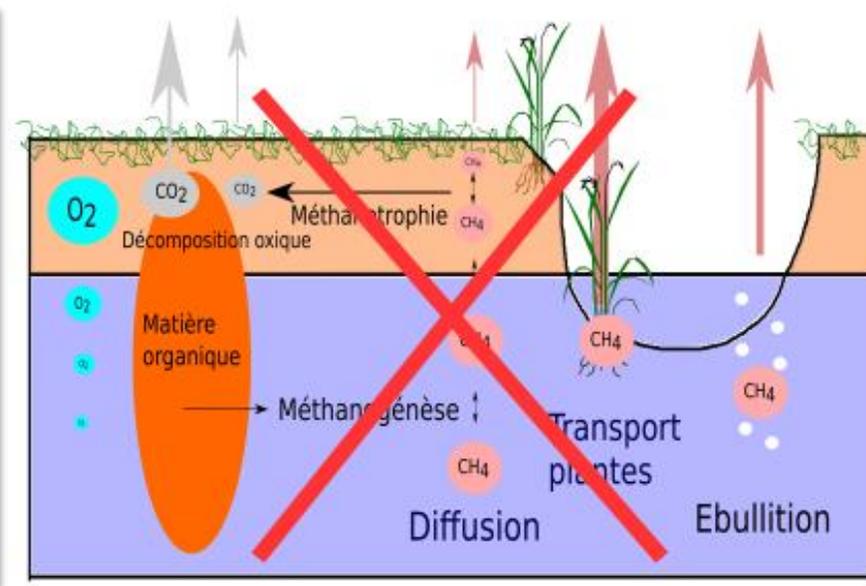
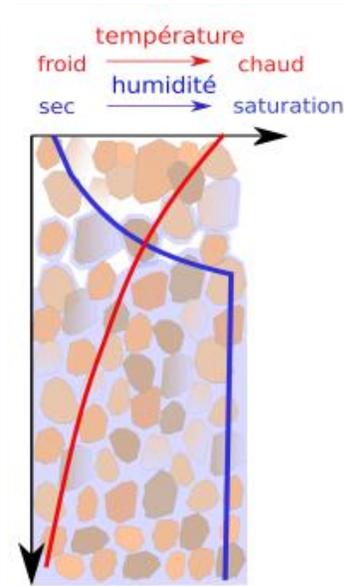


Hydrologie & biogéochimie – La version « système Terre » d'ISBA-CTRIP



- Feux de forêt
➤ Thonicke et al., 2001
- Lixiviation des sols & Transport du carbone en rivière
- Changement d'utilisation des sols
➤ Postdoctorat Ramdane Alkama (2011-2012)

- Végétation interactive
➤ Calvet et al., 1998
➤ Joetzjer et al., 2014
- Carbone du sol via CENTURY
➤ Gibelin 2007
- Seulement émissions de CO₂
- Carbone du sol non discrétisé



Thèse de Xavier Morel (2014 -2018)
Unifier physique & biogéochimie dans ISBA

1) Une nouvelle modélisation hydrologique

- ✓ *La zone non saturée du sol – ISBA_{DF}*
- ✓ *Le continuum neige-sol*
- ✓ *Les processus hydrologiques (inondations & aquifères)*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

2) Cette modélisation à l'échelle globale

- ✓ *Evaluation*
- ✓ *Est-elle utile dans CNRM-CM6 ?*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

3) Le lien hydrologie – biogéochimie dans les régions boréales

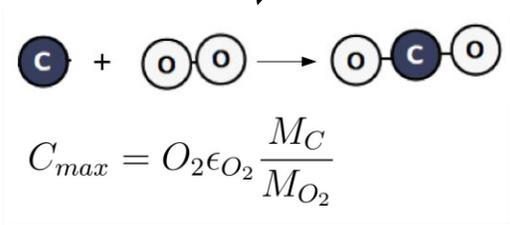
- ✓ *Méthane, Tourbières & Pergélisols*
- ✓ *Dynamique du carbone du sol & des gaz*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

Synthèse générale

Hydrologie & biogéochimie – Dynamique du carbone du sol

Discrétisation du carbone du sol cohérente avec l'hydrologie d'ISBA_{DF}

$$\frac{\partial C_i(z)}{\partial t} = \underbrace{S_i(z)}_{\text{mortalité}} - \underbrace{F_{oxic}^i(z)}_{\text{décomposition oxygène}} + \underbrace{\sum_{j \neq i} [(1 - r_j) f_{ji} F_{oxic}^j(z)]}_{\text{échanges inter-réservoirs}} - \underbrace{r_{MG,i}(z) \frac{M_C}{M_{CH_4}}}_{\text{Méthanogénèse}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} \left[D(z) \frac{\partial C_i(z)}{\partial z} \right]}_{\text{Dynamique verticale}} + \frac{\partial AC_i(z)}{\partial z}$$



Coupe de sol cryoturbé



Accumulation & Compaction du carbone au cours du temps

Hydrologie & biogéochimie – Dynamique du carbone du sol & des gaz

Discretisation du carbone du sol cohérente avec l'hydrologie d'ISBA_{DF}

$$\frac{\partial C_i(z)}{\partial t} = \underbrace{S_i(z)}_{\text{mortalité}} - \underbrace{F_{oxic}^i(z)}_{\text{décomposition oxygène}} + \underbrace{\sum_{j \neq i} [(1 - r_j) f_{ji} F_{oxic}^j(z)]}_{\text{échanges inter-réservoirs}} - \underbrace{r_{MG,i}(z) \frac{M_C}{M_{CH_4}}}_{\text{Méthanogénèse}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} \left[D(z) \frac{\partial C_i(z)}{\partial z} \right] + \frac{\partial AC_i(z)}{\partial z}}_{\text{Dynamique verticale}}$$

Concentration du CO₂, CH₄ et O₂ dans les sols

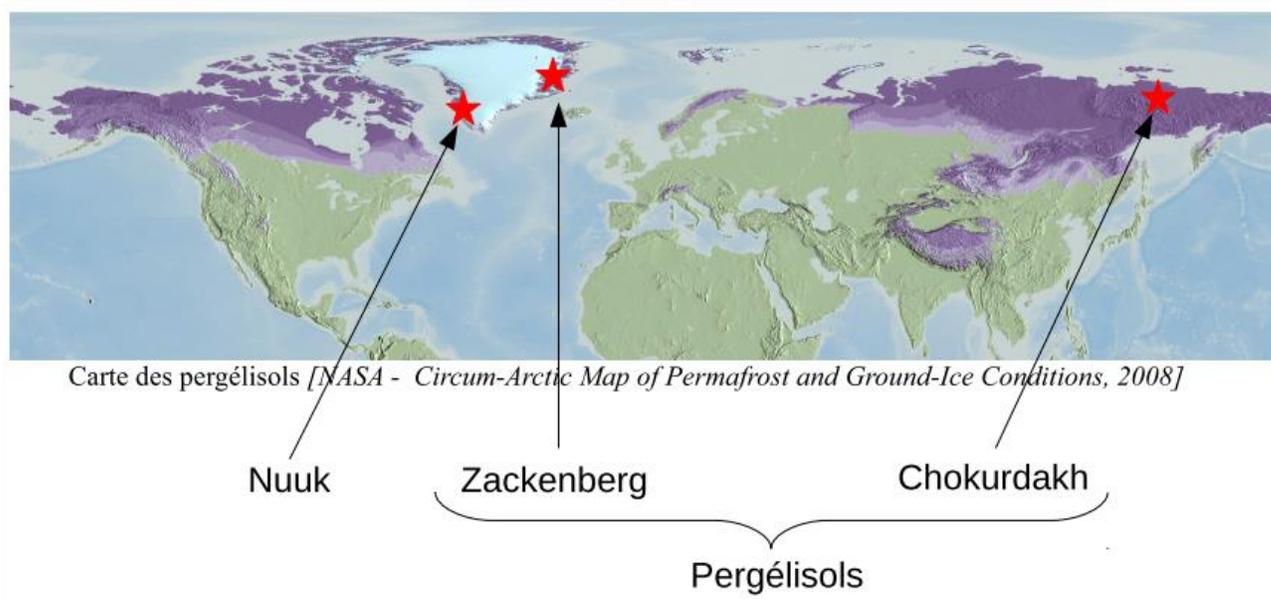
$$\epsilon_{CO_2} \frac{\partial [CO_2]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{CO_2} \frac{\partial [CO_2]}{\partial z} \right) + r_{oxic} + r_{MT} \frac{M_{CO_2}}{M_{CH_4}} - r_{PMT}^{CO_2} - r_{transp}^{CO_2}$$

$$\epsilon_{CH_4} \frac{\partial [CH_4]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{CH_4} \frac{\partial [CH_4]}{\partial z} \right) + \frac{\partial \epsilon_{CH_4} V_e [CH_4]^{ebu}}{\partial z} + \sum_i r_{MG,i} - r_{MT} - r_{PMT}^{CH_4} - r_{transp}^{CH_4}$$

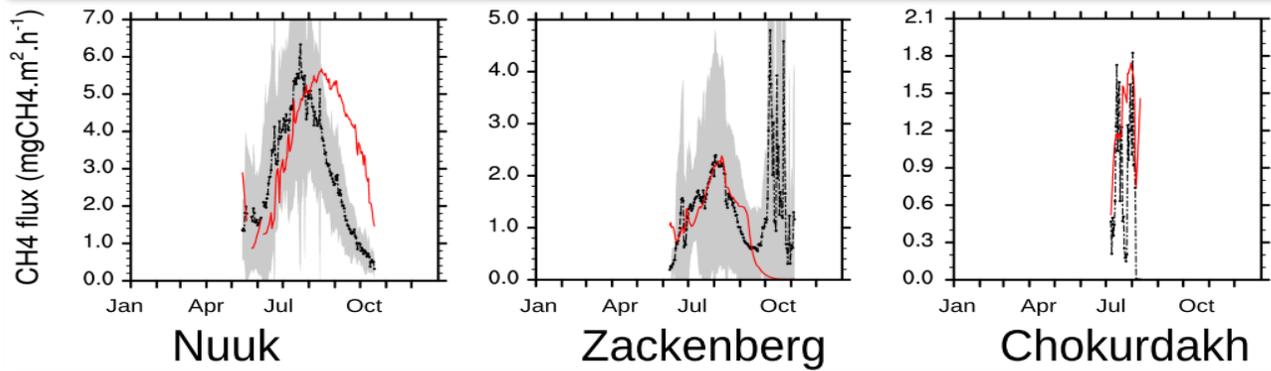
$$\epsilon_{O_2} \frac{\partial [O_2]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{O_2} \frac{\partial [O_2]}{\partial z} \right) - r_{MT} \frac{M_{O_2}}{M_{CH_4}} - r_{oxic} \frac{M_{CO_2}}{M_{CH_4}} + r_{PMT}^{O_2} - r_{transp}^{O_2}$$

- ✓ Diffusion
 - ✓ eau
 - ✓ air
- ✓ Ebullition
- ✓ Sources et puits
 - ✓ Décomposition oxygène
 - ✓ Méthanogénèse
 - ✓ Méthanotrophie
- ✓ Transport par les plantes

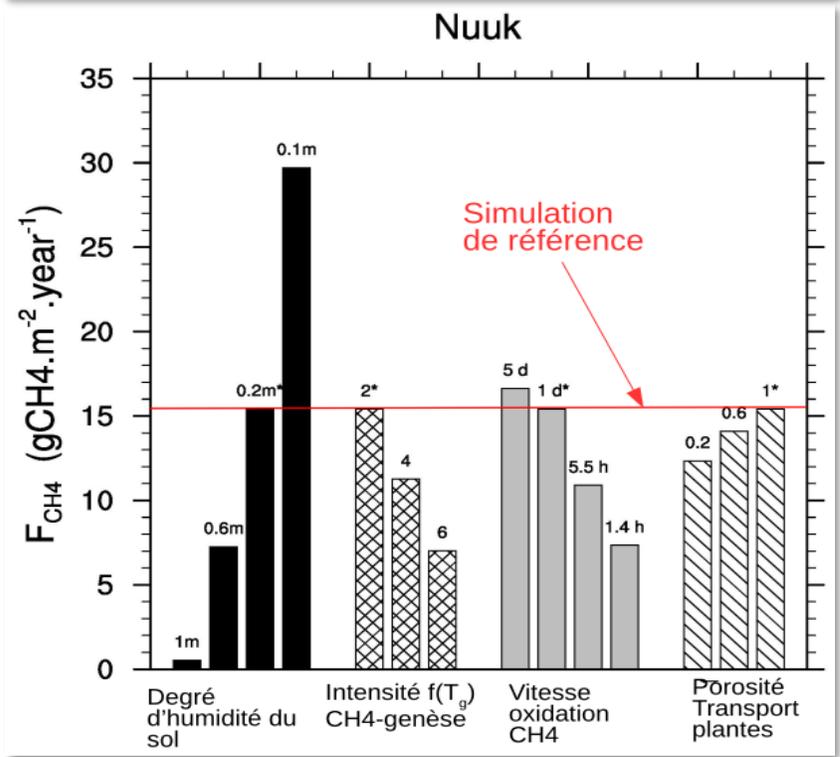
Hydrologie & biogéochimie – Dynamique du carbone du sol & des gaz



Cycle annuel moyen (2009-2014) des flux de CH₄ observés et simulés



Sensibilité des émissions aux processus



→ Devenir hydrologique des zones humides qui va fortement influencer les futures émissions de méthane
 [Knoblauch et al., 2018, Nature Climate Change]

1) Une nouvelle modélisation hydrologique

- ✓ *La zone non saturée du sol – ISBA_{DF}*
- ✓ *Le continuum neige-sol*
- ✓ *Les processus hydrologiques (inondations & aquifères)*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

2) Cette modélisation à l'échelle globale

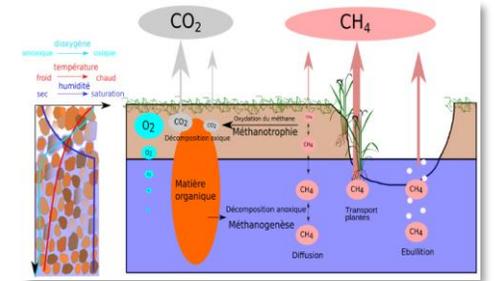
- ✓ *Evaluation*
- ✓ *Est-elle utile dans CNRM-CM6 ?*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

3) Le lien hydrologie – biogéochimie dans les régions boréales

- ✓ *Méthane, Tourbières & Pergélisols*
- ✓ *Dynamique du carbone du sol & des gaz*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

Synthèse générale

- Unification de la physique et de la biogéochimie dans ISBA
 - *Le carbone du sol a été discrétisé sur la verticale avec sa dynamique*
 - *Les gaz ont été rajoutés (CO_2 , CH_4 , O_2)*
 - *La principale source de variabilité de la génèse de CH_4 est liée à l'hydrologie du sol*
- L'évolution de l'hydrologie des régions boréales devrait conditionner l'évolution des futures émissions de CH_4
- Principales limitations de cette modélisation :
 - *Dynamique verticales du carbone du sol*
 - *Temps de décomposition de la matière organique dans le sol*

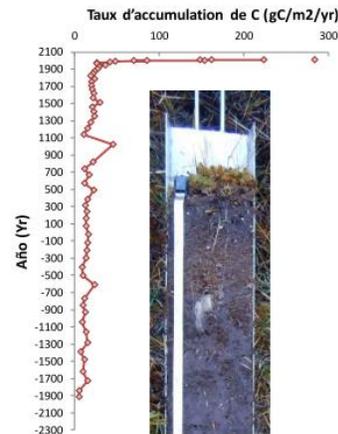


«Evolution de l'accumulation de carbone dans les tourbières pyrénéennes dans un contexte de changement climatique : Observation & Modélisation »

• Flux de carbone (atmosphériques, fluviaux)



• Taux d'accumulation de carbone holocènes et récents



<https://www.sno-tourbieres.cnrs.fr/site-bernadouze/>

1) Améliorer la compréhension de la formation des tourbières pyrénéennes

2) Comment vont évoluer ces tourbières dans un contexte de changement climatique

3) Améliorer la représentation & la dynamique du carbone du sol dans ISBA

4) Au-delà : Spatialiser au mieux cette modélisation sur les régions boréale puis à l'échelle globale

1) Une nouvelle modélisation hydrologique

- ✓ *La zone non saturée du sol – ISBA_{DF}*
- ✓ *Le continuum neige-sol*
- ✓ *Les processus hydrologiques (inondations & aquifères)*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

2) Cette modélisation à l'échelle globale

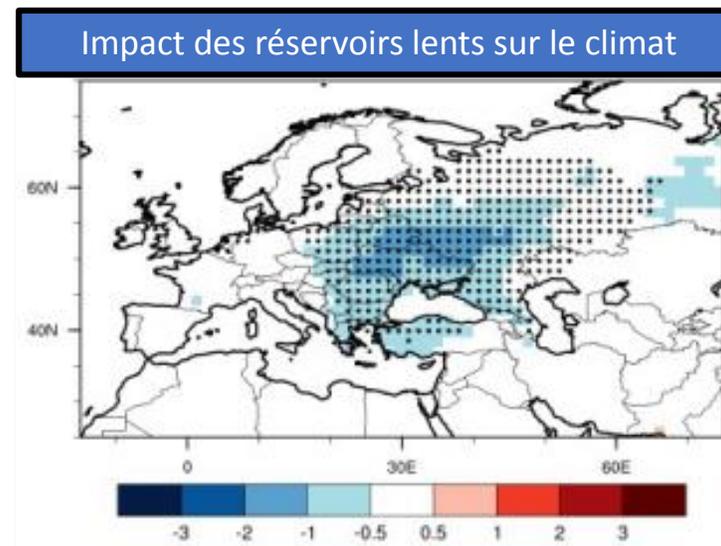
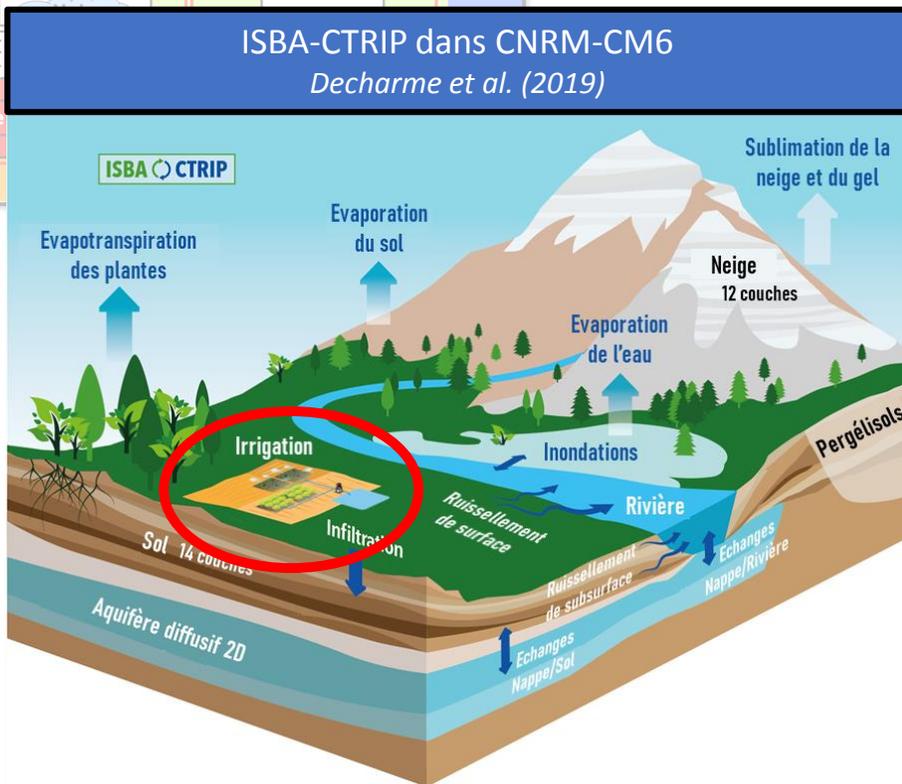
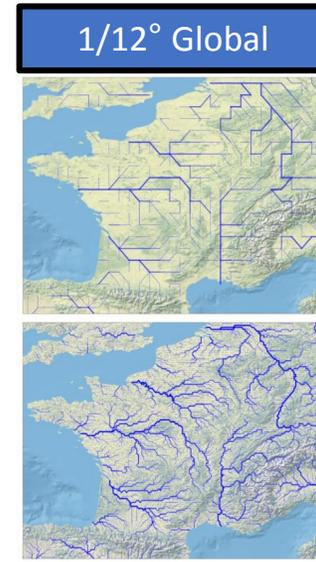
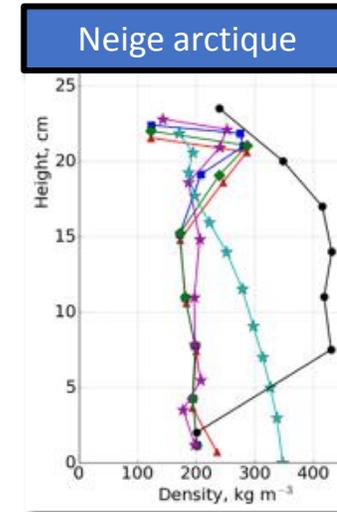
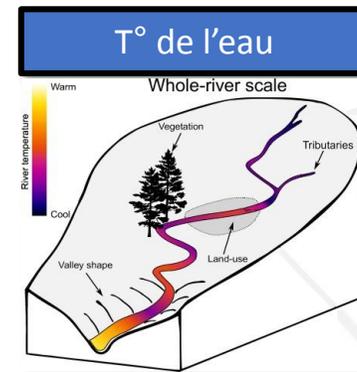
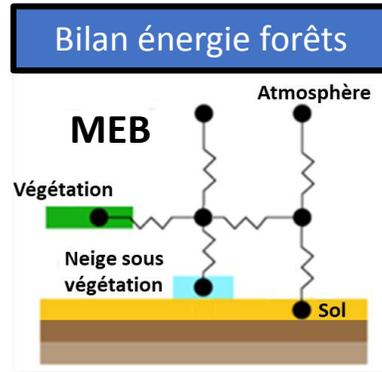
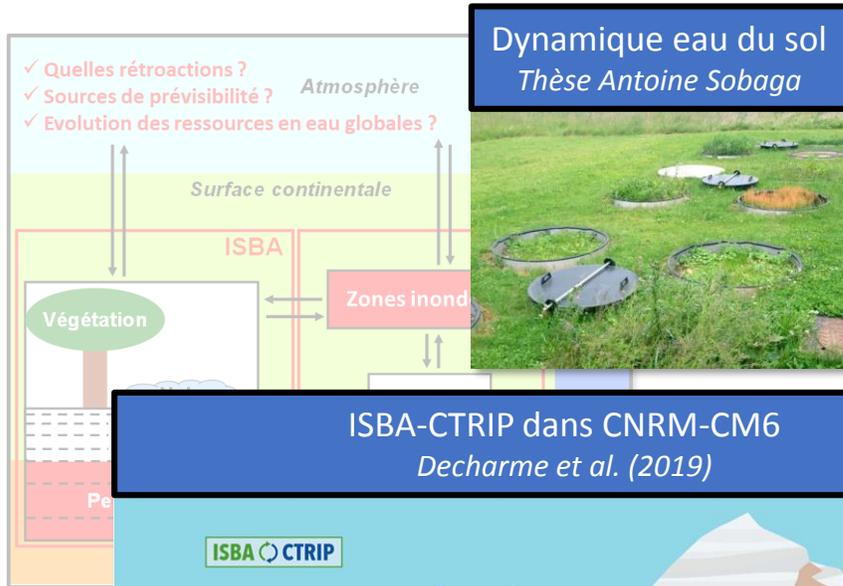
- ✓ *Evaluation*
- ✓ *Est-elle utile dans CNRM-CM6 ?*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

3) Le lien hydrologie – biogéochimie dans les régions boréales

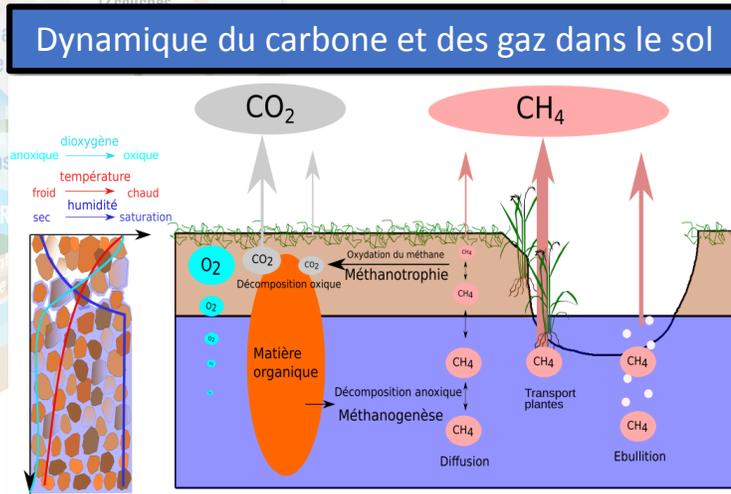
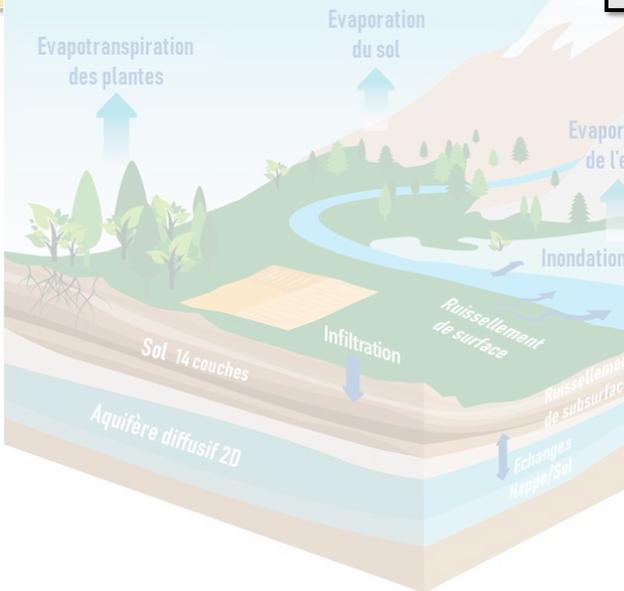
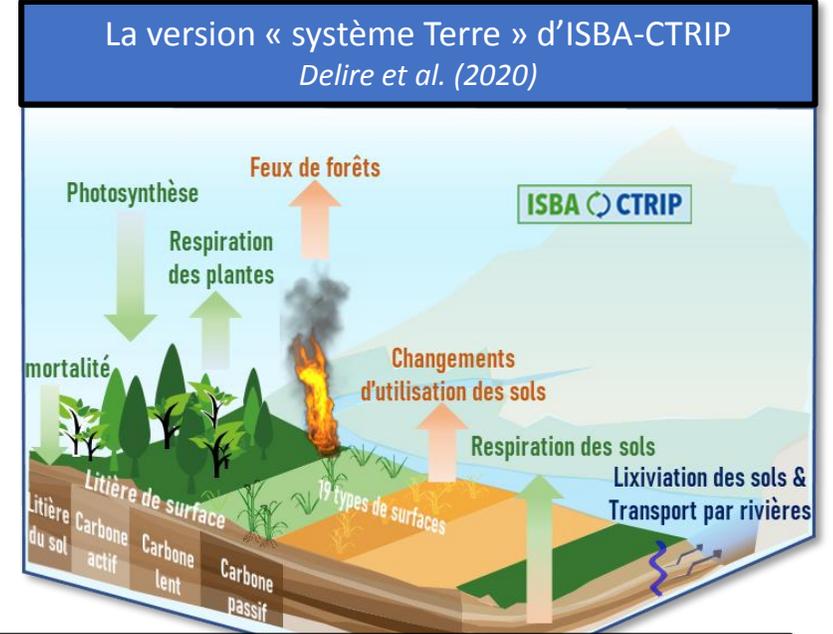
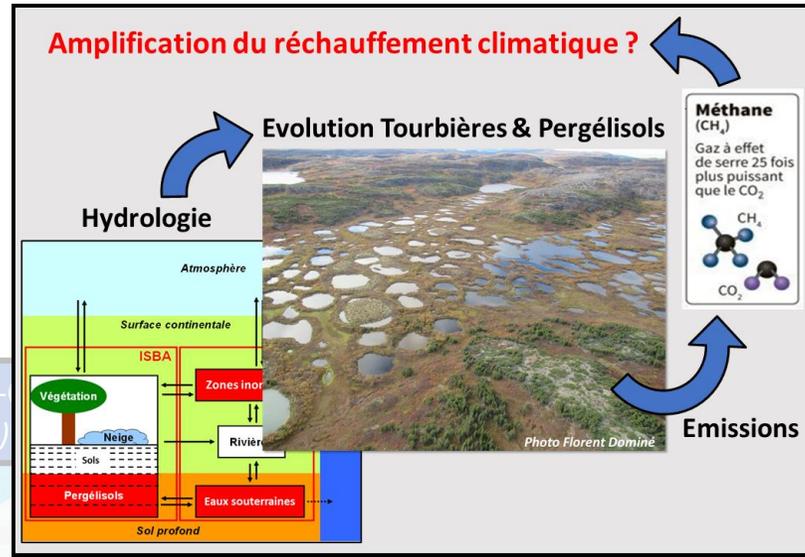
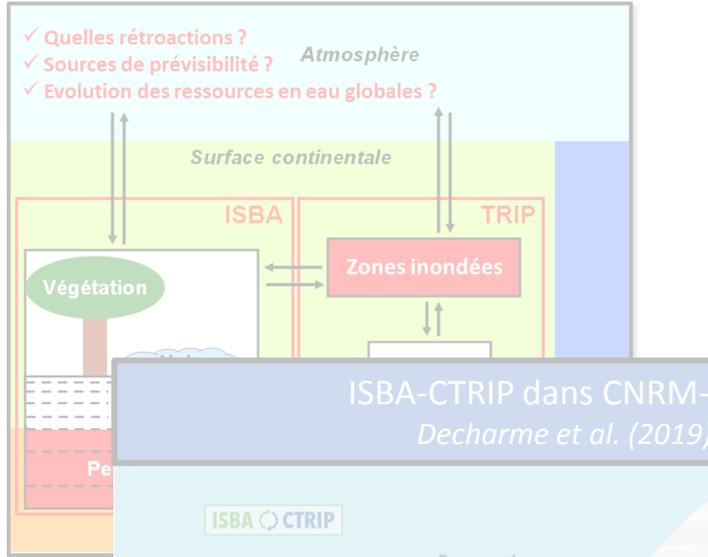
- ✓ *Méthane, Tourbières & Pergélisols*
- ✓ *Dynamique du carbone du sol & des gaz*
- ✓ *Synthèse & Perspectives*

Synthèse générale

Synthèse – Ma Contribution à la modélisation des surfaces continentales pour l'échelle globale



Synthèse – Ma Contribution à la modélisation des surfaces continentales pour l'échelle globale



The CNRM Climate and Earth System Models for CMIP6

Earth System Modeling 2018-2020 | First published: 25 February 2019 | Last updated: 26 June 2020



This special collection deals with the description, evaluation, and analysis of the physical, chemical, and biogeochemical cores of all climate and Earth system models developed for the CMIP6 experiment jointly by CNRM and CERFACS. The CNRM-CERFACS group has a long history in developing these kinds of fully-coupled models and in participating in CMIP exercises. These papers describe advances made in climate modeling during the last decade by the CNRM-CERFACS group designed to perform: (1) fully-coupled ocean-land-atmosphere simulation (CMIP type); (2) stand-alone atmospheric experiments with prescribed sea surface temperature (AMIP type); (3) off-line ocean and/or land surface simulations driven by unbiased atmospheric variables (OMIP and/or LMIP types). [Photo Credit: Bernard Spragg, public domain.]

Select / Deselect all

» Export Citation(s)

Table of Contents

Open Access

The CNRM Global Atmosphere Model ARPEGE-Climat 6.3: Description and Evaluation

Romain Roehrig, Isabelle Beau, David Saint-Martin, Antoinette Alias, Bertrand Dechar, Jean-François Guérémy, Aurore Voltaire, Ahmat Younous Abdel-Lathif, Eric Bazile, Sophie Belamari, Sebastien Blein, Dominique Bouniol, Yves Bouteloup, Julien Cattiau, Fabrice Chauvin, Matthieu Chevallier, Jeanne Colin, Hervé Douville, Pascal Marquet, Martine Michou, Pierre Nabat, Thomas Oudar, Philippe Peyrillé, Jean-Marcel Piriou, David Salas y Mélia, Roland Sférian, Stéphane Sénési

Journal of Advances in Modeling Earth Systems | First Published: 03 June 2020

Submit an Article

Get Content Alerts

Special Collections: Call for Paper

[Special Section Proposal Form](#)

[Personal Choice](#)

«The CNRM Climate and Earth System Models for CMIP6 » *JAMES* special issue

The screenshot shows the website interface for the CNRM-CERFACS contribution to CMIP6. The browser address bar displays 'www.umrcnrm.fr/cmip6/'. The page header includes logos for CNRM, METEO FRANCE, and CERFACS, along with the text 'CNRM-CERFACS contribution to CMIP6'. A navigation menu on the left lists: 'About CNRM-CERFACS', 'Data access and information', 'Models and Contribution to CMIP6', 'Publications', and 'Useful links'. The main content area features a welcome message, a 'Latest news' section, and a list of recent publications with dates and descriptions.

Mon Compte L'ÉQUIPE free Toulouse METEO Météo-France Pro Admin Credit Cooperatif Global Imaging OnLin... Crédit Agricole Toulou... Déménageurs à Toulou...

CNRM-CERFACS contribution to CMIP6

Welcome to this website which provides information on the participation of CNRM-CERFACS to CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)

Latest news :

- (2020/07/28) : CNRM-CM6-1 LR OMIP simulation (omip2) is published on ESGF
- (2020/06/02) : CNRM-ESM2-1 GEOMIP simulation (G6solar) is published on ESGF
- (2020/03/03) : CNRM-CM6-1 PMIP simulation (lig127k) is published on ESGF
- (2020/01/30) : All historical members of CNRM-CM6-1 DECK simulations are published on ESGF (30 members)
- (2020/01/09) : First CNRM-CM6-1 HR ScenarioMIP simulations (ssp245 and ssp585) are published on ESGF

<http://www.umrcnrm.fr/cmip6/>