

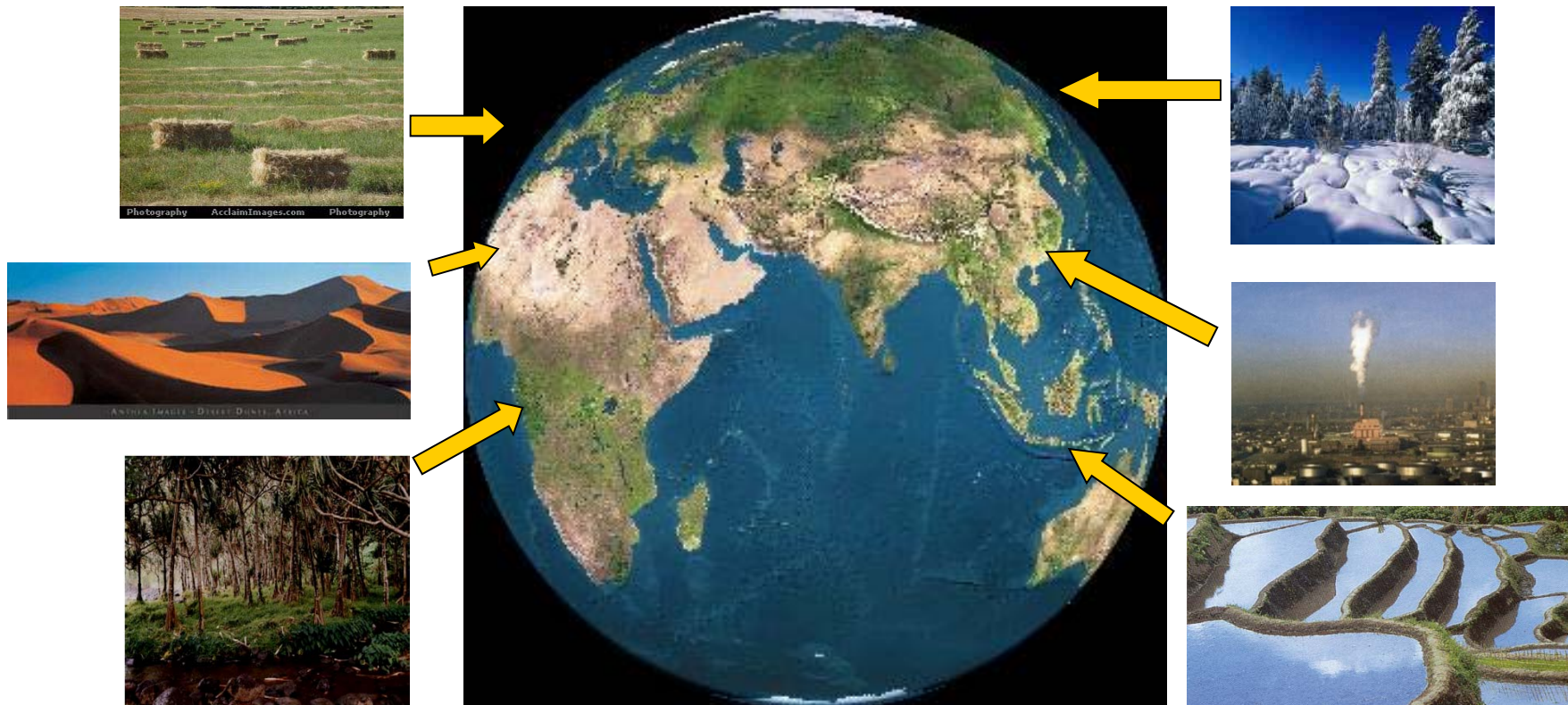
Modélisation hydrologique à grande échelle, exemple du modèle ORCHIDEE : caractéristiques actuelles et évolutions vers la plus haute résolution

Agnès Ducharne
DR CNRS à l'UMR METIS
agnes.ducharne@upmc.fr

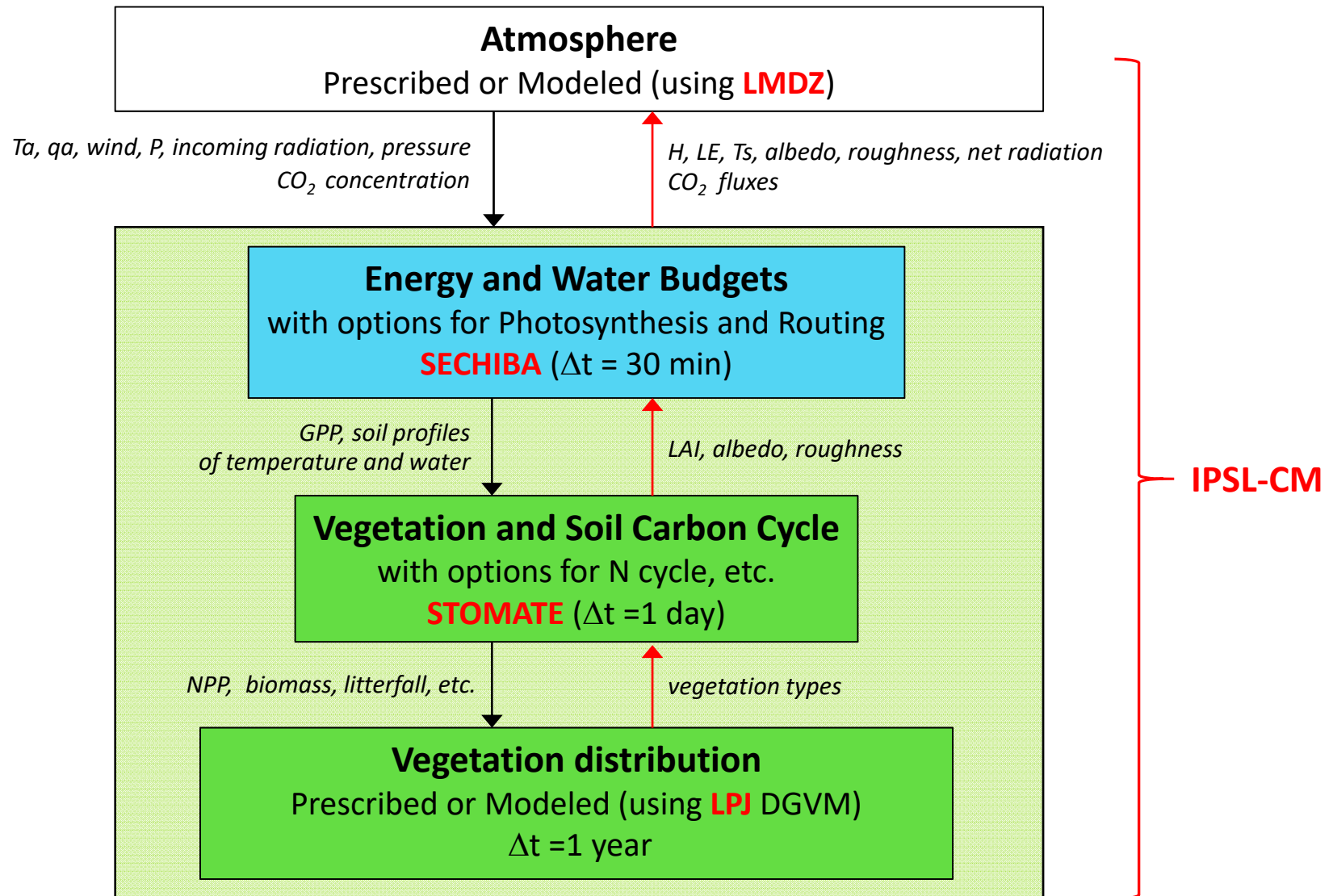


Un modèle construit pour des applications globales

1. Composante du modèle de climat de l'IPSL
2. Simuler les bilans d'énergie, d'eau et de carbone à la surface des continents



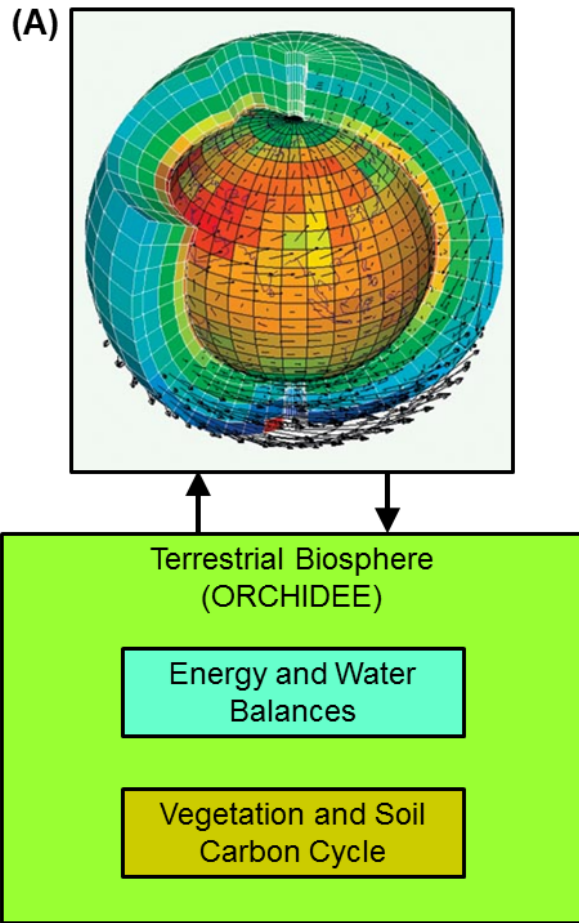
Structure générale



Liens avec l'atmosphère

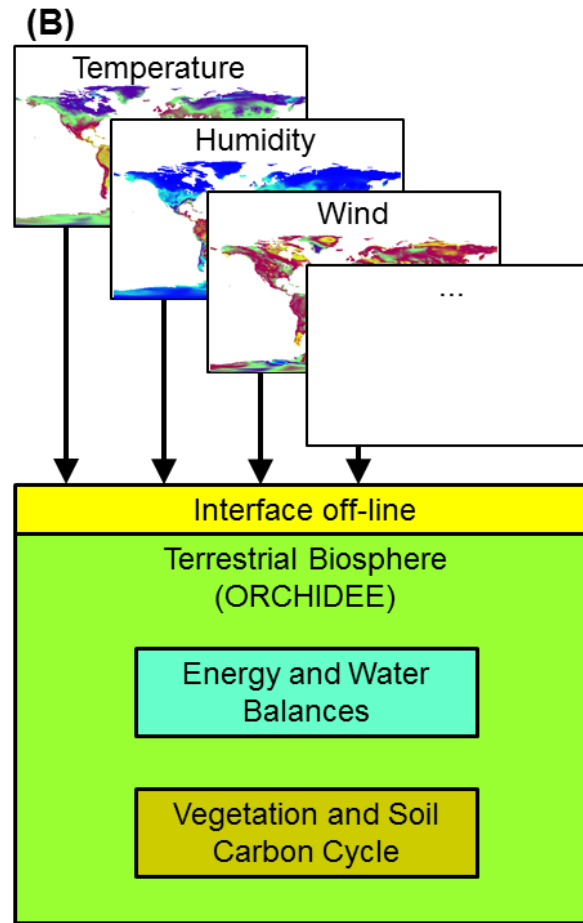
(1) Couplé

Global ou régional



(2a) Off-line

Global ou régional



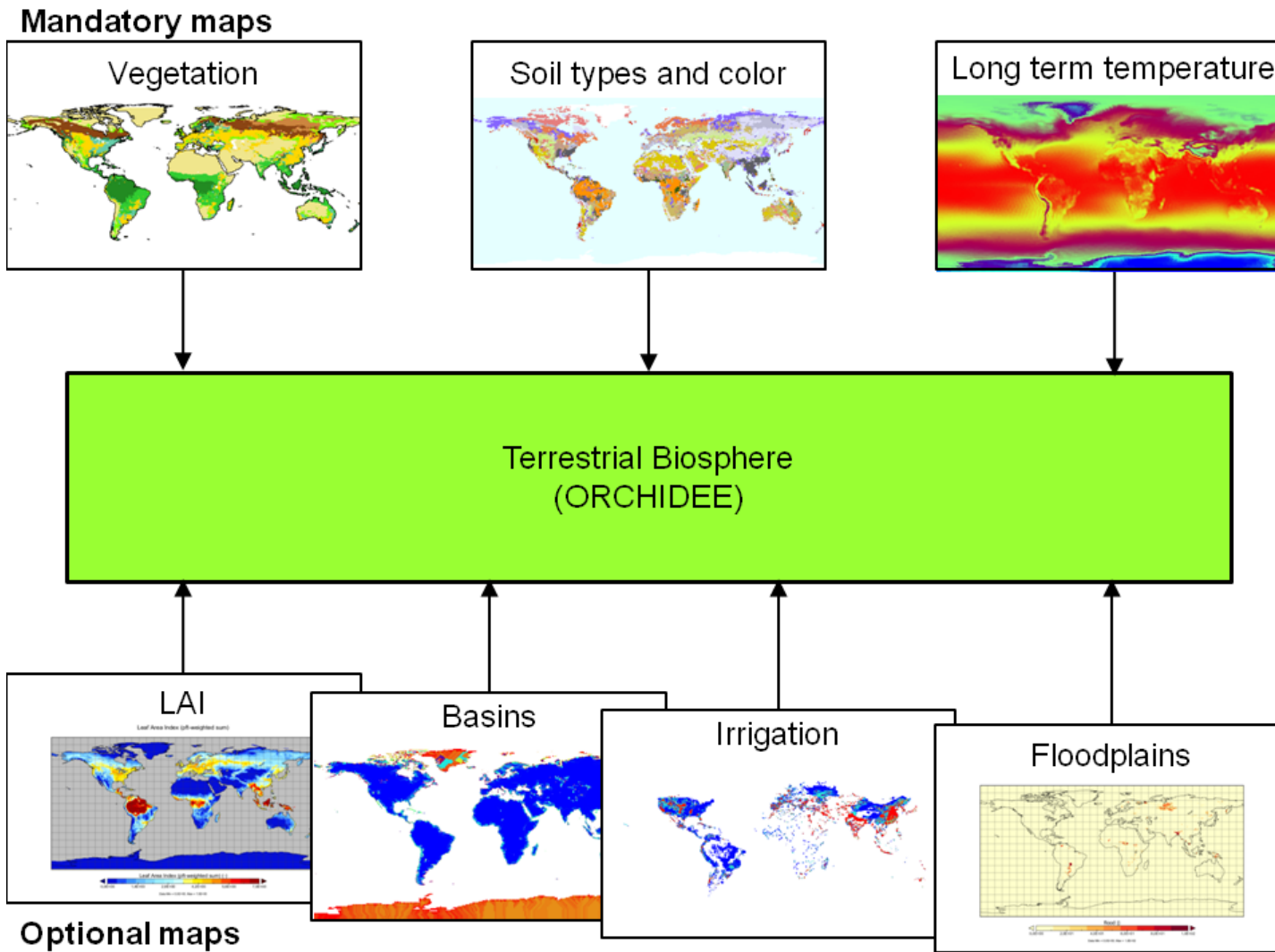
(2b) Off-line

Sites

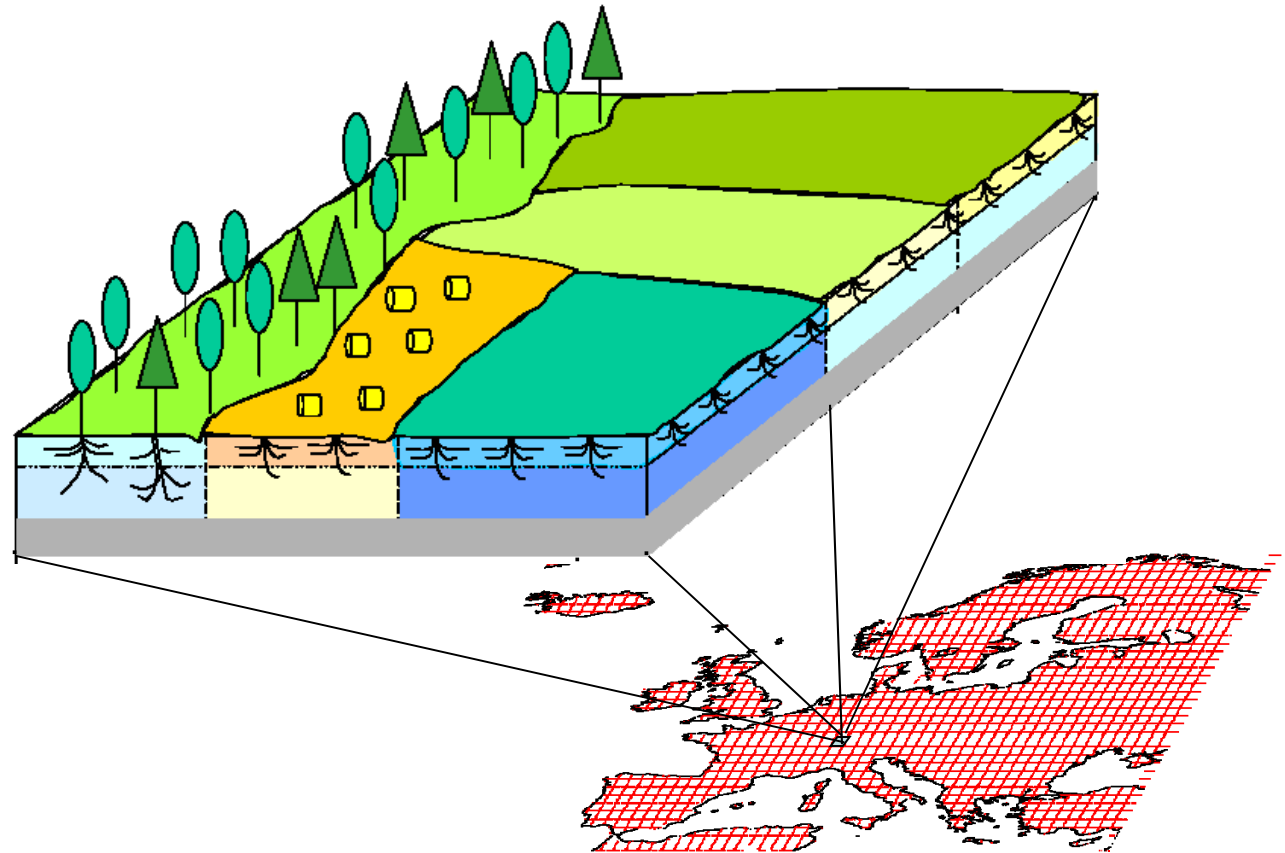


La résolution typique d'ORCHIDEE est 20 à 200 km

Propriétés de la surface à renseigner

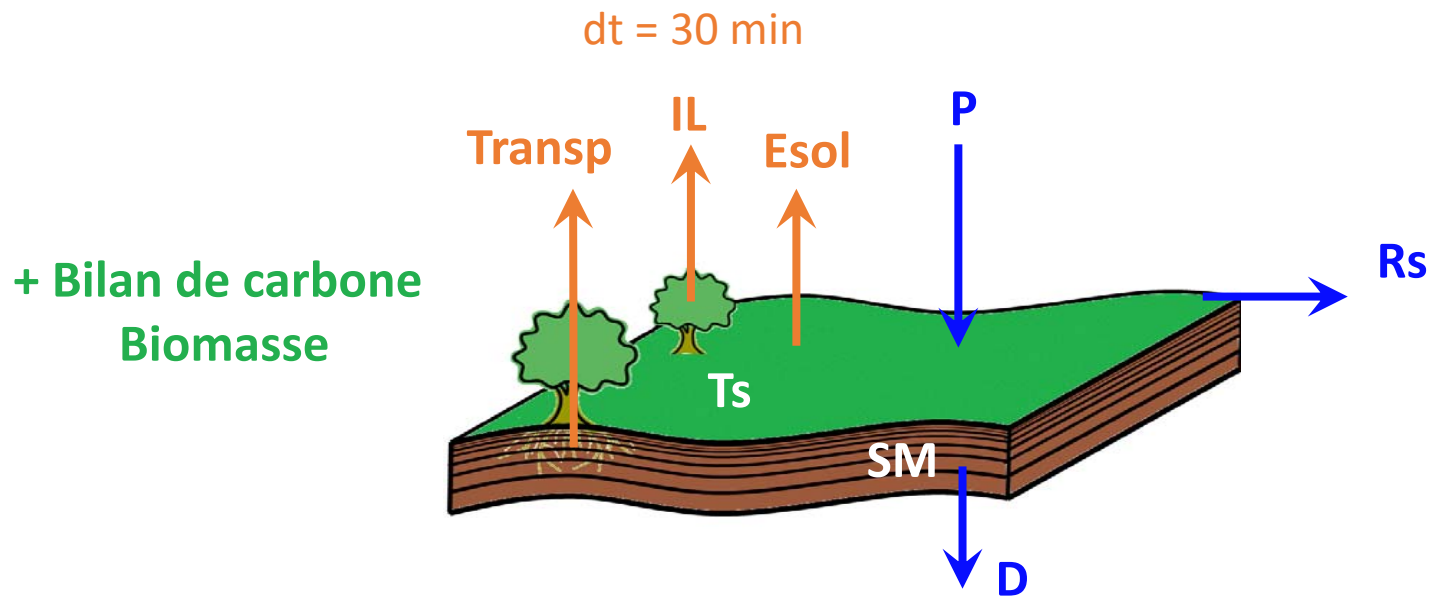


Variabilité sous maille par « tiles » de végétation



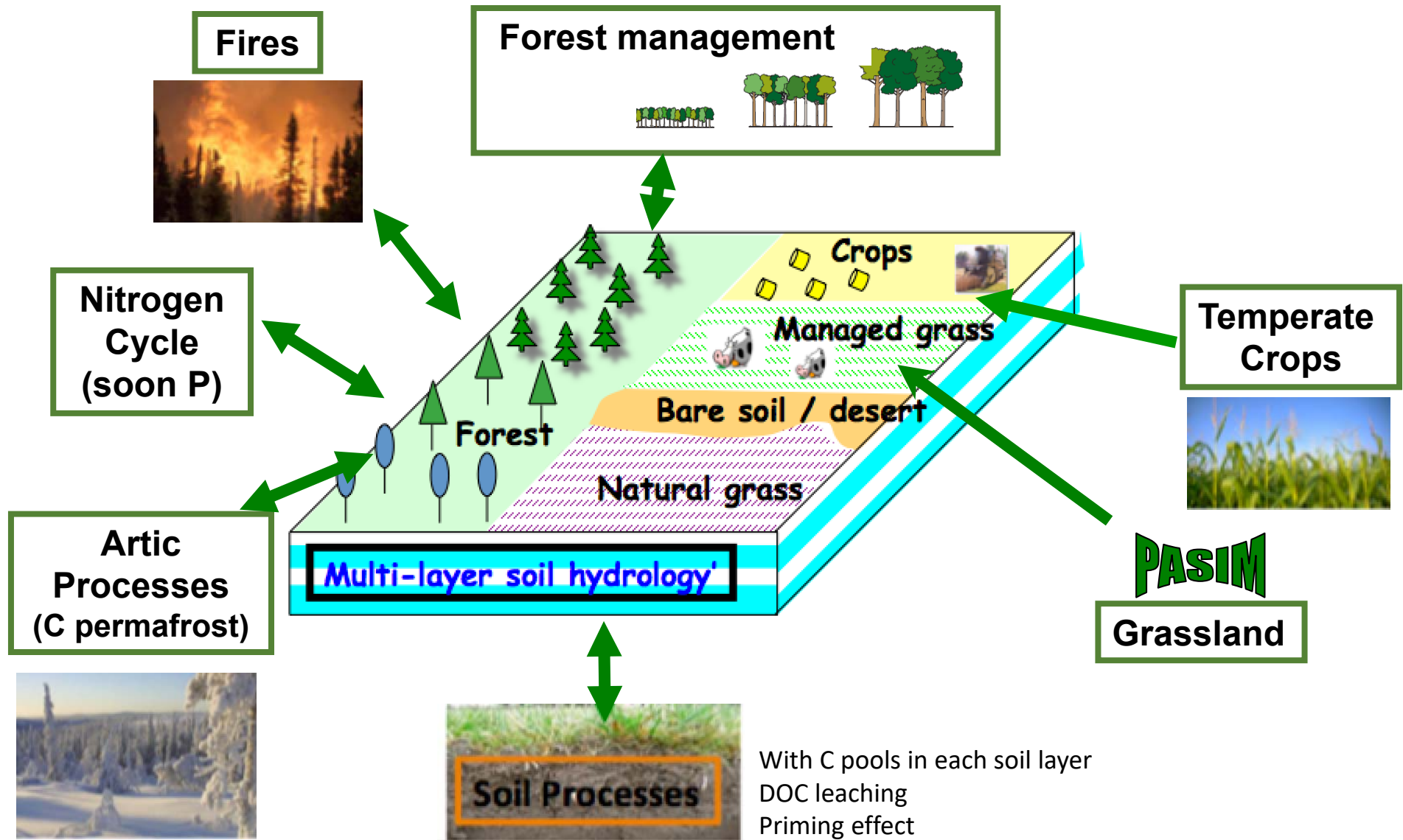
- **Mosaïque de types de surface types dans chaque maille**
- Basé sur carte d'occupation des sols à haute résolution (5km ou 300m)
- Convertie en 15 PFTs (Plant Functional Types)
- Il est possible d'ajouter des PFTs définies par l'utilisateur

Bilan d'eau couplé au bilan d'énergie



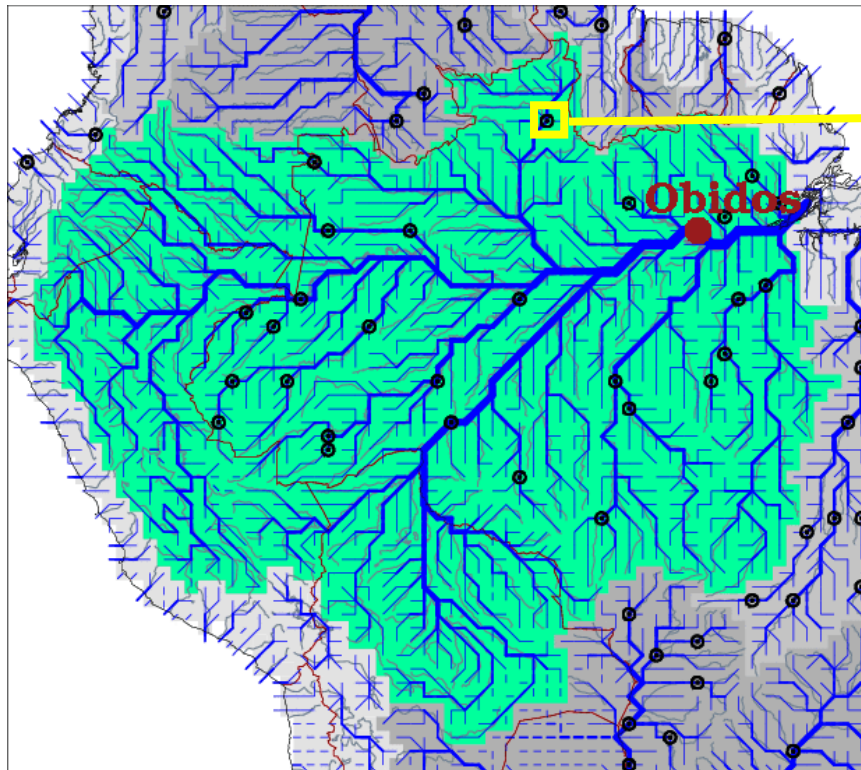
- Sol de 2m discrétisé en 11 couches
- Flux hydriques verticaux basés sur l'équation de Richards (non saturé)
- Propriétés hydrauliques selon van Genuchten-Mualem
- Paramètres associés basés sur la texture (12 classes USDA)
- Infiltration contrôlée par l'intensité des précipitations et K
- Ruissellement par refus d'infiltration (Horton)
- **Par défaut : drainage gravitaire au fond ; pas de remontée capillaire depuis la nappe**
- **Neige isolante avec compaction selon 3 couches**
- Gel de l'eau du sol & permafrost

Développements récents sur la végétation et le carbone



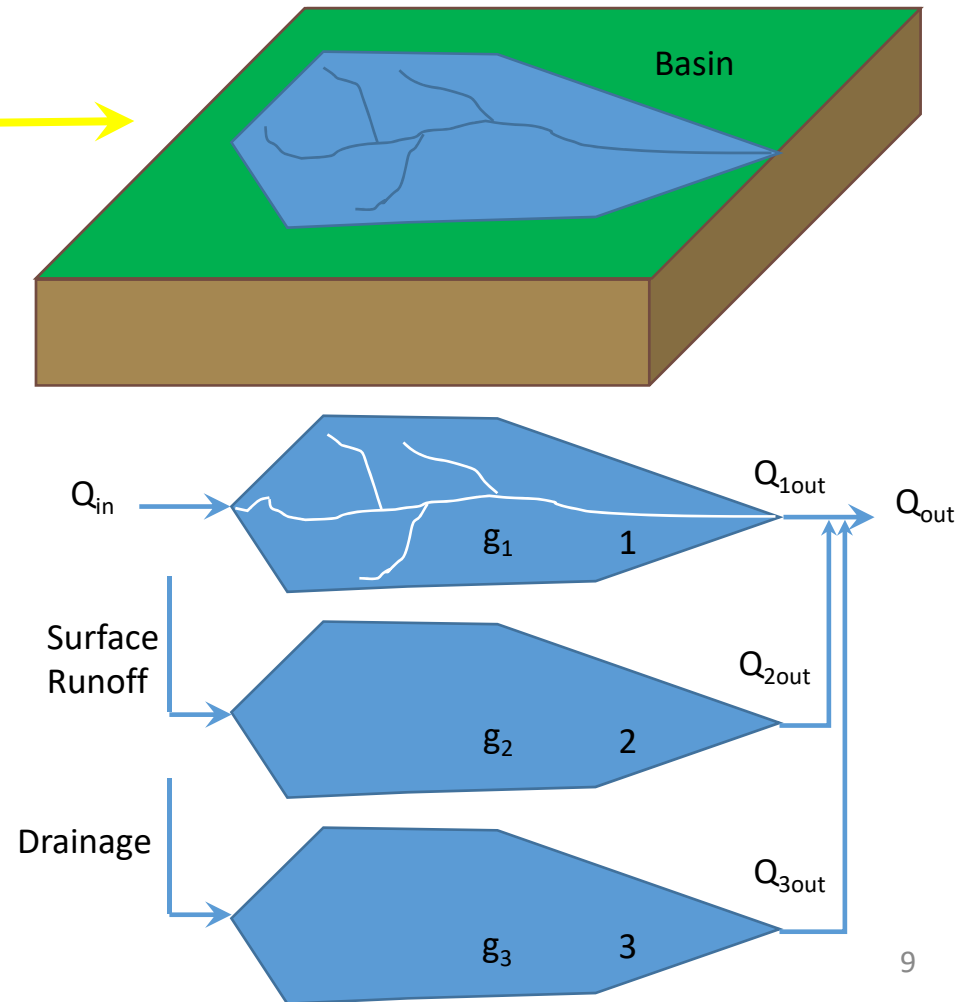
Modélisation des débits

Cascade de réservoirs linéaires
le long du réseau de drainage

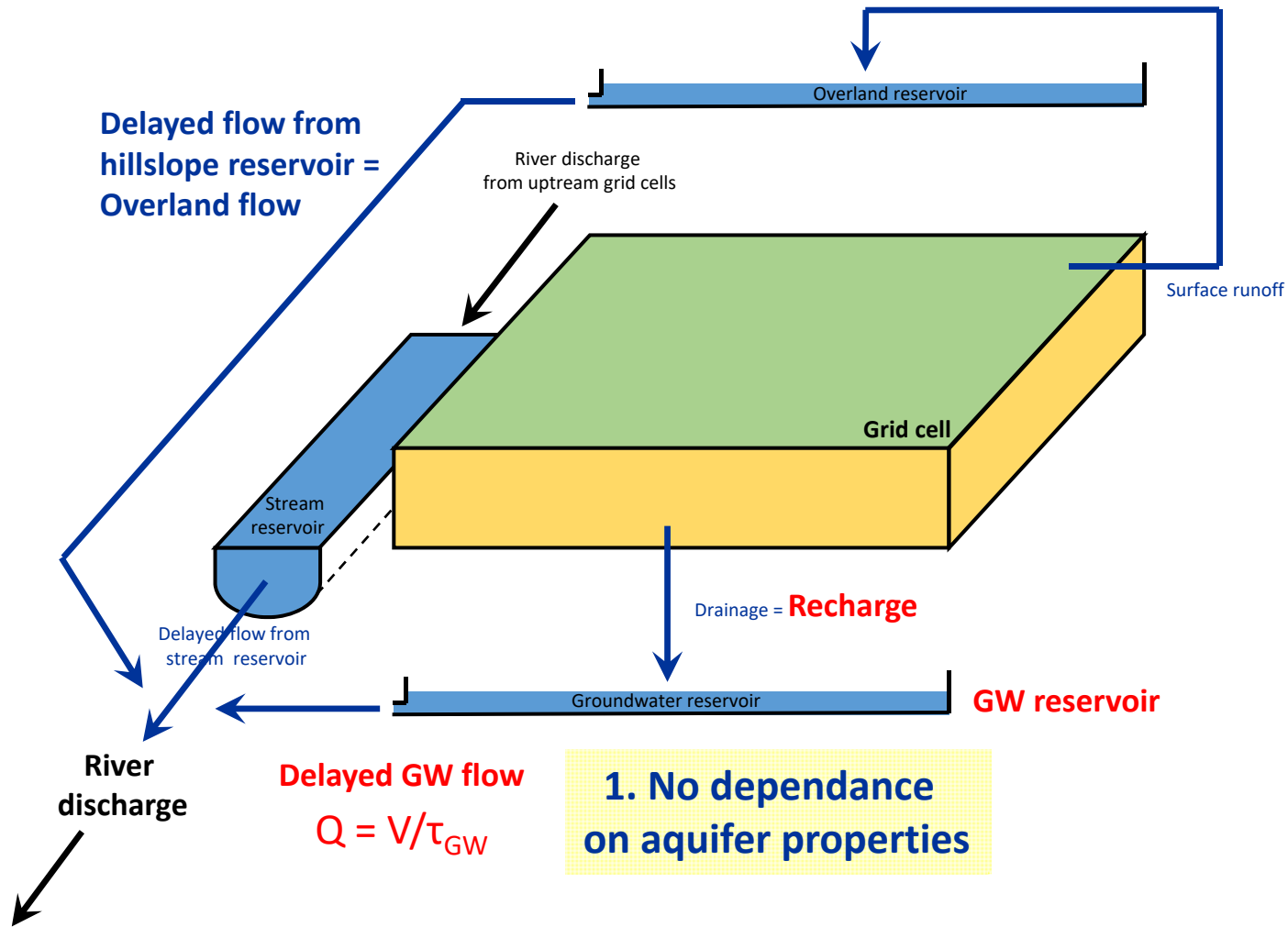


Réseau basé sur topographie à 0.5°

Réservoirs distincts pour cours
d'eau, versant, souterrain



Un modèle hydrogéologique hyper simple



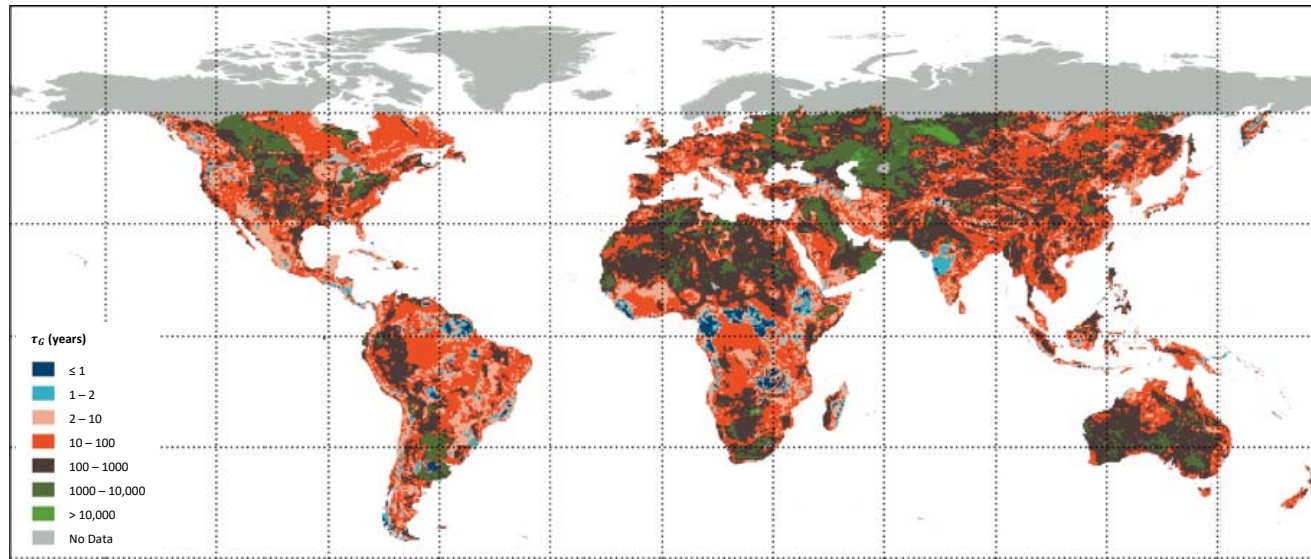
Delayed GW flow
 $Q = V/\tau_{GW}$

1. No dependence on aquifer properties

2. Assumes flat landscapes over tens to hundreds of kms

1. Comment tenir compte des propriétés des aquifères ?

GW timescale from Boussinesq equation



$$\tau_3 = \frac{n_e}{\pi^2 \cdot \delta^2 \cdot T_e}$$

n_e : effective porosity
 T_e : transmissivity
 δ : drainage density

Schneider (2017)

Standard timescales

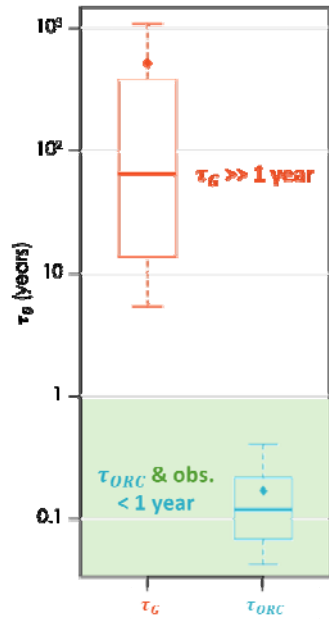
$$\tau_i = k \cdot g_i$$

$$k = d/v_{\text{slope}}$$

Stream reservoir	$g_1 = 0.24 \cdot 10^{-3} \text{ d/km}$
Hillslope reservoir	$g_2 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ d/km}$
GW reservoir	$g_3 = 25 \cdot 10^{-3} \text{ d/km}$

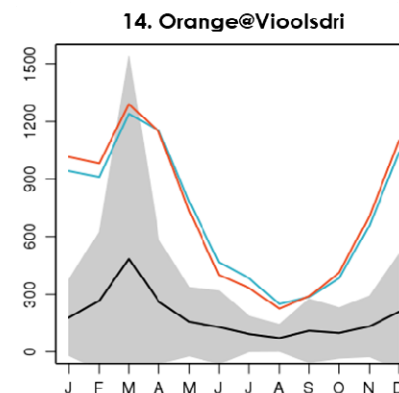
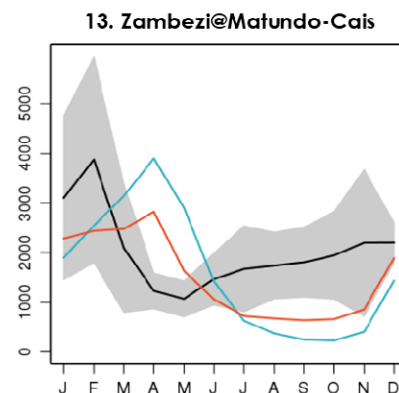
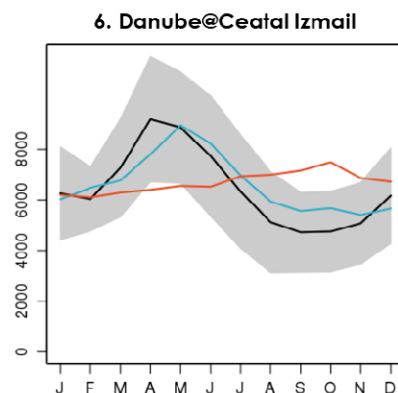
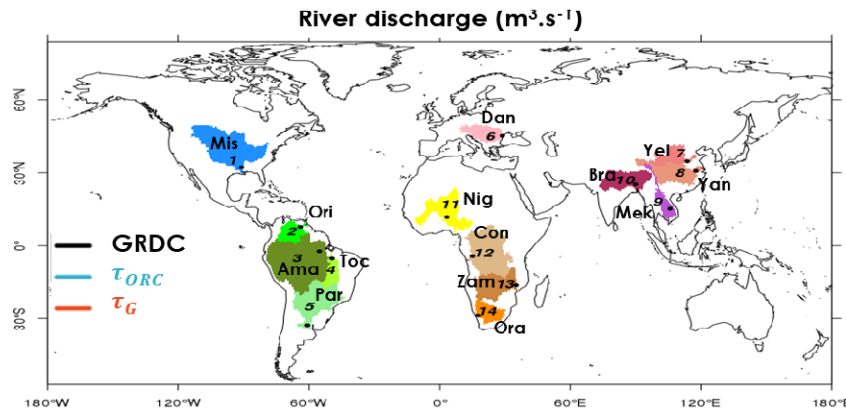
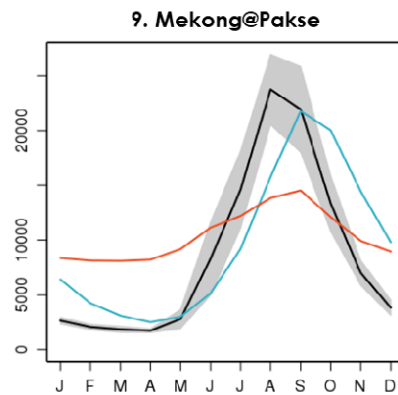
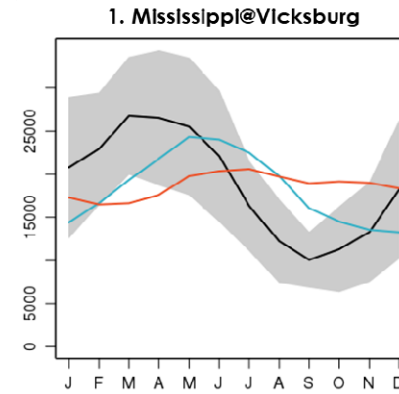
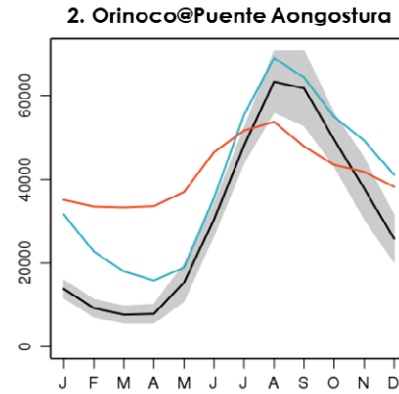
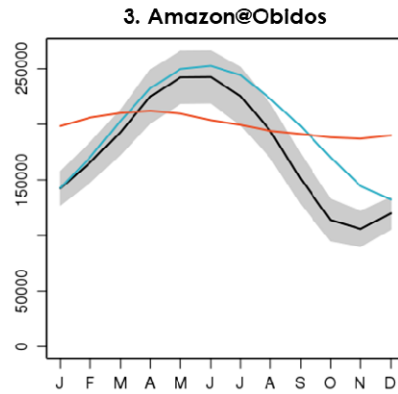
τ	Median
Streams	0.45 d
Fast/hillslopes	5 d
Slow/GW : standard	45 d
Slow/GW: new	65 y

1. Comment tenir compte des propriétés des aquifères ?



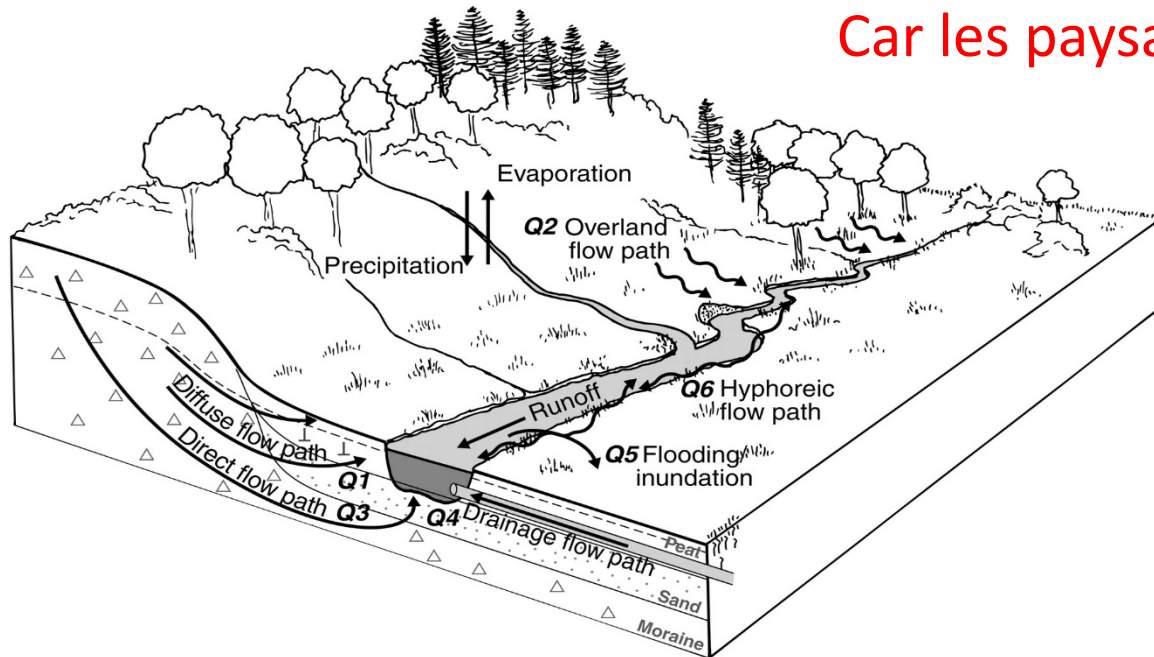
Le τ_G de Boussinesq est surestimé avec les paramètres utilisés

Schneider (2017)



2. Comment tenir compte des variations d'humidité à petite échelle ?

Car les paysages ne sont pas plats

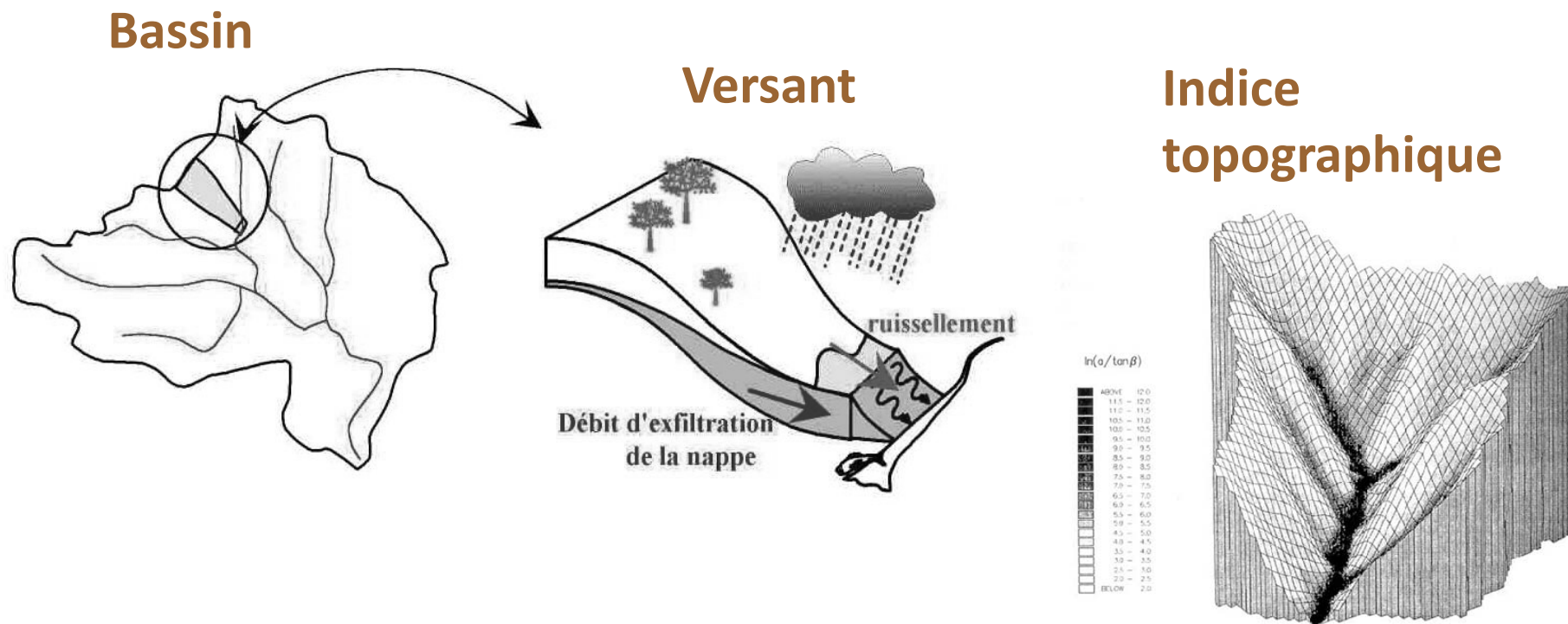


Photographs from Fan et al. 2019, WRR

La stratégie la plus classique repose sur TOPMODEL

2 types d'écoulement :

- Q_s : Ruissellement : Aires contributives variable
- Q_i : Flux « hypodermique » depuis les horizons saturés (Loi de Darcy)

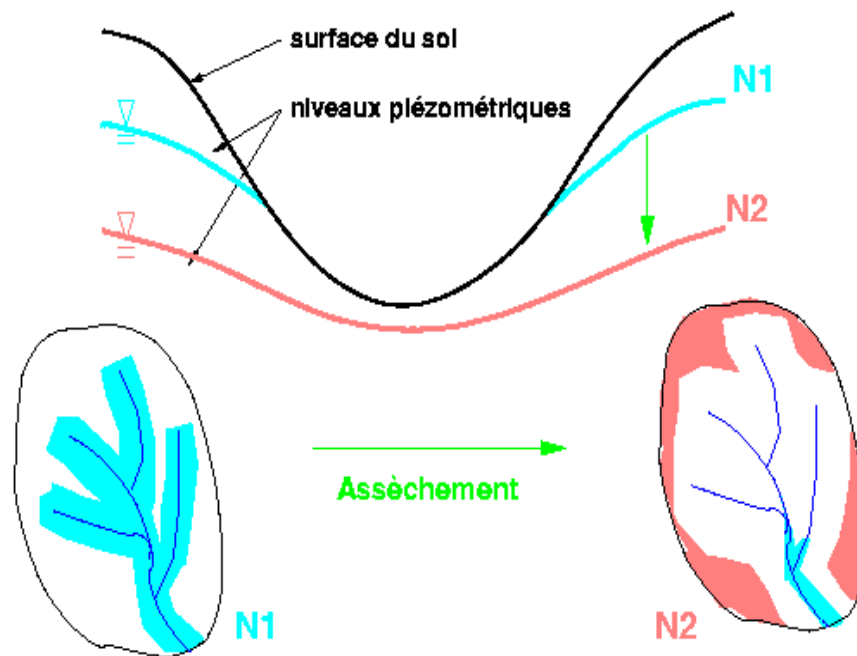


La stratégie la plus classique repose sur TOPMODEL

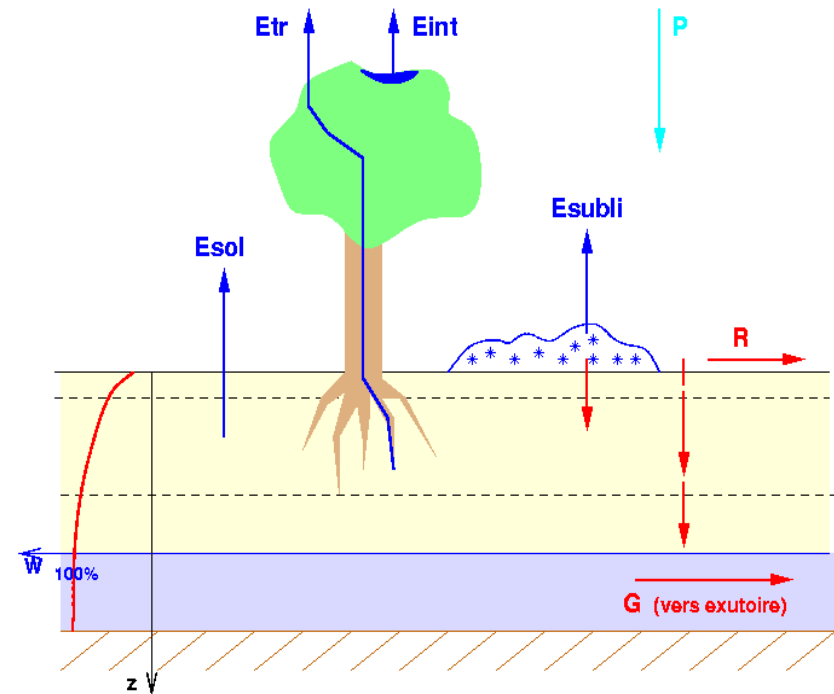
Modèle Catchment (Koster et al., 2000; Ducharne et al. 2000)

Développé pour les MC, mais unité de calcul = bassin versant élémentaire

Topographie → distribution de l'humidité du sol



3 fractions pour les bilans d'eau et d'énergie (approche TSVA)

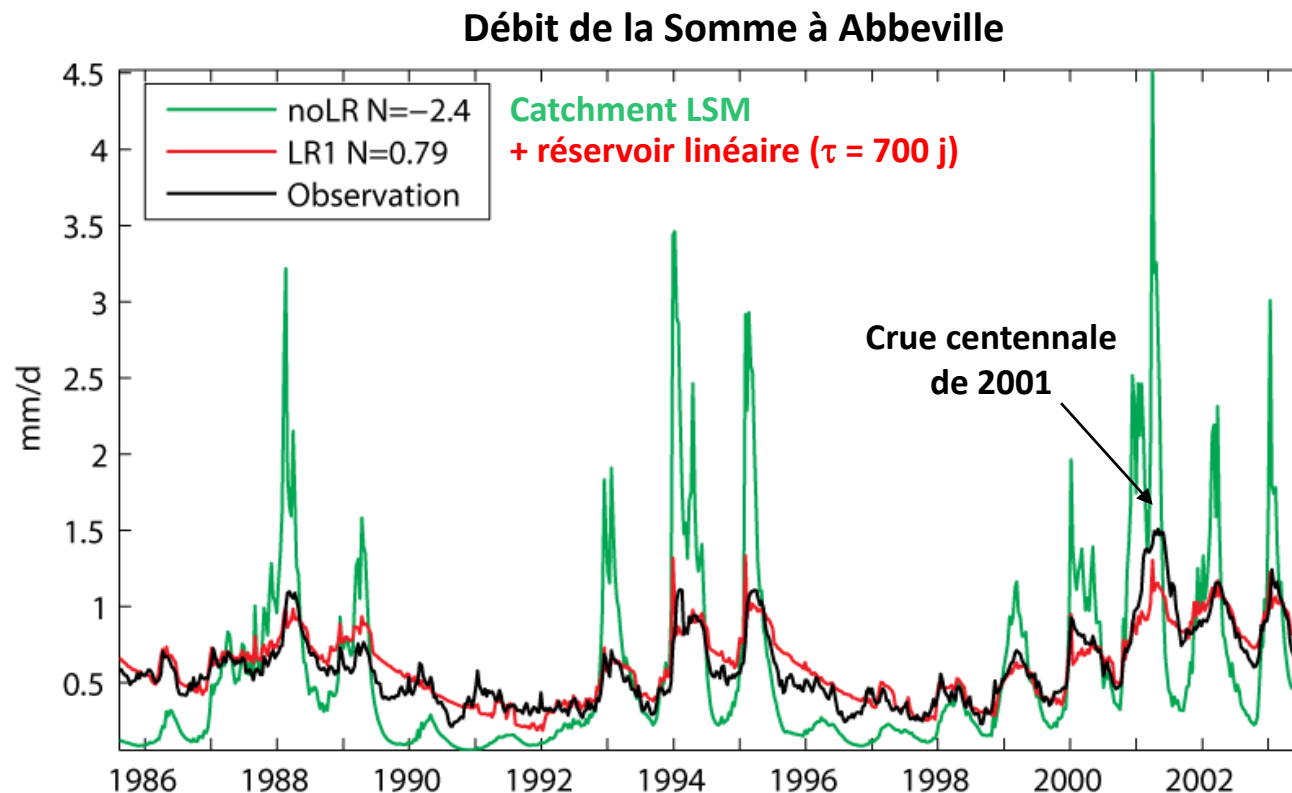


La stratégie la plus classique repose sur TOPMODEL

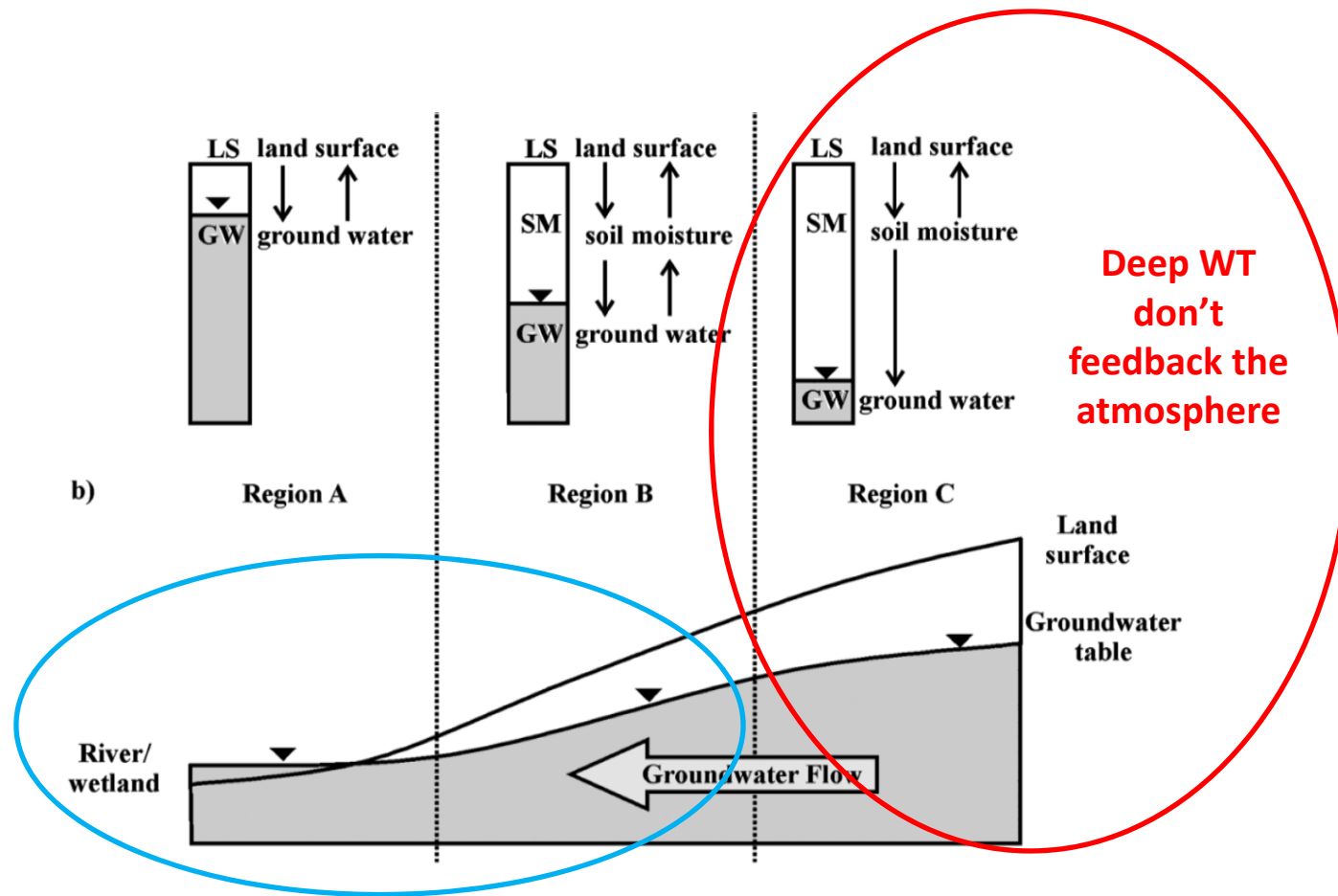
Modèle Catchment (Koster et al., 2000; Ducharne et al. 2000)

La nappe de TOPMODEL est trop superficielle dans les bassins sédimentaires :

- débits pas assez tamponnés
- remontées capillaires trop fortes en stress hydrique



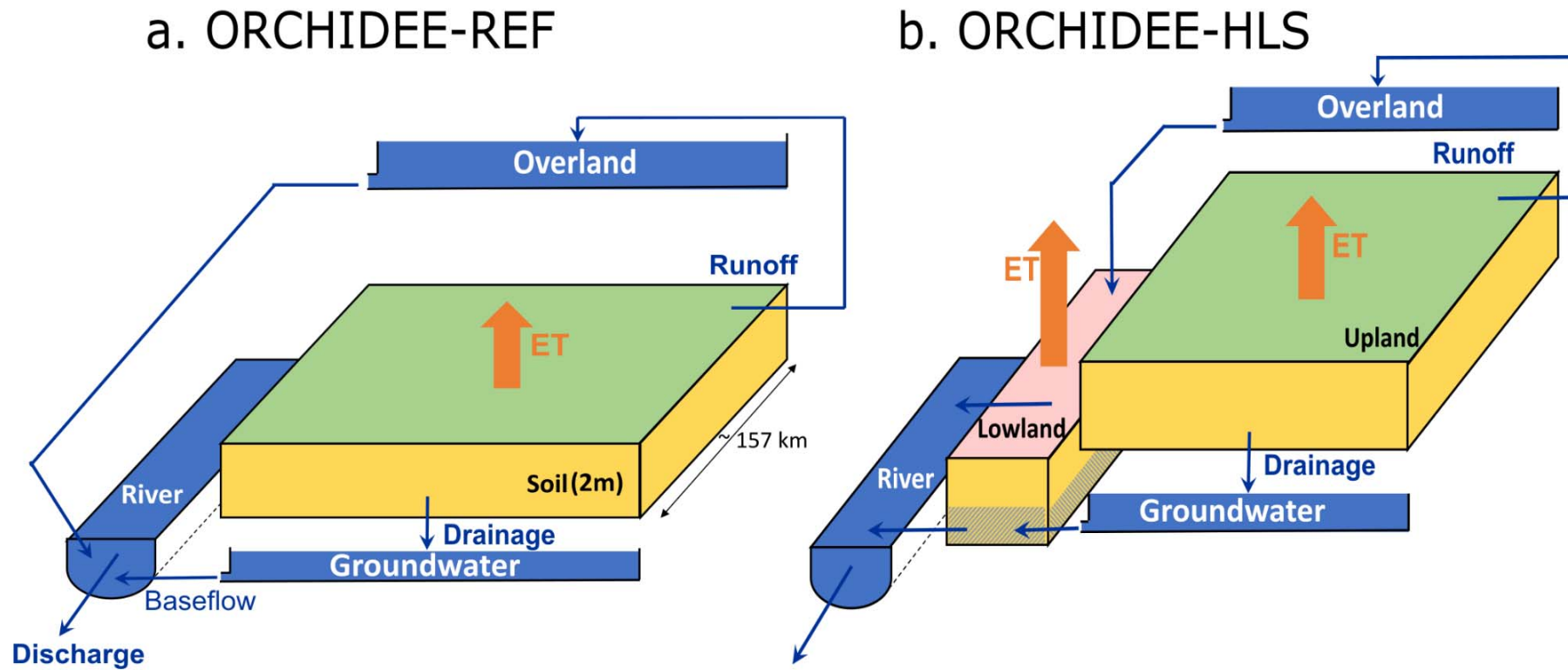
2. Comment tenir compte des variations d'humidité à petite échelle ?



Shallow WT with strong impact on atmosphere
(and specific biogeochemical processes)

2. Comment tenir compte des variations d'humidité à petite échelle ?

Introduction d'une fraction « basse » ou « lowland »



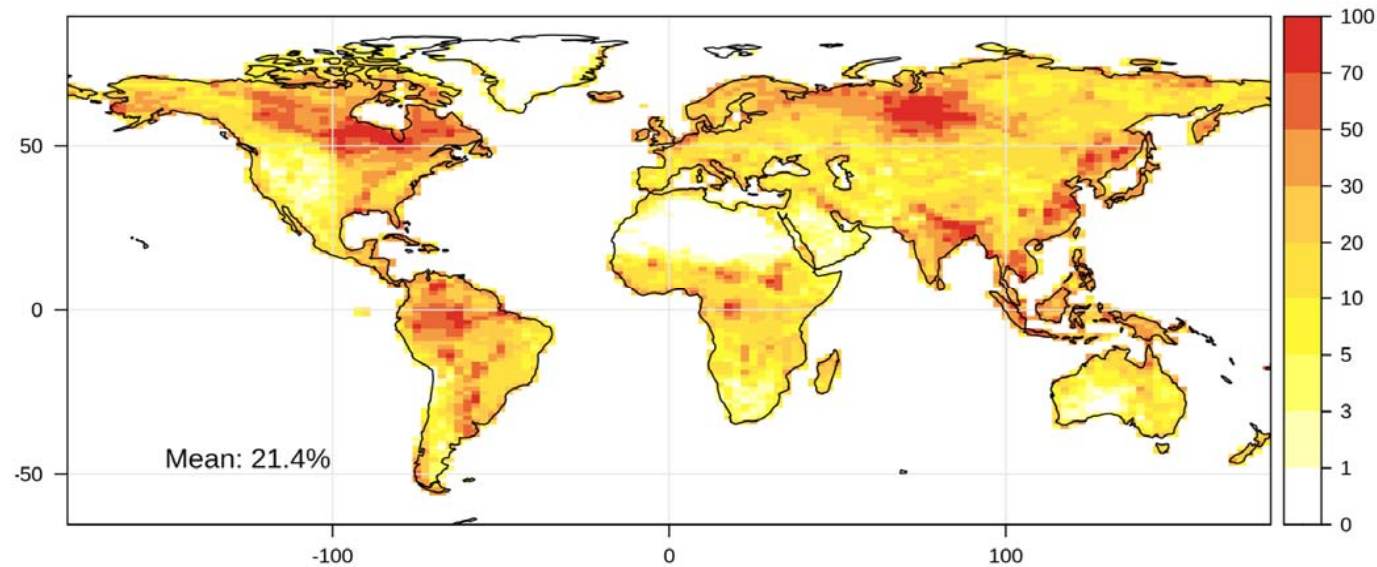
Lowland fraction prescribed from global wetland map

RFW
Regularly flooded wetland
GIEMS-D15 + JRC surface water
+ ESA CCI wetland class

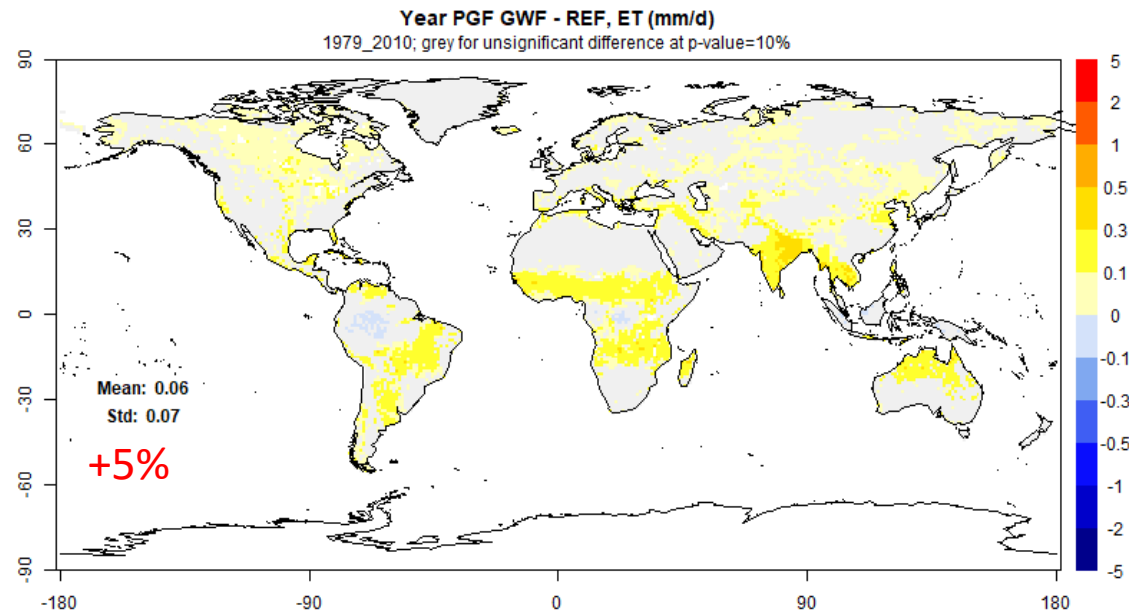
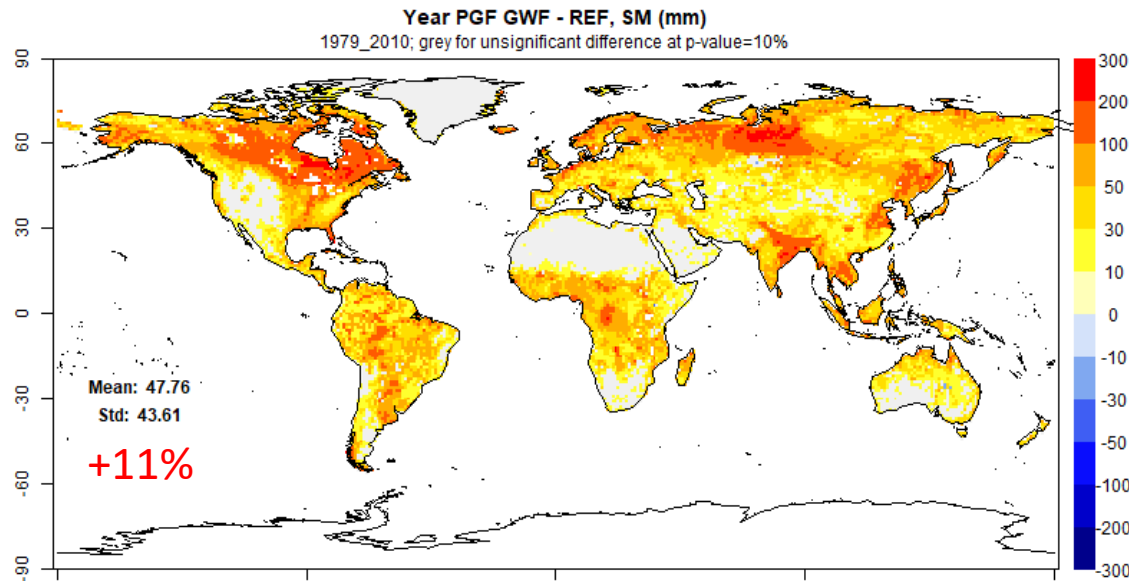
GDW
Ground-water driven wetland
Fan et al. 2013

Tootchi et al., 2019
15 arc-sec
resolution

Agrégation à la résolution d'ORCHIDEE (ici 2.5° x 1.25° d'IPSL-CM6)

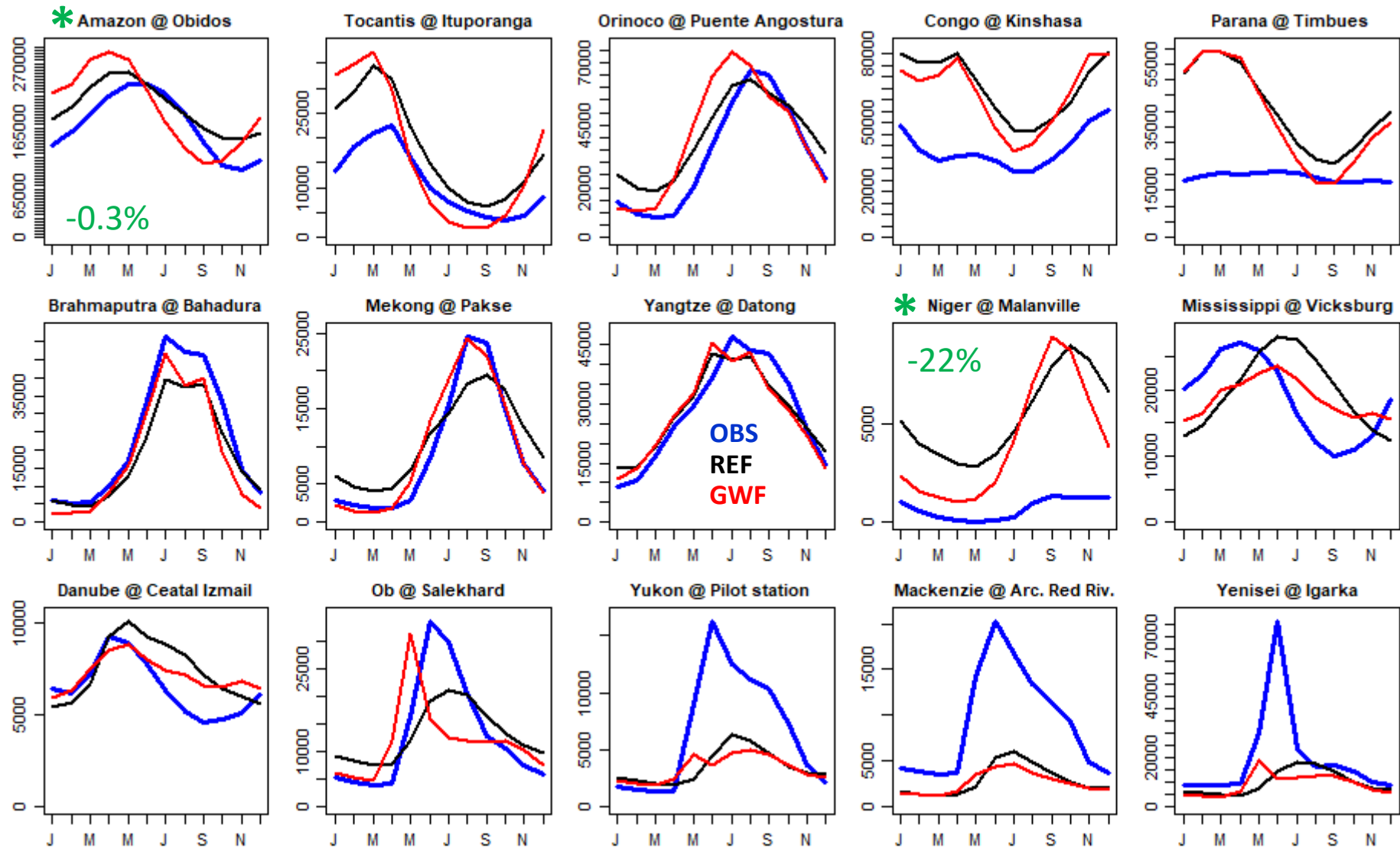


Impact on SM and ET (off-line simulations)



REF = 1.17 mm/d
GWF = 1.23 mm/d
GLEAM = 1.37 mm/d
Rodell et al. 2015
= 1.45 mm/d
(yearly means
excluding Antarctica)

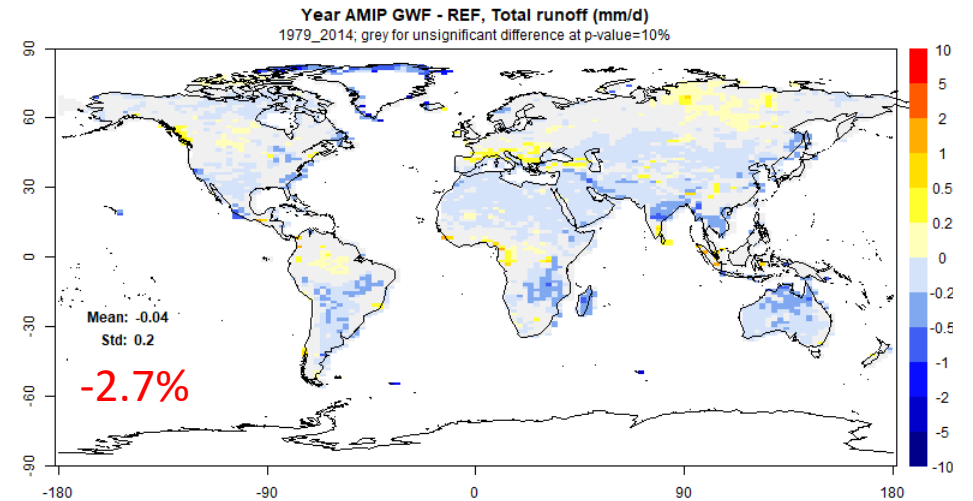
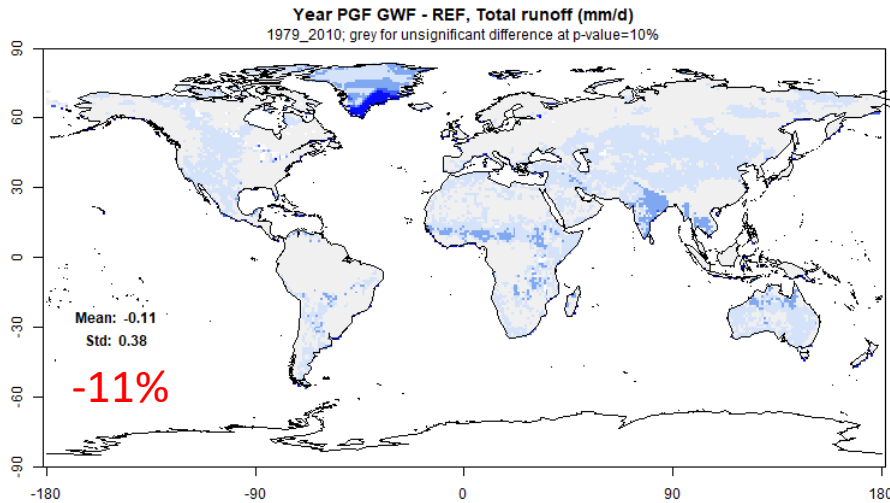
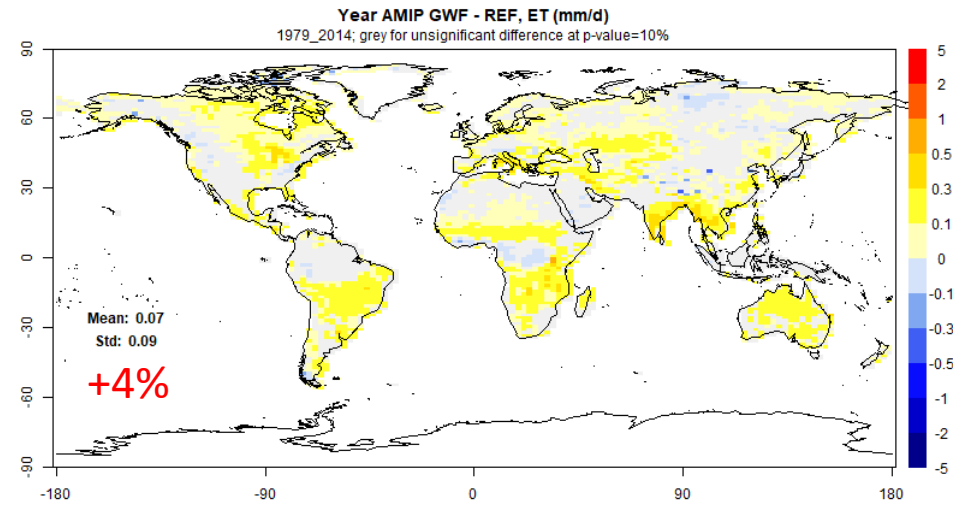
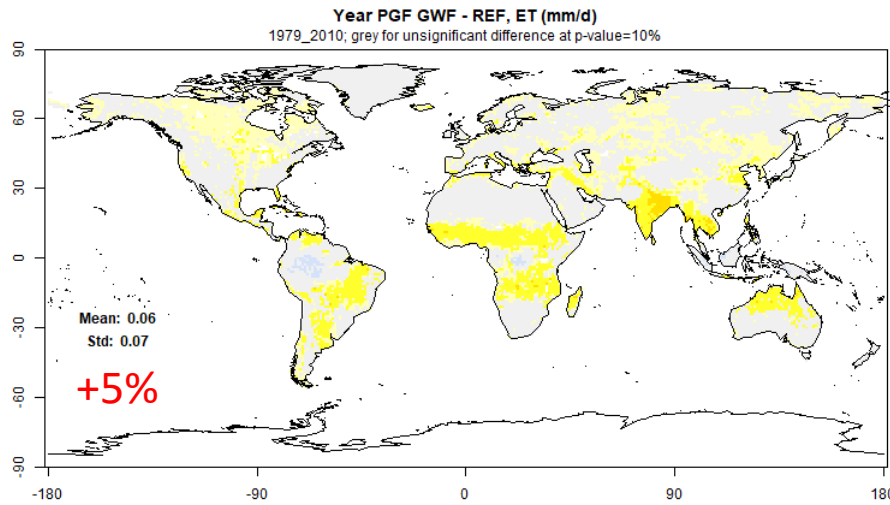
River discharge in major basins (off-line)



Land surface water budget

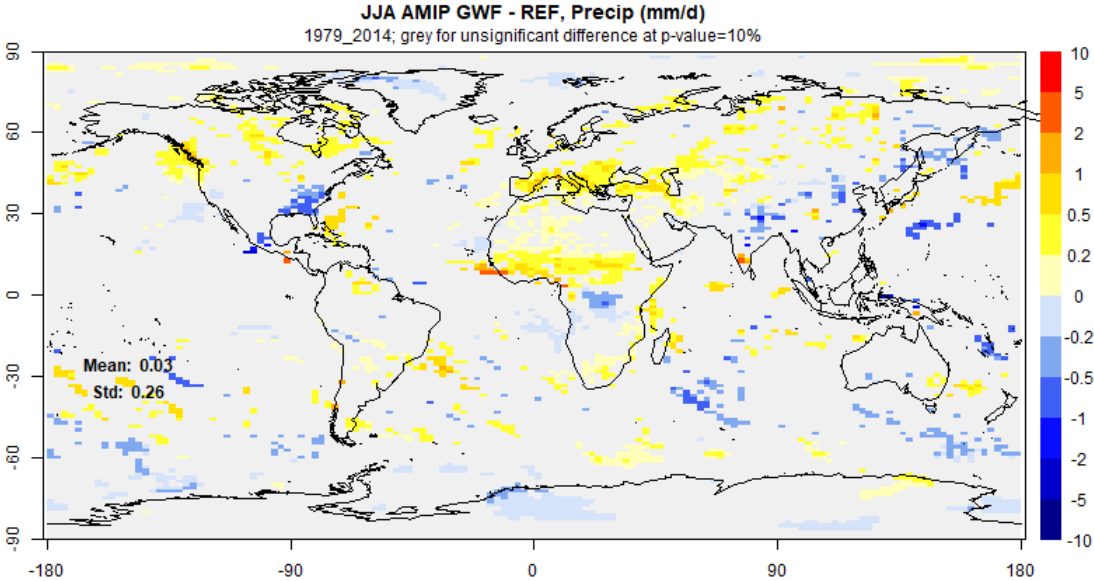
Off-line

Coupled

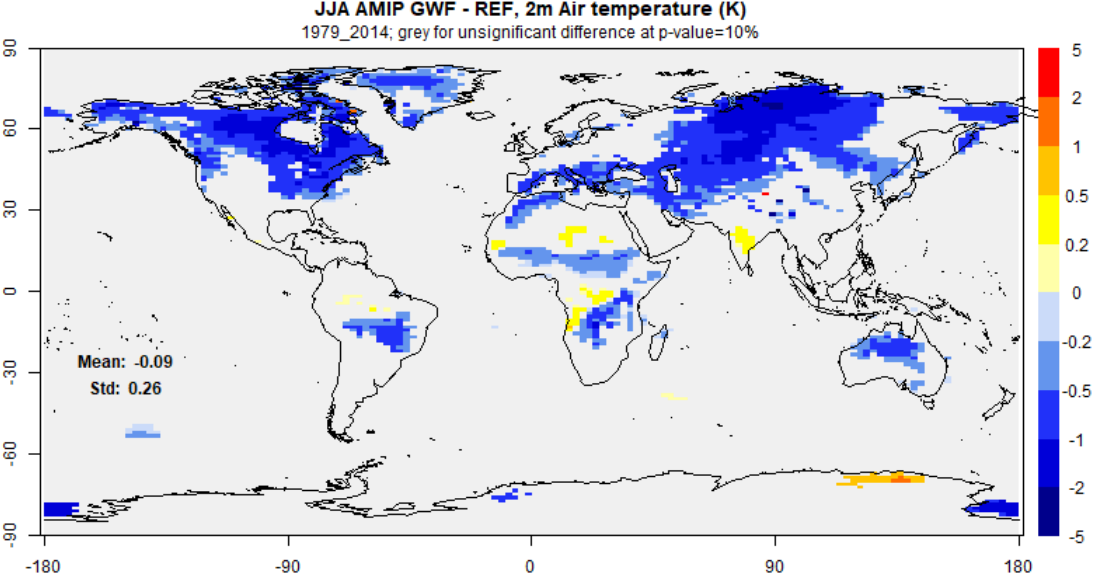


Simulated climate

NH summer
JJA



Precip
 $\Delta_{\text{glob}} = +0.7 \%$
 $\Delta_{\text{land}} = +1.3 \%$

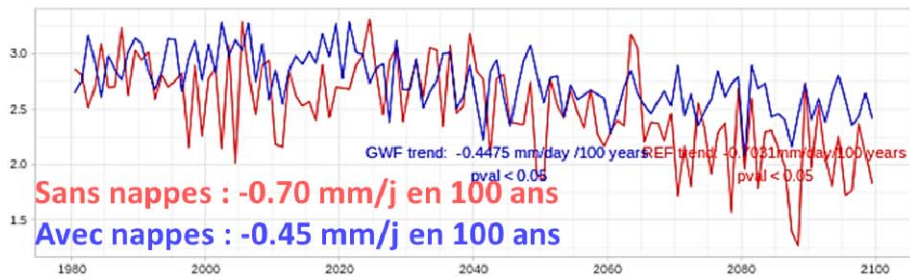


T2m
 $\Delta_{\text{glob}} = -0.09 \text{ C}$
 $\Delta_{\text{land}} = -0.27 \text{ C}$

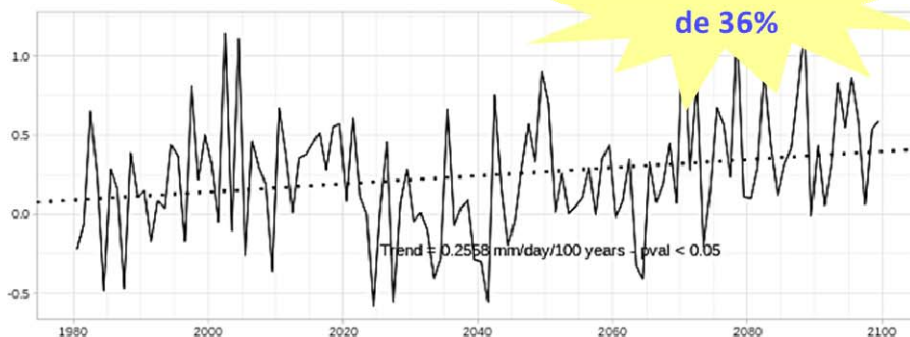
Et sous changement climatique ?

Simulations couplées LMDZOR sous scénario RCP8.5

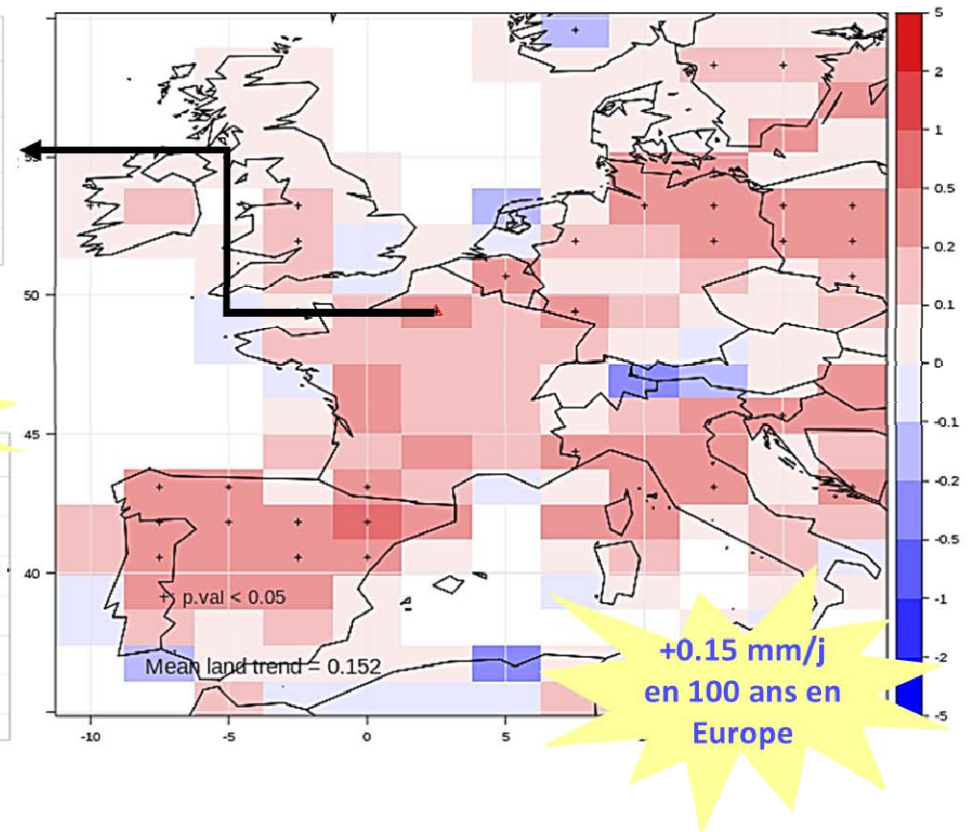
Paris, évapotranspiration (mm/j) JJA



Différence GWF-REF

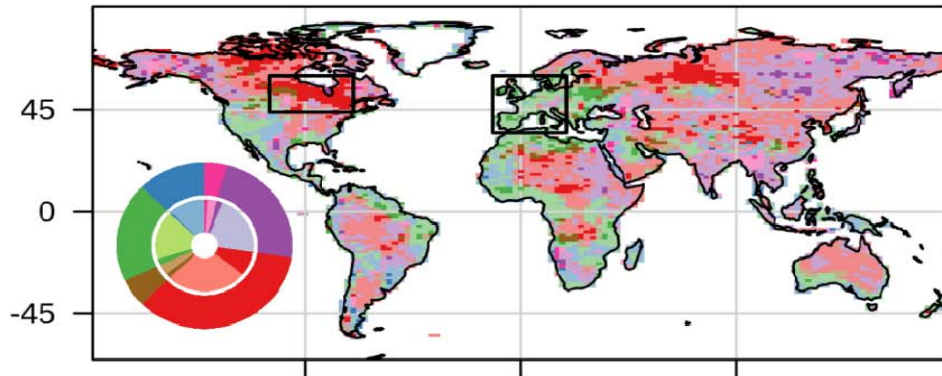


Tendance de la différence GWF-REF ET (mm/j en 100 ans) JJA

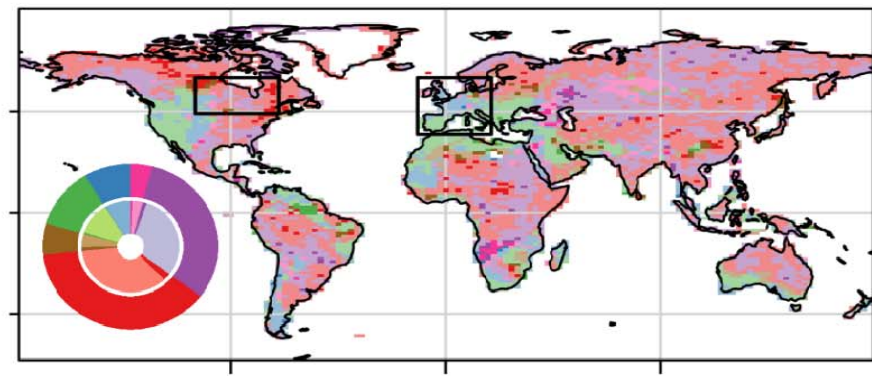


Et sous changement climatique ?

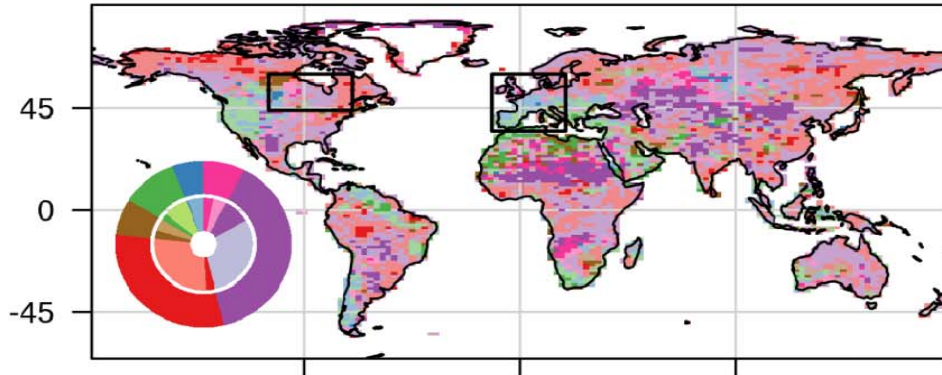
a. ET (Yearly)



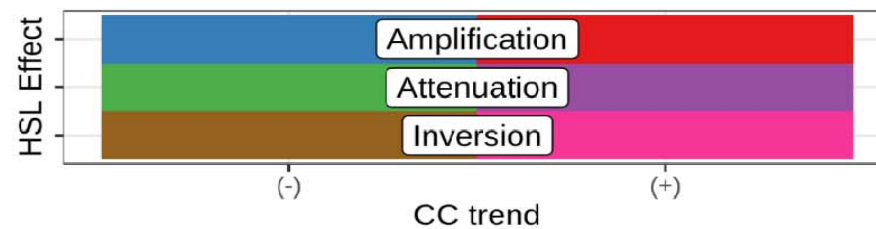
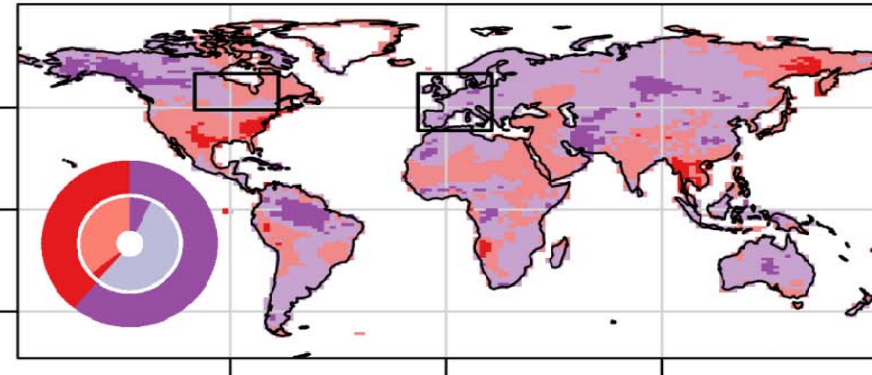
b. P (Yearly)



c. R (Yearly)

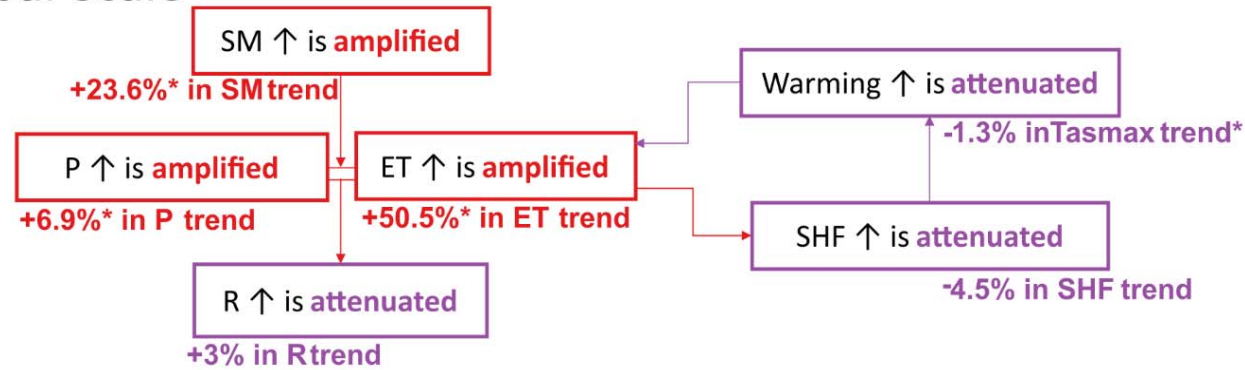


d. Tasmox (Yearly)

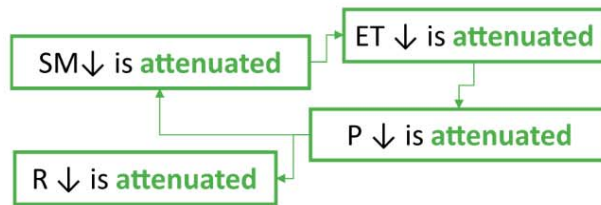


Et sous changement climatique ?

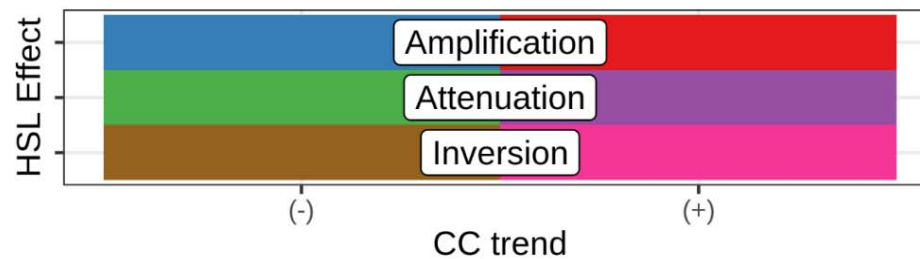
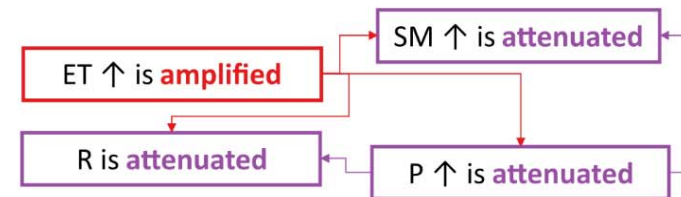
At global scale



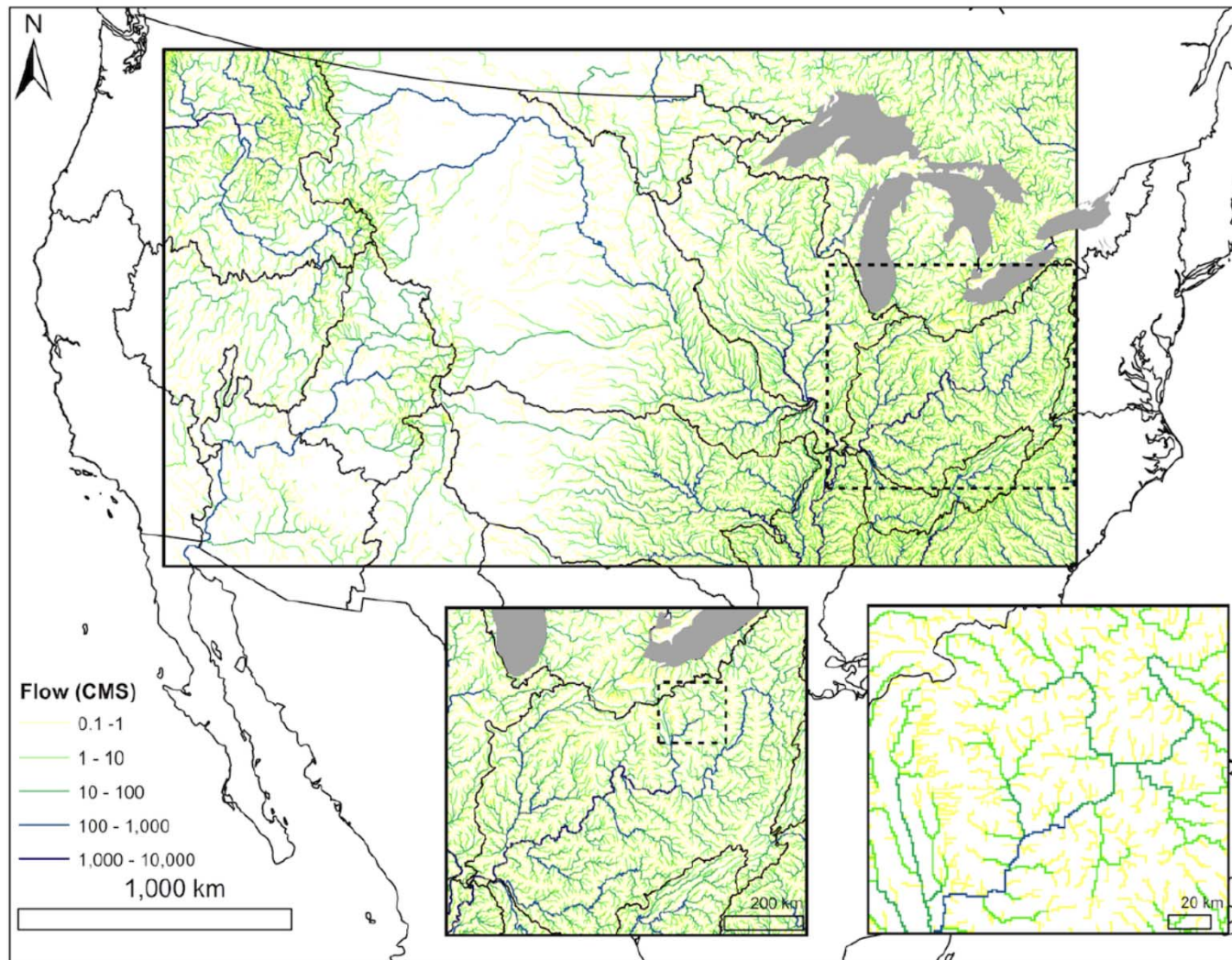
In areas where P-



In areas where P+



Ces processus de versant peuvent aussi être représentés explicitement



**Condon & Maxwell,
2015, GMD**

Parflow-CLM at 1km

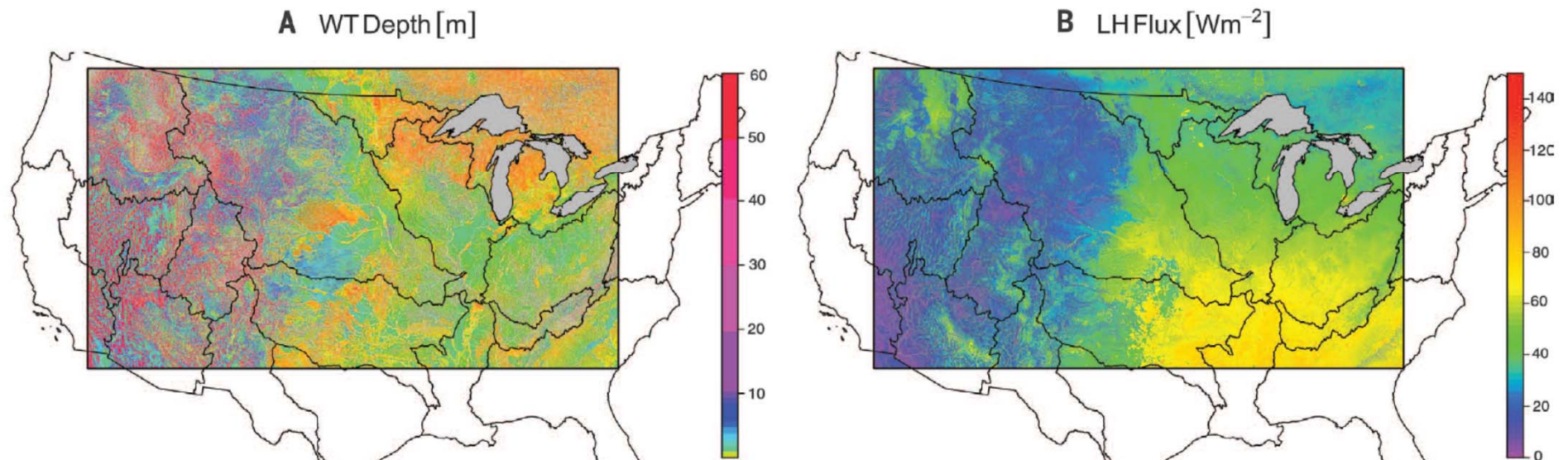
Figure 3. Map of simulated surface flow ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) over the CONUS domain with two insets zooming into the Ohio River basin. Colors represent surface flow in log scale and line widths vary slightly with flow for the first two panels.

Connections between groundwater flow and transpiration partitioning

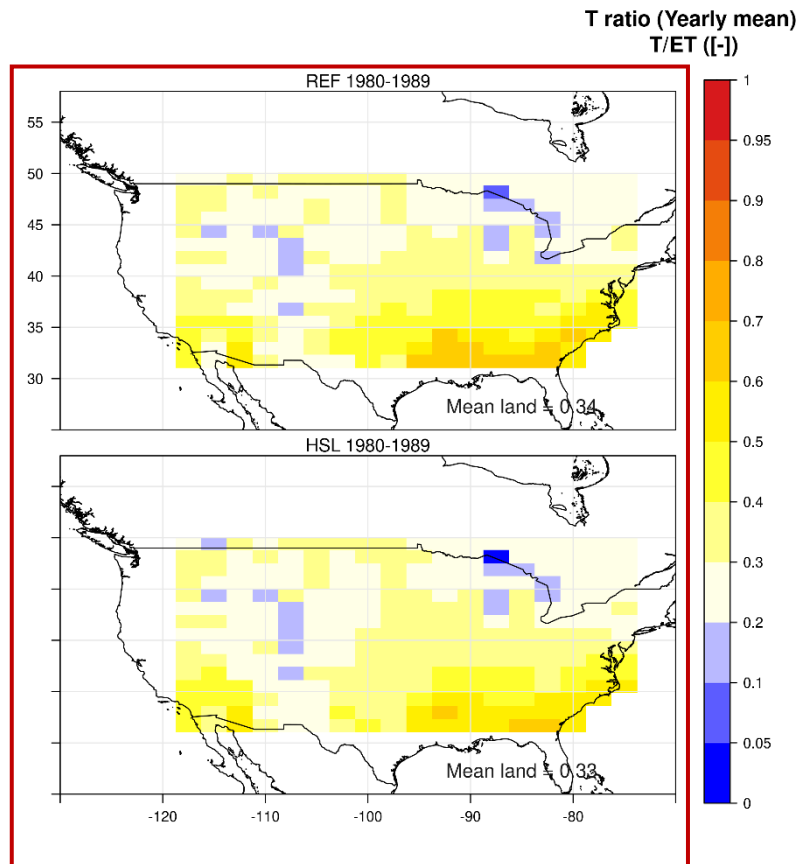
Science 2016

Reed M. Maxwell^{1*} and Laura E. Condon²

Understanding freshwater fluxes at continental scales will help us better predict hydrologic response and manage our terrestrial water resources. The partitioning of evapotranspiration into bare soil evaporation and plant transpiration remains a key uncertainty in the terrestrial water balance. We used integrated hydrologic simulations that couple vegetation and land-energy processes with surface and subsurface hydrology to study transpiration partitioning at the continental scale. Both latent heat flux and partitioning are connected to water table depth, and including lateral groundwater flow in the model increases transpiration partitioning from 47 ± 13 to $62 \pm 12\%$. This suggests that lateral groundwater flow, which is generally simplified or excluded in Earth system models, may provide a missing link for reconciling observations and global models of terrestrial water fluxes.

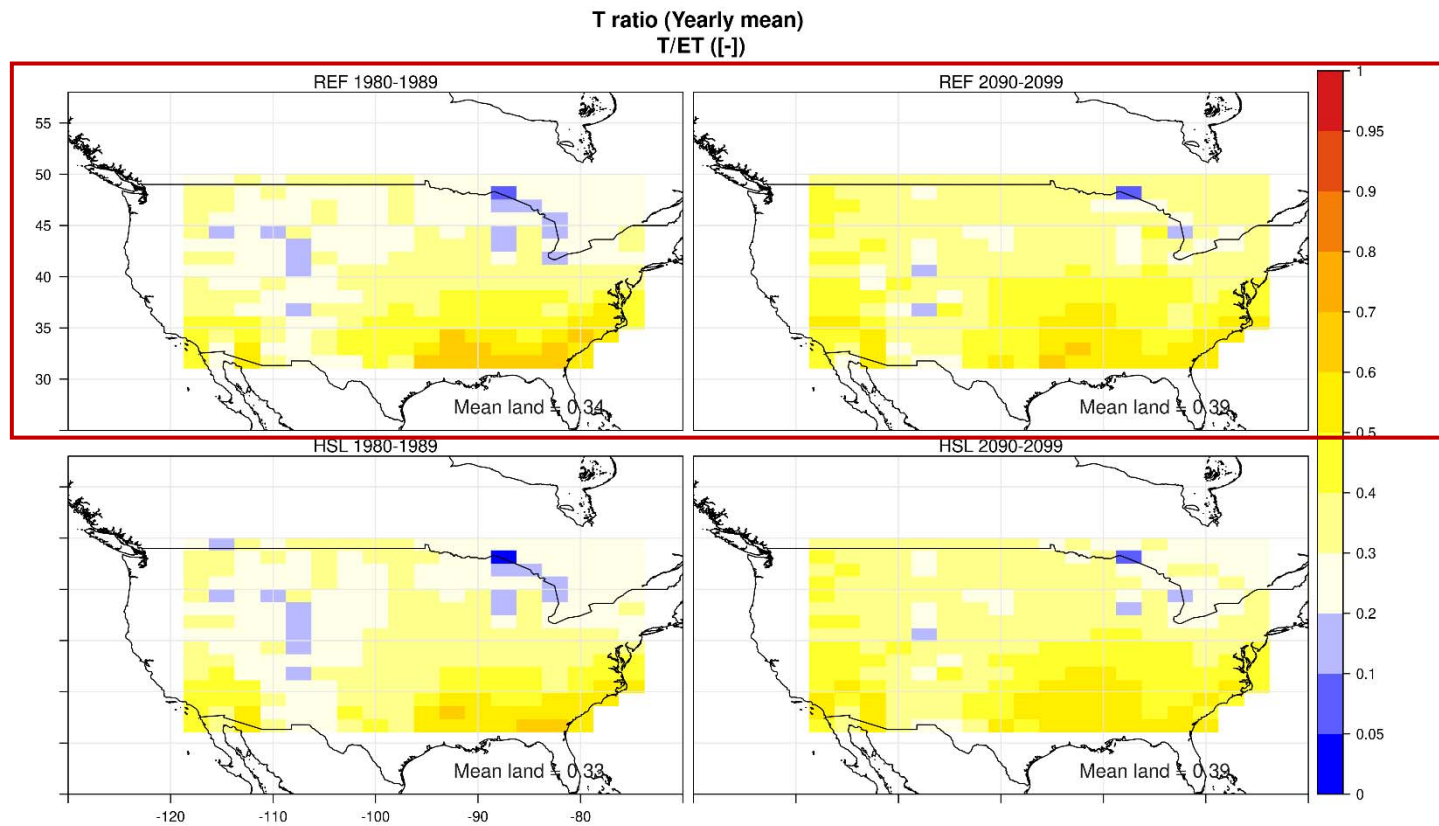


Comparaison avec ORCHIDEE



T/ET ↘ avec hillslope flow
Très faible ; T et ET ne changent
presque pas en moyenne

Comparaison avec ORCHIDEE



**T/ET \nearrow avec CC
(RCP8.5)
P \nearrow , T \nearrow , mais E \searrow
Chgts faibles et
variables
spatialement**

Evolutions d'ORCHIDEE vers la haute résolution

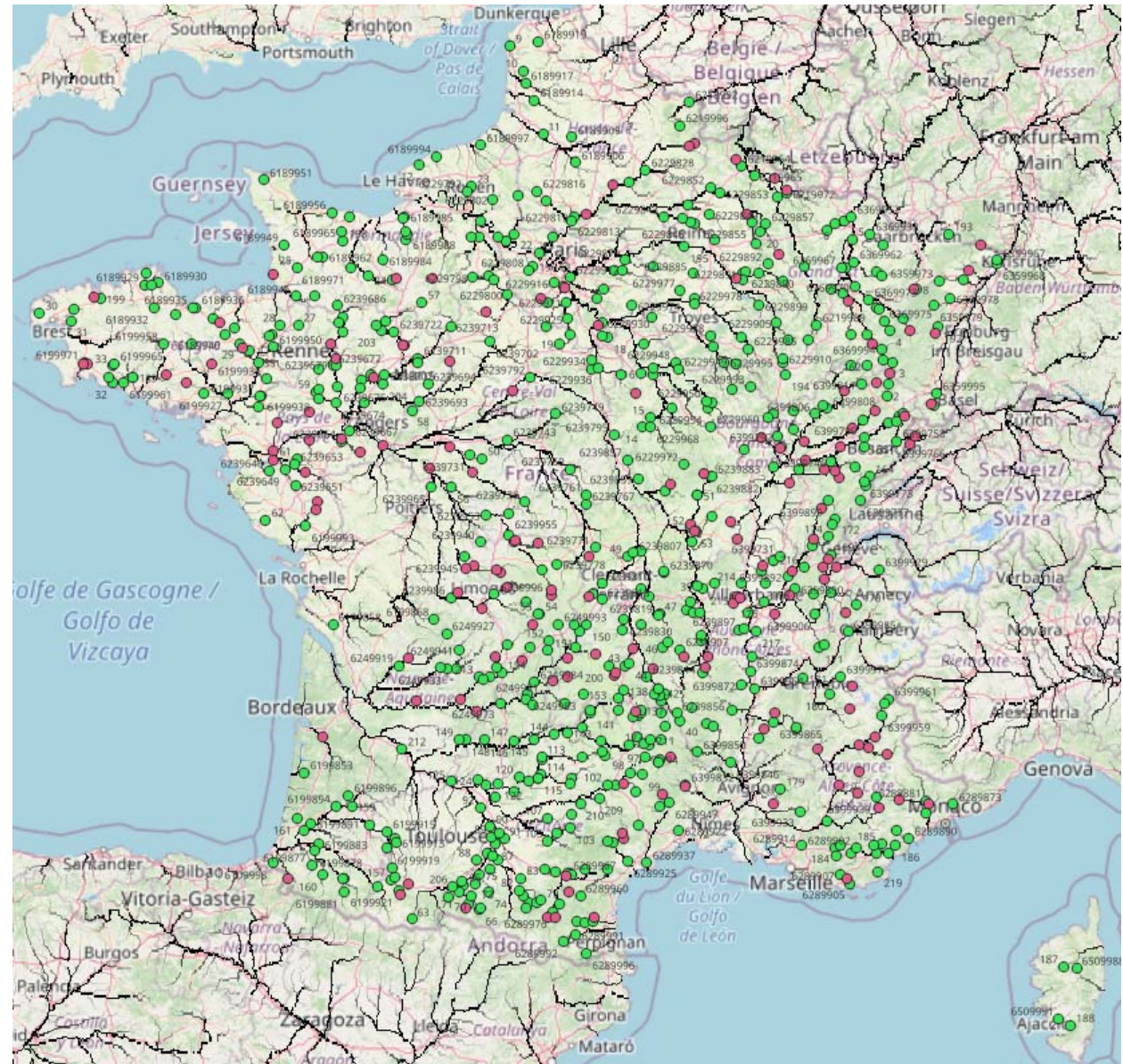
Config France for Explore 2

- **SAFRAN forcings (8 km)**
- Hourly forcing, daily output
- **DEM MERIT at 2 km**
- Period 2000-2010

Stations where river discharge is simulated:

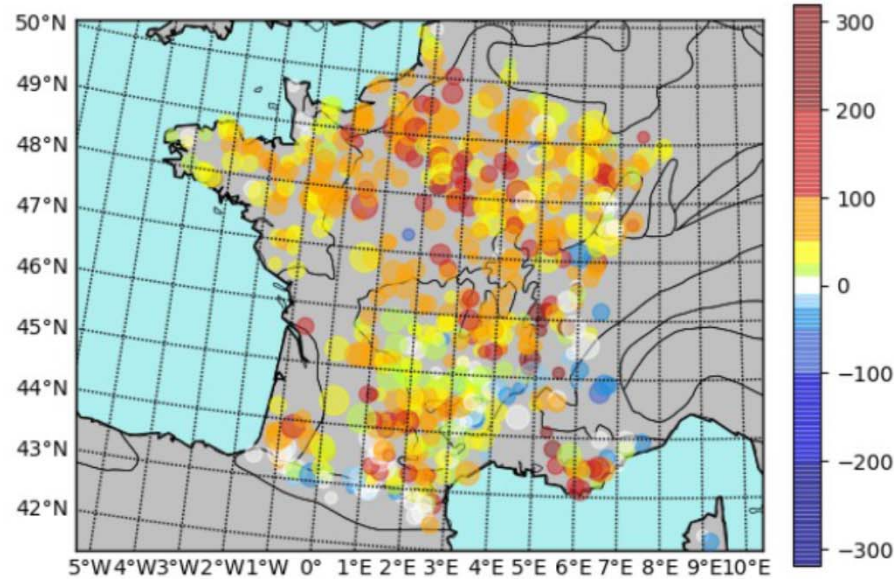
- **612** (out of 771) **with small water usage**
- **4000** stations to be used for Explore2

No irrigation activated for the moment

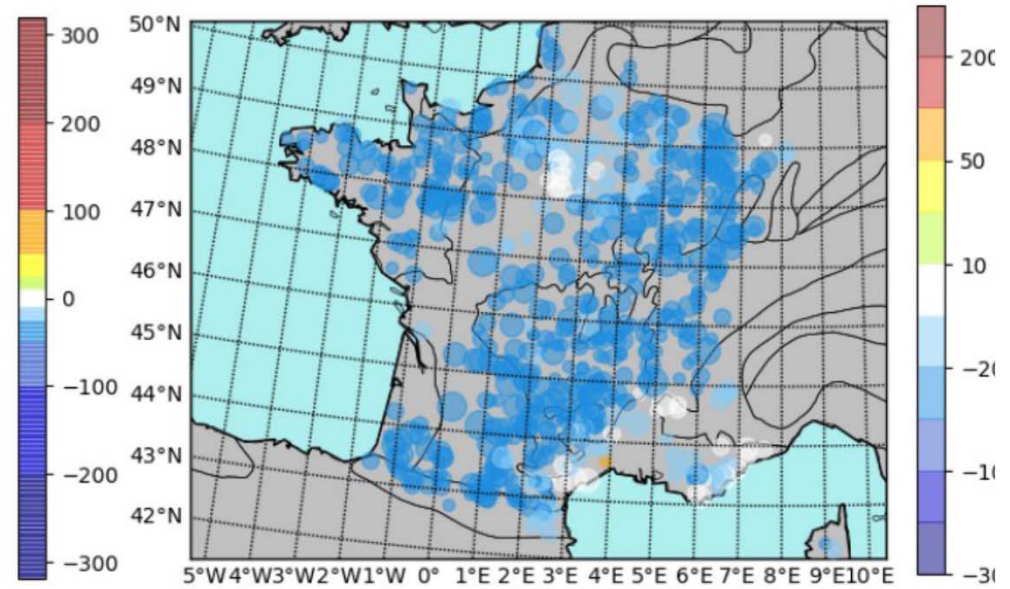


Bias vs observation (%)

Discharge vs Banque Hydro
(stations peu influencée)



ET vs FLUXCOM
(average bias in upstream
catchment of each station)



Les biais sont très importants et une grande part ne tient pas à la résolution du modèle.

Pistes : Ks, stress hydrique/FC, z0, albedo, irrigation

Aucun modèle n'est parfait

Synthèse des approches de modélisation hydrogéologique pour la grande échelle
Modifié d'après Gleeson et al., 2021, GMD

GW flow geometry	No GW flow		Local GW flow (1D from grid-cell to embedded streams)			Gradient-based GW flow (2D among grid-cells)			3D GW flow		
			1-way		2-way	1-way		2-way			
GW-Surface coupling	Yes		No		Yes		No			Yes	
Surface-Atmosphere coupling	Yes		No		Yes		No			Yes	
Example model	JULES	ORCHIDEE	WaterGAP2 PCR-GLOB -WB	LM3	CLM5 TOPLATS Catchment	PCR-GLOB- WB coupled to MODFLOW	WaterGAP2 -G3M	LEAF hydro	Hydrogeo Sphere Parflow-CLM	ISBA-CTRIP	
Land surface boundary condition (recharge away from streams)	Free-drainage	Recharge = P-R-ET			Recharge depends on WT head and capillary fluxes	one-way coupling with recharge from PCR GLOB-WB	currently uncoupled with recharge from WaterGAP2	recharge derived from WGM	directly represented	Recharge depends on WT head and capillary fluxes	

- Le couplage avec l'atmosphère reste une limite forte (bilan d'énergie explicite + CPU pour atmosphère)
- ORCHIDEE en cours de couplage avec modèle d'aquifère 2D (CaWaQs) dans bassin de la Seine, offline
- **On reste loin des « digital twins »**

A digital twin of Earth for the green transition

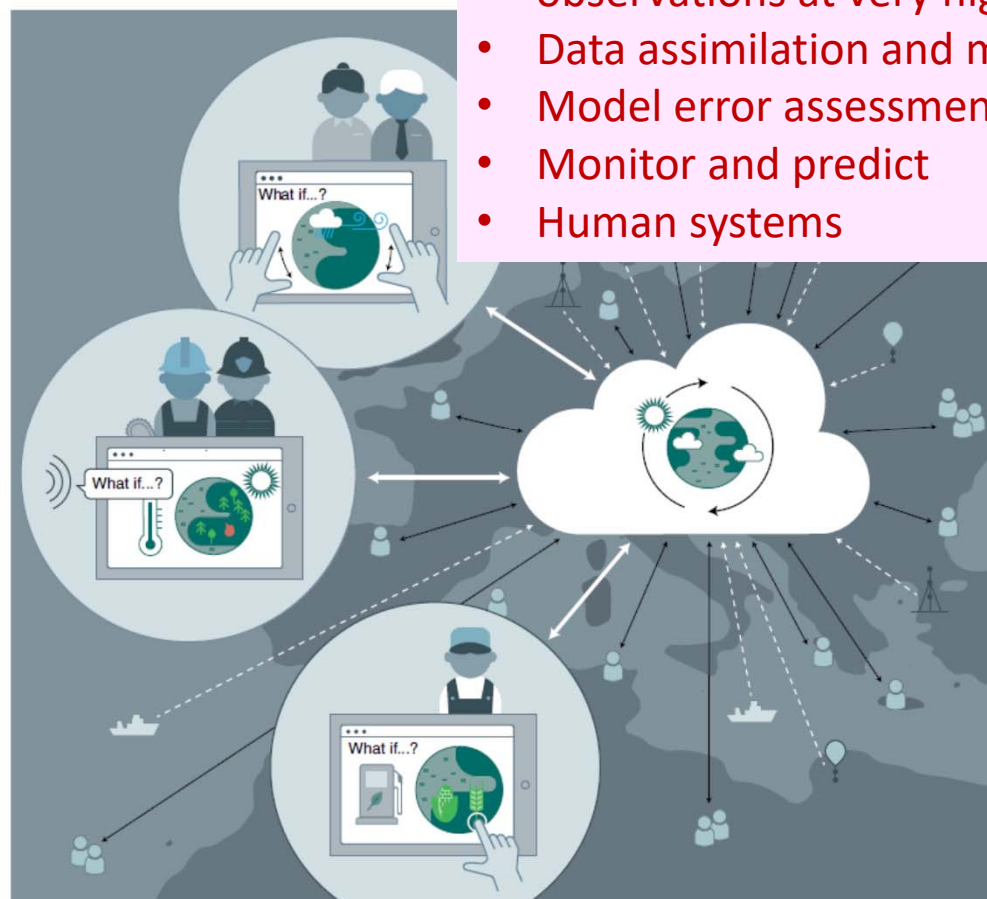
For its green transition, the EU plans to fund the development of digital twins of Earth. For these twins to be more than big data atlases, they must create a qualitatively new Earth system simulation and observation capability using a methodological framework responsible for exceptional advances in numerical weather prediction.

Peter Bauer, Bjorn Stevens and Wilco Hazeleger

The European Union (EU) intends to become climate neutral by 2050, and the set of policies designed to bring about this green transition — the European Green Deal — was announced in December 2019 (ref. ¹). Accompanied by €1 trillion of planned investment, Green Deal policies aim to help the world's second-largest economy sustainably produce energy, develop carbon-neutral fuels and advance circular products in energy-intensive industrial sectors with zero waste and zero pollution.

A key element of the Green Deal is its dependence on the 'digital transformation' — an openly accessible and interoperable European dataspace as a central hub for informed decision making. The EU identified two landmark actions to support the necessary information systems: GreenData4All² and Destination Earth³. Whereas GreenData4All will develop the European approach to discover, manage and exploit geospatial information, Destination Earth aims to construct highly accurate models, or 'digital twins', of the Earth to monitor and predict environmental change and human impact in support of sustainable development. Aligned with the new Digital Europe funding programme⁴, Destination Earth is expected to start in 2021, and the first,

- Combination of simulations and observations at very high resolution
- Data assimilation and machine learning
- Model error assessment and correction
- Monitor and predict
- Human systems



Conclusions

- La très haute résolution est cruciale pour certains processus : montagne, inondations, urbain...
- Elle semble un peu abusivement mise en avant comme condition essentielle de l'appropriation d'un modèle par les usagers/gestionnaires locaux
- A mon avis, la qualité est plus importante que la résolution (mais qualité difficile à définir pour systèmes multi-variés et dynamiques)
- De ce point de vue, ORCHIDEE est encore très largement perfectible, avec un vrai déficit d'évaluation quantitative
- La multiplicité des processus impliqués dans un même modèle reste une difficulté majeure, de même que la fréquente inadéquation d'échelle entre variables simulées et observées
- **L'observation de la ZC est fondamentale pour identifier les processus dominants selon les contextes (typologies)**