



IRD
GET - Toulouse
Université de Toulouse
INAMHI Quito
SENAMHI Lima
UNALM Lima

SENAMHI La Paz
UMSA La Paz
ANA Brasília
UnB Brasília
UFAM Manaus



Bilan d'altération du bassin de l'Amazone : sources et dynamique temporelle des Andes à l'océan Atlantique

Jean-Sébastien Moquet

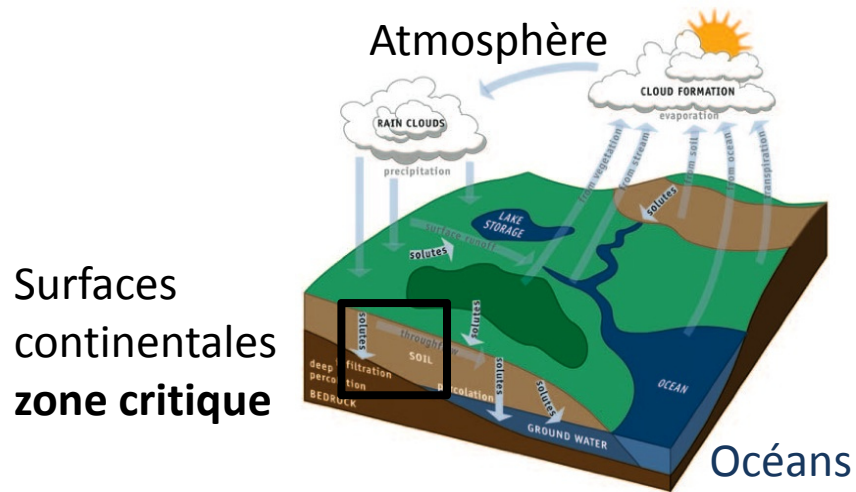
Post-doctorant Universidade de Brasília, Brésil
Laboratoire GET-OMP Toulouse, France

js.moquet@gmail.com

Rio Huallaga à Chazuta - Pérou

Introduction

Etude de la zone critique (Earth's critical zone)



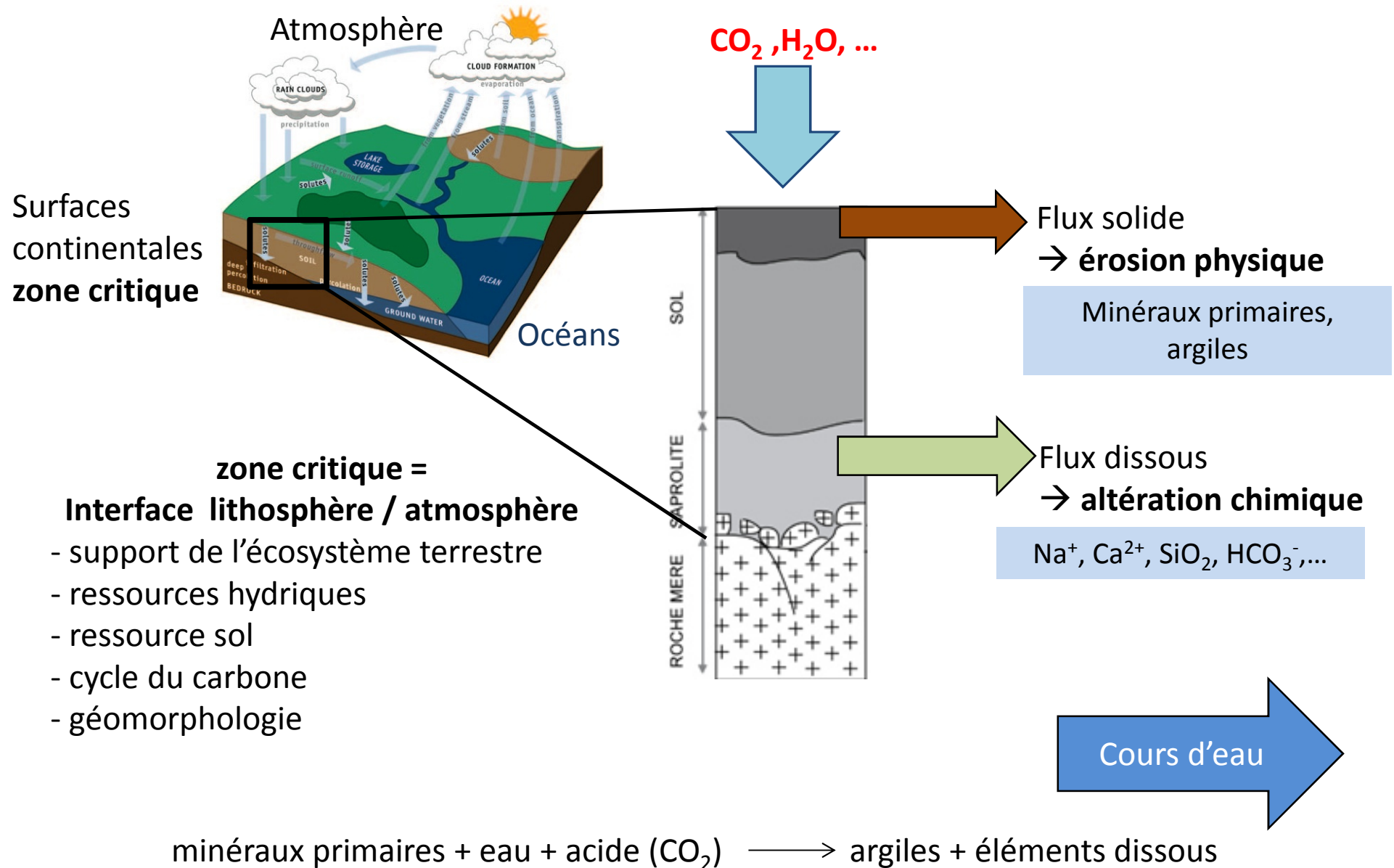
zone critique =

Interface lithosphère / atmosphère

- support de l'écosystème terrestre
- ressources hydriques
- ressource sol
- cycle du carbone
- géomorphologie

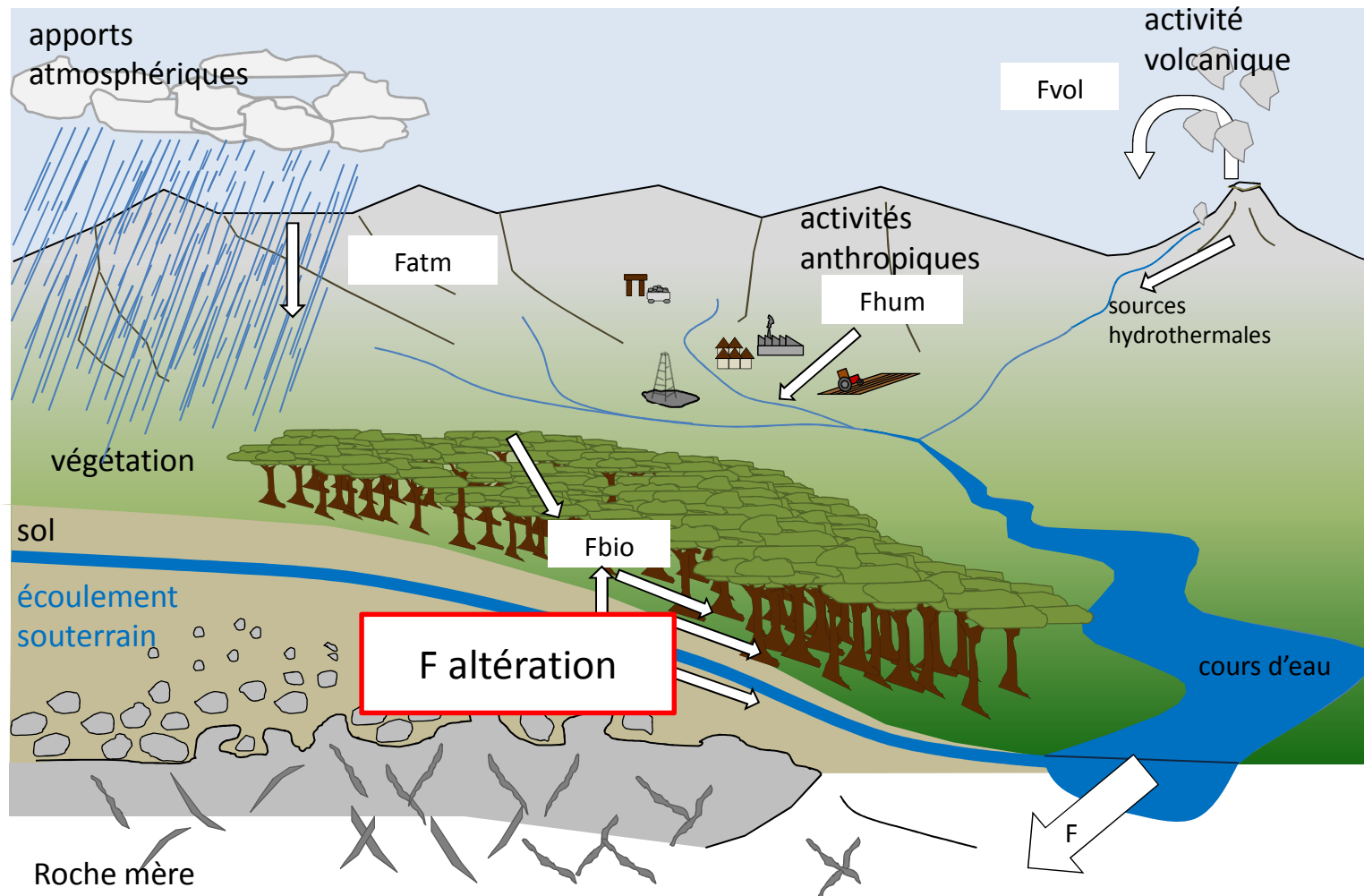
Introduction

Etude de la zone critique (Earth's critical zone)



Introduction

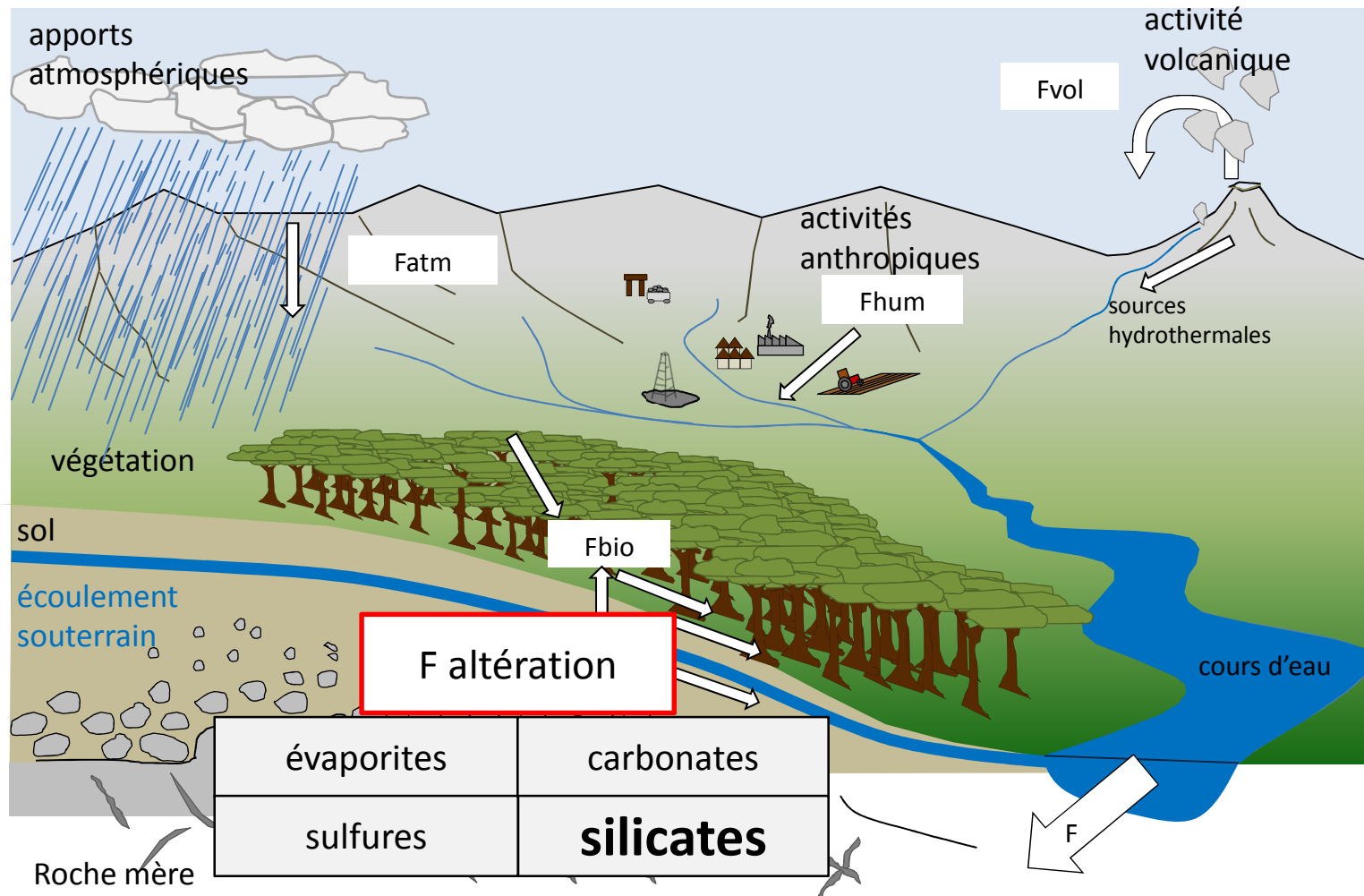
Les sources du matériel dissous



$$F_{\text{rivière}} = F_{\text{atm}} + F_{\text{hum}} + F_{\text{vol}} + F_{\text{bio}} + F_{\text{altération}}$$

Introduction

Les sources du matériel dissous



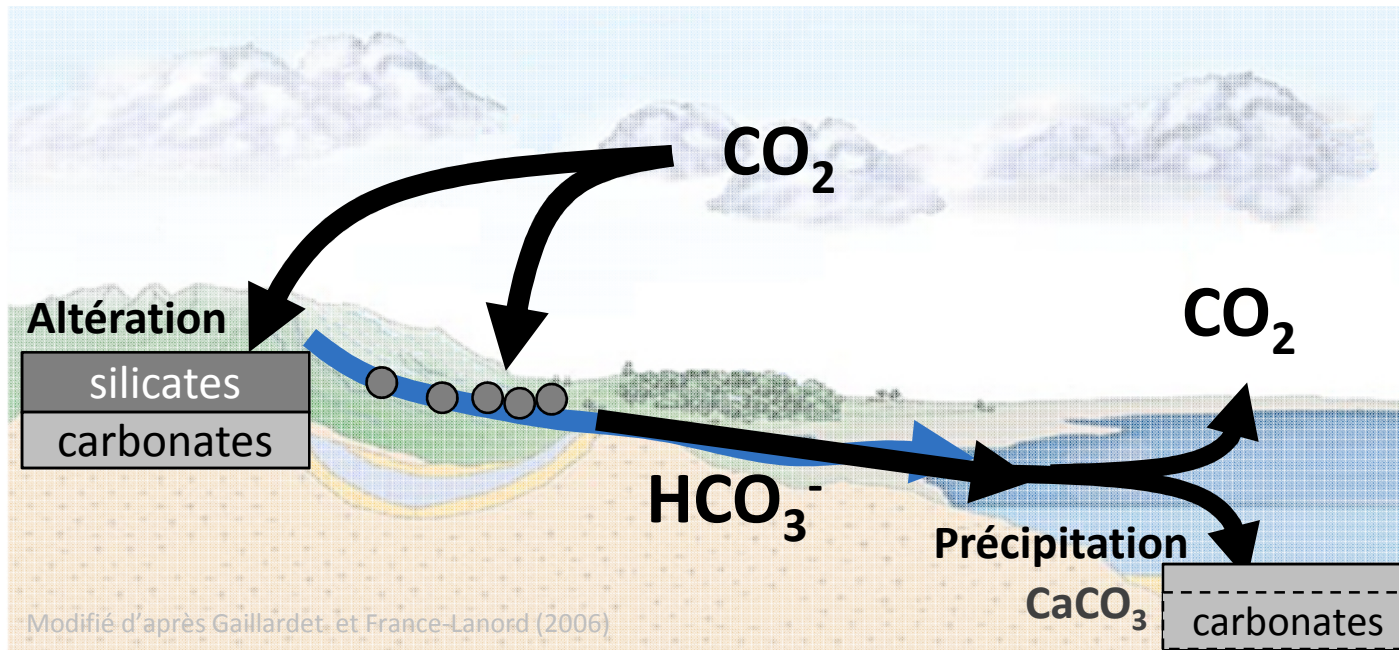
$$F_{\text{rivière}} = F_{\text{atm}} + F_{\text{hum}} + F_{\text{vol}} + F_{\text{bio}} + F_{\text{altération}}$$

Introduction

Altération des silicates = puits de CO₂ long terme

Silicates : $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{Ca} + \underline{2}\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \frac{1}{2} \text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \underline{1} \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Carbonates : $\text{CaCO}_3 + \underline{1}\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$



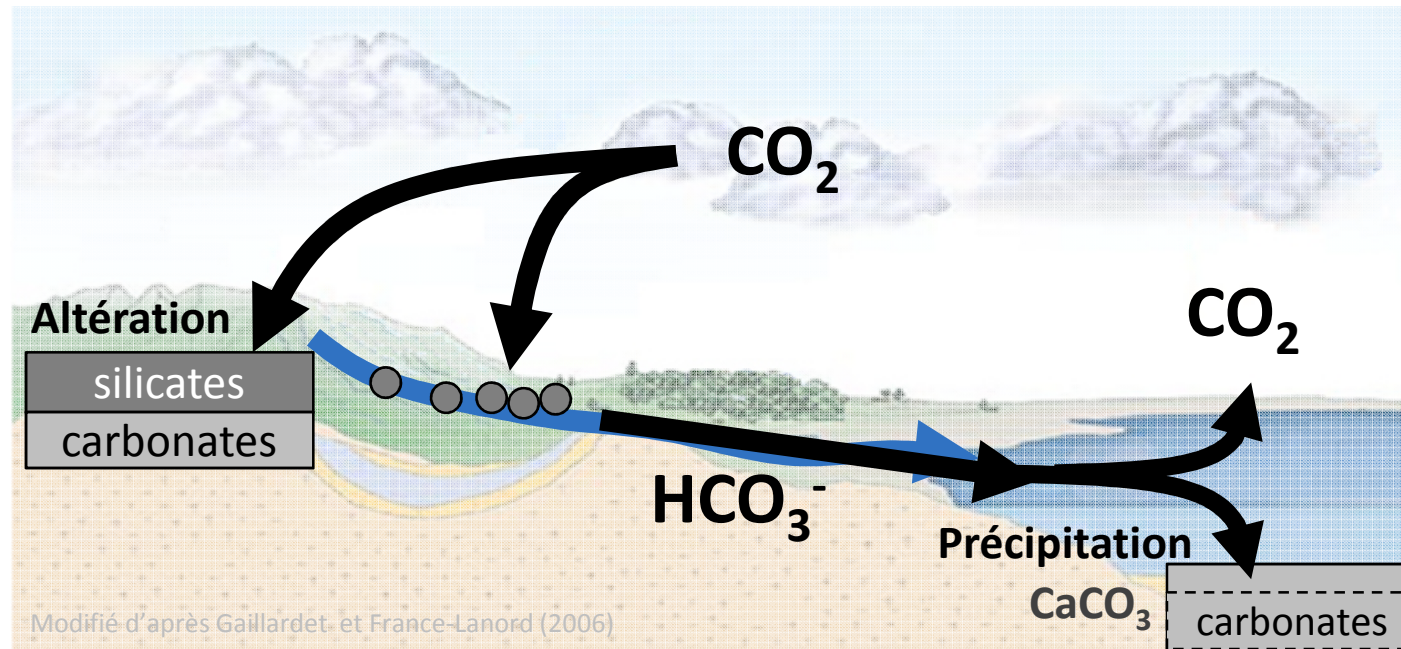
Walker et al., 1981 ; Berner et al., 1983 ; Raymo, 1991 ; Gaillardet et al., 1999 ; Godderis et al., 2013

Introduction

Altération des silicates = puits de CO₂ long terme

Silicates : $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{Ca} + 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \frac{1}{2} \text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + 1 \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Carbonates : $\text{CaCO}_3 + 1\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$



Walker et al., 1981 ; Berner et al., 1983 ; Raymo, 1991 ; Gaillardet et al., 1999 ; Godderis et al., 2013

- ➔ Bilan de **consommation de CO₂** des silicates continentaux?
- ➔ Rôle des chaînes de **montagnes** et des **plaines** dans ces bilans?
- ➔ Lien entre **érosion**, **altération** et **climat** actuel?

Introduction

Plan

- 1) Présentation du bassin versant de l'Amazonie
- 2) Bilan dissous à l'Océan (flux et dynamique temporelle)
- 3) Origine géographique des flux dissous
- 4) Quantification des sources anthropiques et naturelles
- 5) Bilan d'altération de l'Amazonie
- 6) Lien avec l'érosion et le climat

Introduction

L'Amazone :

Une source majeure de matières à l'océan Atlantique

Apports aux océans:

~ 20% des flux hydriques

~ 7% des flux dissous

~ 4-5% des flux solides

Données SO HYBAM :
Gaillardet et al., 1999;
Meybeck, 2007;
Callède et al., 2010;
Guyot et al., 2011

= bassin majeur dans les cycles biogéochimiques des océans

Un laboratoire naturel

géomorphologie

lithologie

climat

occupation des sols



Andes à La Paz - Bolivie



Andes – Pastaza - Equateur



Andes – Rio Grande - Bolivie



Amazonie – Rio Ucayali - Pérou

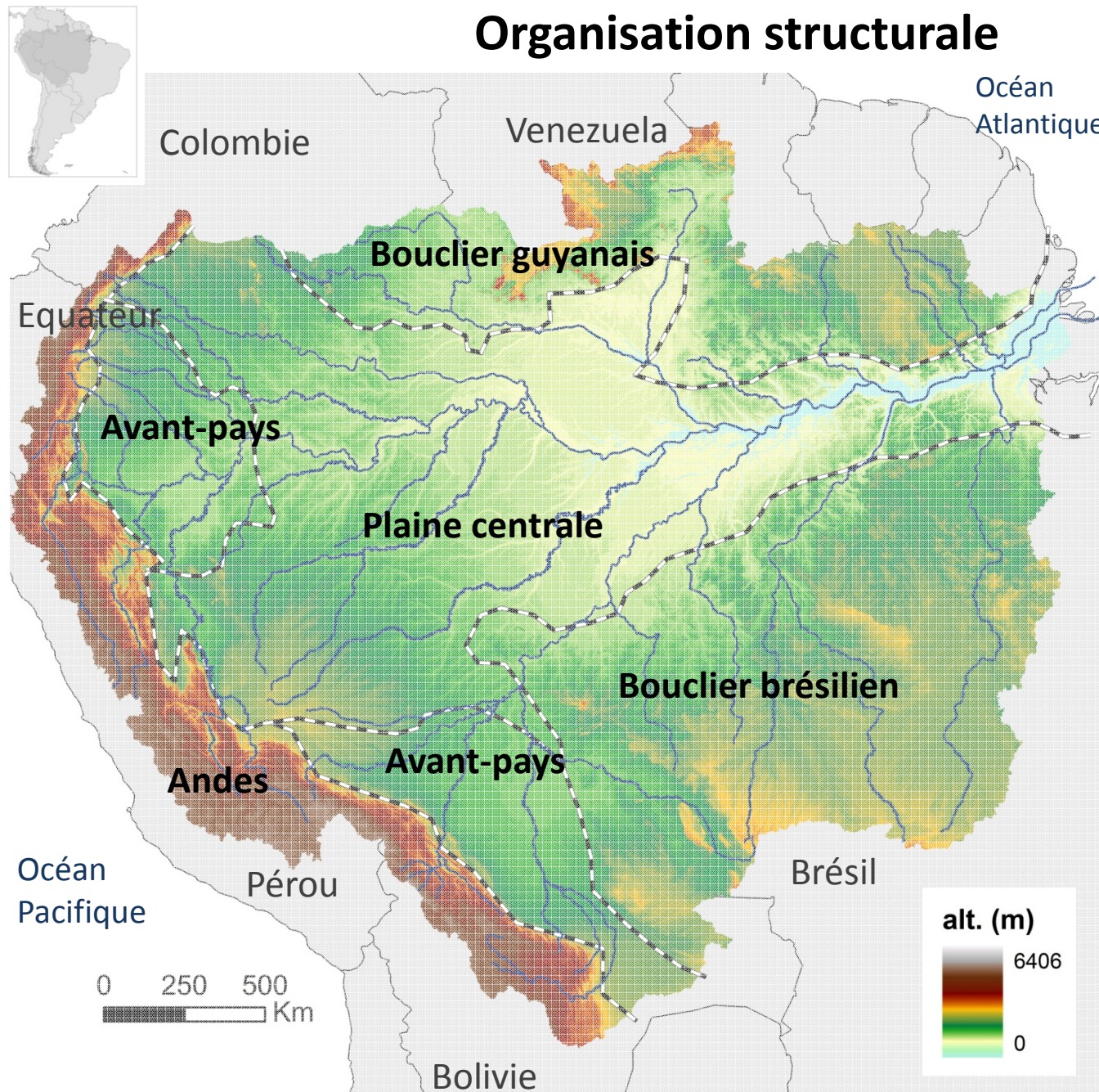
Un bassin versant en mutation

Activités anthropiques

Changements climatiques



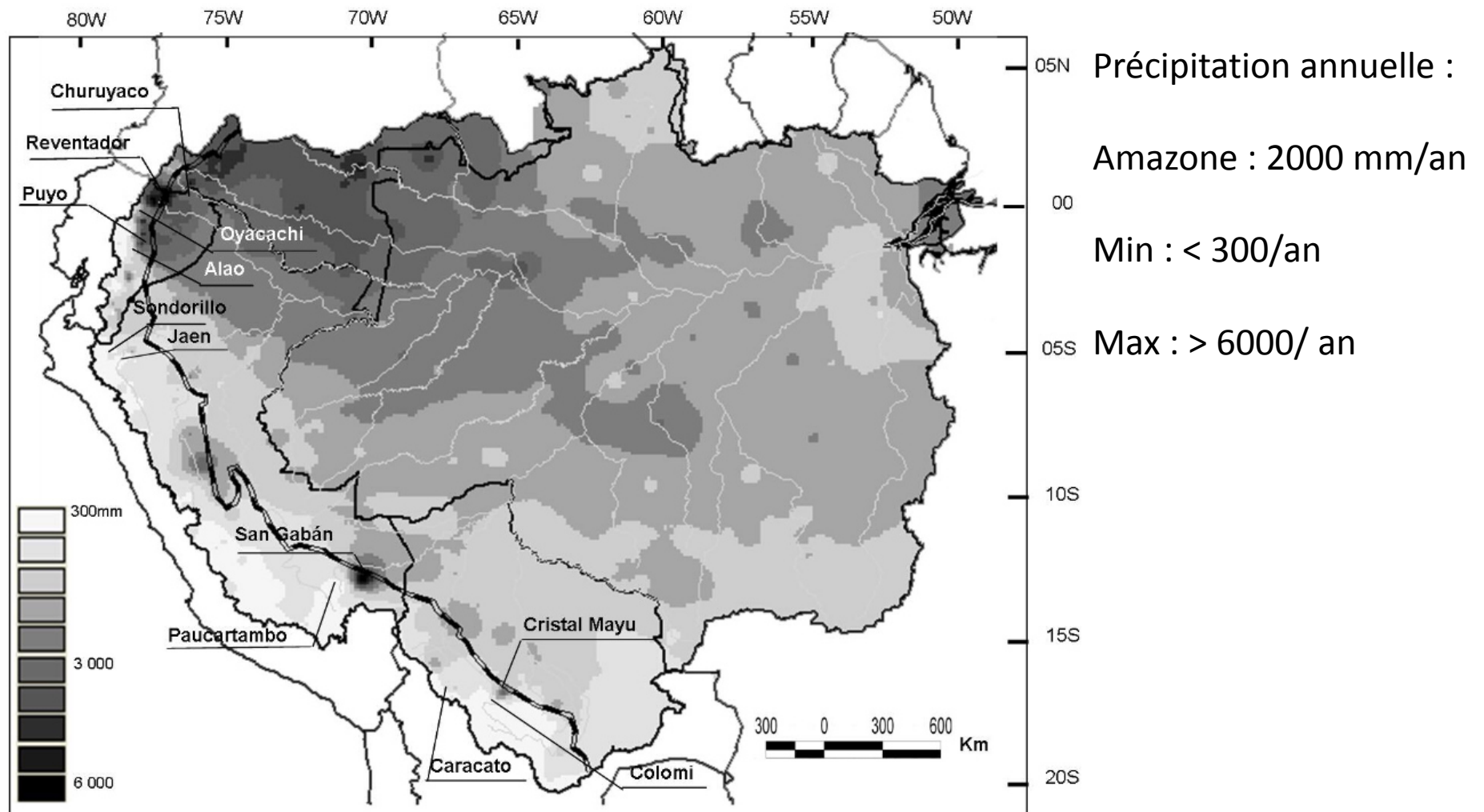
Organisation structurale



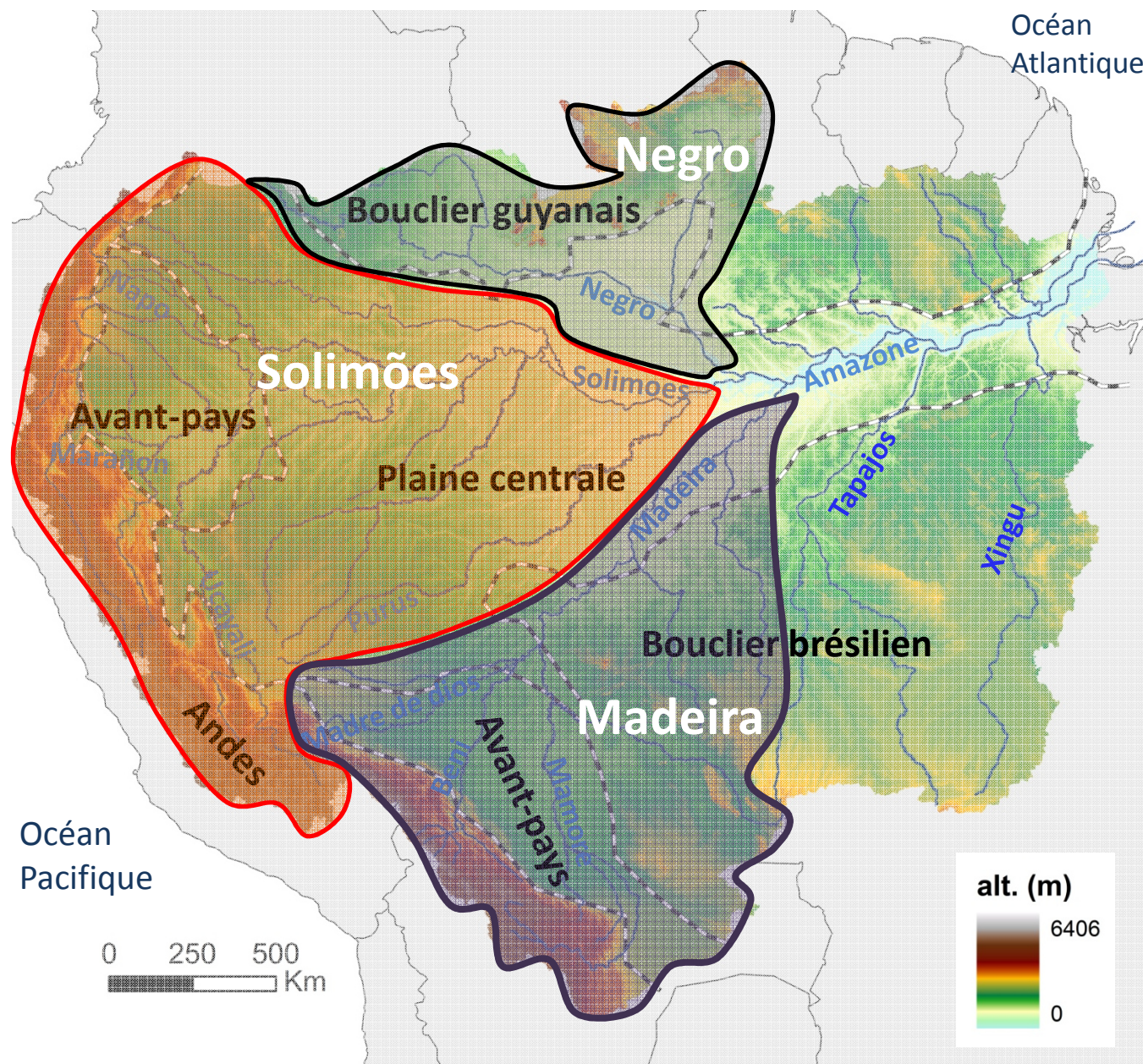
Surface / Amazone

Andes :	12%
avant-pays :	12%
plaine :	30%
bouclier guyanais :	11%
bouclier brésilien:	35%

Climat - Pluviométrie



Hydrographie



Surface / Amazone

Negro : 12%

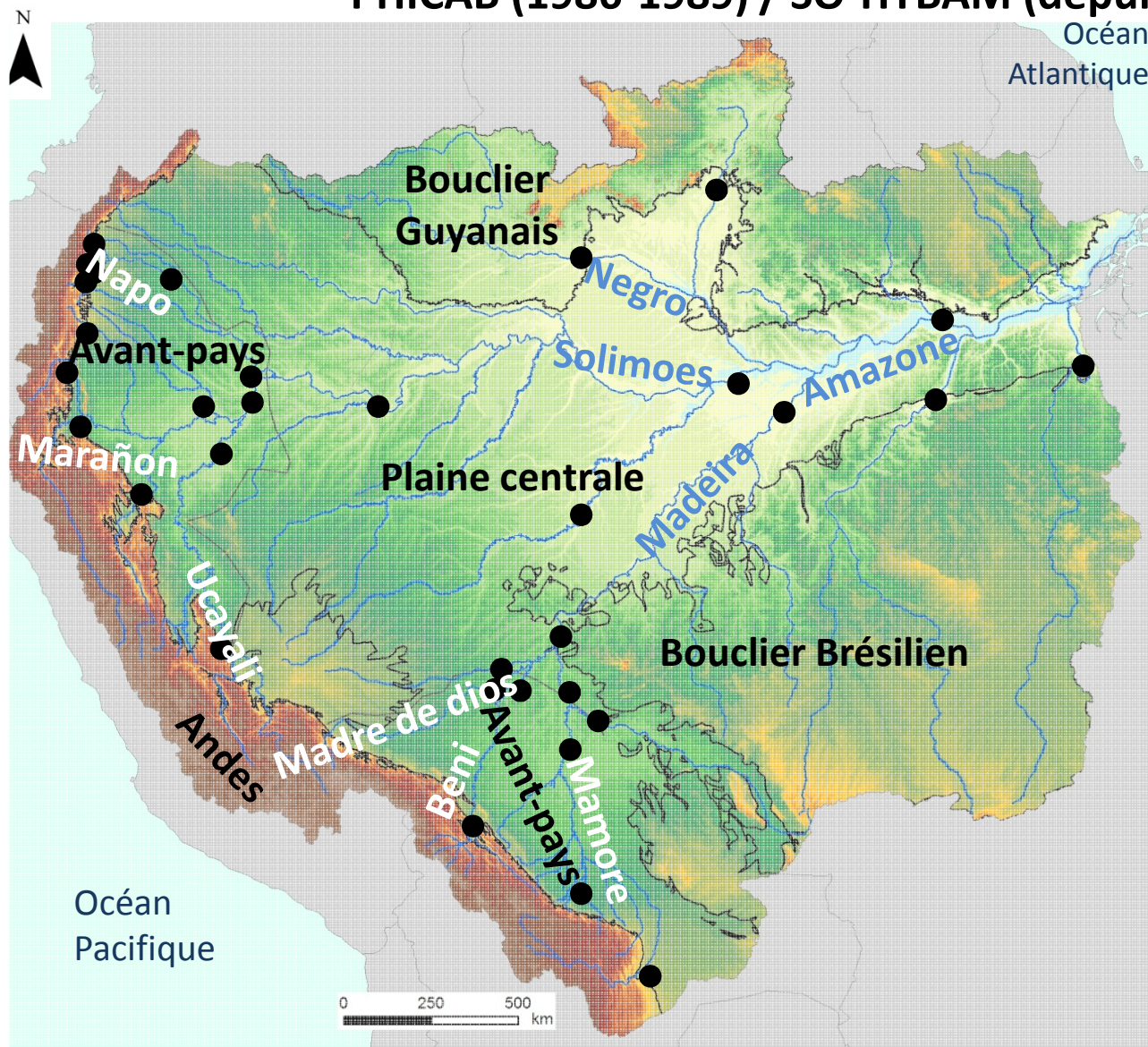
Solimões : 37%

Madeira : 22%

Tapajos : 8%

Xingu : 8%

Réseaux d'observation
PHICAB (1986-1989) / SO-HYBAM (depuis 2003)



Données (35 stations - 4pays):

- débits journaliers

- hydrochimie mensuelle
(éléments majeurs :

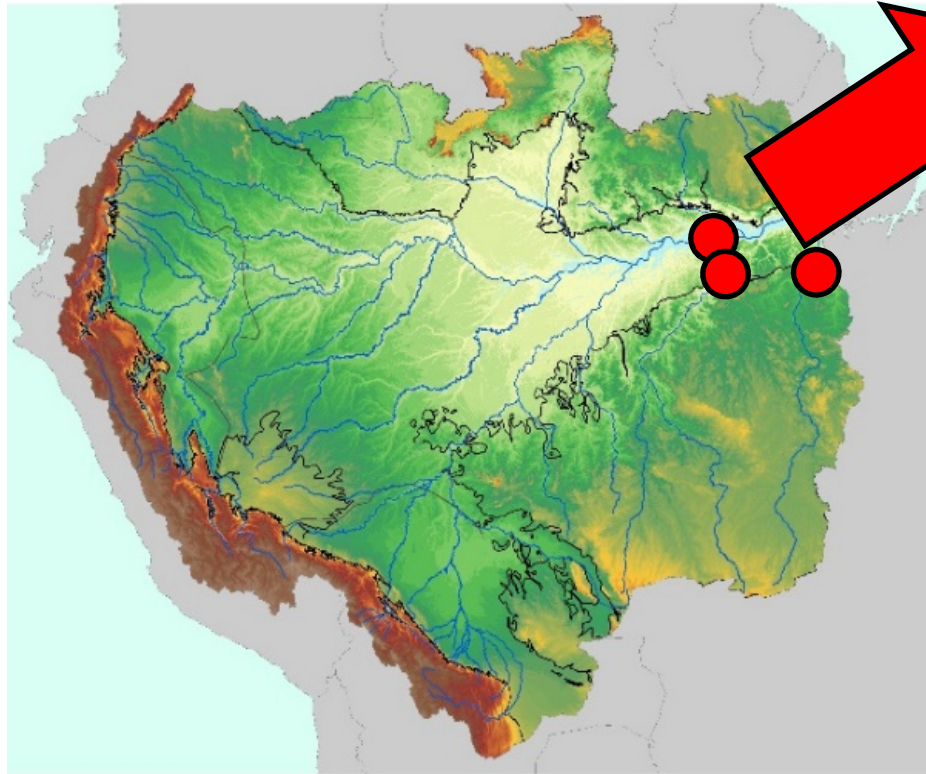
Na, Ca, Mg, K, HCO_3 , Cl, SO_4 ,
 SiO_2)

→ >3000 analyses

(+flux de MES:
Fréquence décadaire)

→ Calcul des flux dissous
 $F = C \times Q$
(4 méthodes)

Flux dissous de l'Amazonie et dynamique temporelle



TDS (matériel dissous total)

Flux TDS = 272 Mt.An⁻¹

Gibbs, 1967; Stallard e Edmond, 1983; Gaillardet et al., 1997;
Mortatti et Probst, 2003; Sanchez et al., 2015

~25% des matières exportées
(dissous + solides)

=7% des apports à l'océan
(Milliman et al., 2011)

Ca, Mg, Na, Cl, SO₄ and HCO₃

➔ 5-8%

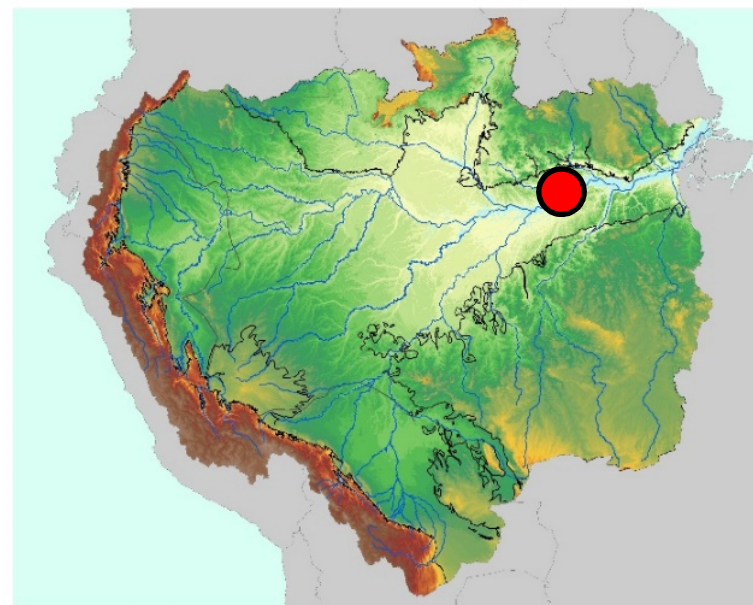
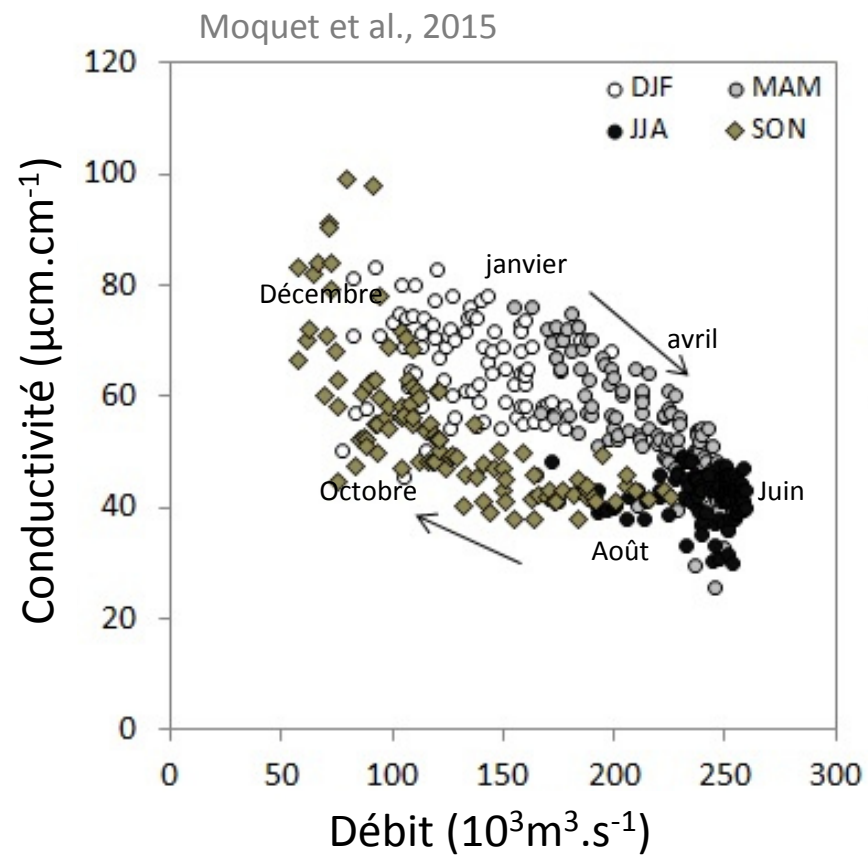
Berner and Berner (1987) and Milliman and Farnsworth
(2011)

Si et K

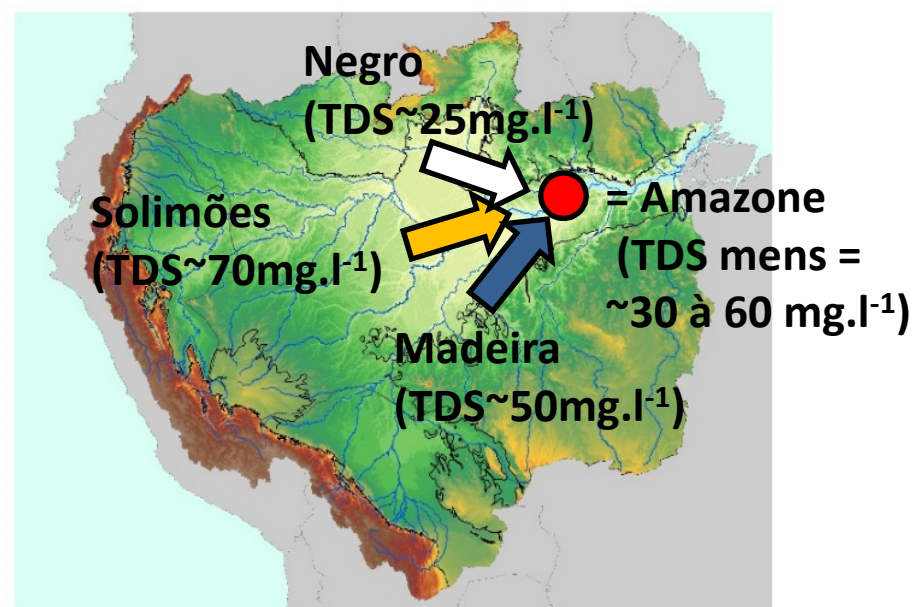
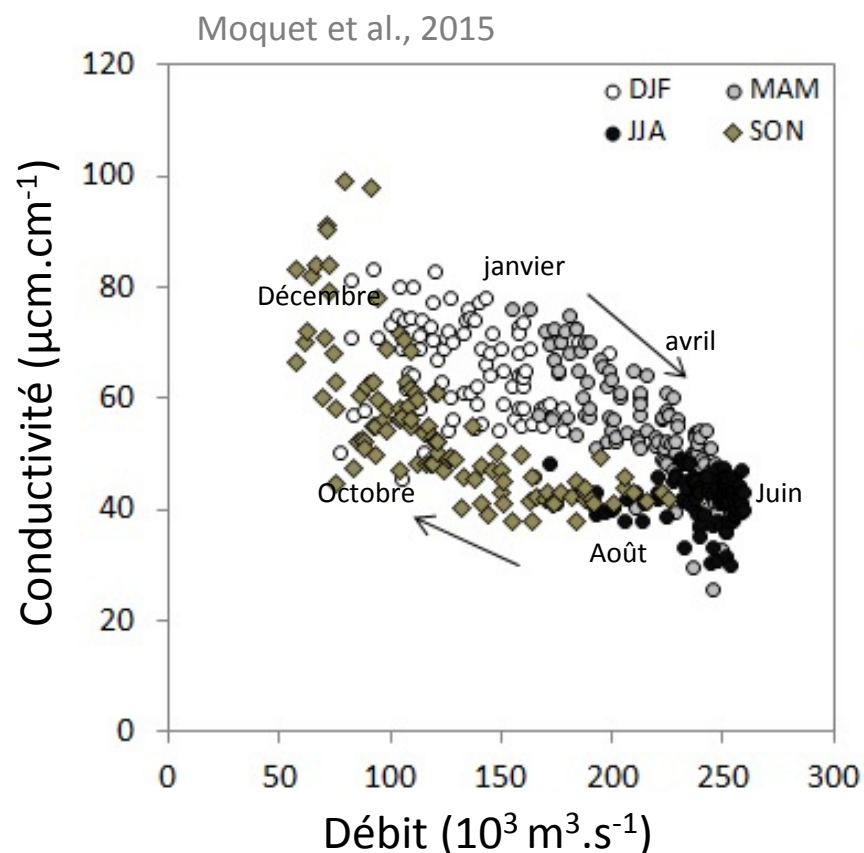
➔ 12-17%

Berner and Berner, 1987, Beusen et al., 2009;
Milliman and Farnsworth, 2011

Relation C Q à Obidos Hystérésis

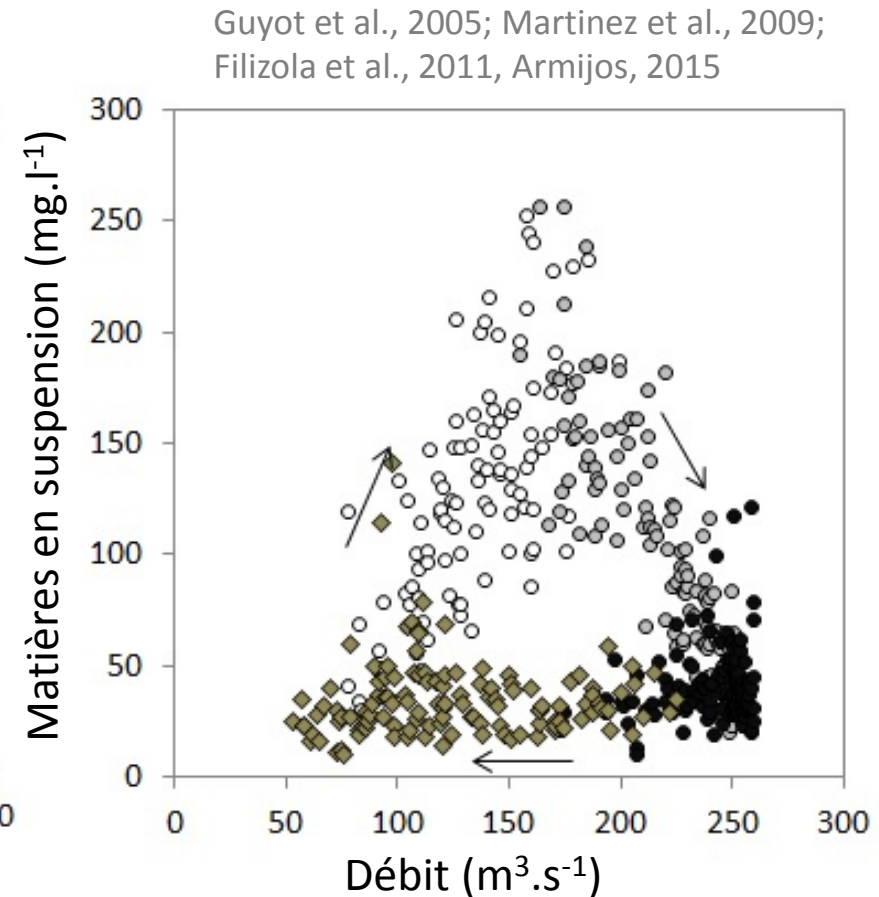
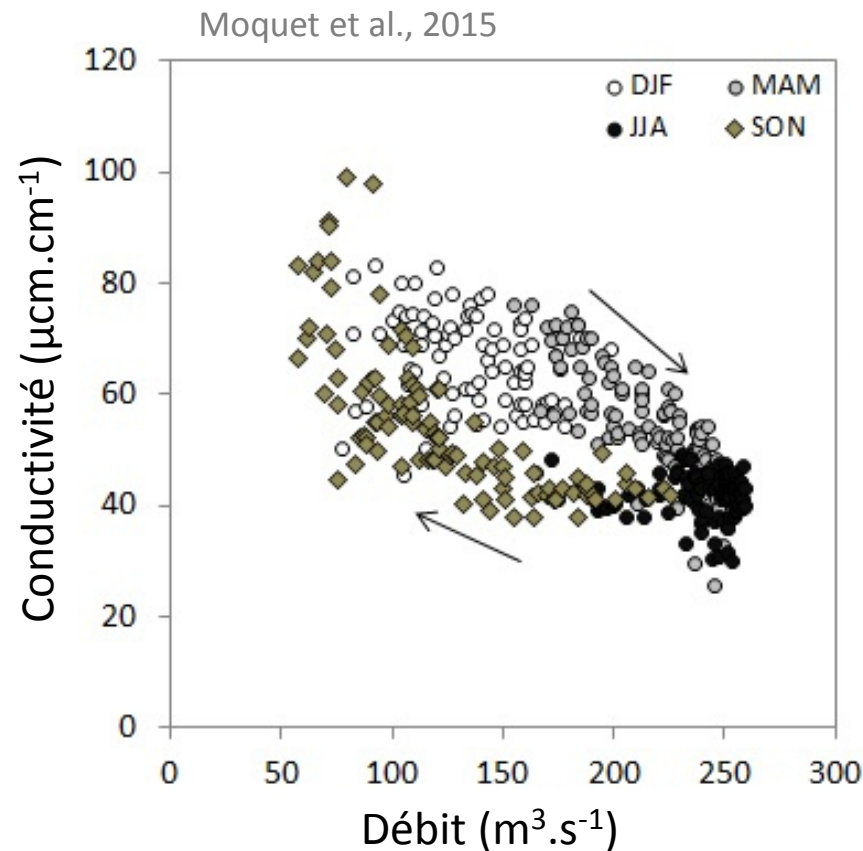


Relation C Q à Obidos Hystérésis



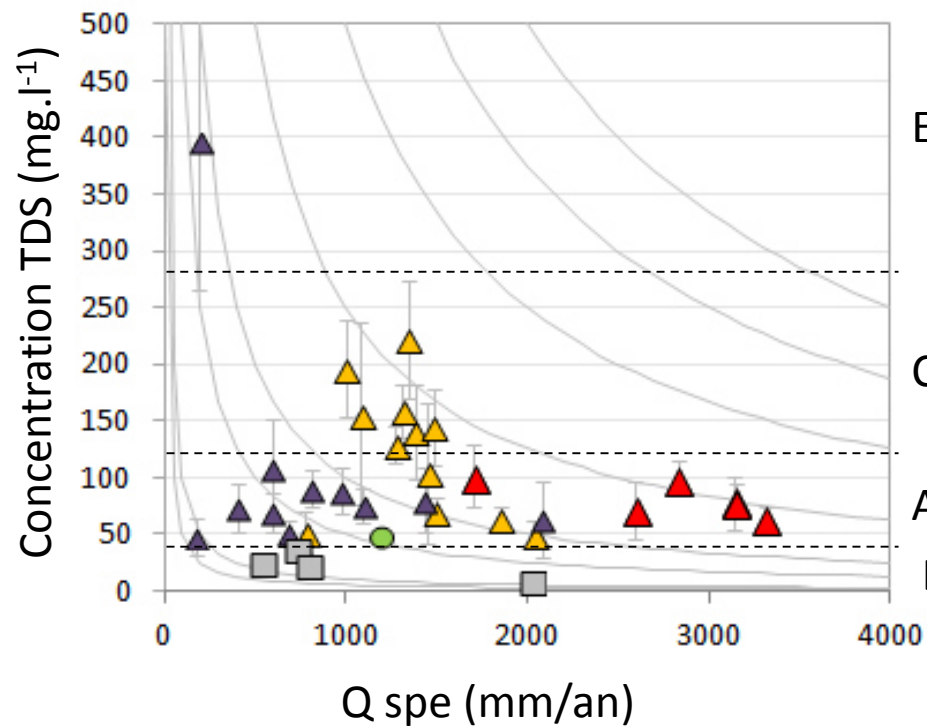
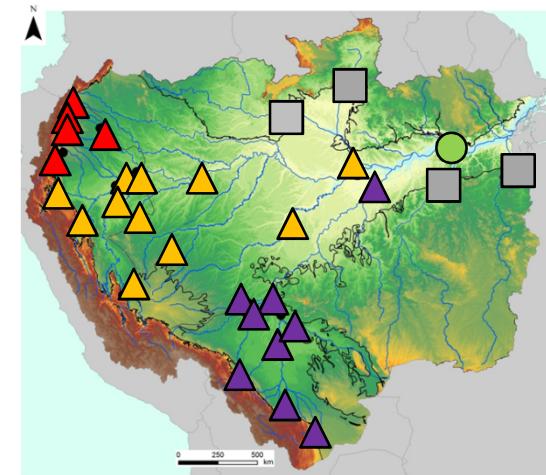
➔ Décalage temporel des apports du Rio Solimoes, du Rio Madeira et du Rio Negro

Relation C Q à Obidos Hysteresis



➔ Différence de dynamique des flux dissous et particulaires

Gradient de concentration : Un indice lithologique



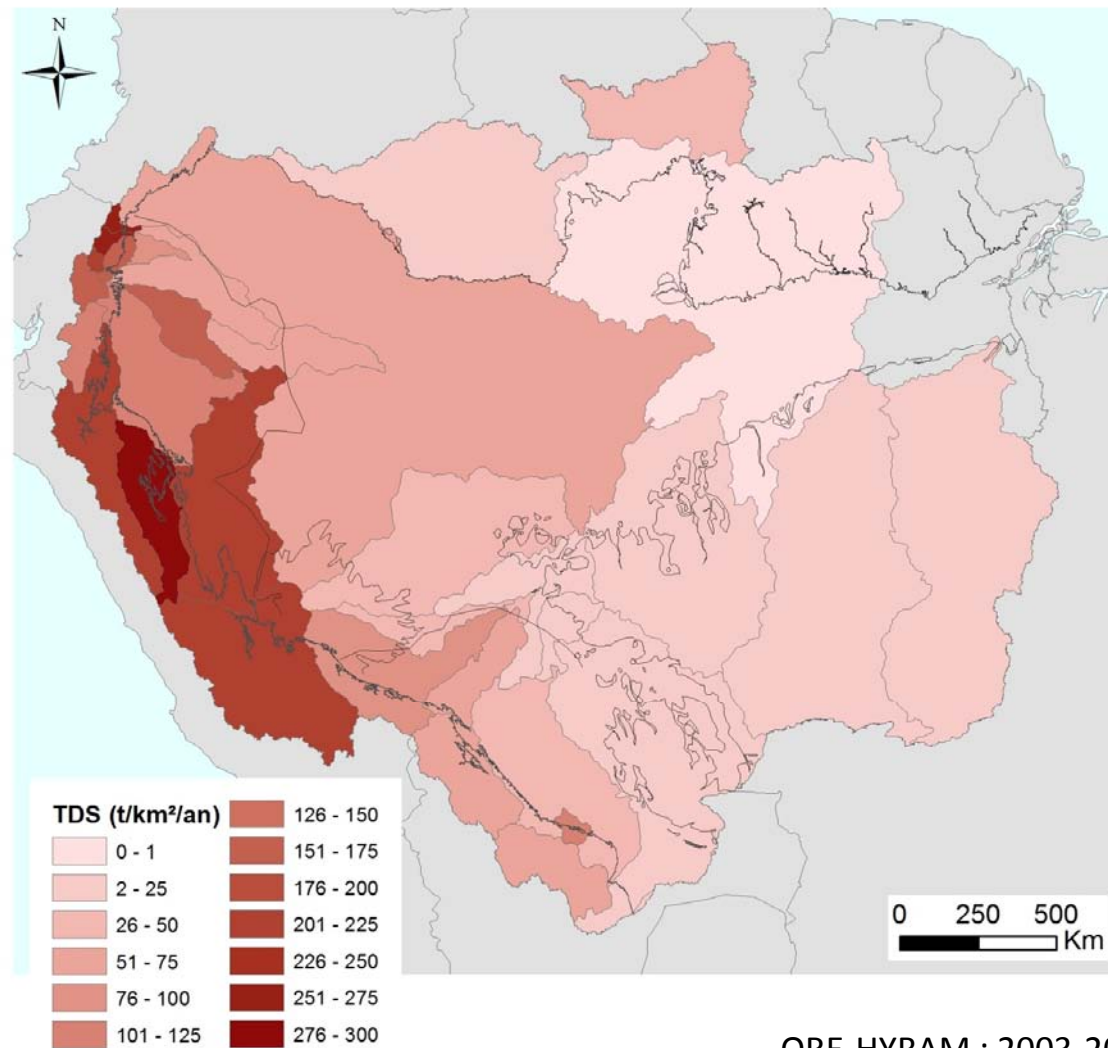
Evaporites (bassin semi-aride)

Carbonates (Haut Solimões)

Autres bassins andins

Bouclier

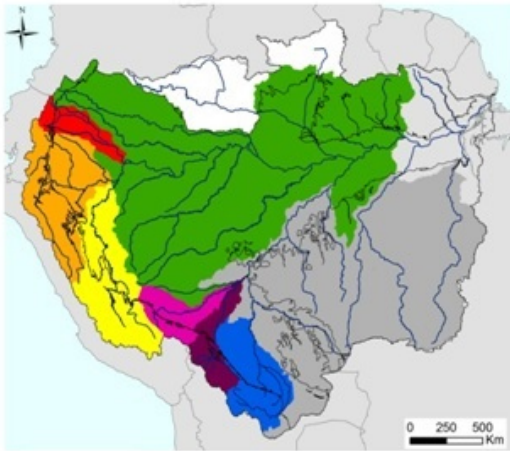
Flux spécifique
du matériel
dissous (TDS)



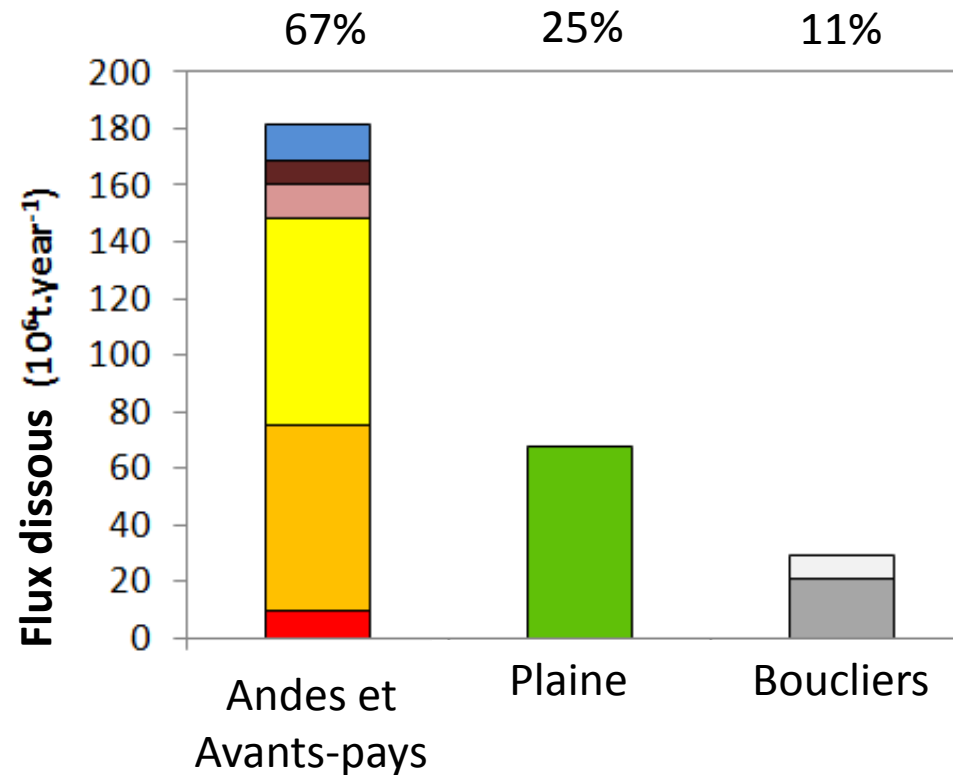
ORE-HYBAM : 2003-2012

PHICAB (Haut Madeira) : 1986-1989

Andes : Région la plus active



Matériel dissous Répartition du flux

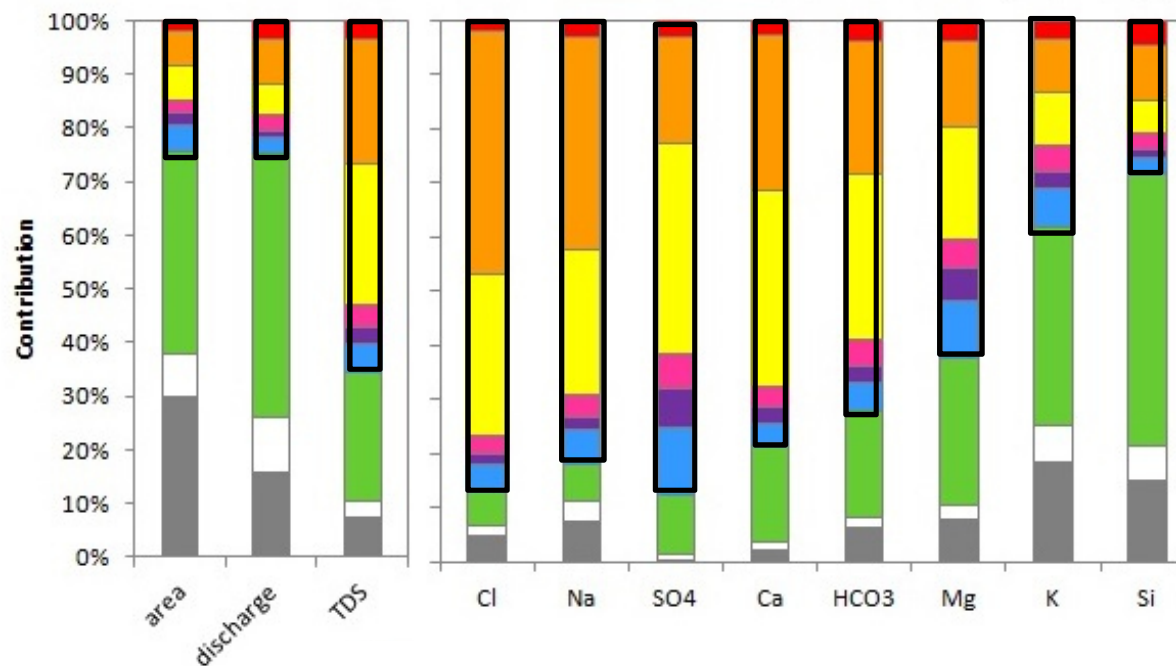


➔ Les Andes dominent la production de matières dissoutes

- Napo
- Marañon
- Ucayali
- Madre de Dios
- Beni
- Mamore
- Solimoes-Amazon floodplain
- Guiana shield Tributaries (Negro River)
- Brazilian shield Tributaries (Lower Madeira, Tapajos, Xingu)



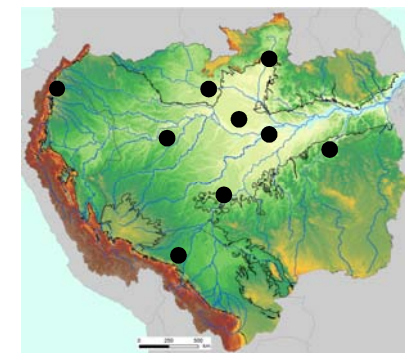
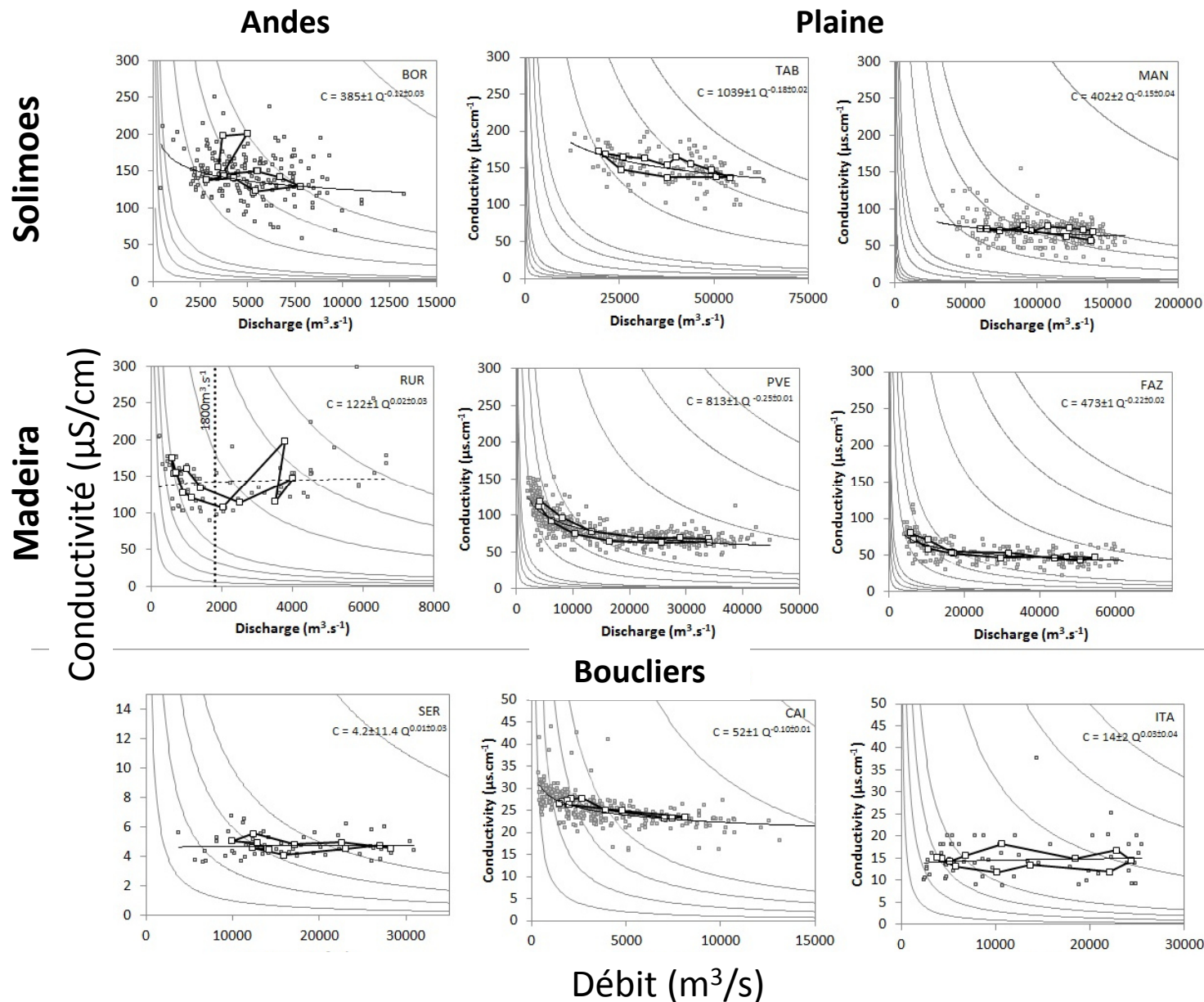
➔ Source des éléments
majeurs = Andes



Exceptions : K et Si =
concentrations ~ homogènes

Quel est le rôle de la variabilité hydrologique
sur le flux de matières dissoutes?

Relations concentrations vs débits



$$C = aQ^b$$

$$-0.25 < b < 0$$

➔ Phénomène ~ **chemostatique** : concentration ~ constante

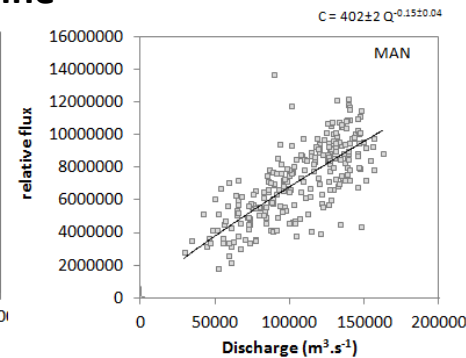
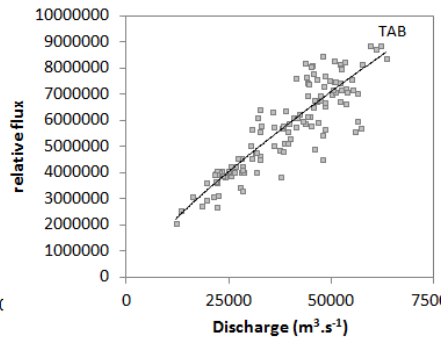
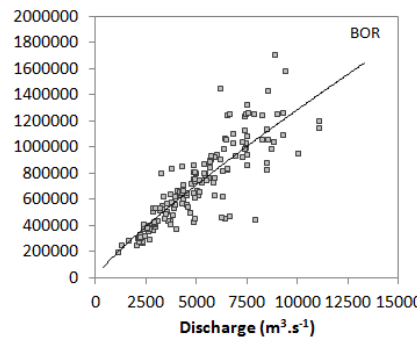
Solimoes

Madeira

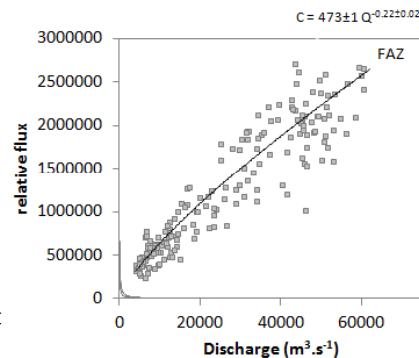
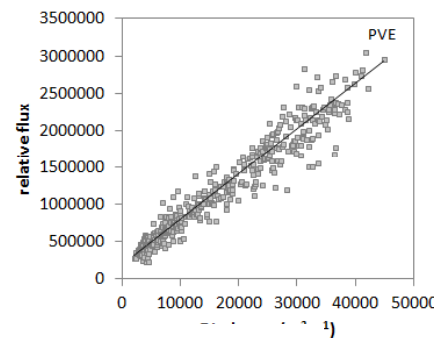
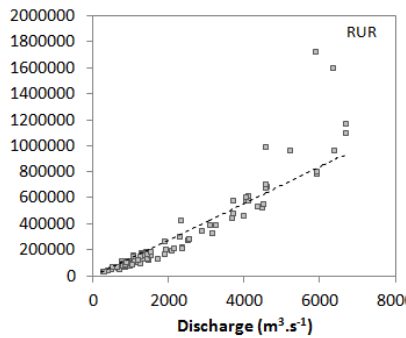
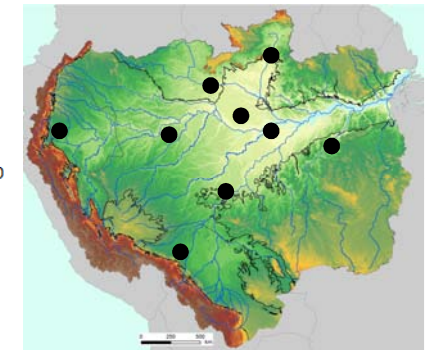
Flux relatif (Cond $\times$ Q)

Andes

Plaine

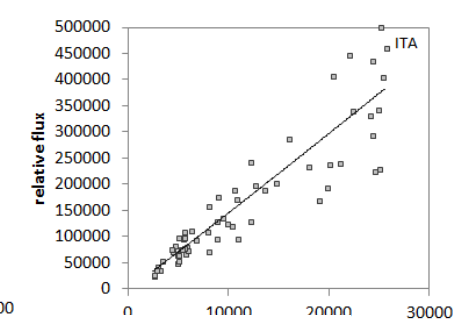
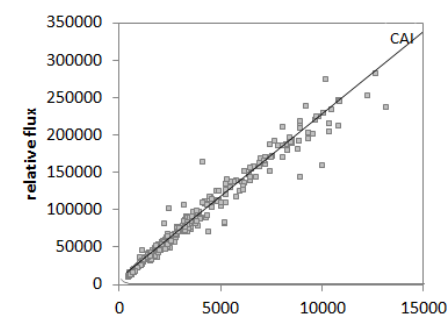
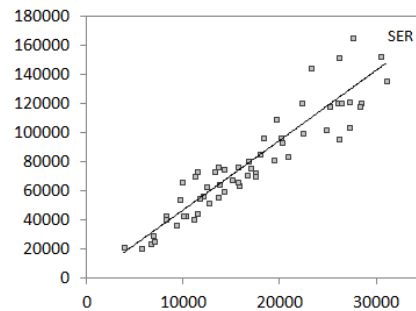


$$F = C \times Q$$



Boucliers

es



Débit (m³/s)

➔ La variabilité hydrologique contrôle la variabilité temporelle des flux dissous

Source majeure de matières dissoutes :

→ Andes + avant-pays = 67% matières dissoutes

La lithologie/géomorphologie :

→ contrôle la concentration moyenne

Le climat (le débit) :

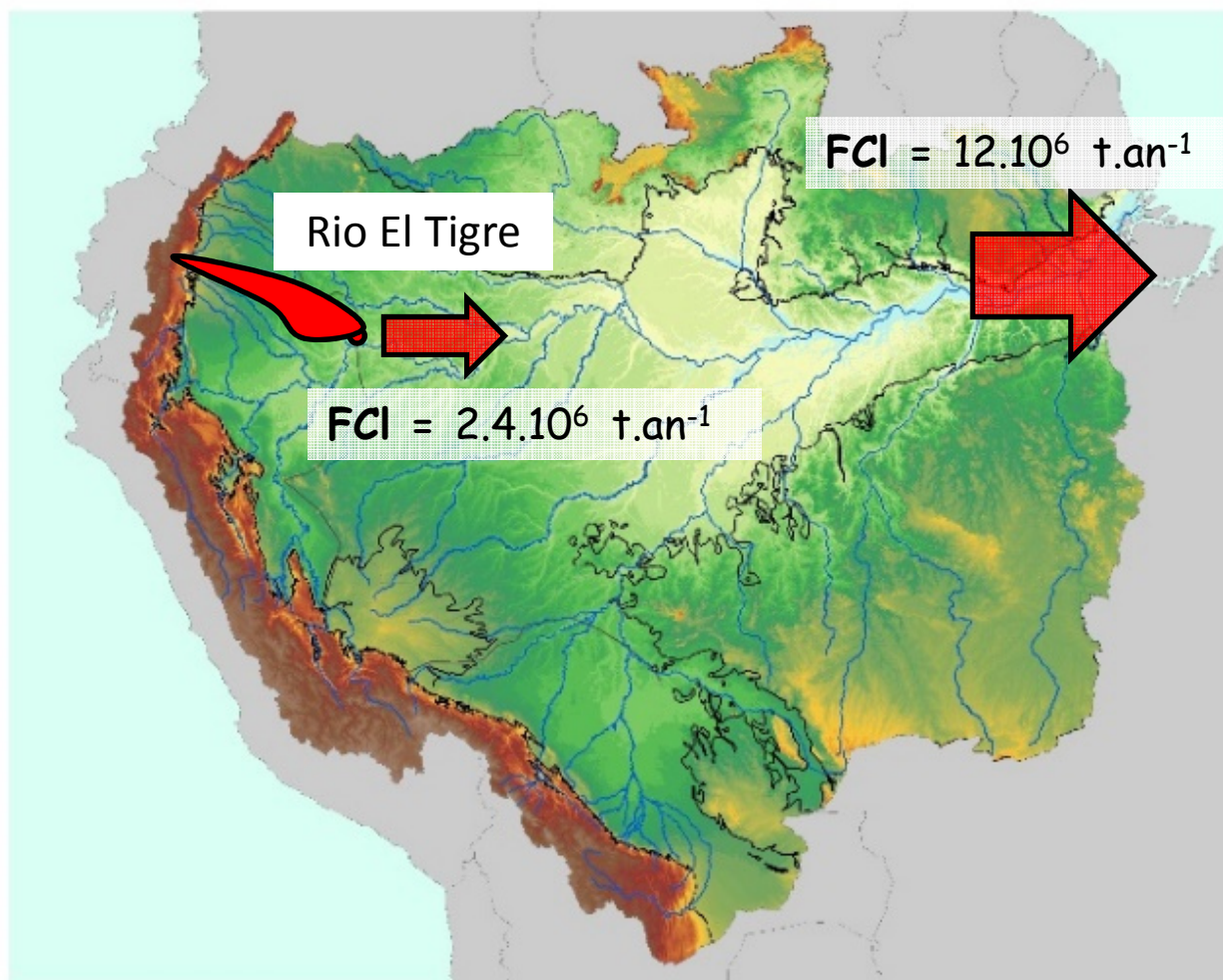
→ Contrôle la variabilité temporelle des flux dissous

Les flux de Cl et Na dans l'avant-pays andin du rio Amazonas-Solimoes : Mise en évidence d'un impact anthropique



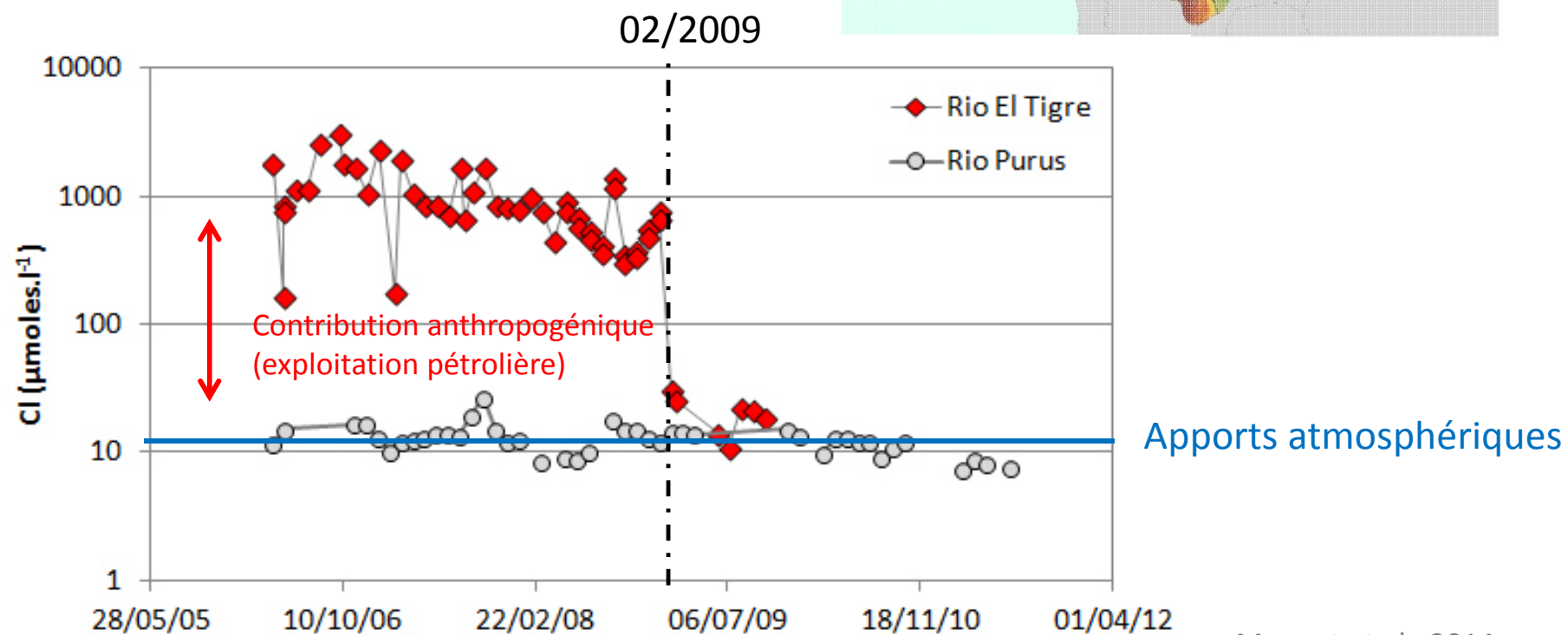
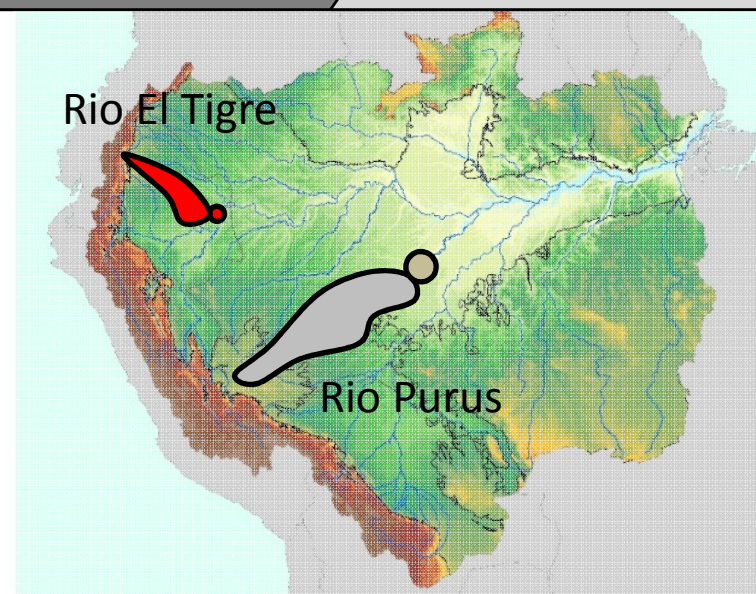
Source : projet Monoil (IRD)

Moquet et al., 2014a



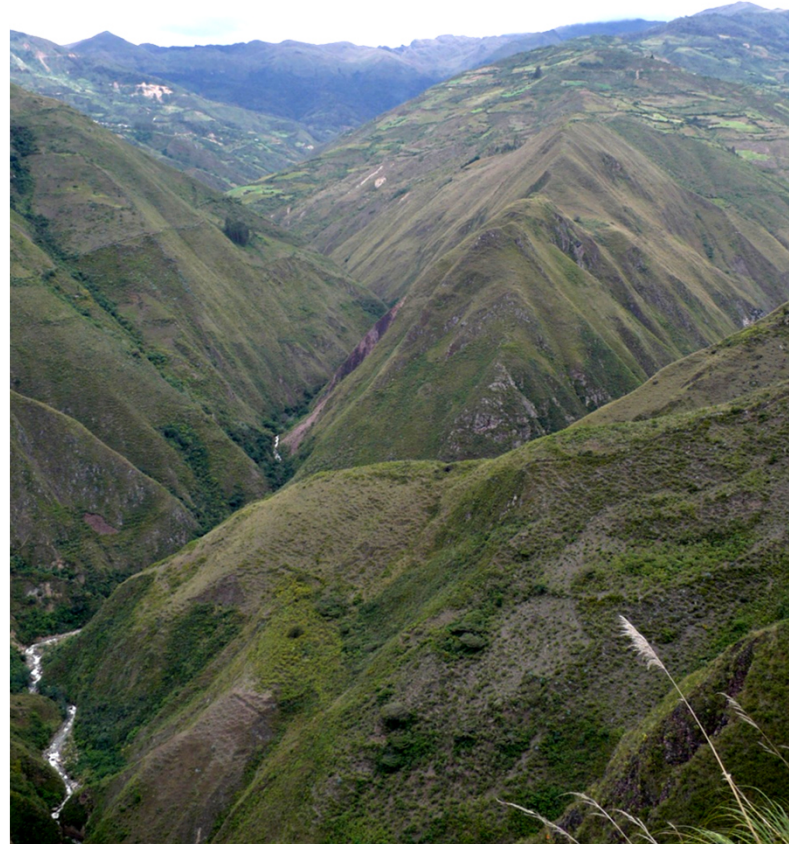
Rio Tigre :

2007-2009 = 20% du flux de Cl
de l'Amazone



- Cl (et Na) = indice des pratiques des activités pétrolières.
 - Rio El Tigre : ~ 20% de la production de Cl de l'Amazone (2007-2009)
- ➔ L'activité anthropique peut avoir un impact important sur l'hydrochimie des eaux de l'**Amazone**

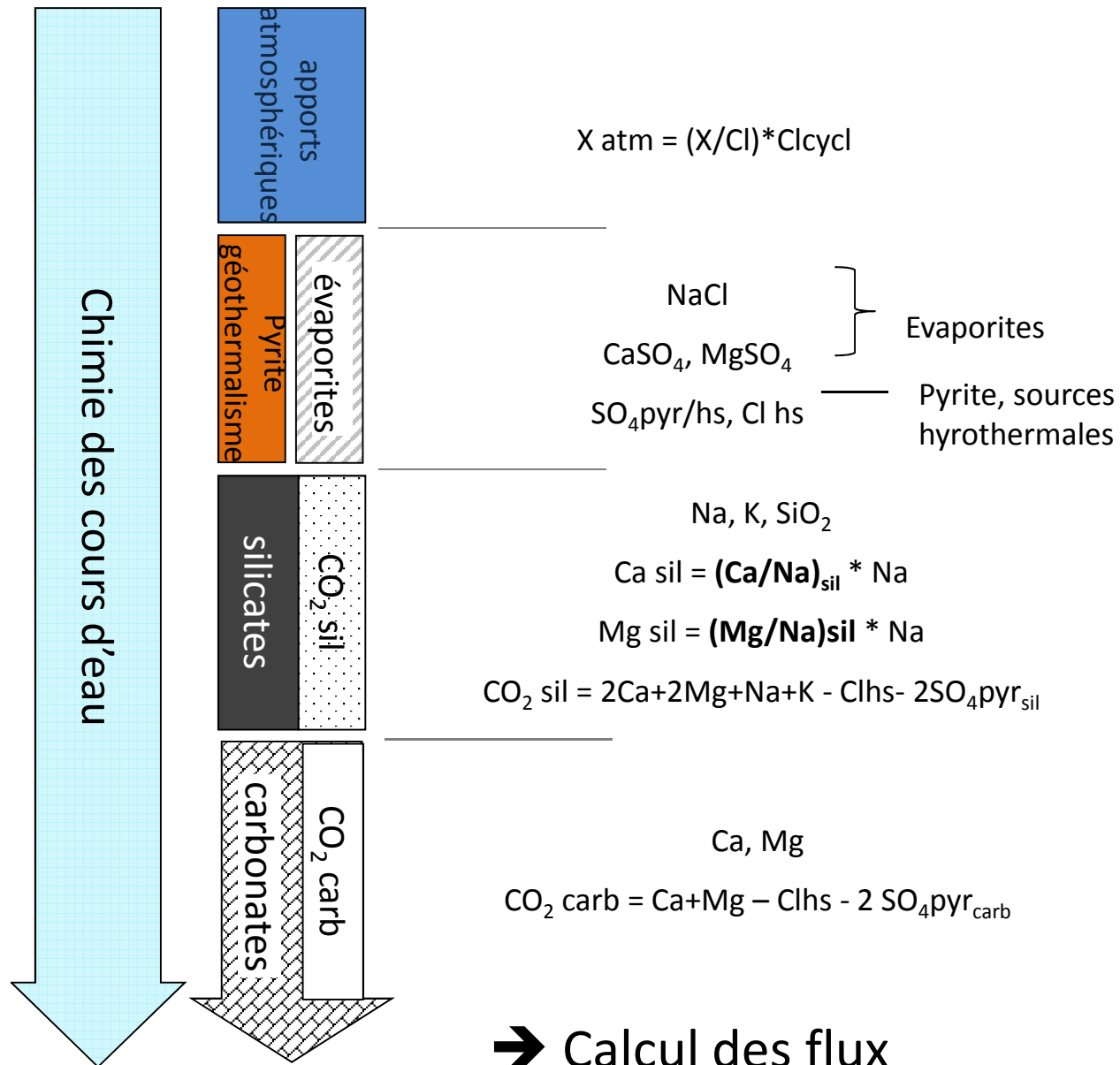
Bilan d'altération du bassin de l'Amazone



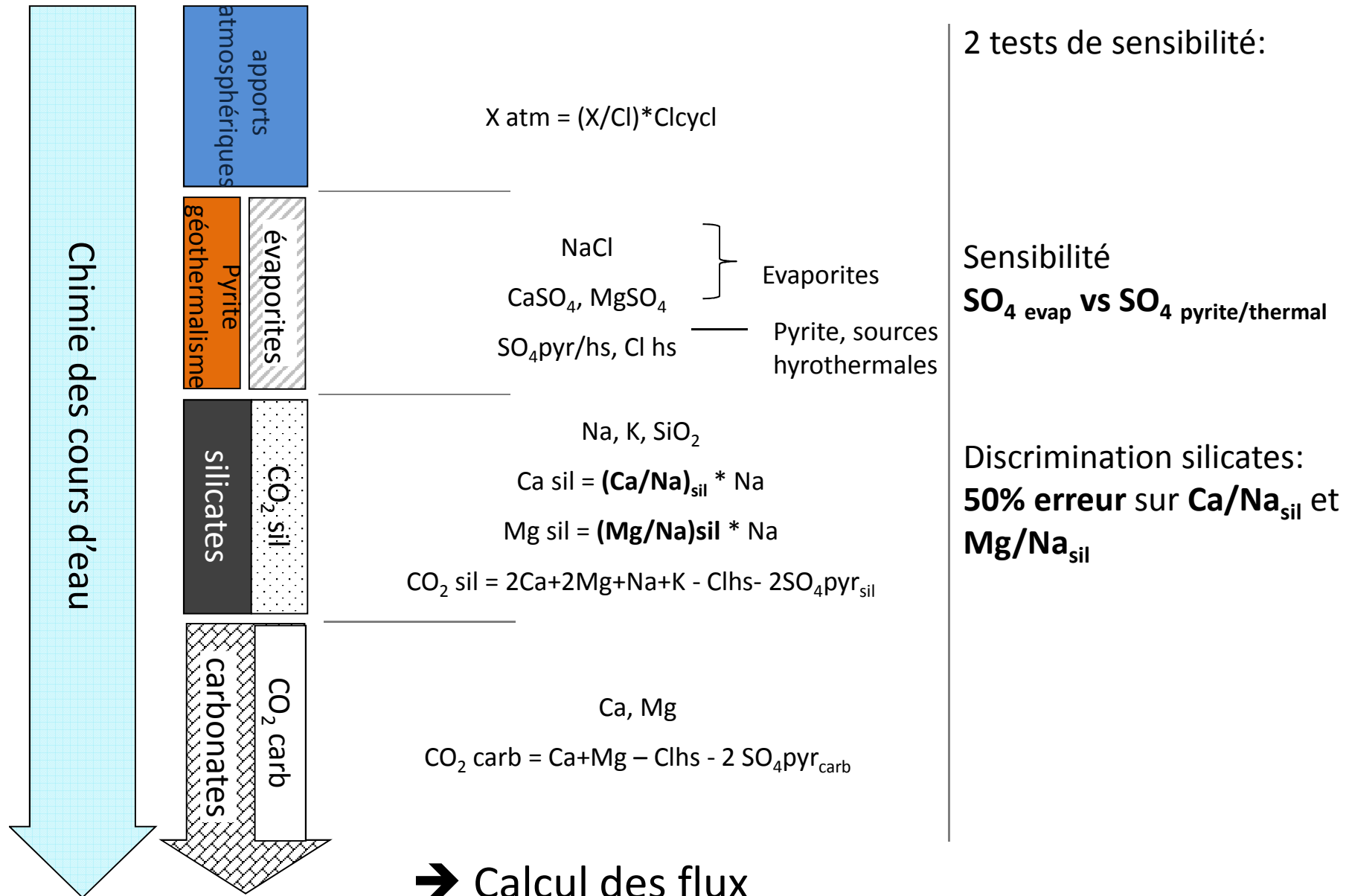
Région Chachapoyas – Amazonas - Pérou

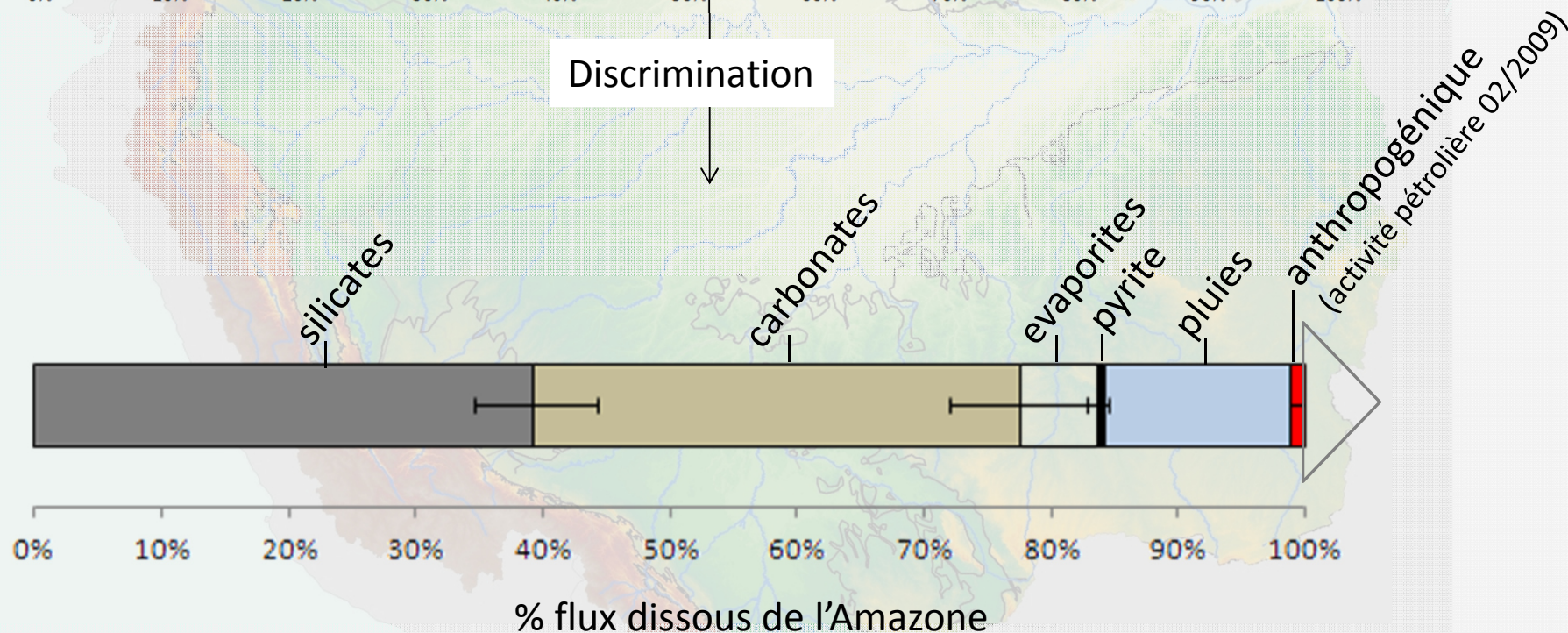
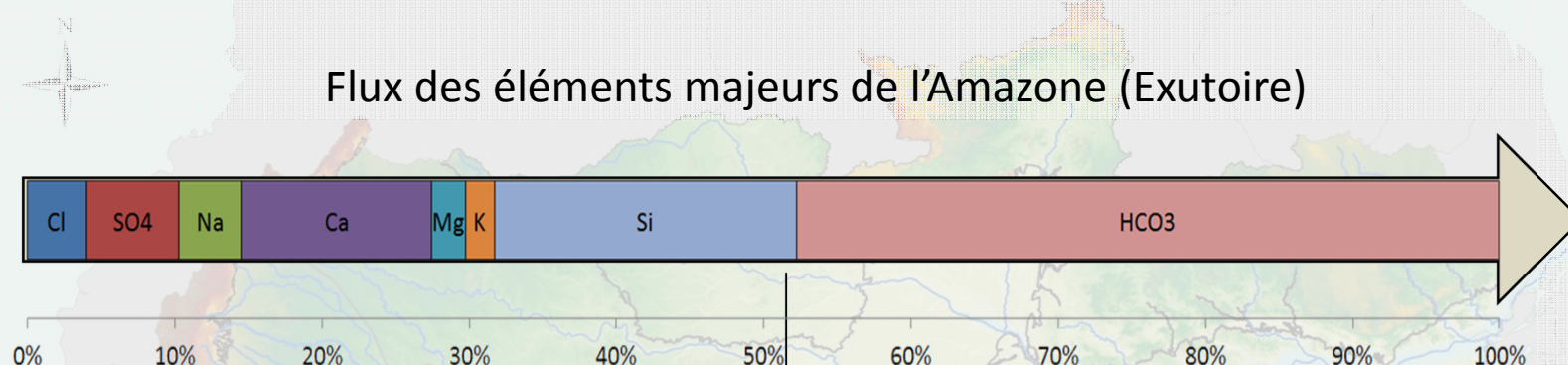
Moquet et al., 2011

Méthode « forward » (d'après Garrels and Mackenzy, 1972) :

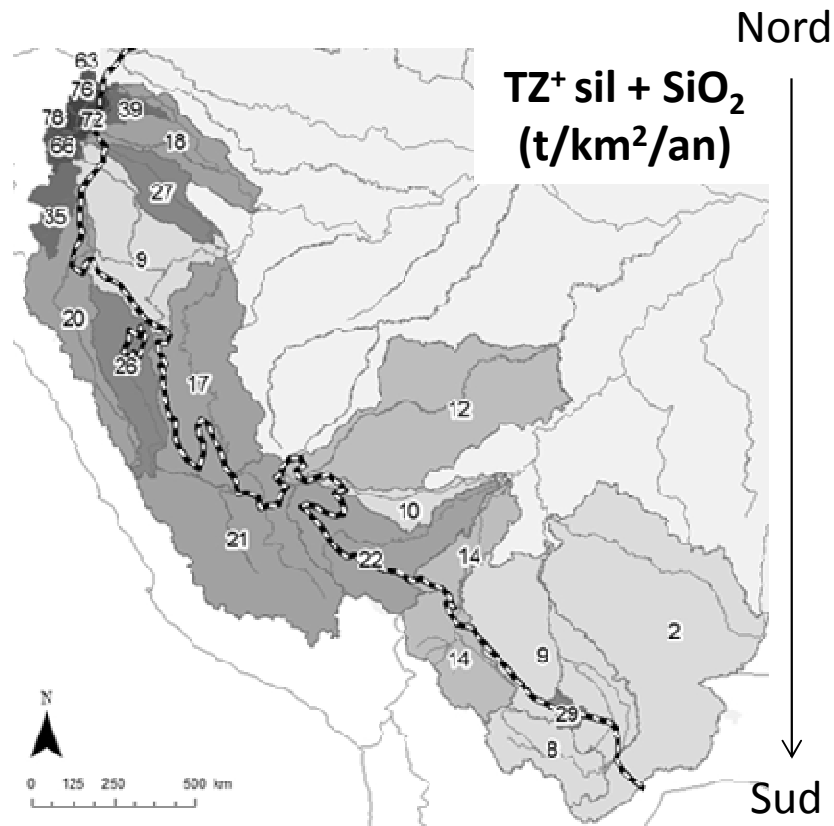


Méthode « forward » (d'après Garrels and Mackenzy, 1972) :



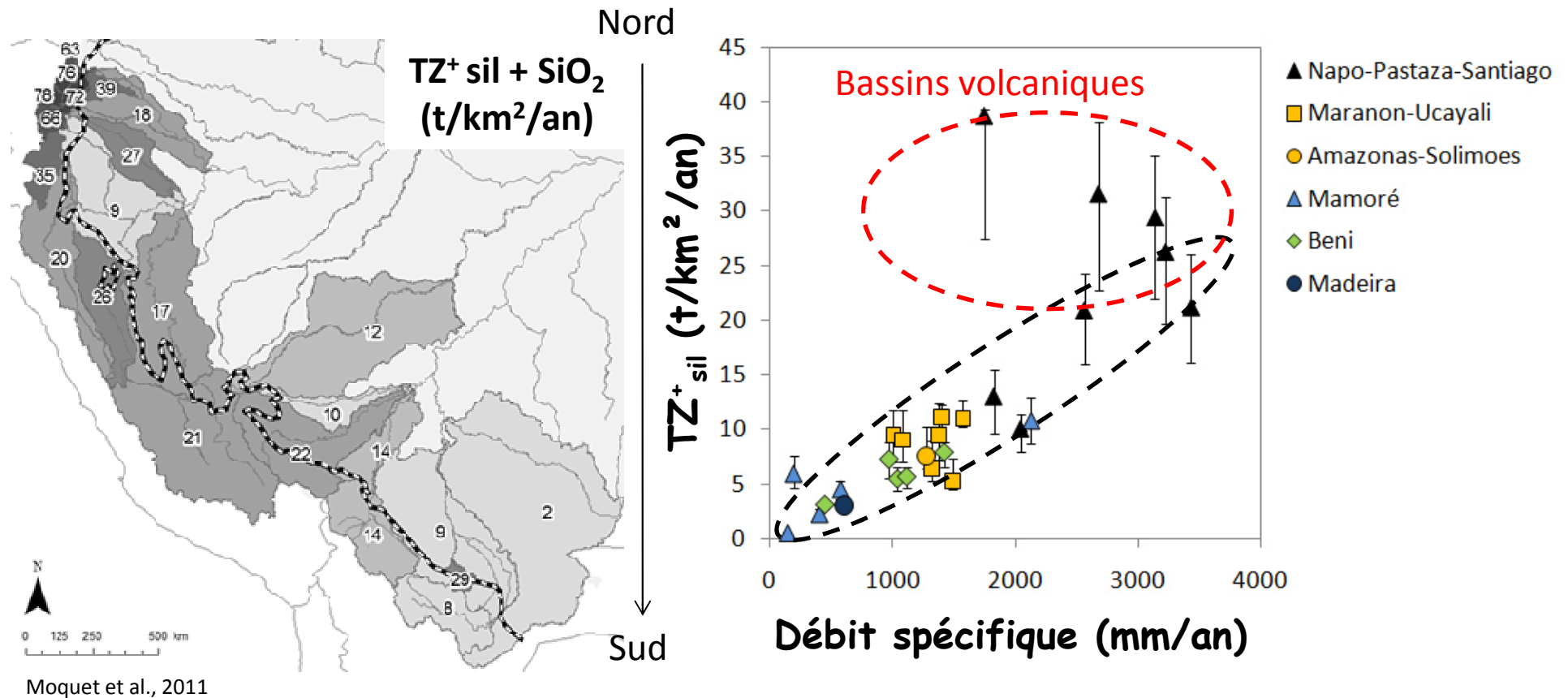


Altération des silicates



Moquet et al., 2011

Altération des silicates

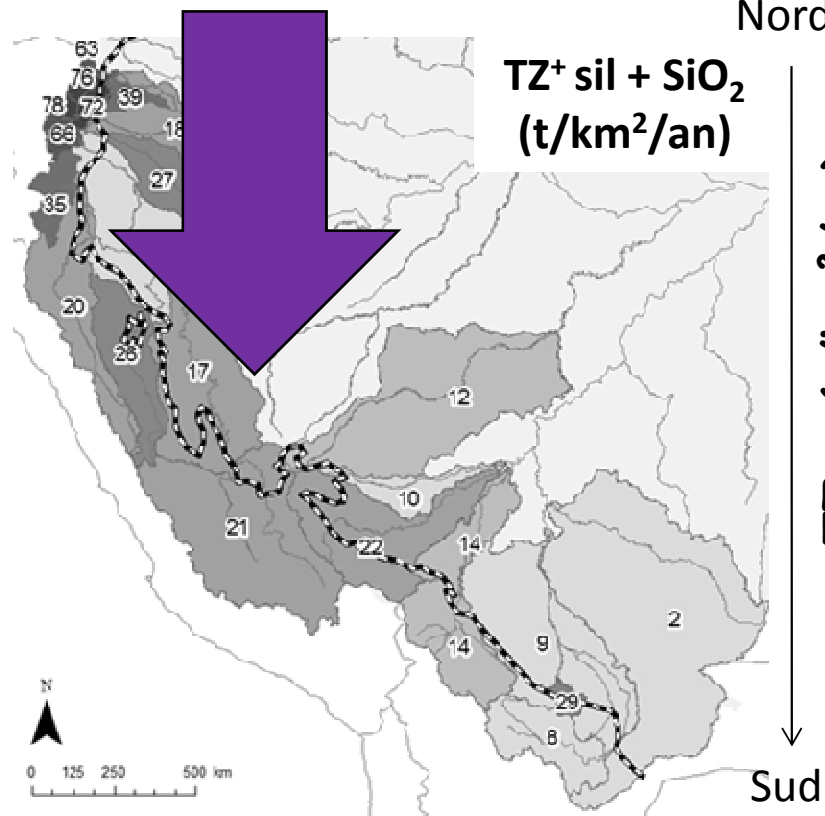


- ➔ Facteur d'altération des silicates de première ordre : le débit spécifique
- ➔ Bassins volcaniques plus sensibles

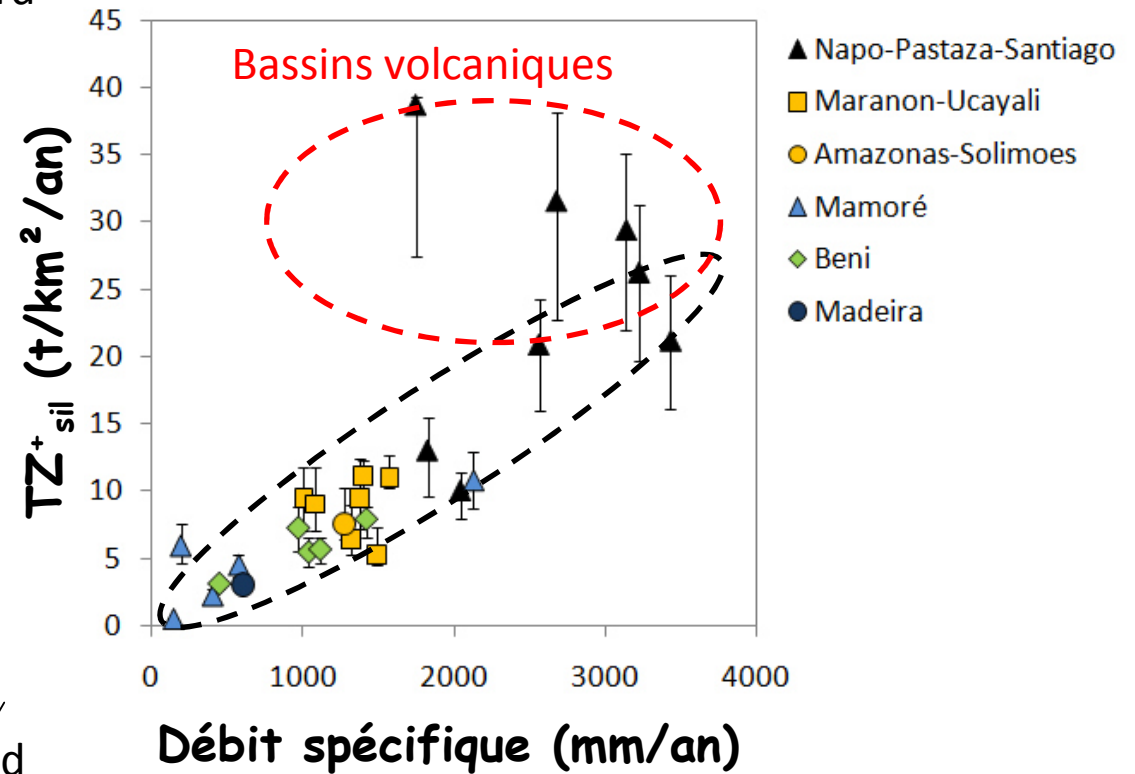
Altération des silicates

F TDS_{sil}: 26 (22-26) .10⁶ t/an

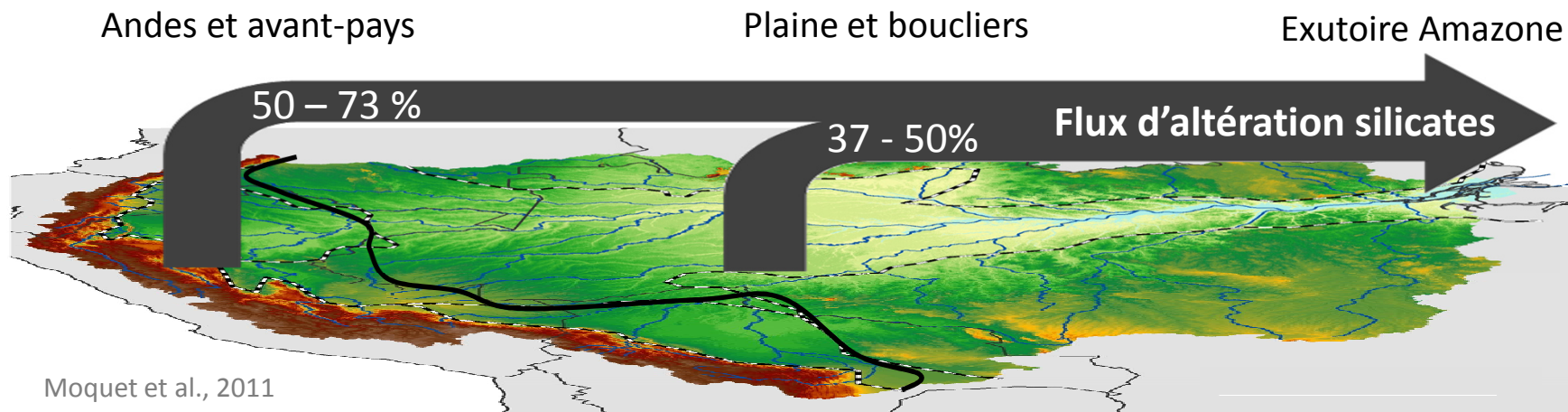
F CO₂_{sil}: 406 (250- 460).10⁹ moles CO₂ /an



Moquet et al., 2011

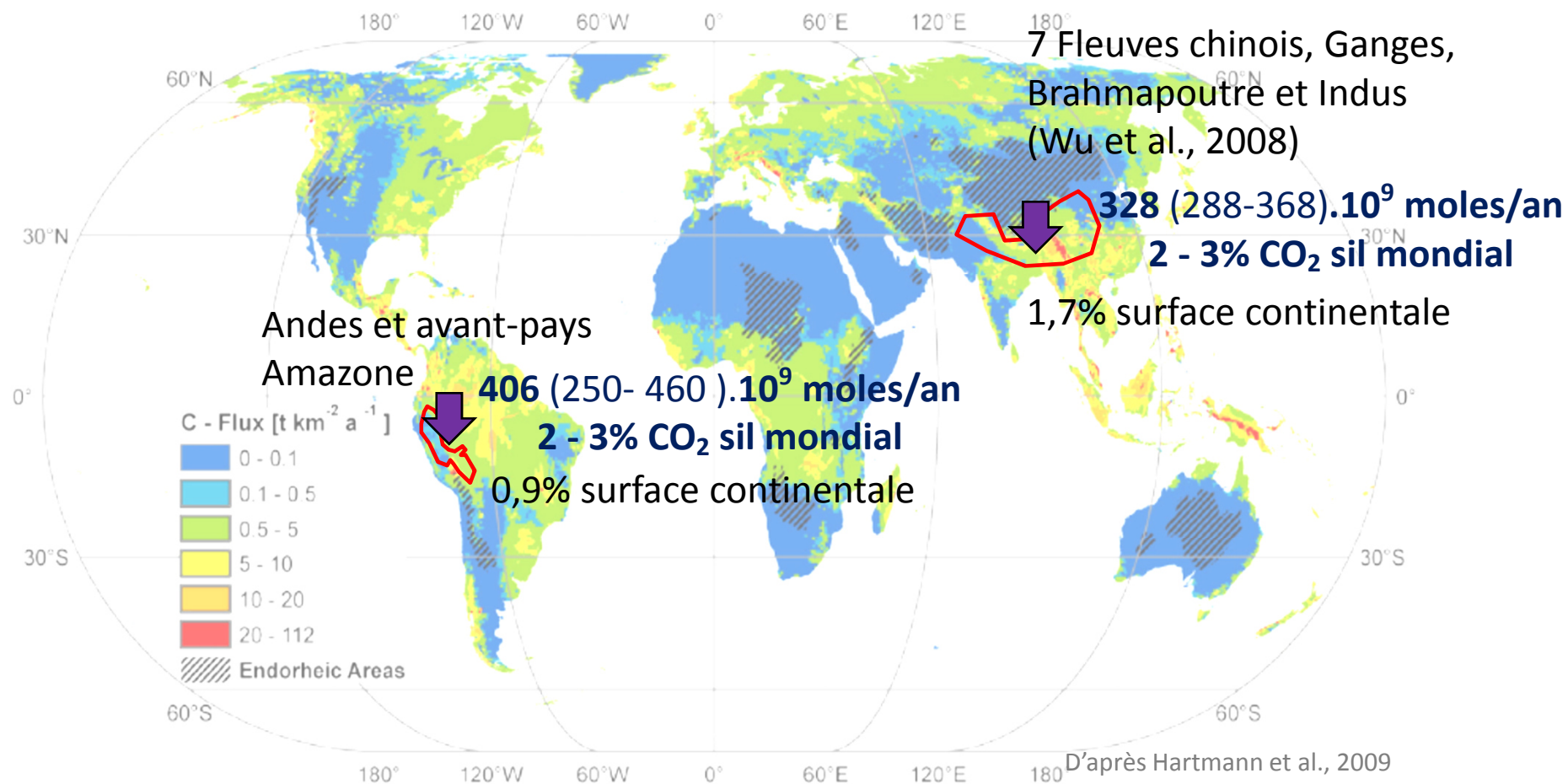


- ➔ Facteur d'altération des silicates de première ordre : le débit spécifique
- ➔ Bassins volcaniques plus sensibles



➔ plaine sédimentaire active dans le bilan d'altération des silicates

Consommation de CO_2 par altération des **silicates** Andes vs Himalaya



Contrôle de la variabilité spatiale de l'altération des chaînes de montagne
= facteur **hydroclimatique**

Observe-t-on une relation spatiale entre les flux d'érosion et d'altération des silicates dans les Andes?

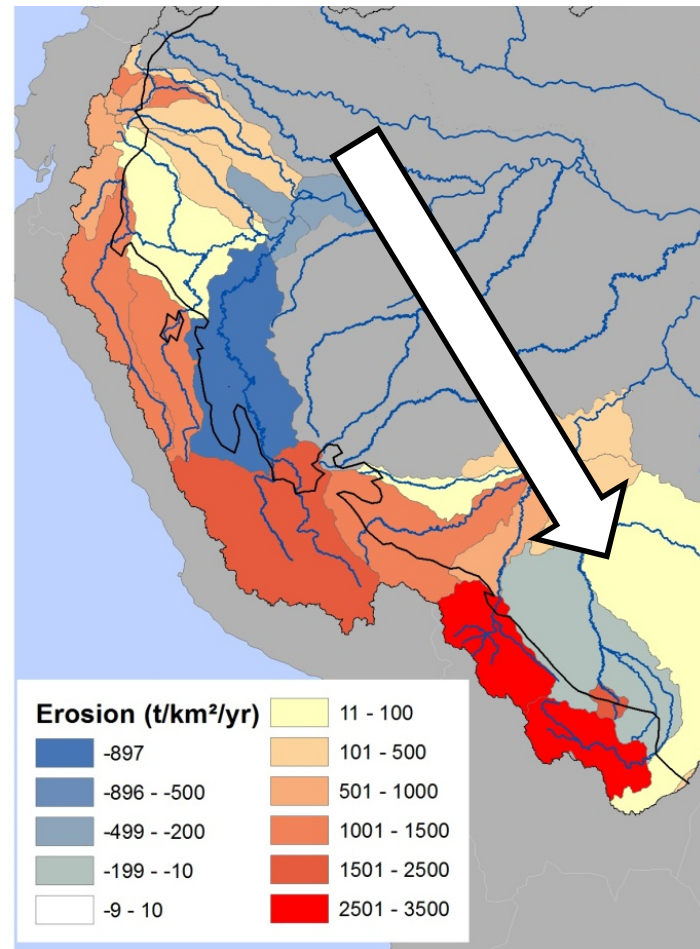


Haut Pastaza – Equateur (source : JL Guyot)

Moquet et al., 2014b

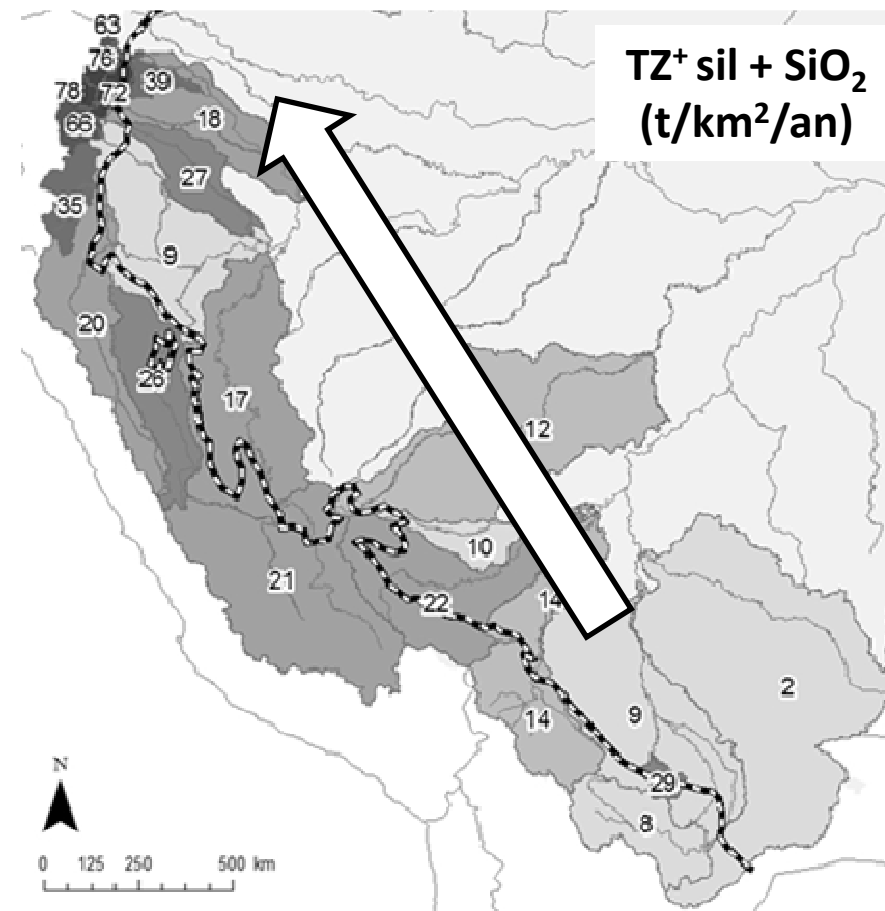
Erosion vs altération silicates

Erosion



Pepin et al., 2013 ; Armijos et al., 2013 a, b;
Vauchel et al., en prep.,

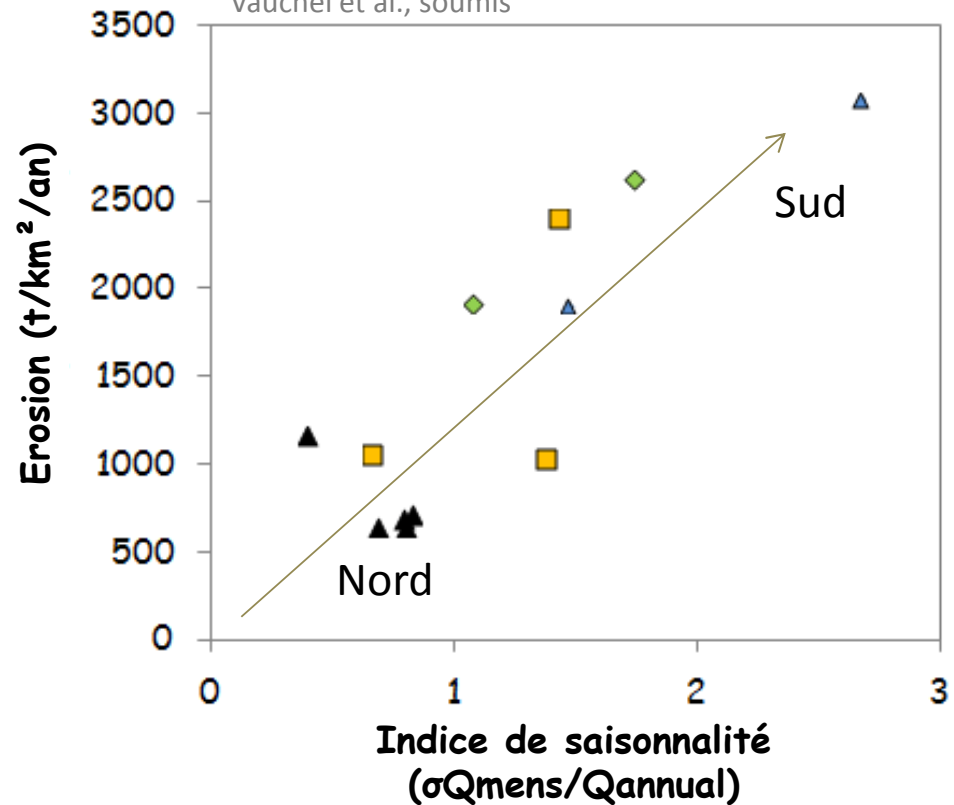
Altération silicates



Moquet et al., 2011

Relation entre l'altération des silicates, l'érosion et le climat dans les Andes

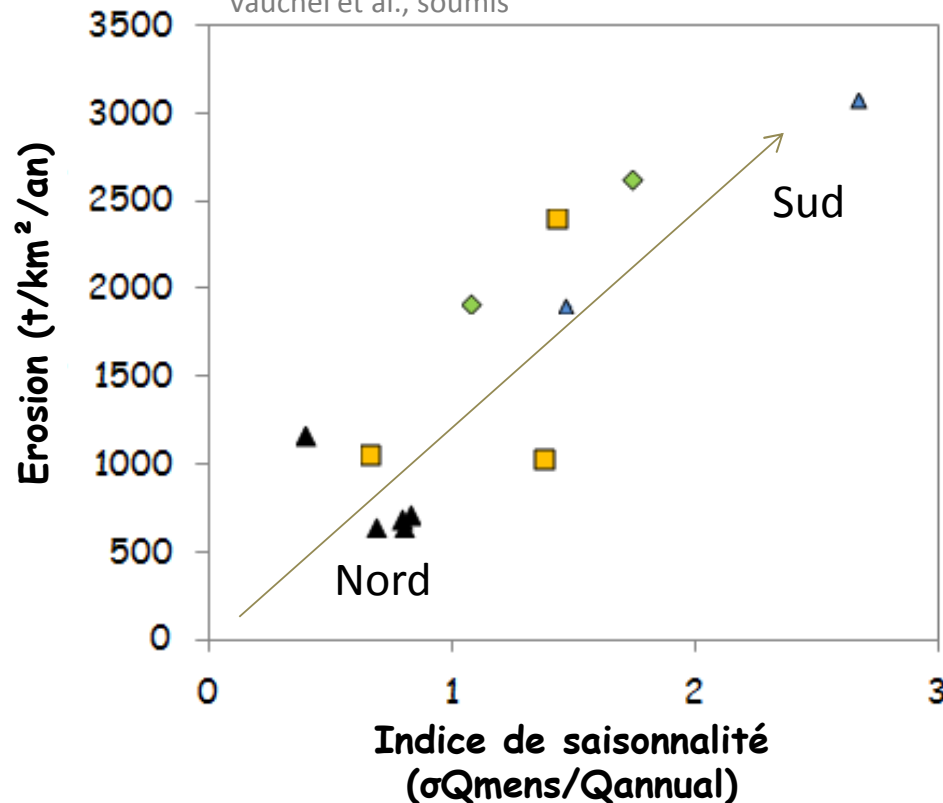
Pepin et al., 2013 ; Armijos et al., 2013 a, b;
Vauchel et al., soumis



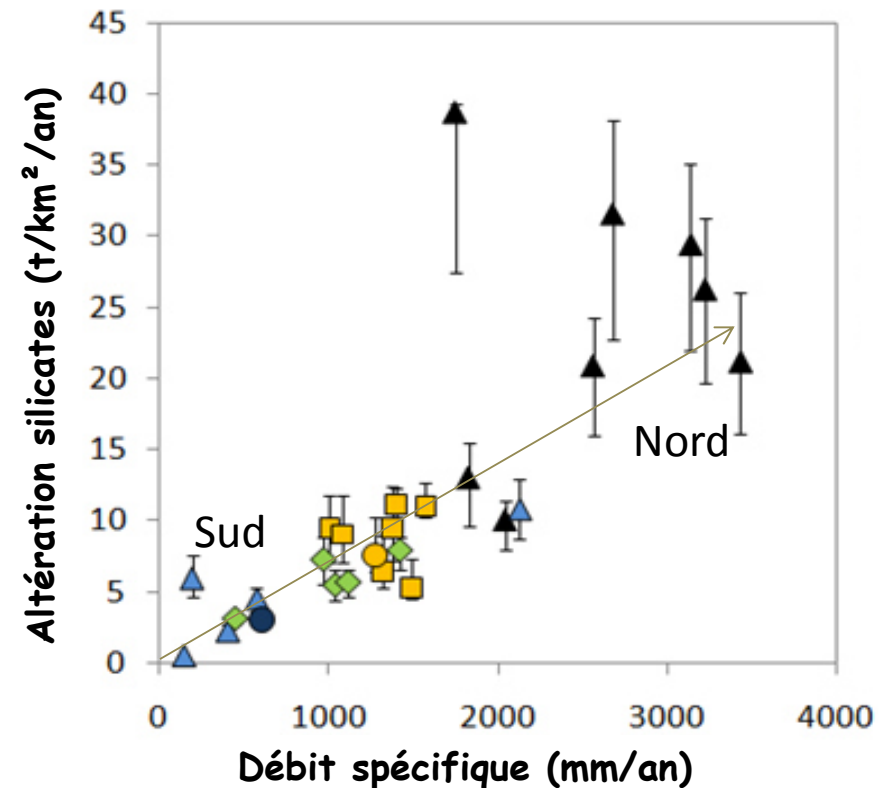
- ▲ Napo-Pastaza-Santiago
- ▲ Mamoré
- Marañon-Ucayali
- ◆ Beni
- Amazonas-Solimoes
- Madeira

Relation entre l'altération des silicates, l'érosion et le climat dans les Andes

Pepin et al., 2013 ; Armijos et al., 2013 a, b;
Vauchel et al., soumis



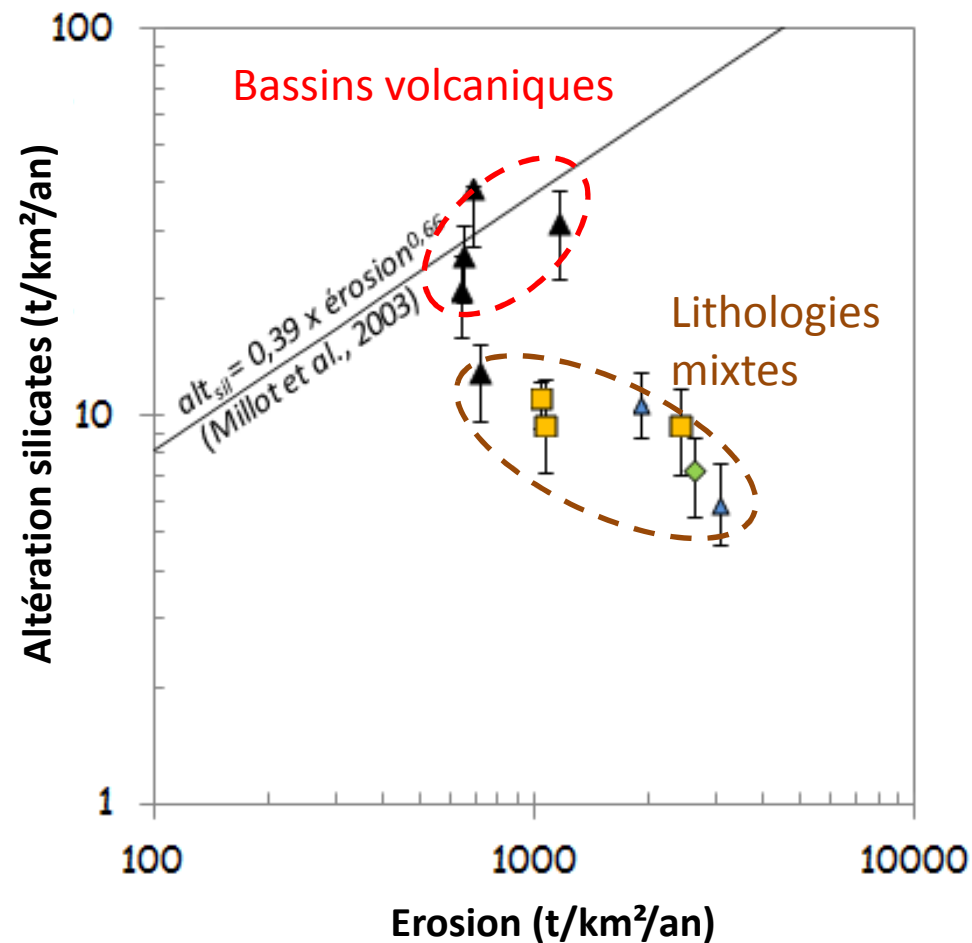
Moquet et al., 2011



▲ Napo-Pastaza-Santiago ▲ Mamoré
■ Marañon-Ucayali ◆ Beni
● Amazonas-Solimoes ● Madeira

→ Le climat contrôle la variabilité de l'érosion et de l'altération dans les Andes :
altération → précipitation annuelle
érosion → saisonnalité

Relation altération / érosion dans les Andes



Moquet et al., 2014b

- Andes : pas de loi uniforme entre érosion et altération.
- Bassins volcaniques répondent à une loi empirique :
 $\text{altération}_{sil} = 0.39 \text{ érosion}^{0,66}$ (Millot et al., 2003).

Conclusion

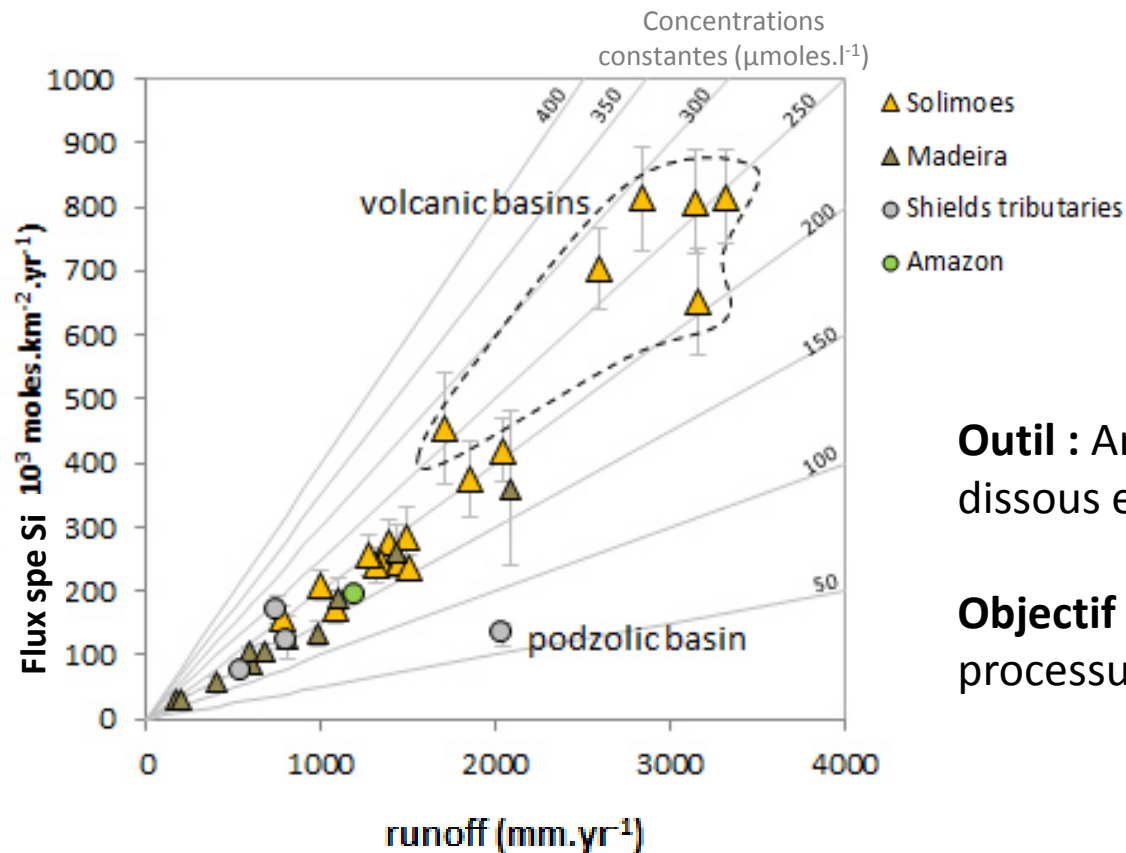
Bilan d'altération de l'Amazone : 3 résultats clefs

- L'**activité anthropique** peut être une source significative de matériel dissous
 - 20% des flux de Cl jusqu'en 2009
- Les **Andes** ne sont pas la seule pompe à **CO₂ géologique** du bassin
 - La plaine a un rôle significatif : altération des sédiments dans les varzeas (plaine inondable)? Dans les sols?
- Dans les Andes : **Erosion et Altération** dépendent du **climat** mais pas selon le même mode de contrôle
 - Relation inverse. Seuls les bassins volcaniques répondent à une loi globale.

Perspectives

Le cycle continental du silicium :

→ Cycle naturel du Si en milieu tropical :
Amazonie



Outil : Analyse des isotopes du silicium dissous et particulaire ($\delta^{29}\text{Si}$, $\delta^{30}\text{Si}$)

Objectif : identifier les sources et/ou processus de contrôle du Si dissous

→ Interférences anthropiques : Eutrophisation et stockage sédimentaire
Cas du bassin versant de la Loire?

A wide river, likely the Rio Napo, is shown at sunset. The sun is low on the horizon, creating a bright, golden reflection that stretches across the calm water. The sky is filled with soft, wispy clouds, and the distant shoreline is lined with a dark silhouette of trees. In the foreground, the water's surface is textured with small ripples. The overall mood is peaceful and serene.

Merci
Gracias
Obrigado

Rio Napo