



Jean-Baptiste Charlier

CIRAD PERSYST, Guadeloupe

Fonctionnement et modélisation hydrologique d'un petit bassin versant cultivé en milieu volcanique tropical



Thèse encadrée par :

Philippe Cattan (CIRAD PERSYST, Guadeloupe)
Roger Moussa (INRA LISAH, Montpellier)



*Projet de recherche sur la gestion des risques environnementaux liés à
l'activité agricole à l'échelle du bassin versant en zone bananière*



INTRODUCTION

*Systeme de culture aux Antilles :
monoculture bananière sur sols volcaniques*



Plantations de banane en Guadeloupe



Épandages de pesticides

La chlordécone témoigne de la pollution

- Contamination des sols, eaux, légumes, viande, etc...
- Concentration en certains captages = 100 x norme de potabilité

Snegaroff (1977) ; Beaugendre et Edmond-Mariette (2005) ; Cabidoche et al. (2006)

Quelles zones à risque ?

Quels outils d'évaluation de l'impact environnemental ?



caractériser le **fonctionnement hydrologique** à l'échelle du bassin versant en bananeraies



développer des **outils de modélisation** pour tester des scénarios d'occupation du sol

Nombreux travaux à l'échelle du bassin versant :

Étude des processus hydrologiques

Australie (*Bonell et Gilmour, 1978*)

Guyane – ECEREX (*Roche, 1982; Fritsch, 1992*)

Indonésie (*Bruijnzeel, 1983*)

Brésil (*Lesack, 1993; Fujieda et al., 1997*)

Porto Rico (*Schellekens, 2004*)



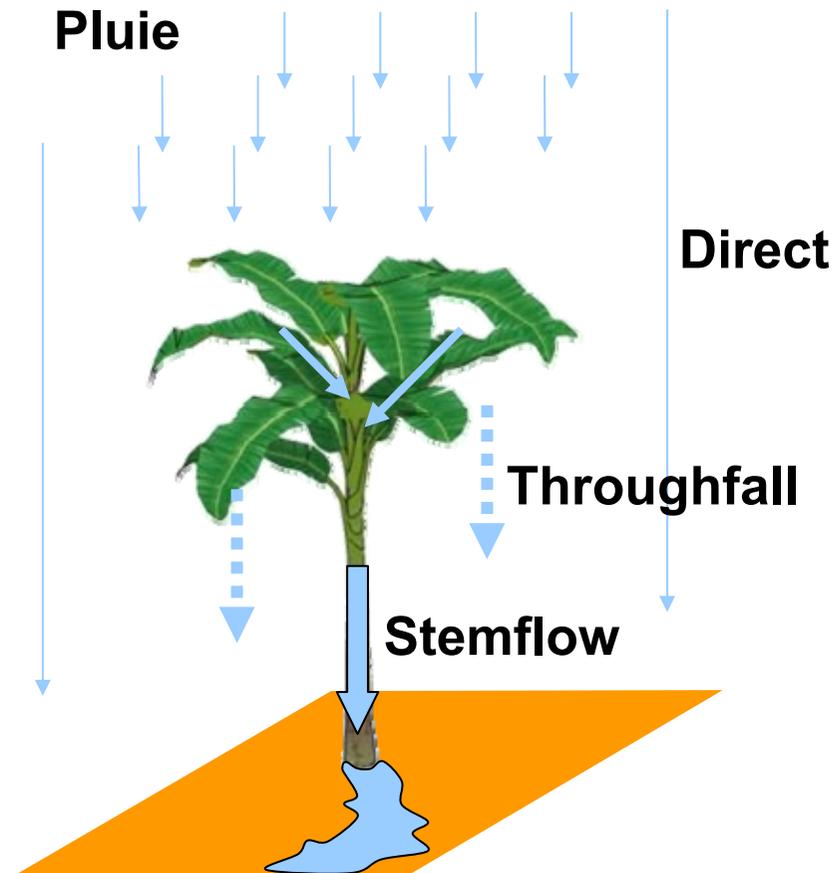
- Forêt tropicale
- Sols évolués infiltrants



Peu d'études en milieu volcanique

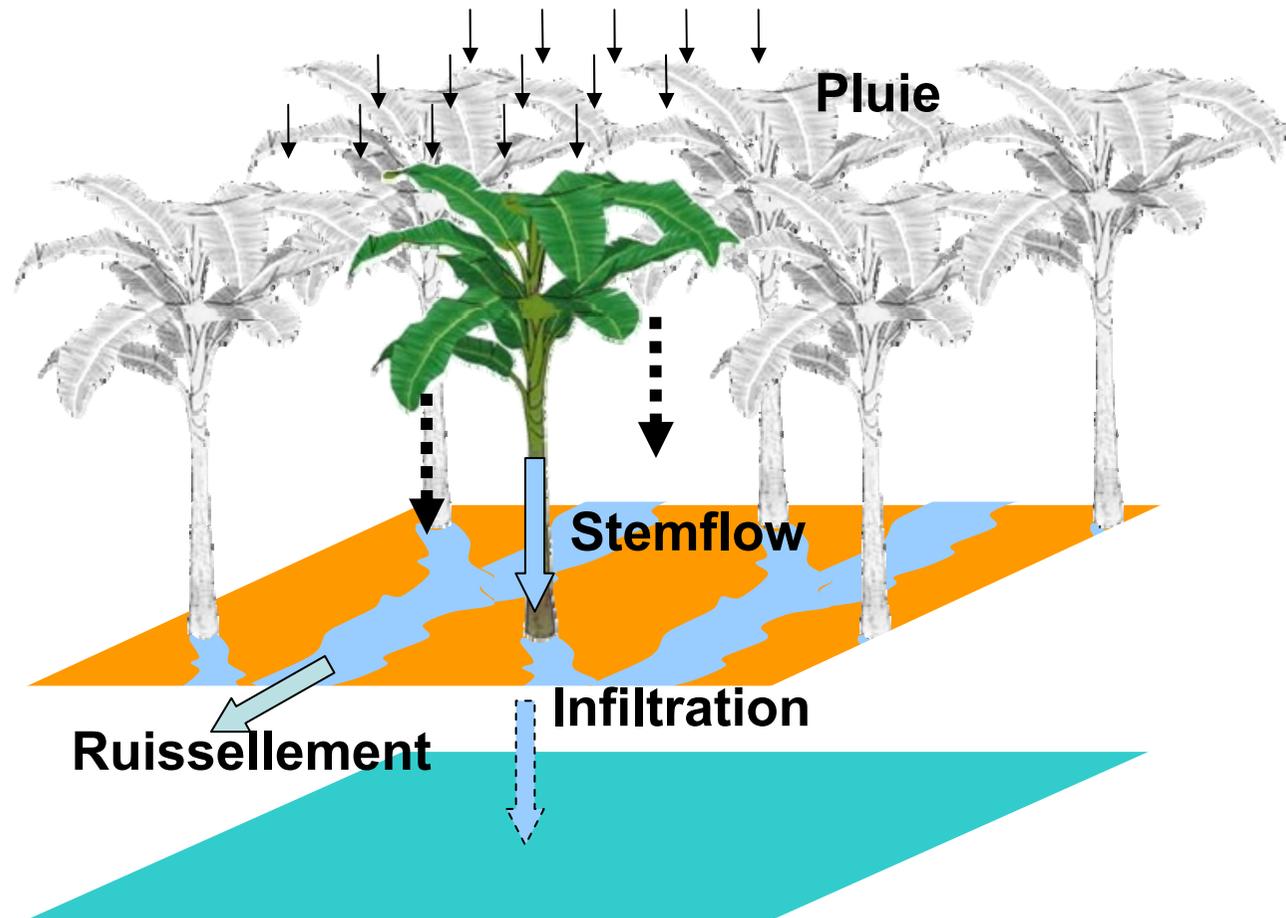
Pas de travaux en bananeraies

- Pluie > 2 000 mm an⁻¹ avec de fortes intensités



Redistribution de la pluie par le couvert

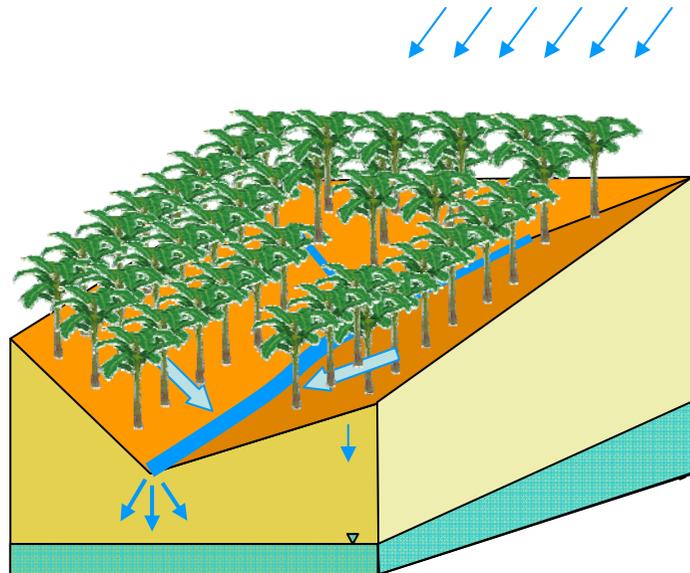
Bussière (1995) ; Harris (1997) ; Cattan et al. (2007) ; Sansoulet (2007)



Impact du stemflow et des pratiques culturales à la surface du sol sur le partage ruissellement- infiltration

Rishirumuhirva (1993) ; Dorel (1993) ; Khamsouk (2001) ; Cattan et al. (2006)

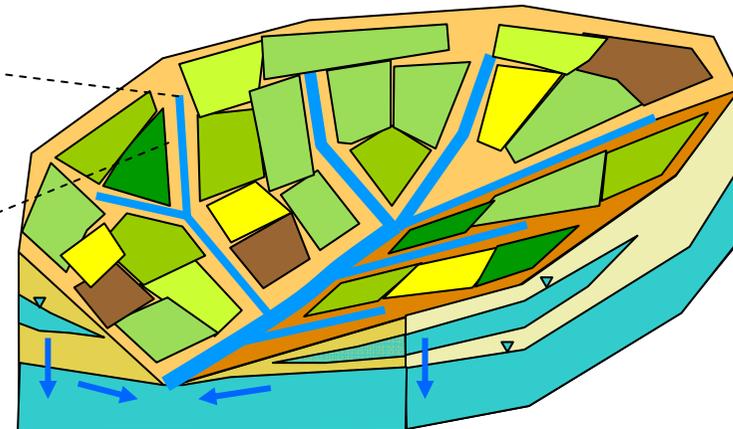
Sous-bassin



Rôle des fossés sur les échanges surface - souterrain

Moench et al. (1974) ; Marofi (1999) ; Dagès (2006)

Bassin



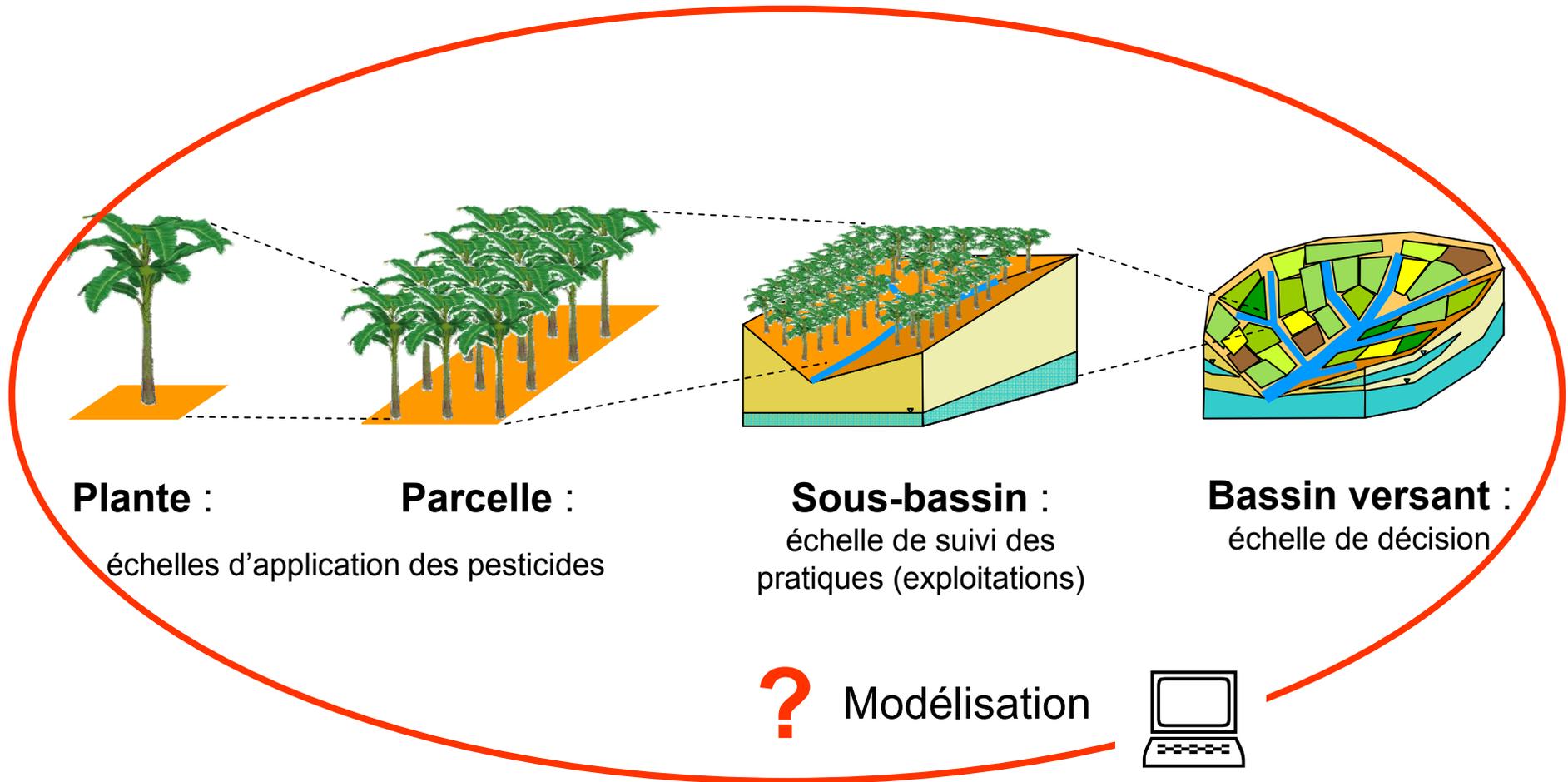
Influence des aménagements anthropiques

Gallart et al. (1994) ; Moussa (2002) ; Carluer et De Marsily (2004)

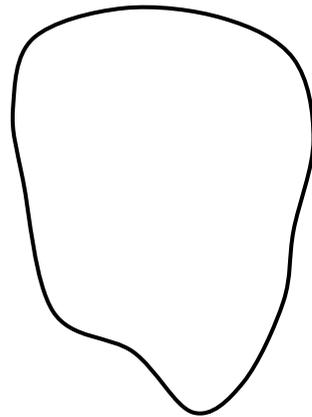
Processus souterrains

Lesack (1993) ; Cook et al. (1998)

Hétérogénéité du milieu : variabilité spatiale des processus

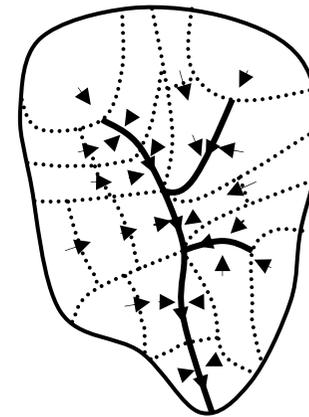


Modèle global



Crawford et Linsley (1966) ; Bergström (1995) ; Edijatno (1999) ; Perrin (2003)

Modèle distribué



Beven et Kirkby (1979) ; Abbott et al. (1986) ; Bouraoui et Dillaha (1996) ; Vertessy et al. (1993)

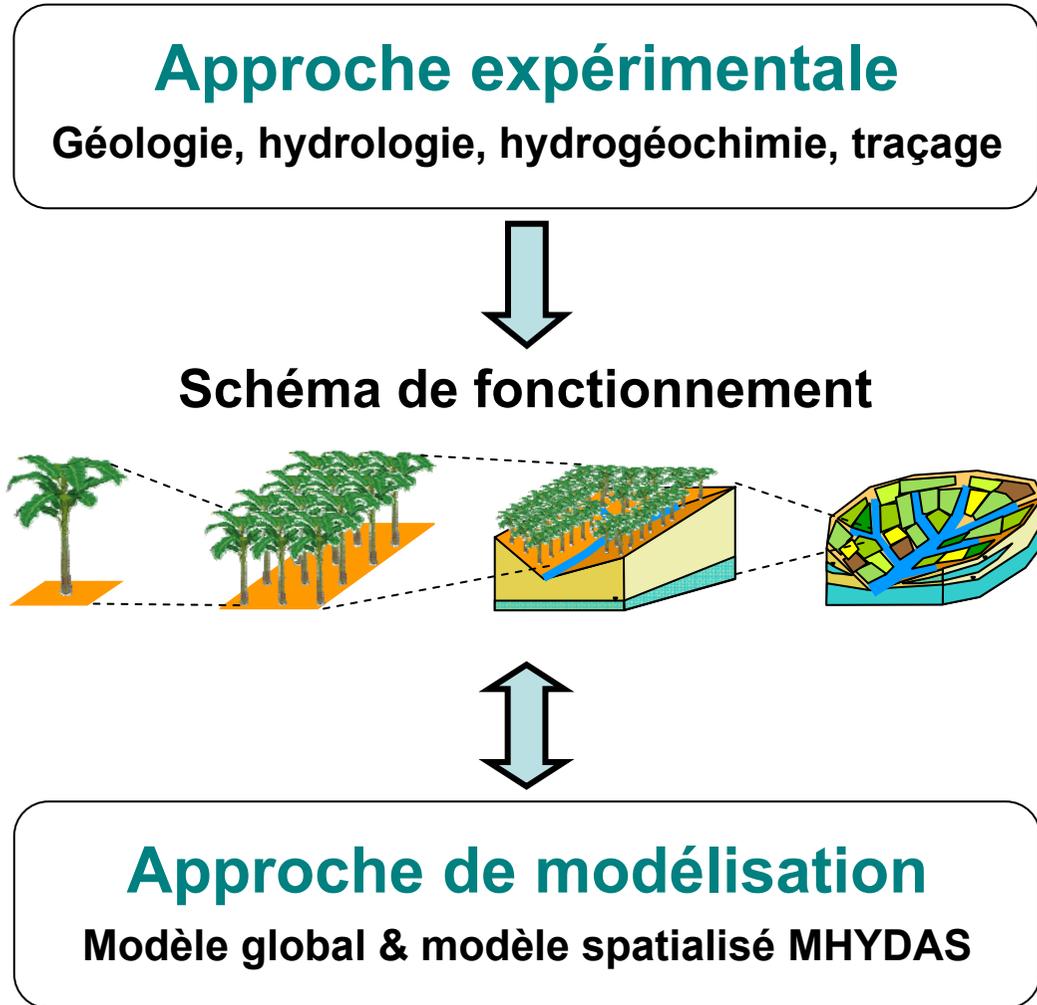
Parmi les quelques modèles qui prennent en compte les spécificités du milieu cultivé : MHYDAS (*Moussa et al., 2002*)

MHYDAS ne tient pas compte du stemflow du bananier

Caractériser le fonctionnement hydrologique d'un petit bassin versant bananier en milieu volcanique tropical

1 - Quels sont les processus hydrologiques et les voies de contamination des eaux de surface et souterraines ?

2 - Quel est le rôle du stemflow sur le ruissellement et comment le modéliser aux échelles de la parcelle et du bassin versant ?



I - Site & données spatiales

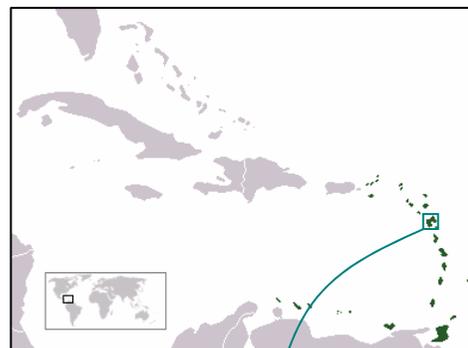
II - Structure du système

III - Fonctionnement hydrologique

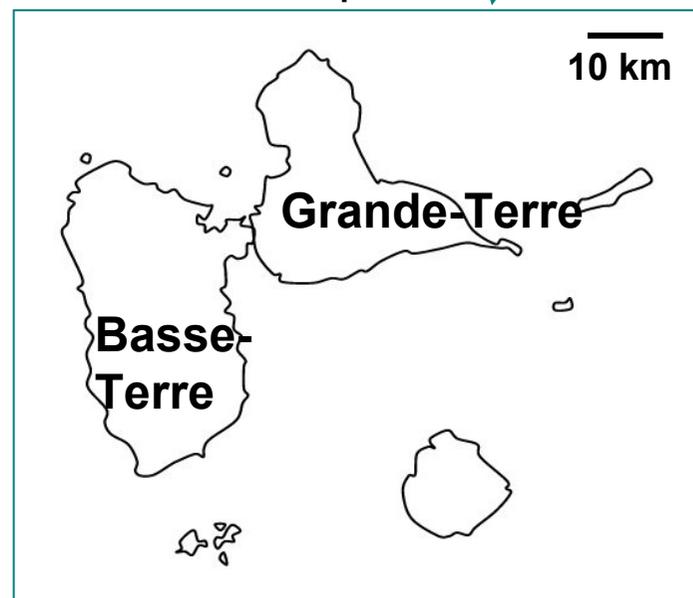
IV - Modélisation spatialisée

I – SITE & DONNÉES SPATIALES

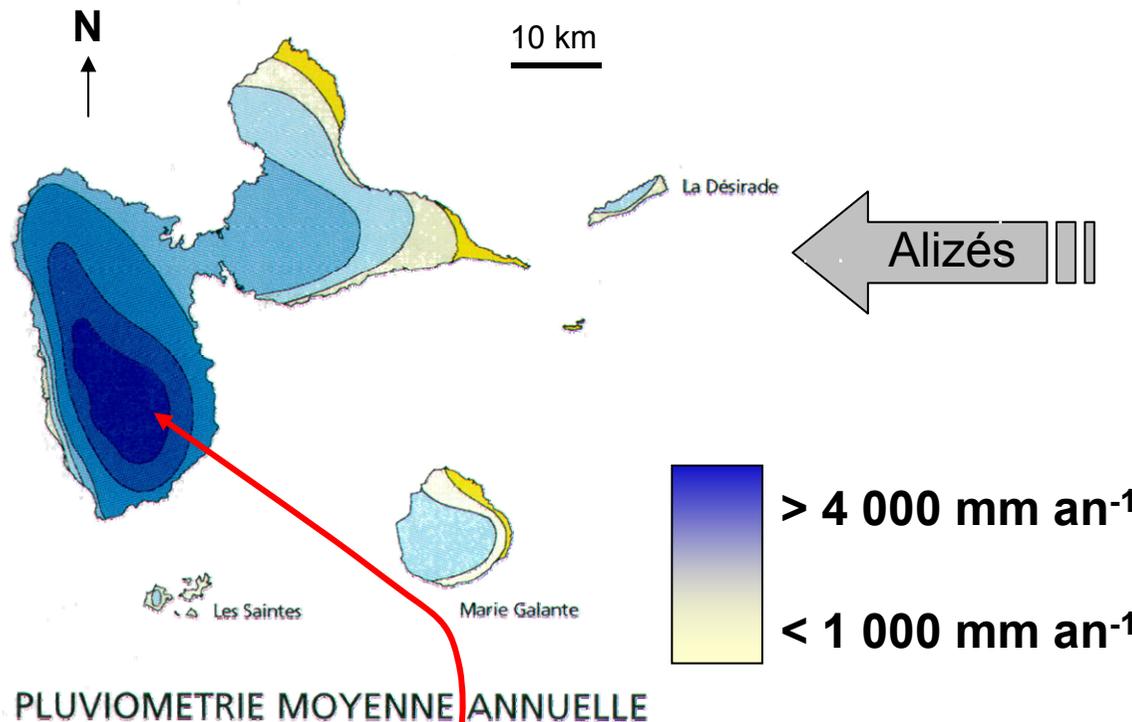
Les Antilles



La Guadeloupe



Source : DIREN (2006) d'après METEO FRANCE



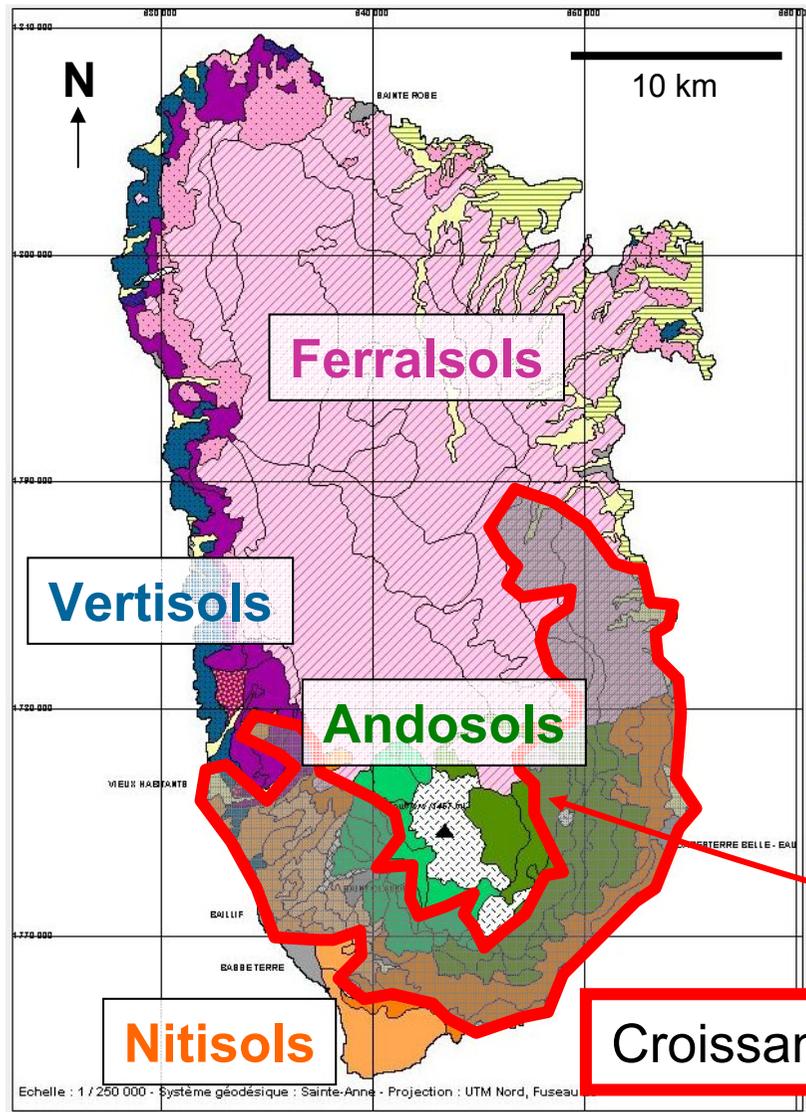
Bassin de Féfé

Climat maritime tropical

En altitude :

- Pluie > 4 000 mm an⁻¹
- Évapotranspiration ≈ 1 800 mm an⁻¹
- Intensités élevées
- Dépressions tropicales
- Saison sèche peu marquée
- Humidité constante toute l'année

Chaperon et al. (1983) ; Morell (1986)



Bananeraies d'altitude

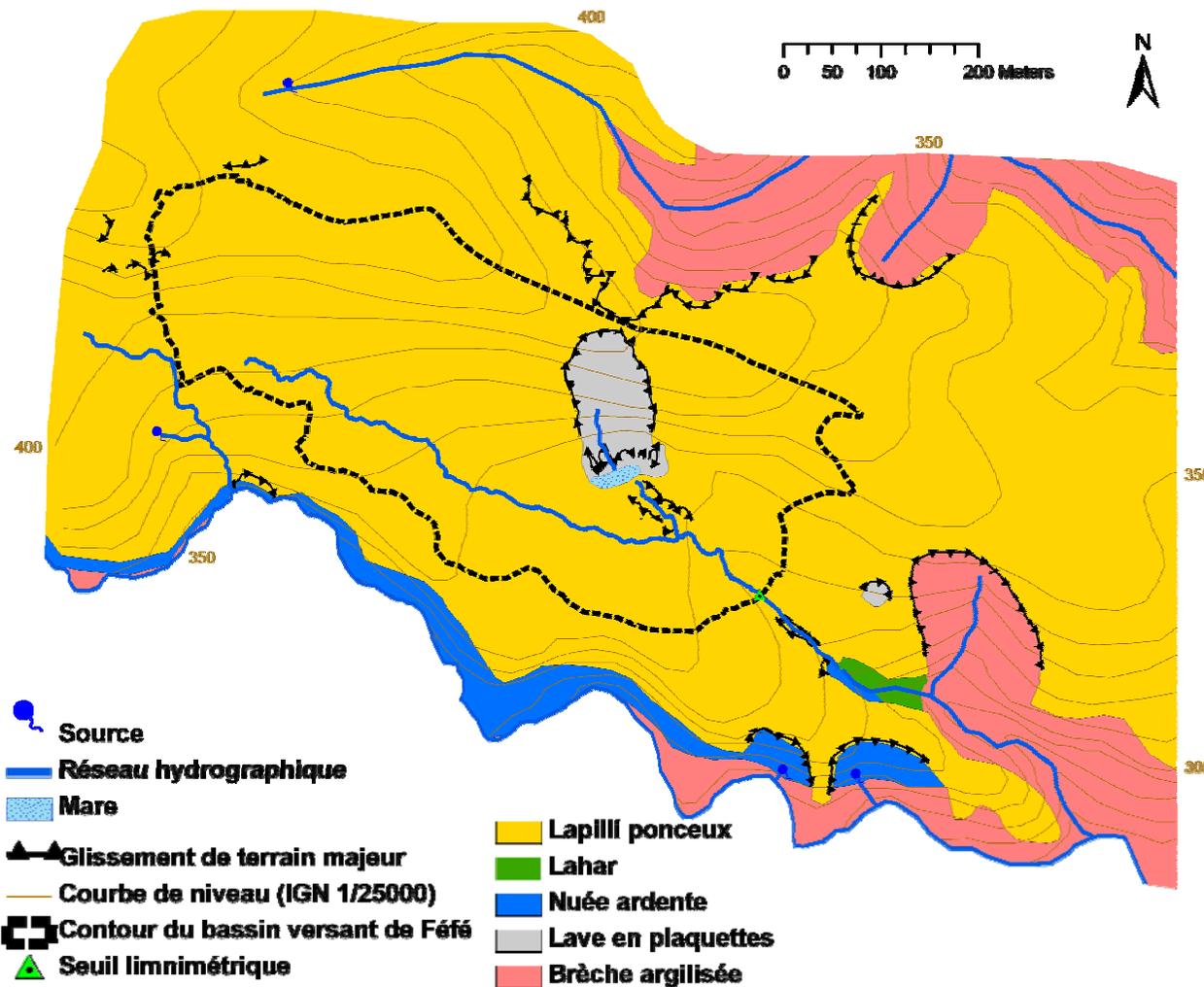
- Non mécanisé
- Pas de labour
- Pentes jusqu'à 60%

Andosols d'altitude

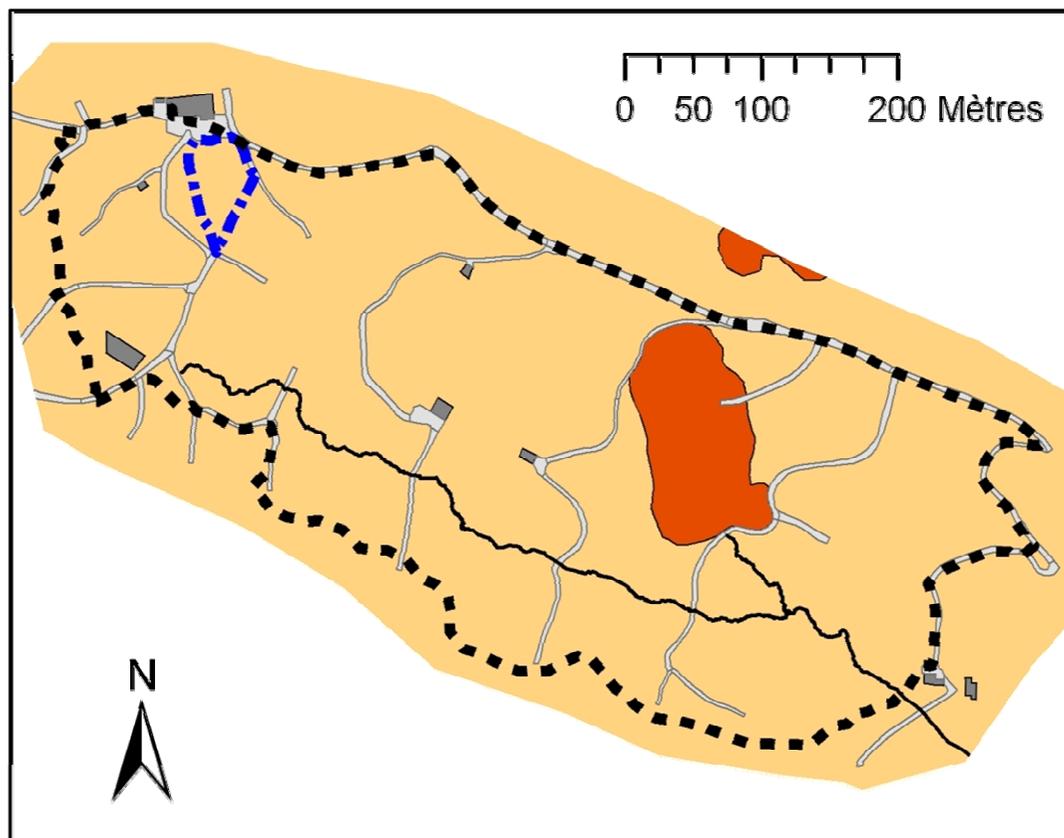
- Forte teneur en matière organique
- Forte teneur en eau
- $K_s > 30 \text{ mm/h}$

Colmet-Daage (1969) ; Delvaux (1995) ; Dorel (2000)

Source : Colmet-Daage (1969)



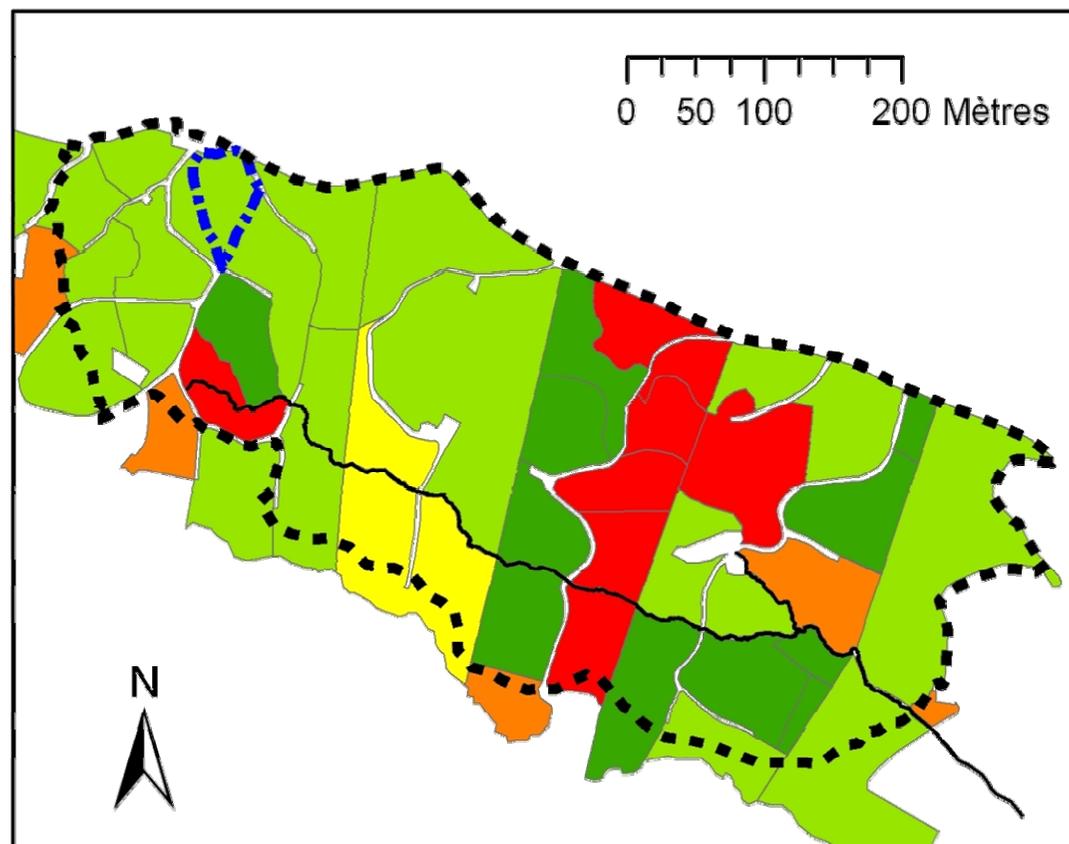
➔ Structure en remplissage de paléo-vallées



Andosol
 Chemin et route
 Ferralsol
 Hangar

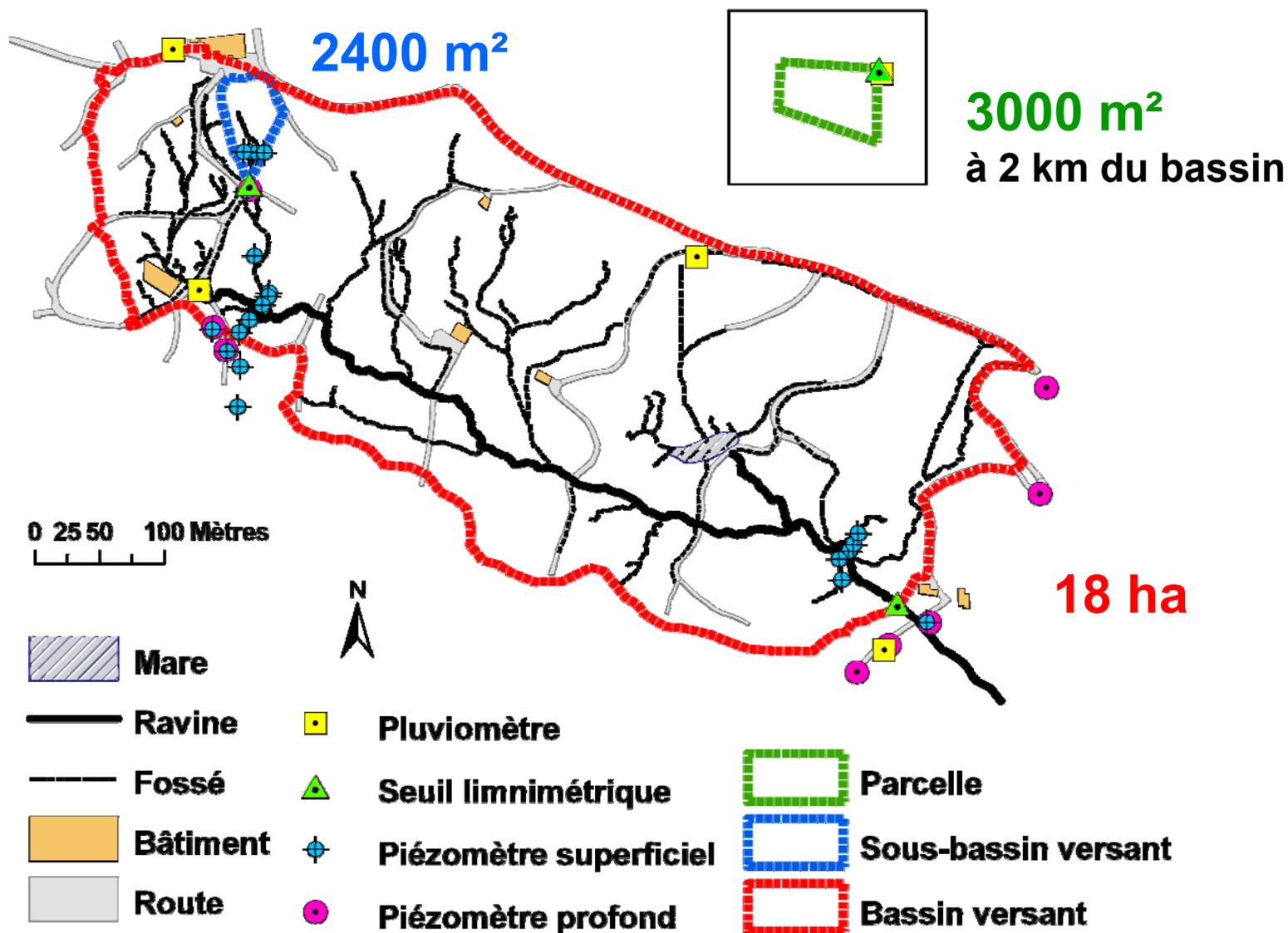


Andosols ≈ 90 % surface



Banane
 Fleurs
 Sol nu
 Abandon
 Prairie

➔ Banane > 50 % surface



II – STRUCTURE DU SYSTEME

- Quelle est la nature du système ?
- Quels sont les compartiments d'eau ?

Variabilité spatiale du K_s



Andosols
($K_s \approx 30$ mm/h)



Ferralsols
($K_s > 400$ mm/h)

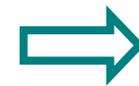
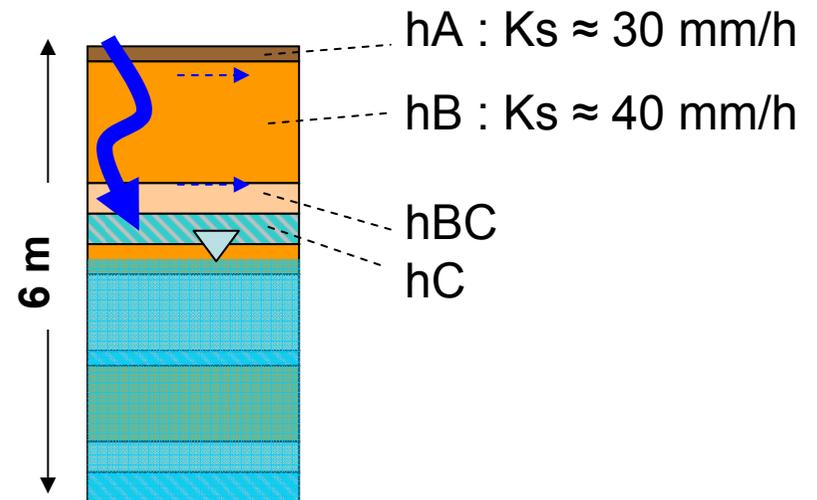


Routes, hangars
($K_s \approx 0$ mm/h)



Sols infiltrants

Variabilité verticale du K_s

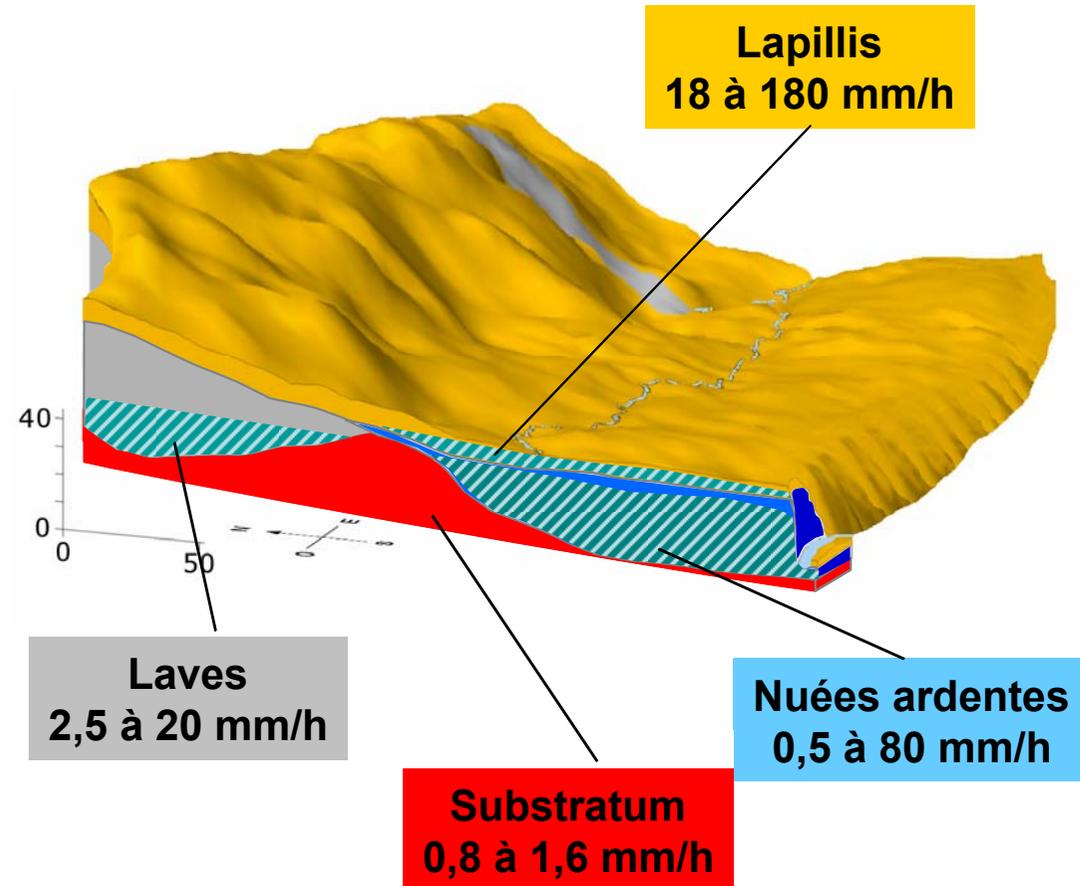


Drainage vertical favorisé

Variabilité spatiale et verticale de la perméabilité

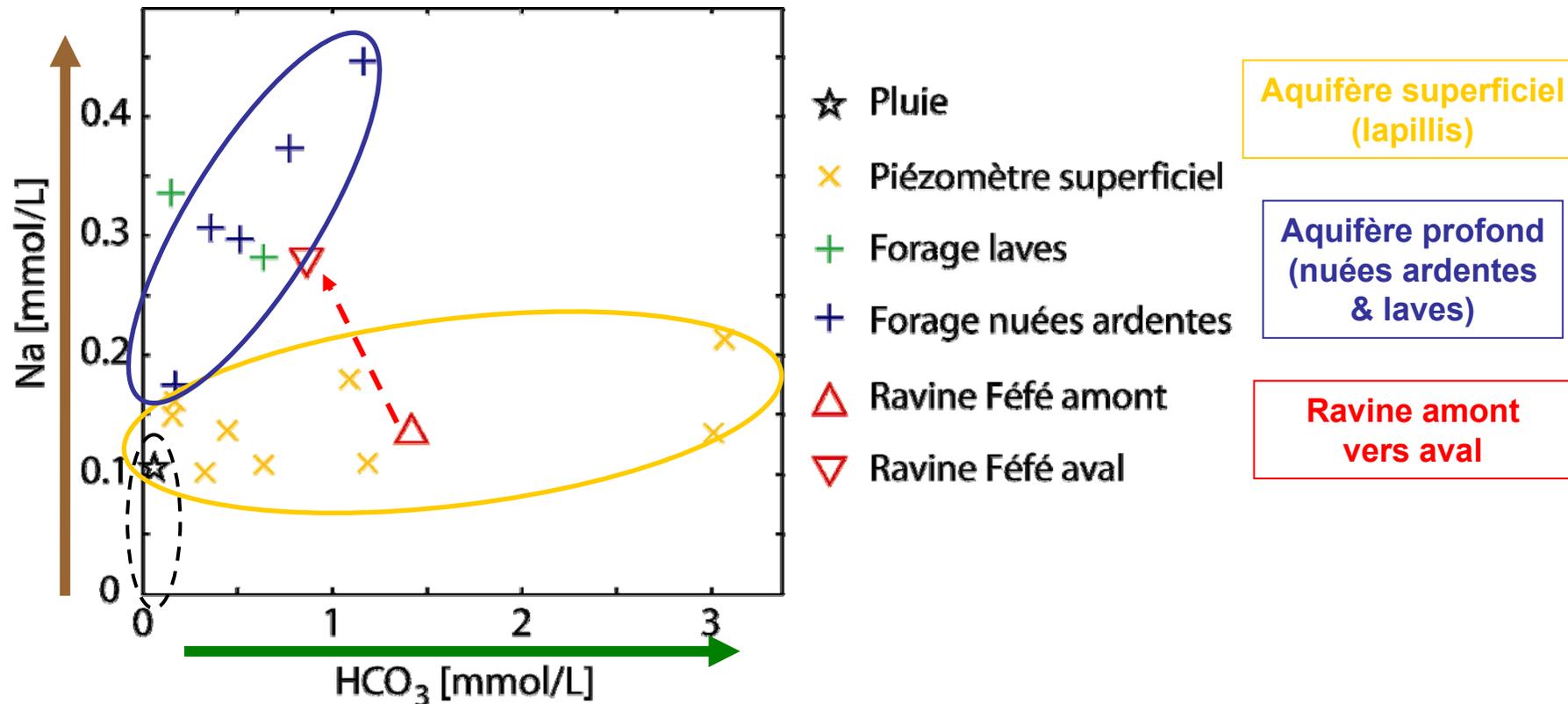
Tests hydrauliques :

- Slug tests
- Tests d'injection
- Essai de pompage



- 3 formations de gamme de perméabilité similaire
- Compartimentation => niveaux plus argileux inter-stratifiés

Prélèvements ponctuels – période de basses eaux (juin 2006)



- enrichissement en $\text{HCO}_3 \Rightarrow$ forte influence des écoulements de surface
- enrichissement en Na \Rightarrow temps de résidence « long »



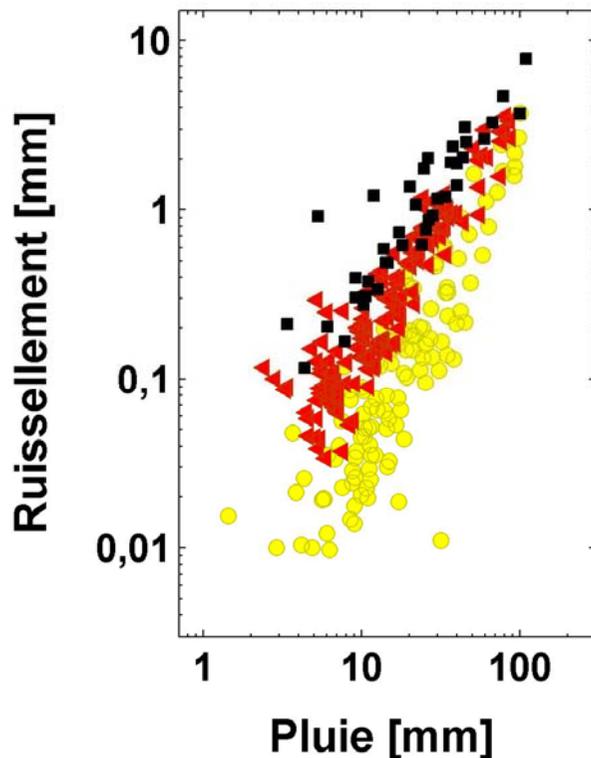
Deux compartiments aquifères : superficiel et profond

III – FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE

- Quels sont les flux en surface et en souterrain ?
- Quels sont les chemins de l'eau et les voies de contamination du sous-bassin au bassin versant ?

- Humide
- ▲ Transition
- Sec

États de saturation de bassin
Indicateur = débit de base

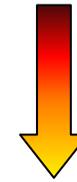
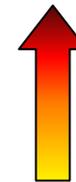


Coefficient de Ruissellement

Temps de réponse

Humide 24 %

18 min



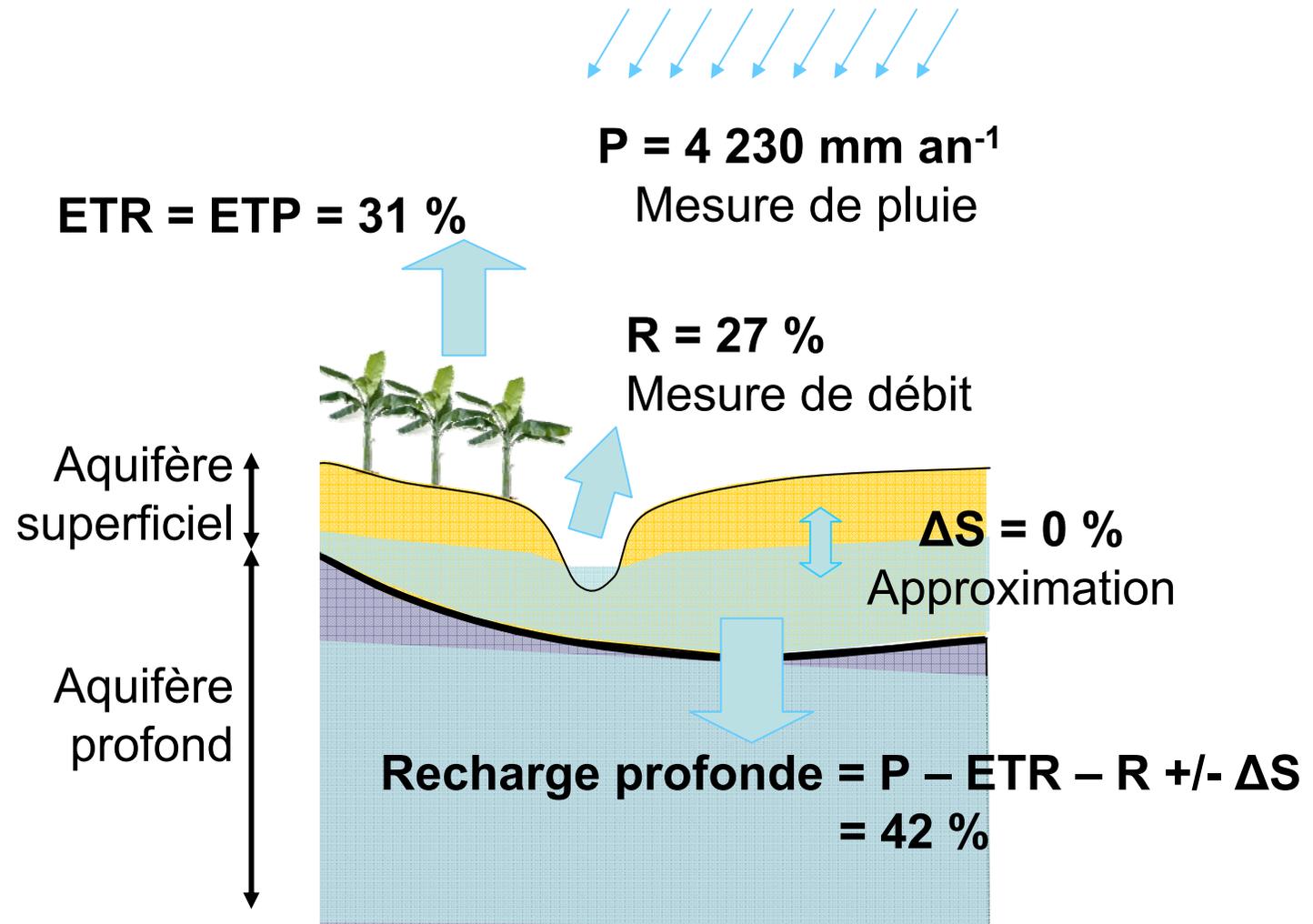
Sec 6 %

60 min



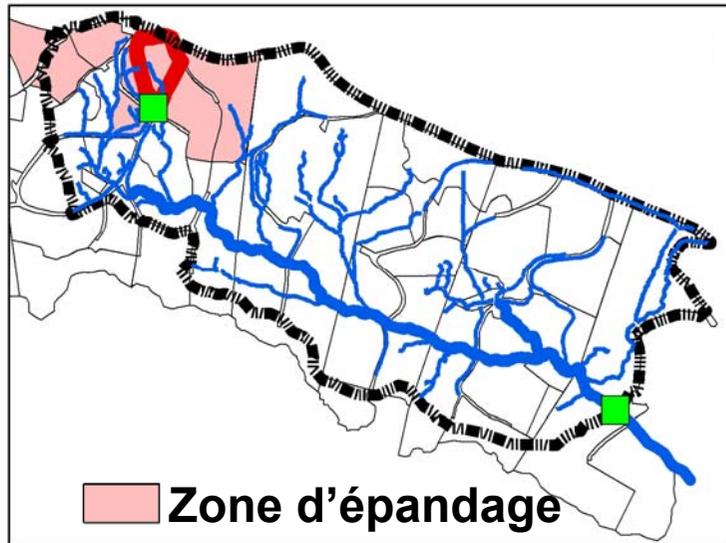
Réponse du système rapide et intense pour des sols perméables

Bonell et Gilmour (1978) ; Bruijnzeel (1983) ; Lesack (1993) ; Elsenbeer et Lack (1996) ; Schellekens et al. (2004)



➡ Importance des flux de recharge de nappe

Traçage d'un nématicide : cadusafos (juillet-août 2006)



Granules au pied du bananier

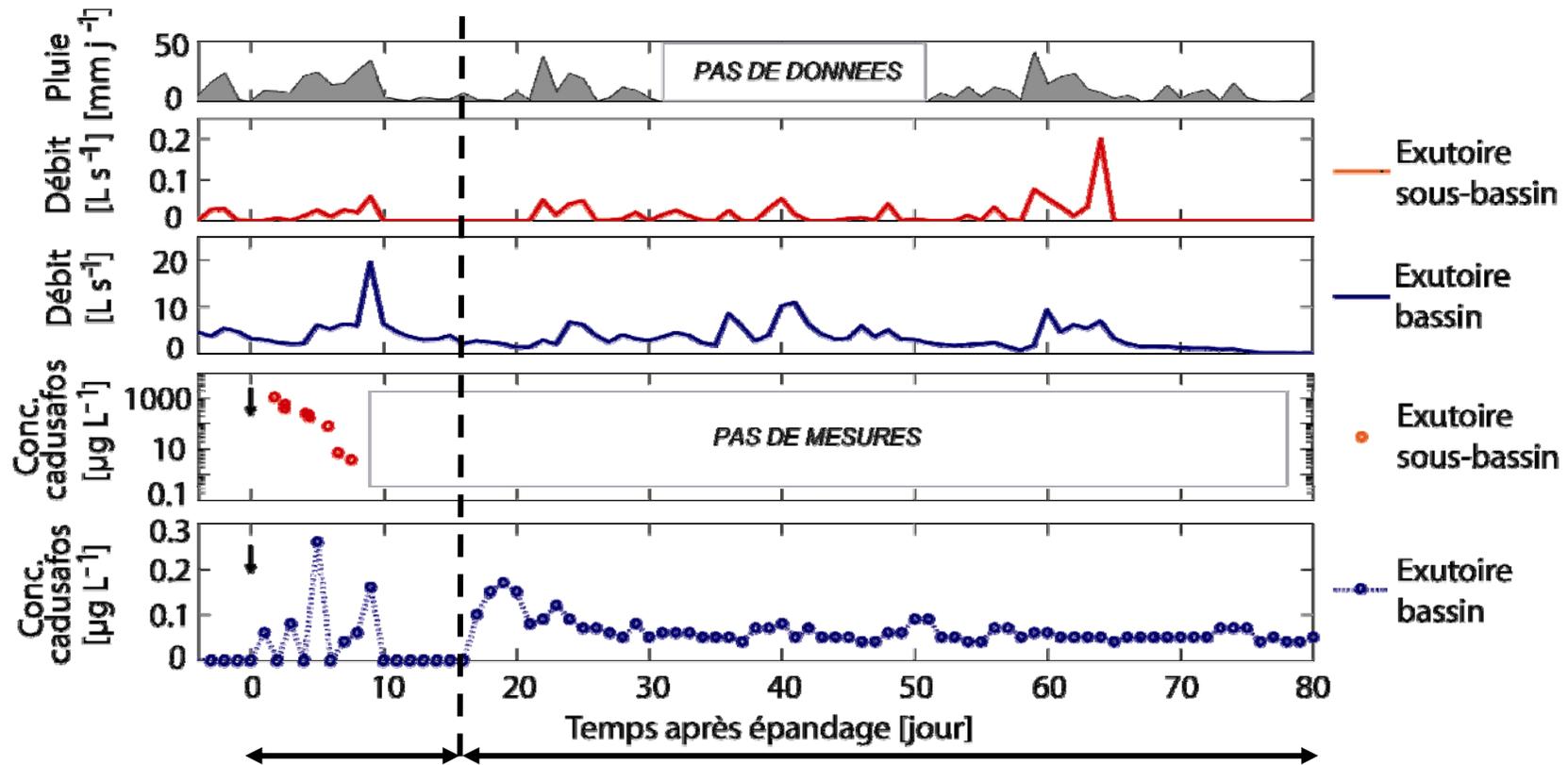


Suivi des concentrations

Application = 6 kg ha⁻¹

Demi-vie : 11 à 15 jours

Pluie, débits et concentrations des eaux de ruissellement (juillet-août 2006)



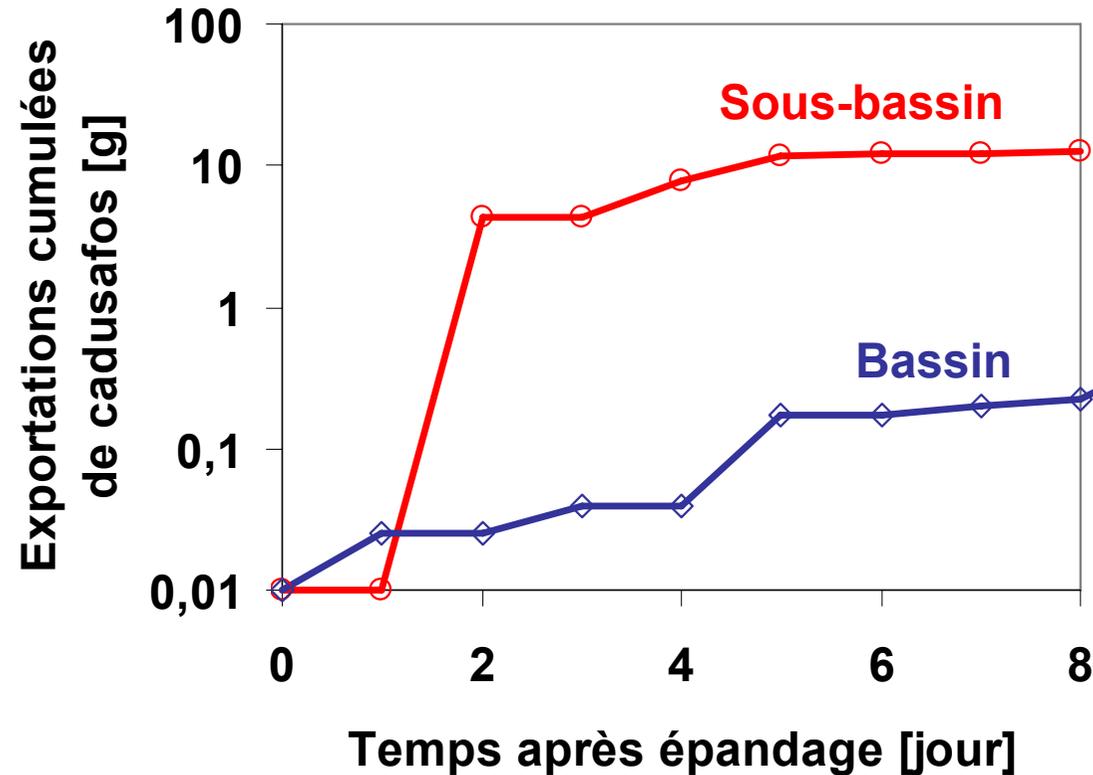
Contamination par pics
= ruissellement de surface

Contamination chronique
= drainage de la nappe superficielle

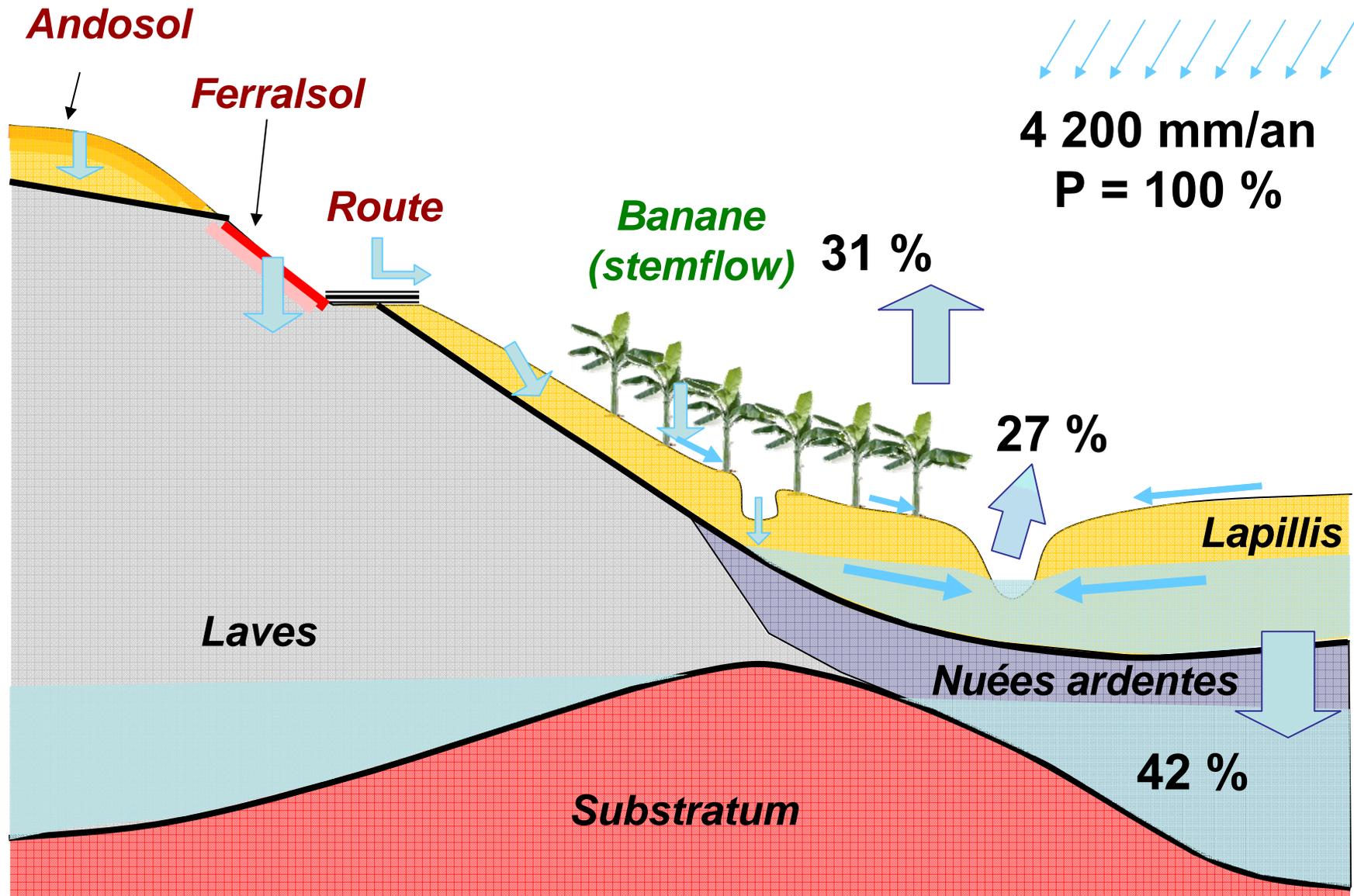


Deux mécanismes de contamination des eaux de surface

Exportations de cadusafos du sous-bassin au bassin versant



ré-infiltration en fossés



IV – MODELISATION SPATIALISEE EN BANANERAIES EN MILIEU VOLCANIQUE

- Quel est le rôle du stemflow aux échelles de la parcelle et du bassin ?
- Comment intégrer le stemflow dans une modélisation spatialisée ?

Hypothèses simples, peu de paramètres

Données d'entrée

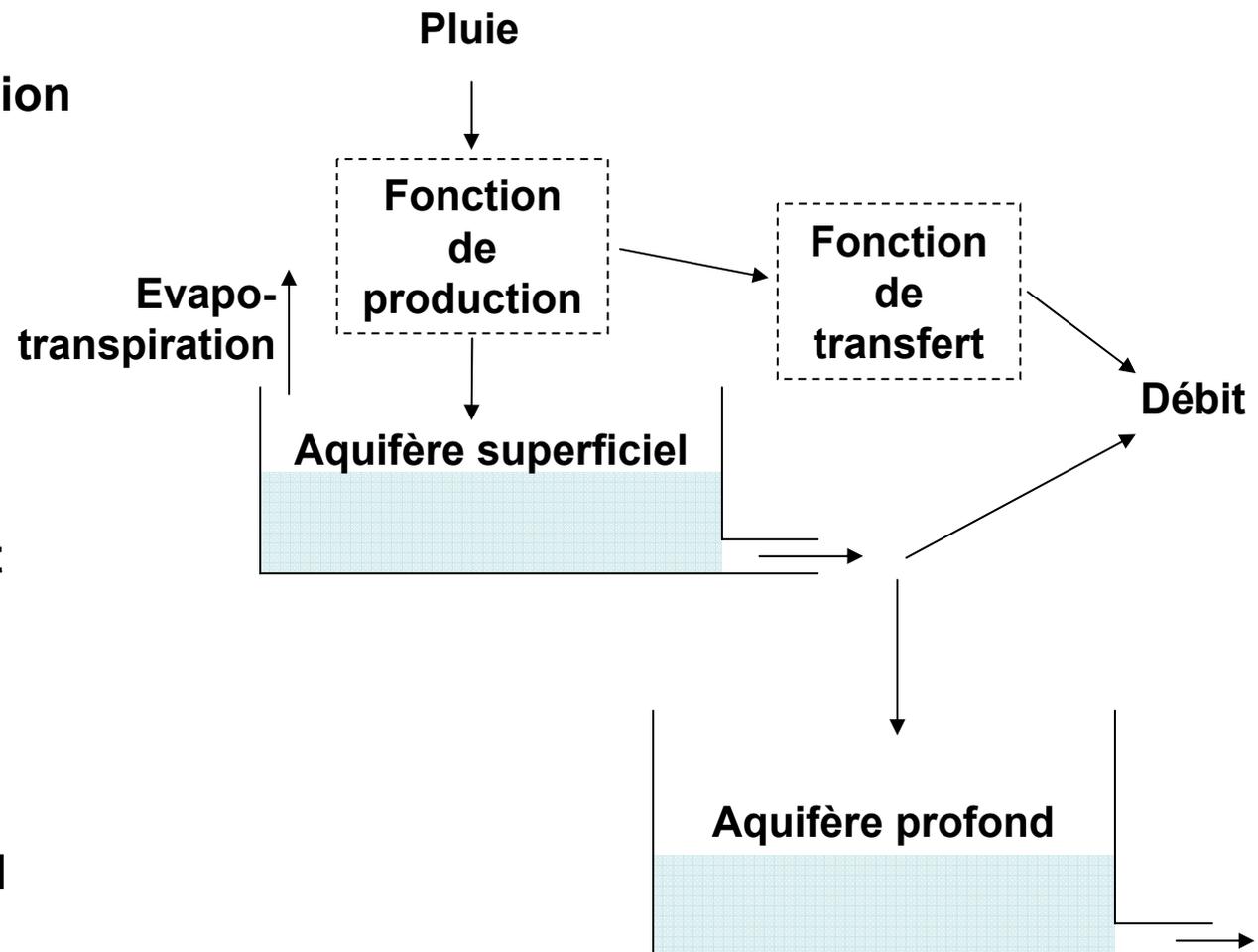
- Pluie, Evapotranspiration
- K_s mesuré
- Stocks initiaux

6 paramètres calés

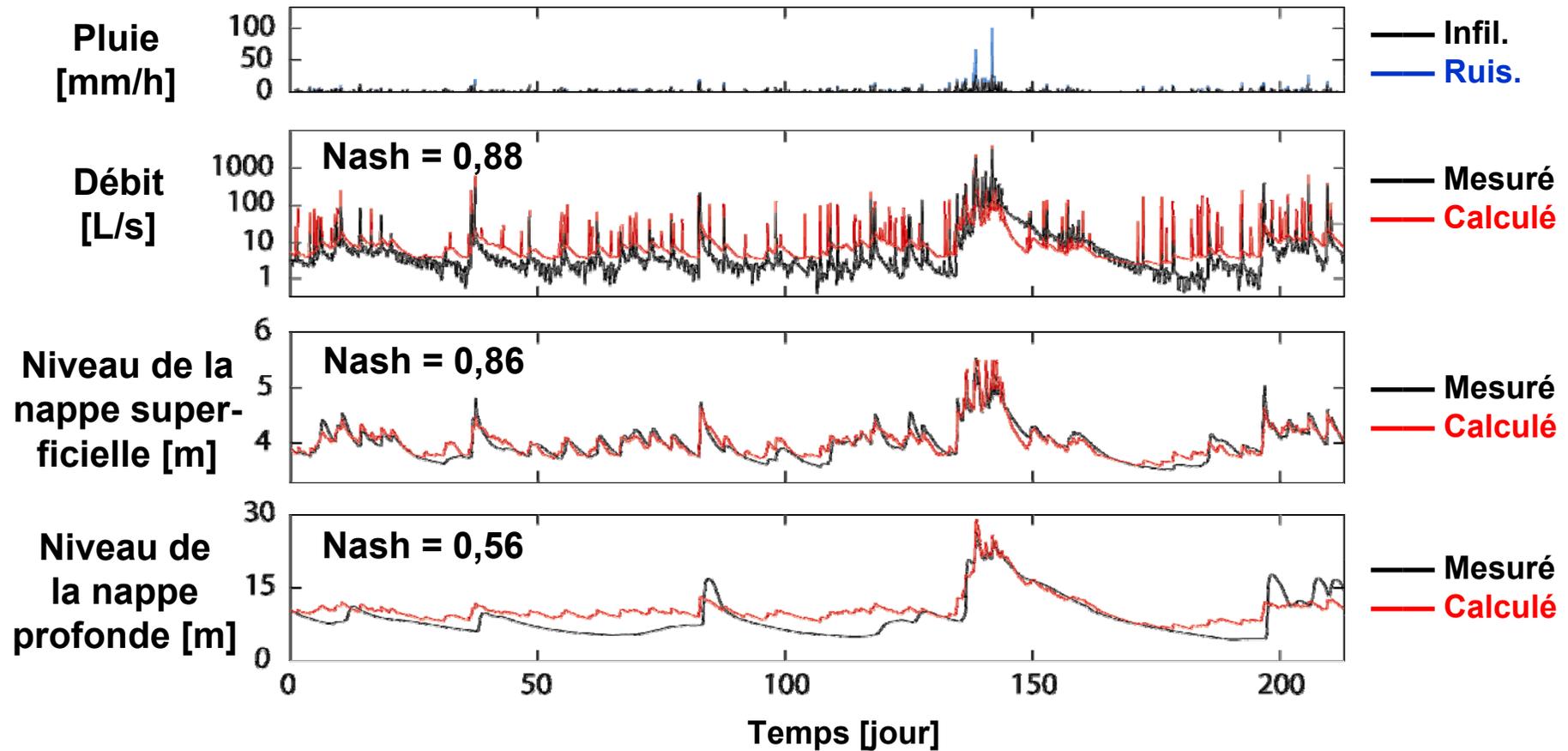
- Fonction de transfert : célérité et diffusivité
- Aquifères : porosité et vidange

Données de sortie

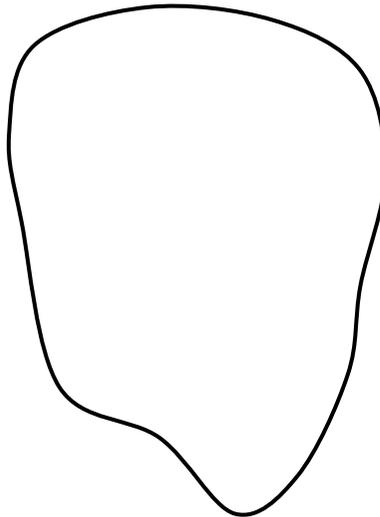
- Débit à l'exutoire
- Piézomètre superficiel
- Piézomètre profond



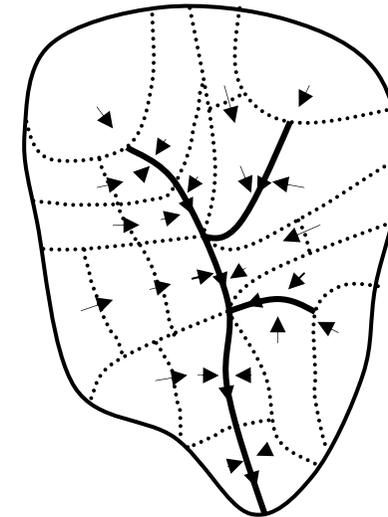
Le **critère de Nash** permet d'estimer l'efficacité de la simulation en comparant l'écart quadratique moyen des débits par rapport à la variance



Modèle global



Modèle distribué



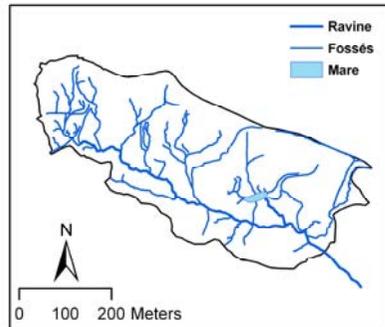
Vérifie le schéma de fonctionnement global

Mais ne prend pas en compte l'hétérogénéité du milieu

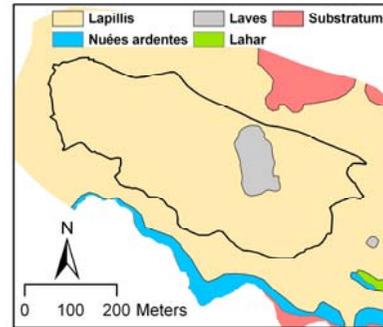


Adaptation de MHYDAS aux spécificités des bananeraies (stemflow)

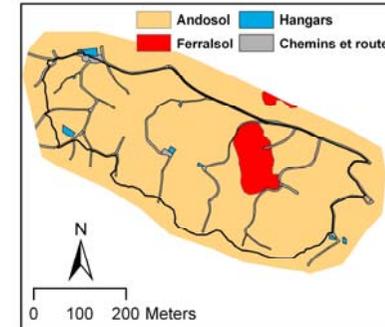
Segmentation de l'espace (d'après Lagacherie, 1996)



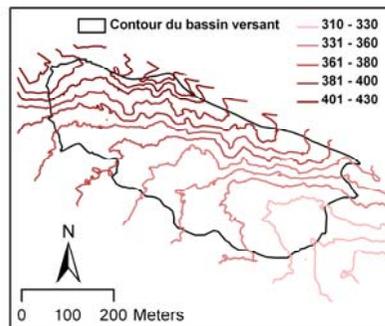
Réseau hydrographique



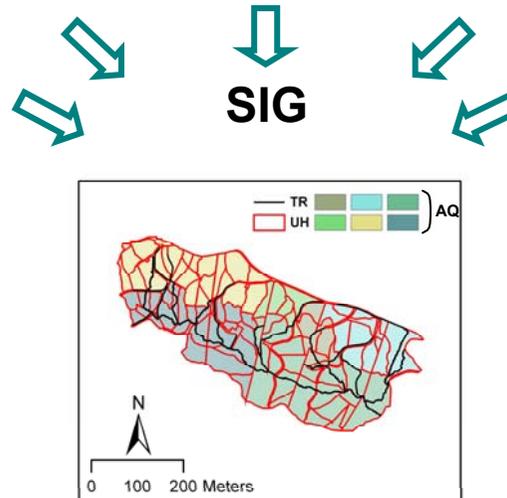
Géologie



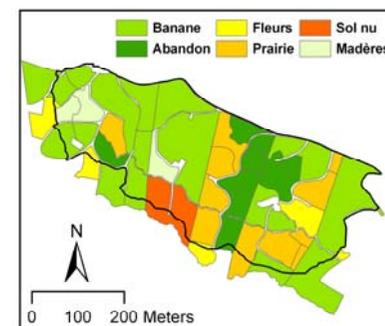
Sols



Topographie



SIG

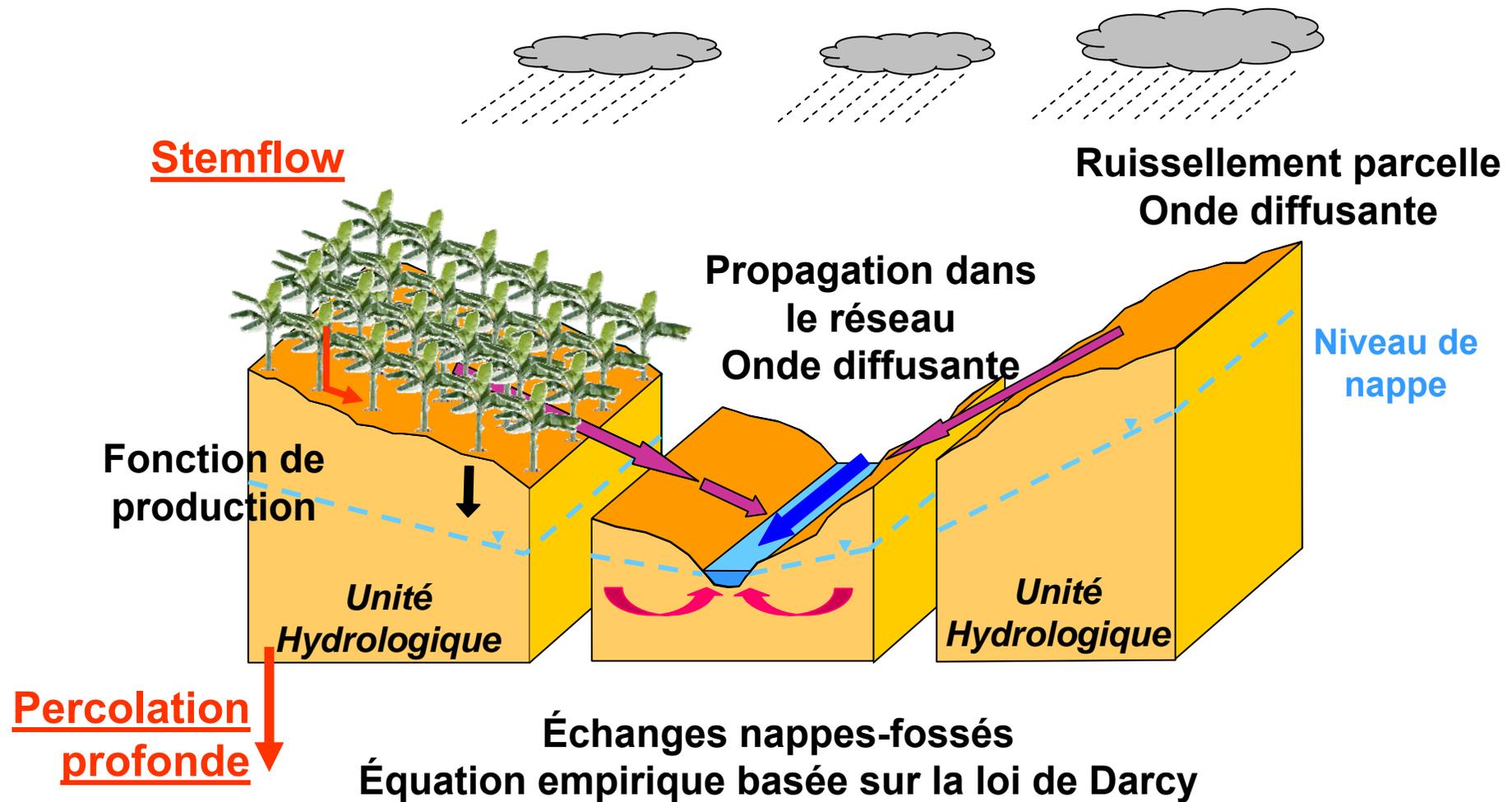


Parcellaire



Identification des unités hydrologiques, des tronçons et des unités aquifères

Simulation des processus de crue en milieu tropical (d'après Moussa, 2002)



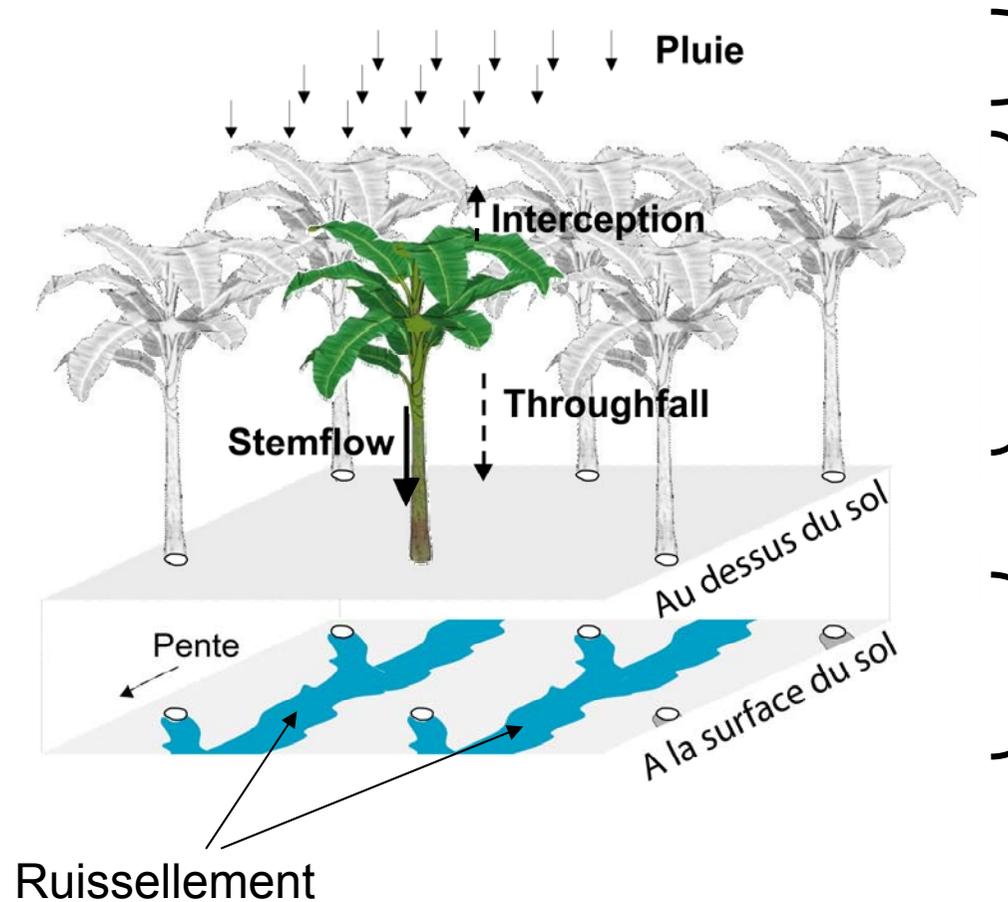
1 – A l'échelle de la parcelle :

Développement de la fonction stemflow et calage de la fonction de production

2 – A l'échelle du bassin :

Calage de la fonction de transfert dans le réseau, de la percolation profonde et des échanges nappes-fossés

Conceptualisation des processus



Donnée d'entrée
Pluie uniforme

Fonction stemflow
Coefficient de partage de la pluie

Fonction de production
Seuil de K_s

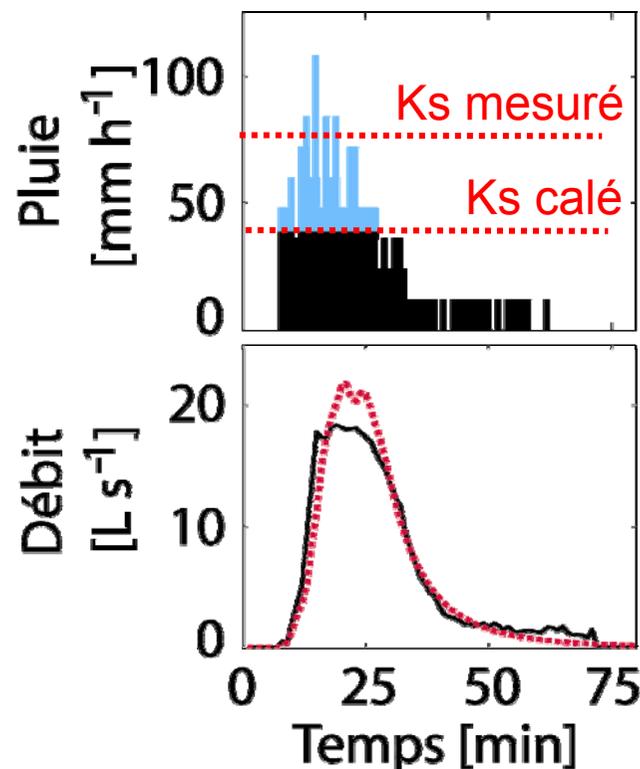
Fonction de transfert
Pente, rugosité, diffusivité, célérité



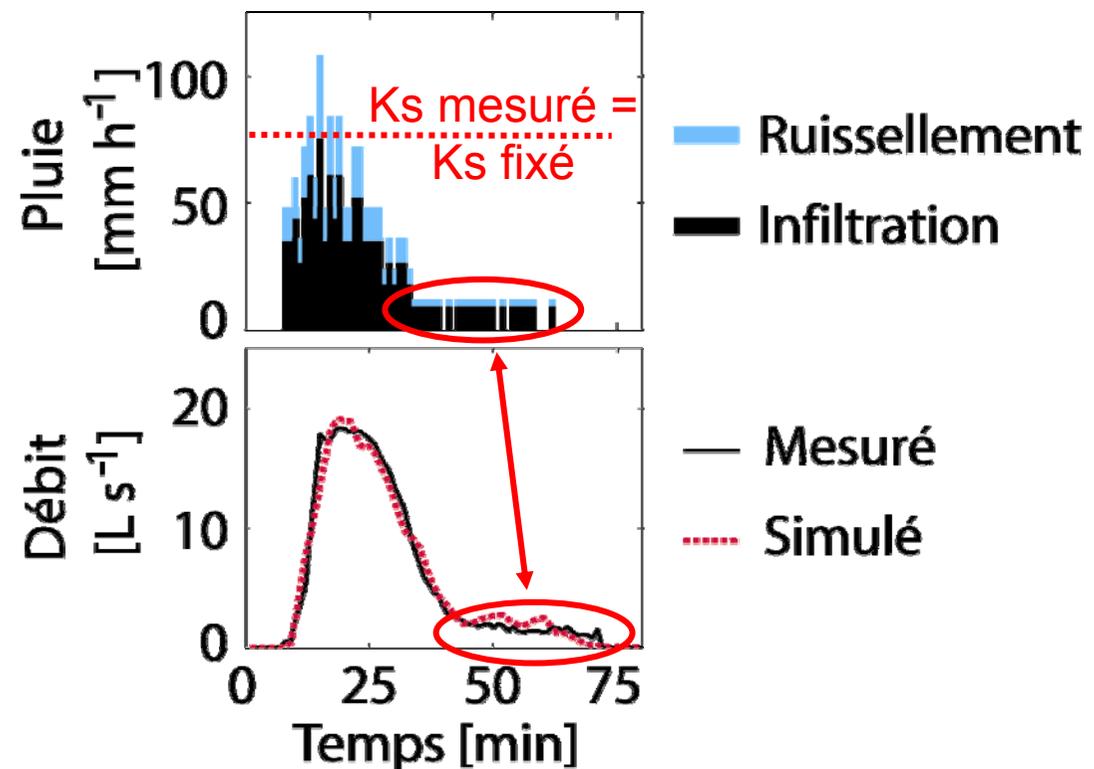
Fonction stemflow concentre la pluie

Effets de la fonction stemflow

Sans stemflow
Calage sur Ks

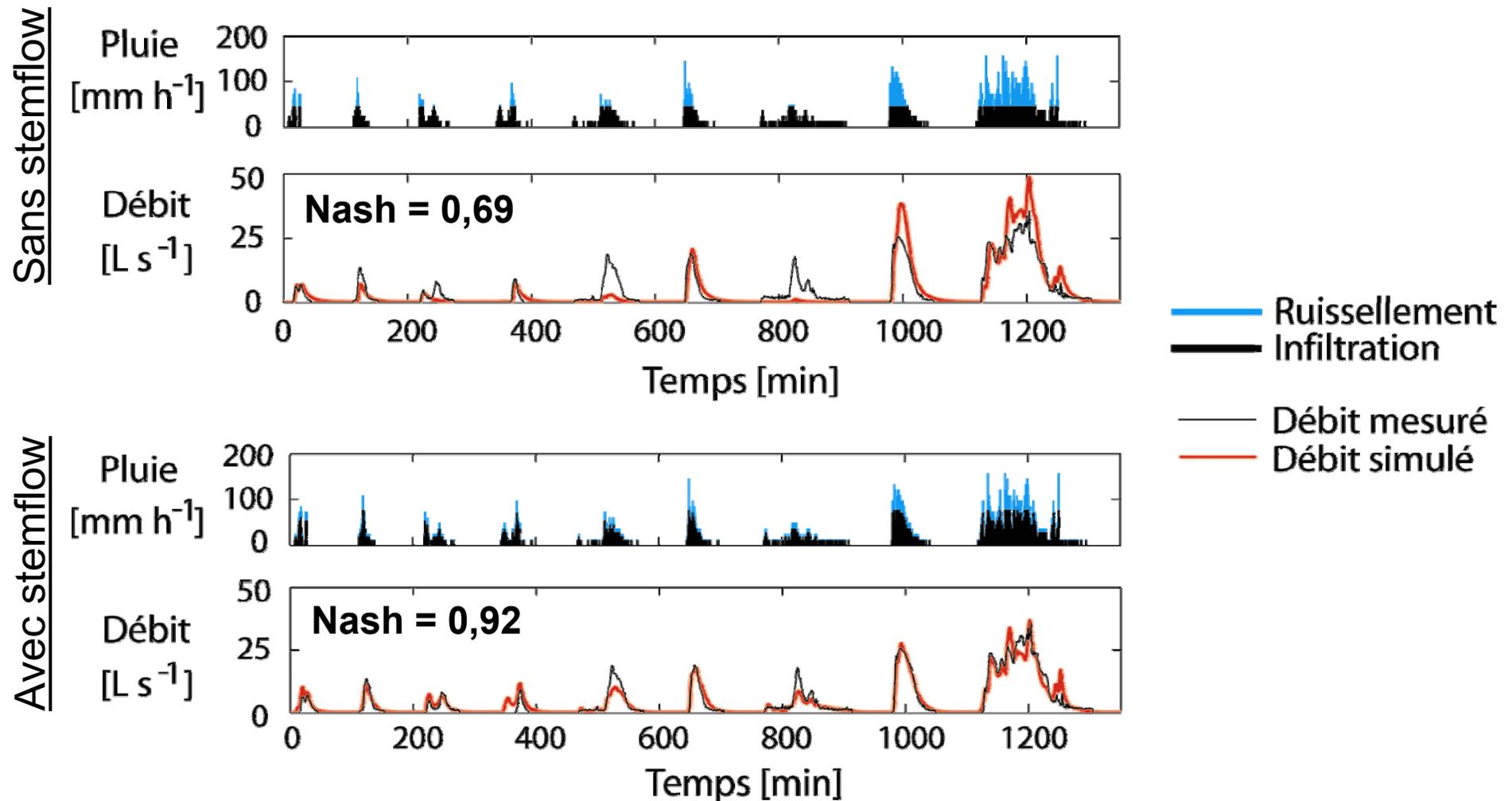


Avec stemflow
Ks mesuré et calage sur la fonction stemflow

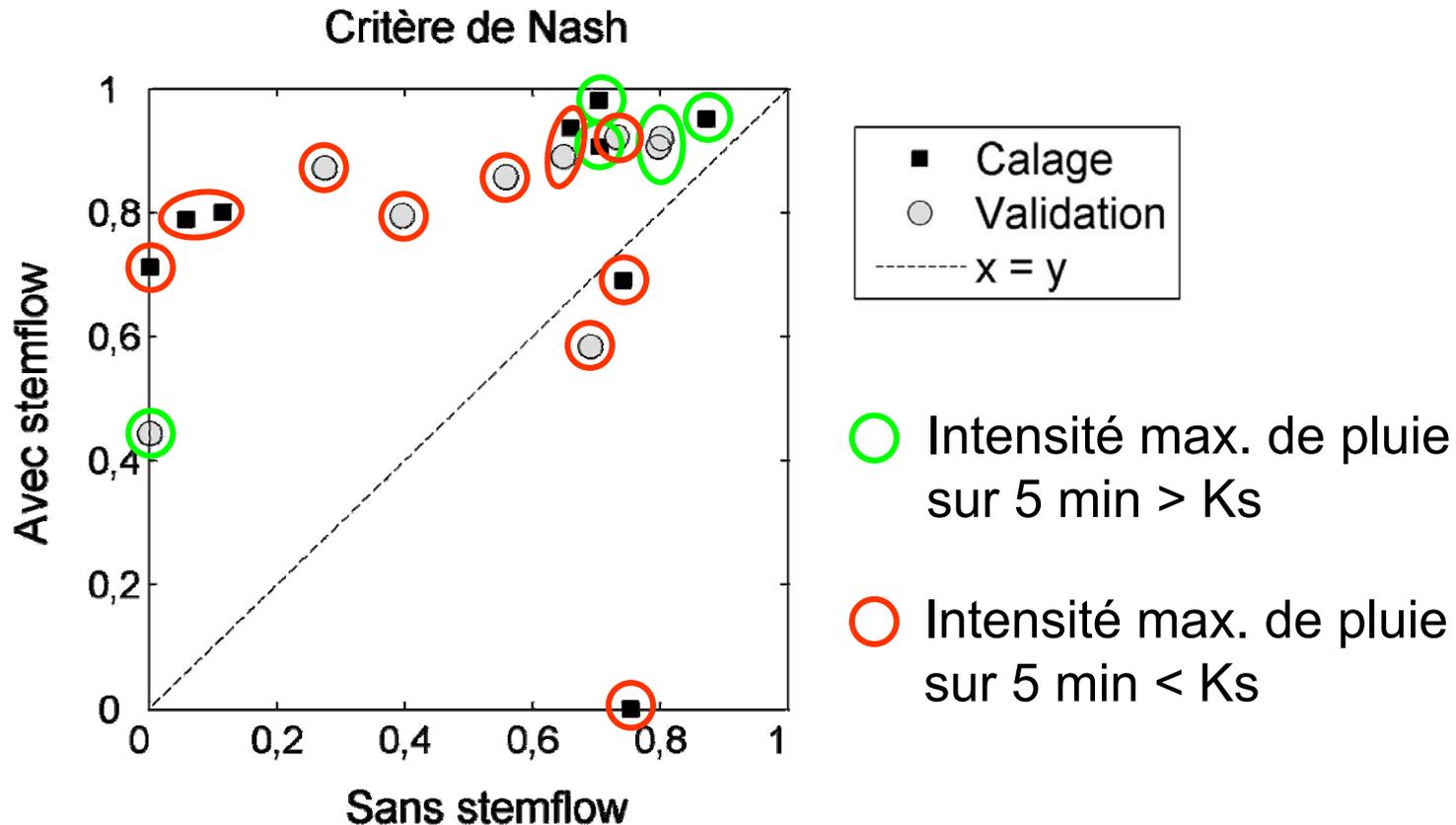


Simulation du ruissellement pour des intensités de pluie < Ks

Résultats des simulations sans/avec stemflow sur la période de calage

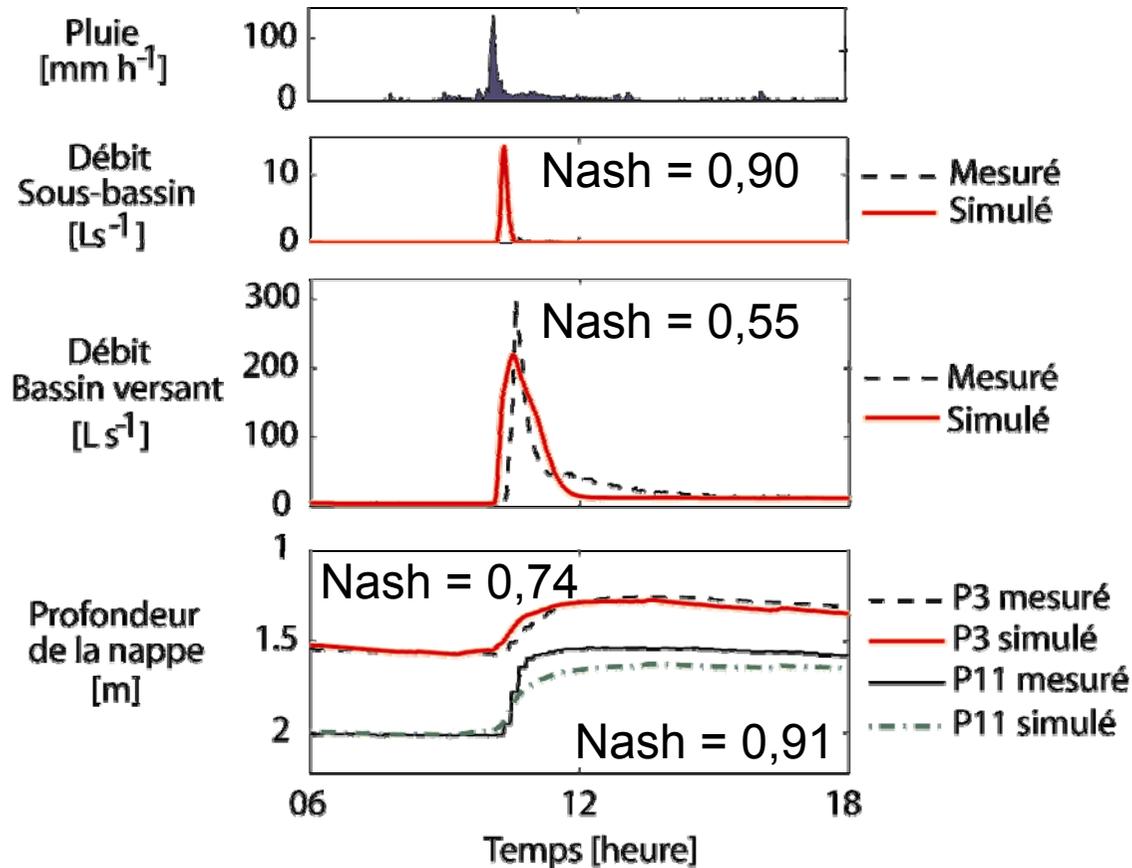


Effet de la fonction stemflow



La fonction stemflow améliore la simulation des événements avec des pluies de faibles intensités

Exemple de simulation



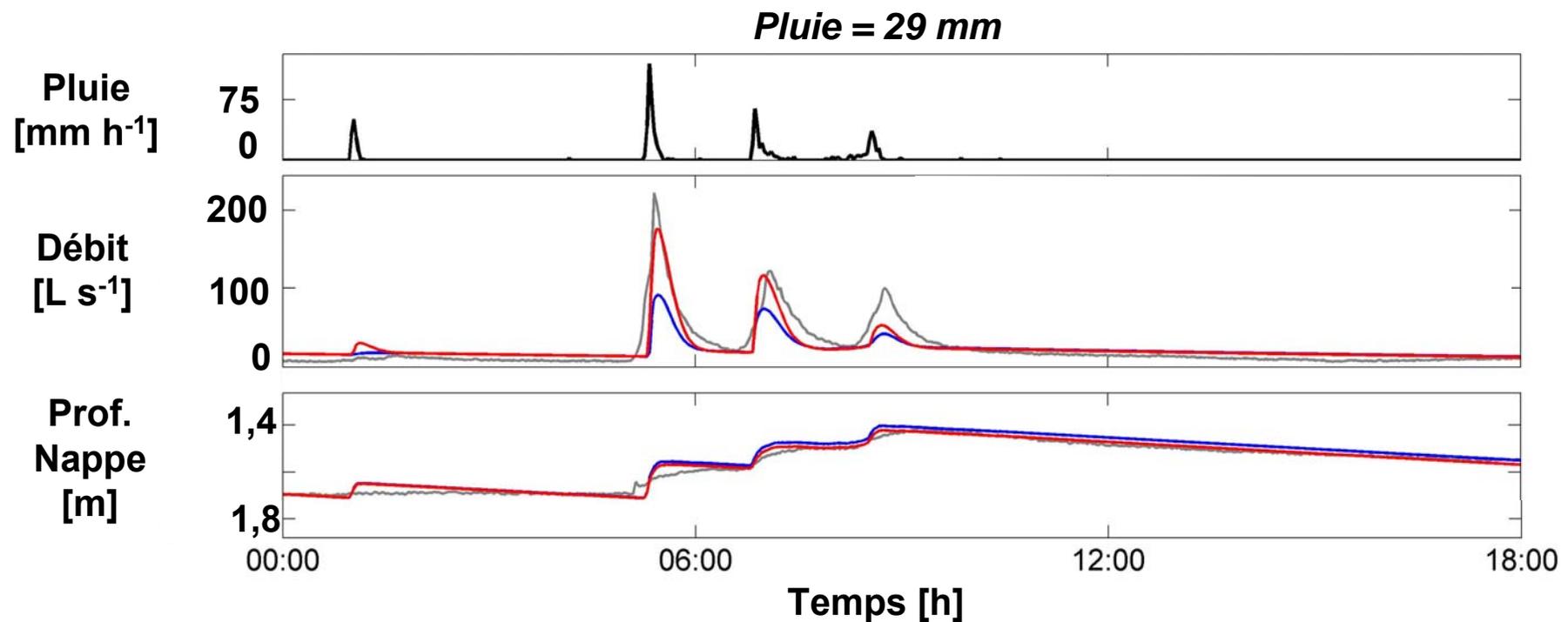
Résultats

	Nash Débit
Calage : 9 événements	0,73
Validation : 10 événements	0,63



Simulation des hydrogrammes aux échelles du sous-bassin et du bassin versant ainsi que des fluctuations de nappe

- Mesuré
- Simulé : 53 % de la surface du bassin en banane
- Scénario : 0 % banane



➡ **stemflow augmente le ruissellement**

CONCLUSION

Question 1 :

Quels sont les processus hydrologiques ?

- **Compartmentation des écoulements souterrains**
- **Importance de la recharge de la nappe = 60% de la pluie annuelle**
- **Crues rapides et intenses : coefficient de ruissellement de 6 à 24 %**

et quelles sont les voies de contamination ?

- **Eaux de surface contaminées par ruissellement lors des crues et de manière chronique par drainage de la nappe superficielle**
- **Eaux souterraines contaminées par transfert rapide dans les sols infiltrants et les fossés**

Question 2 :

Quel est le rôle du stemflow et comment l'intégrer dans une modélisation spatialisée ?

- à l'échelle de la parcelle : le stemflow augmente le coefficient de ruissellement
- à l'échelle du bassin : l'effet du stemflow est atténué par la variabilité de l'occupation du sol et la ré-infiltration en fossés
- intégration dans MHYDAS d'un module stemflow pour envisager des tests de scénarios

Étendre l'étude des processus hydrologiques :

- Redistribution de la pluie par d'autres couverts végétaux et incidence sur le partage ruissellement/infiltration : prairie, ananas, jachère, etc.
- Ré-infiltration en fossés

Développer un outil de diagnostic environnemental sur la base de la modélisation réalisée sur Féfé :

- Modélisation mécaniste des écoulements souterrains
- Impact de scénarios d'occupation du sol sur les flux d'eau et de polluants
- Transposition à des échelles supérieures et sur des bassins non jaugés

Merci de votre attention

