



Exploration de modèles spatialisés avec la plateforme OpenFLUID : exemple de la sensibilité globale d'un modèle spatialisé de simulation de l'hydrologie de surface

David Crevoisier, Jean-Stéphane Bailly et Jean-Christophe Fabre

UMR LISAH

30 nov 2021





Plan

- 1 Simulation du fonctionnement du paysage
- 2 La plateforme OpenFLUID
- 3 Une application : sensibilité à des facteurs spatiaux
- 4 Bilan & perspectives

Simulation du fonctionnement du paysage

Comprendre le fonctionnement d'un paysage

- Un système spatio-temporel complexe :
 - des processus bio-physiques en fortes **interactions**,
 - des dépendances **latérales**,
 - des **hétérogénéités** à représenter explicitement (parcellaires, infrastructures),
 - des **acteurs** diversifiés.
- Une problématique **pluri-disciplinaire**
 - pour la communauté des hydrologues : paysage = bassin-versant,
 - enjeu pour des nombreuses autres communautés de scientifiques (agronomes, écologues, écotoxycologues, économistes,...)

Simulation du fonctionnement du paysage

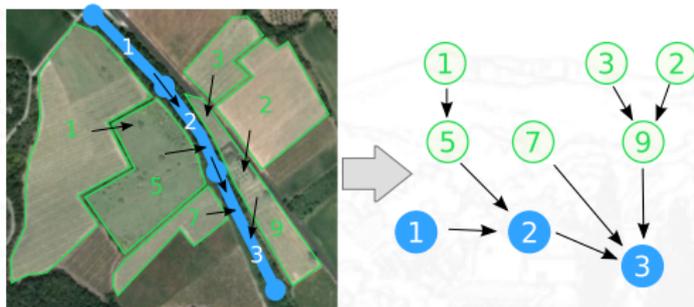
Scénarios de changements d'occupations du sol / de pratiques

- Évaluation de **services écosystémiques** rendus par le paysage :
 - production d'eau,
 - production végétale,
 - régulation des crues,
 - régulation de contaminants,
 - maintien / développement de biodiversité
 - ...
- Quels **scénarios** pour les optimiser ?
 - en réorganisant la mosaïque paysagère,
 - en privilégiant certaines pratiques culturelles,
 - en optimisant leur distribution spatiale

La plateforme OpenFLUID

Fondements : représentation numérique de l'espace

L'organisation spatiale est représentée sous la forme de **graphes mathématiques** valués et orientés



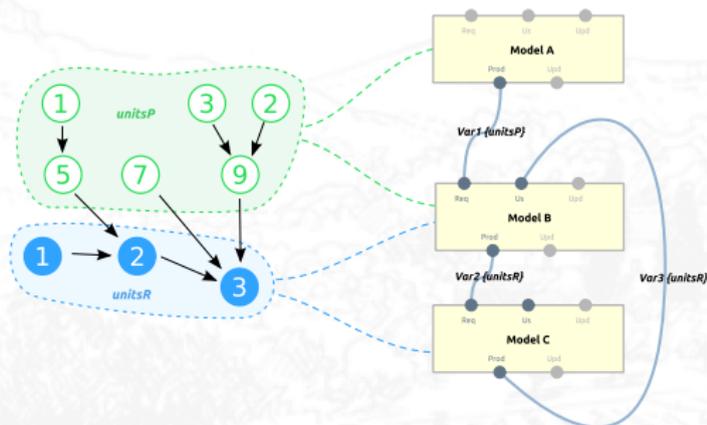
- Les noeuds du graphes sont les **objets spatiaux**, répartis en **classes**
- les noeuds portent les **propriétés des objets spatiaux**
(e.g. surface, pente, propriétés du sol, ...)
- Les arcs du graphes sont les **relations entre les objets**
- Un noeud peut contenir un graphe pour des **approches multi-échelles**

Algorithmique des graphes : parcours, connectivité, parallélisation de calculs, ... ◀ ◻ ▶

La plateforme OpenFLUID

Fondements : dynamique des processus

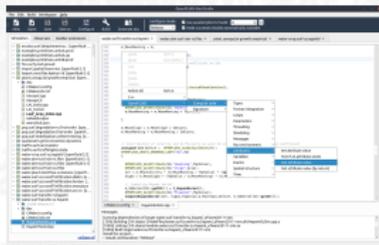
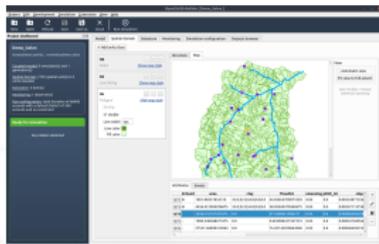
Les **codes de calcul** (simulateurs) font évoluer les états des objets et les flux entre objets en exploitant le graphe d'espace



- **Variables** et **événements** spatio-temporels
- **Couplage** entre simulateurs par échanges de variables
- Dynamique à pas de temps **fixe** ou **variable**, **synchrone** ou **asynchrone** entre simulateurs

La plateforme OpenFLUID

Environnement logiciel



Un **environnement logiciel** pour des approches **pluri-disciplinaires** de la modélisation des paysages

<https://www.openfluid-project.org/>

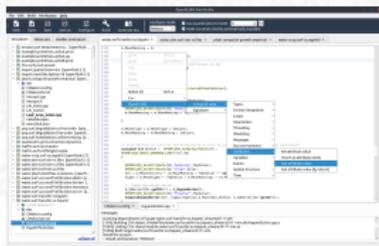
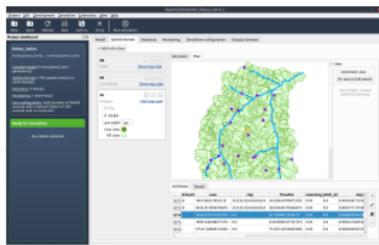
- **Framework** logiciel de modélisation en C++
- **Applications** logicielles pour le développement et l'application de modèles
- **Interopérable** : API complète, formats ouverts, packages R/Python/Node.js, ...

logiciel open-source disponible sous **licence libre**

<https://github.com/OpenFLUID>

La plateforme OpenFLUID

Environnement logiciel



Un **environnement logiciel** pour des approches **pluri-disciplinaires** de la modélisation des paysages

<https://www.openfluid-project.org/>

- **Framework** logiciel de modélisation en C++
- **Applications** logicielles pour le développement et l'application de modèles
- **Interopérable** : API complète, formats ouverts, packages R/Python/Node.js, ...

logiciel open-source disponible sous **licence libre**

<https://github.com/OpenFLUID>

⇒ **Développement**, **capitalisation**, **partage**,
couplage spatio-temporel de modèles
et **exécution des simulations**

La plateforme OpenFLUID

Package ROpenFLUID : OpenFLUID dans R

ROpenFLUID : pilotage d'OpenFLUID depuis l'environnement R

- Paramétrage des modèles
- Exécution de simulations
- Acquisition des résultats



```
library("ROpenFLUID")

ofsim <- OpenFLUID.loadDataset("/path/to/dataset")
Ks15 <- OpenFLUID.getAttribute(ofsim, "SU", 15, "Ks")
OpenFLUID.setAttribute(ofsim, "SU", 15, "Ks", 0.5 * Ks15)

OpenFLUID.runSimulation(ofsim)
Q15 <- OpenFLUID.loadResult(
  ofsim, "SU", 15, "water.surf.Q.downstream")
```

La plateforme OpenFLUID

Package ROpenFLUID : OpenFLUID dans R

ROpenFLUID : pilotage d'OpenFLUID depuis l'environnement R

- Paramétrage des modèles
- Exécution de simulations
- Acquisition des résultats



```
library("ROpenFLUID")

ofsim <- OpenFLUID.loadDataset("/path/to/dataset")
Ks15 <- OpenFLUID.getAttribute(ofsim, "SU", 15, "Ks")
OpenFLUID.setAttribute(ofsim, "SU", 15, "Ks", 0.5 * Ks15)

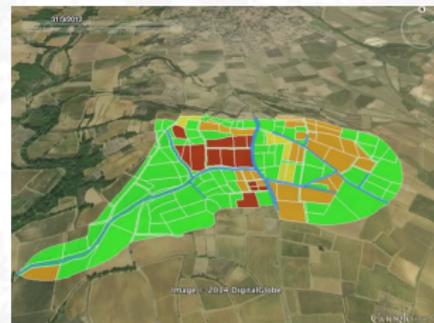
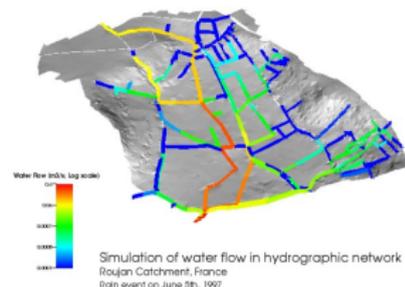
OpenFLUID.runSimulation(ofsim)
Q15 <- OpenFLUID.loadResult(
  ofsim, "SU", 15, "water.surf.Q.downstream")
```

⇒ Profiter des fonctionnalités d'**exploration de modèles** sous R

La plateforme OpenFLUID

Exemples de contextes d'application

- **hydrologie des agrosystèmes** pluviaux et irrigués
(projet ALTOS ; thèse Pak)
- devenir et transfert des **pesticides**
(projets MIPP, RIPPviti, Trophy, PollDiffCaptage, FIP ;
thèses Dollinger, Campan, Metayer)
- transferts **érosifs**
(thèses Gumiere, Inoubli)
- fonctionnement **agrohydrologique des retenues**
(projet Retenues ; thèse Lebon)
- impact de l'**organisation spatiale** des aménagements et des pratiques
(projets BVservice, FIP ; thèse Levasseur)
- rétroactions entre hydrologie et **pratiques agricoles**
(projets RSEau, GeDuQuE, SP3A, MIPP-V ; thèses Paré, Naulleau)
- ...



Une application : sensibilité à des facteurs spatiaux

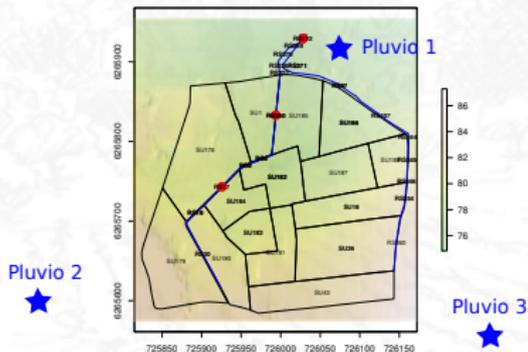
Le contexte

- contribution de l'équipe OpenFLUID au pari scientifique **ASM** (Roux, Buis 2015)
 - AS sur sorties multi-variées / entrées climatiques sous OpenFLUID
 - consolidation de scripts ROpenFLUID pour des problèmes d'AS
- développement de l'axe **AS & modèles spatialisés** du projet
 - travaux en interne au LISAH
 - sensibilité à des **facteurs spatiaux distribués** en hydrologie de surface

Une application : sensibilité à des facteurs spatiaux

Les simulations du modèle MHYDAS

- hydrologie de surface
 - fonction de **production** (Morel-Seytoux)
 - fonction de **transfert** (onde diffusante / Hayami)
- modèle **événementiel**
- paysage : relief peu marqué, $\approx 9Ha$
- grain parcellaire, 16 parcelles
- réseau hydro fixe, 20 tronçons de fossés
- évènement pluvieux du 05-06 mars 2003 de 60 mm

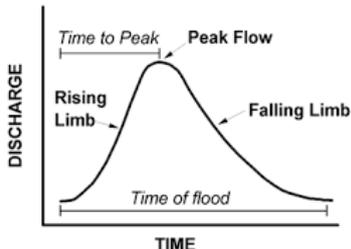


Une application : sensibilité à des facteurs spatiaux

Les objectifs de l'étude

Sorties d'intérêts dérivées des hydrogrammes :

- Q_{max} , débit max : indicateur pour régulation de **crue**
- V_{cum} , volume cumulé : indicateur d'**approvisionnement en eau bleue** (surface)



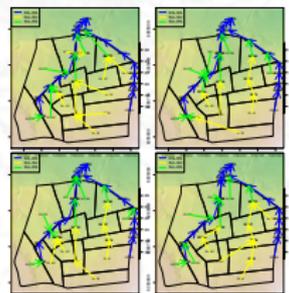
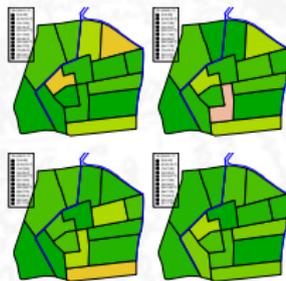
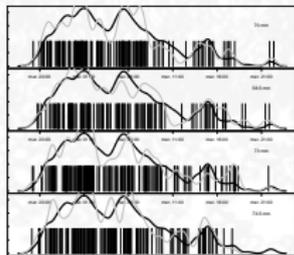
Questions :

- Sensibilité de chaque sortie scalaire à l'incertitude sur la pluie, l'infiltrabilité et la connectivité ?
- ⇒ 3 facteurs incertains : Ks , pluie (production), connectivité (production & transfert)
- ⇒ Représentation explicite d'incertitudes de connectivité SU-SU et SU-RS (M1 O. Hussain)

Une application : sensibilité à des facteurs spatiaux

Définition des incertitudes épistémiques

- chronique de pluie (facteur 1D) : instants de basculement d'augets suivant un processus stochastique NHpoisson avec intensité moyenne observée sur les 3 pluviomètres
- carte d'infiltrabilité (facteur 2D) : issue de distributions observées suivant 3 types d'états de surface liés au travail du sol [Léonard and Andrieux 2008]
- carte de connectivités (facteur incertain de structure du modèle) : connectivité stochastique inspiré de la méthode ρ_8 sur MNT [Fairfield and Leymarie 1991]



Une application : sensibilité à des facteurs spatiaux

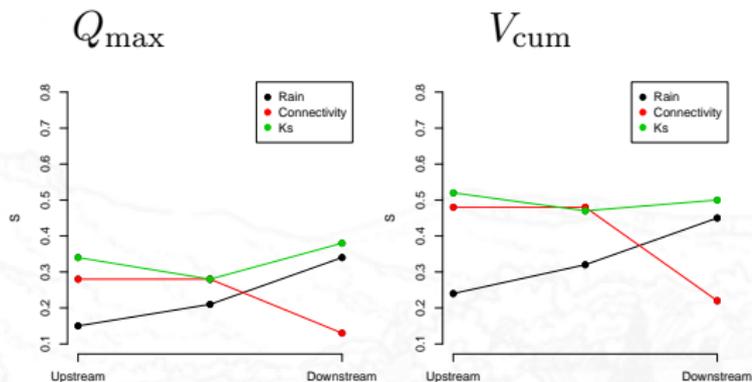
L'analyse de sensibilité

Méthode standard et intensive VB-GSA (faible coût CPU)

- VB-GSA [Sobol 1993]
- Avec incertitude par "étiquetage" (map labelling) [Lilburne and Tarantolla 2009]
- Mesure d'importance par indices de Sobol S et S_T [Saltelli et al. 2002]
- DOE : facteurs indépendants ; space filling par LHS, avec $100000 = (p + 2) * N$, ($p = 3$, $N = 200$) runs puis $n_{boot} = 100$ (coût CPU d'un run : 0.15 s)

Une application : sensibilité à des facteurs spatiaux

Indices de premier ordre

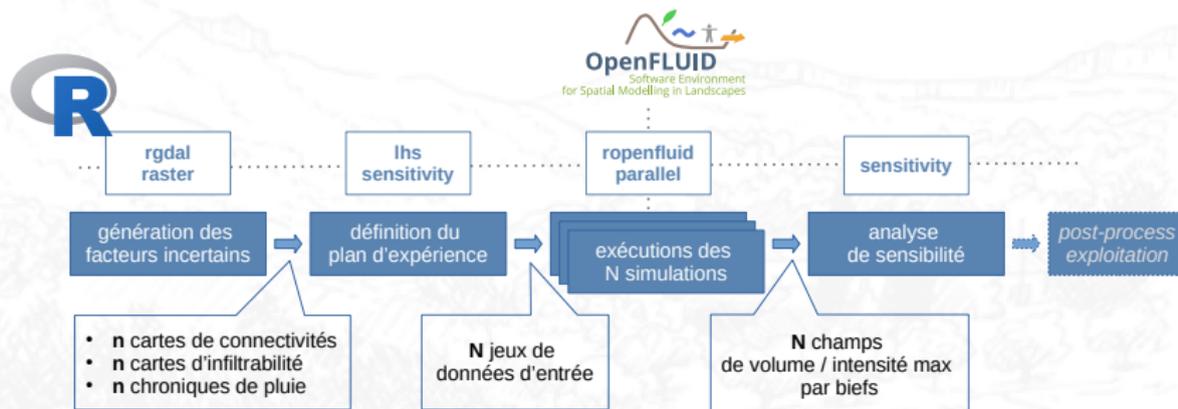


- l'importance de la connectivité augmente vers l'amont (attendu)
- la connectivité : un facteur important sur Q_{max} (moins attendu)
- démontre et quantifie le changement de hiérarchie entre facteurs dans le changement d'échelle
- effet support des indices de sensibilité entre facteurs spatiaux et aspatiaux attendus [Saint Geours et al., 2012]

Une application : sensibilité à des facteurs spatiaux

Le workflow de l'approche

Un workflow modulaire

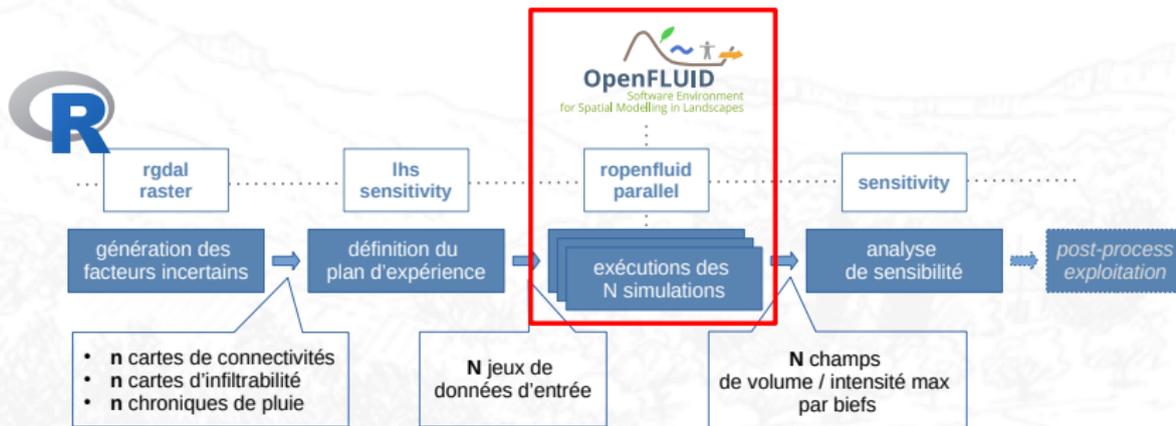


- étapes du workflow indépendantes
- facilités pour changer les étapes du workflow

Une application : sensibilité à des facteurs spatiaux

Le workflow de l'approche

OpenFLUID : une normalisation de l'étape "simulation"



- facilités pour changer le modèle / les simulations
- pré-traitement du domaine sous R ou avec un simulateur OpenFLUID

Bilan & perspectives

Constat actuel

- **OpenFLUID** facilite la mise en oeuvre de modèles spatialisés couplés
 - **ROpenFLUID** facilite leur exploration
- ⇒ Des simulations de + en + complexes :
- paramètres par simulateurs : ≈ 10 ,
 - simulateurs par modèles : ≈ 10 ,
 - unités spatiales / domaine : $\approx 100 - 1000$,
 - temps de calcul d'un run jusqu'à h ou j
- Les limites des approches **standards** d'explorations de modèles :
 - analyse de sensibilité par simulateur, peu d'unités spatiales,
 - calibration par multi-simulation sur des espaces / temps restreints

Bilan & perspectives

Besoin de méthodologies adaptées

- Le recours à des approches **avancées** :
 - ASM (entrées climatiques, sorties multi-variées, modèles spatialisés),
 - ONEMA - FIP (typologies)
 - Cluster-Based GSA (Buis, Roux)
- En modélisation spatialisée :
 - comment déterminer les sensibilités locales ?
 - comment calibrer ces simulations ?
- Des méthodes à explorer :
 - réduction du nombre de paramètres (zonage, typologie),
 - métamodélisation
 - analyse de sensibilité,



Merci de votre attention