



HAL
open science

Synthèse du séminaire du 15 février 2024 “ Le traitement des scénarios de changement pour anticiper les impacts sur le transfert sédimentaire dans le Rhône ”

Olivier Radakovitch, Mathieu Fressard, Flora Branger, Patrick Boyer, Jérôme Le Coz, Marina Coquery

► To cite this version:

Olivier Radakovitch, Mathieu Fressard, Flora Branger, Patrick Boyer, Jérôme Le Coz, et al.. Synthèse du séminaire du 15 février 2024 “ Le traitement des scénarios de changement pour anticiper les impacts sur le transfert sédimentaire dans le Rhône ”. [Rapport de recherche] IRSN; CNRS; INRAE. 2024, pp.1-29. hal-04653154

HAL Id: hal-04653154

<https://hal.science/hal-04653154v1>

Submitted on 26 Aug 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Observatoire
des Sédiments
du Rhône

Synthèse du séminaire 15 février 2024

**« Le traitement des scénarios de
changement pour anticiper les
impacts sur le transfert
sédimentaire dans le Rhône »**

Synthèse du séminaire 15 février 2024

« Le traitement des scénarios de changement pour anticiper les impacts sur le transfert sédimentaire dans le Rhône »

Rapport scientifique final

Version du 12 mars 2024

Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action

Axe D – Prévoir les changements pour anticiper les impacts

Action D1 – identification des scénarios du changement

Personnes impliquées

Olivier Radakovitch (IRSN, LRTA) ; Mathieu Fressard (CNRS, EVS) ; Bertrand Morandi (GRAIE), Patrick Boyer (IRSN), Flora Branger (INRAE)

Pour citer ce rapport

Radakovitch O., Fressard M, Branger F., Boyer P., Le Coz J., Coquery M. (2024). *Synthèse du séminaire « Le traitement des scénarios de changement pour anticiper les impacts sur le transfert sédimentaire dans le Rhône »*. Rapport final. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action. Action D1. 51 p.

L'OSR est un dispositif animé par le Graie. Pour toute information vous pouvez contacter Bertrand Morandi (bertrand.morandi@graie.org)



Résumé

Ce rapport présente les résultats et conclusions du séminaire final de l'OSR6 portant sur les travaux réalisés dans le cadre de l'axe D « Prévoir les changements pour anticiper les impacts ». Cet axe avait pour objectif de définir les évolutions attendues du changement climatique sur le bassin versant du Rhône et de commencer à en intégrer les aspects majeurs dans les modèles de transferts de sédiments utilisés par les chercheurs de l'OSR. Le séminaire a permis de présenter les résultats obtenus sur les 3 volets de l'axe D puis d'ouvrir les questions. Ce rapport présente une synthèse des grands points évoqués.

Les sorties du modèle hydrologique J2000 montrent que l'impact du changement climatique sera notable sur le débit des affluents et la saisonnalité des flux. Les projections climatiques et le modèle ne permettent pas encore de traiter l'ensemble des processus contrôlant le transport des matières en suspension.

Le couplage des modèles INVEST-SDR / J2000-Rhône / CASCADE est fonctionnel et peut intégrer des scénarios d'évolution, qui ont montré une grande diversité de trajectoires possibles pour les flux sédimentaires avec une tendance globale vers une diminution. Plusieurs évolutions sont possibles et en développement sur ces modèles.

Les premières évaluations de l'effet du changement climatique sur le fractionnement liquide-solide de contaminants montrent que les paramètres qui auront le plus d'influence sont les évolutions du débit et des matières en suspension.

Mots-clés

Rhône ; Observatoire ; Sédiments ; OSR ; Scénario d'évolution ; Changement climatique ; Modélisation

Table des matières

1. Introduction5
2. Modélisation prospective des scénarios de transfert hydrologique et des débits6
3. Modélisation prospective des transferts de Matières en suspension9
4. Modélisation de scénarios de propagation de contaminants particuliers11
5. Présentation EDF13
6. Discussion14
7. Références15
8. Annexes16
 - Annexe 1 - Le traitement des scénarios du changement pour anticiper les impacts sur le transfert sédimentaire dans le Rhône. Introduction16
 - Annexe 2 - Modélisation prospective des transferts hydrologiques et des débits22
 - Annexe 3 - Modélisation prospective des transferts de MES38

1. Introduction

Les dix années de l'Observatoire des Sédiments du Rhône ont permis de construire une importante base de données sur des domaines associés au transfert sédimentaire (apports, stocks, contamination, cartographies, flux...) et de développer des modèles numériques capables de reproduire les processus et les flux hydro-sédimentaires le long du corridor. Cette acquisition de connaissances et d'outils avait été jugée suffisante en début d'OSR 6 pour élaborer et travailler des scénarios prospectifs permettant d'anticiper les changements qui pourraient affecter, d'ici la fin du siècle, le transfert de sédiments et contaminants associés. Trois grands domaines avaient été soulignés pour une prise en compte :

- 1) les changements climatiques, affectant directement le régime des précipitations sur le bassin et les épisodes de crue (fréquence, localisation, débit) et d'étiage (coin salé, changement physico-chimique sur les particules).
- 2) les changements d'occupation des sols (pratiques agricoles, urbanisation, etc.), qui sont susceptibles d'entraîner des évolutions de la production sédimentaire et des contaminations sur tout le bassin et in fine sur le corridor.
- 3) l'apparition de « nouvelles contaminations », telles que : la résurgence de sources passées (remobilisation de stocks affectés par les PCB, les métaux ou plus récemment les PFAS), l'urbanisation croissante, les déversements accidentels (accidents routiers, industriels, portuaires...).

Un premier atelier s'est tenu sur ce sujet en janvier 2022 (Radakovitch et al., 2022). Il avait fait intervenir des chercheurs extérieurs à l'OSR qui ont présenté les connaissances acquises sur l'évolution attendue des changements climatiques pour la région en termes de forçages majeurs, et il avait permis d'aborder la question de nouvelles contaminations potentielles induites par ces changements, à l'échelle du bassin du Rhône et au-delà. Les partenaires institutionnels et gestionnaires de l'OSR (CNR, EDF, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse) ont également pu présenter la manière dont leur organisme appréhende ces changements. Enfin, l'après-midi avait été consacré à un échange pour réfléchir à des scénarios de changements susceptibles d'affecter le fleuve. Certains de ces scénarios ont été repris par les chercheurs pour être utilisés dans les travaux de cet axe D.

Le présent rapport reprend les principaux résultats et conclusions présentés durant le séminaire de fin de programme (15/02/2024) et synthétise les discussions. Il retranscrit au mieux ce que les auteurs ont reporté mais ne relate pas l'intégralité de leurs présentations qui sont en annexes. Les actions D2 et D3 ont fait l'objet de rapports spécifiques présentant le détail des travaux réalisés. Le rapport de l'action D4 porte lui sur des résultats différents de ceux discutés ici.

2. Modélisation prospective des scénarios de transfert hydrologique et des débits

Présentation : F. Branger, J. Bonneau, N. Pellerin, L. Troudet, J. Le Coz, E. Sauquet

Cette action avait pour but de disposer de simulations prospectives de débits sur l'ensemble des affluents du Rhône, élément essentiel à l'élaboration de scénarios hydro-sédimentaires. Elle s'est appuyée sur le modèle hydrologique distribué J2000-Rhône, sur la base de données DRIAS Climat ainsi que sur les résultats de plusieurs projets de recherche sur le futur du climat, tout particulièrement le programme EXPLORE 2 qui se terminera en juin 2024.

Le modèle J2000-Rhône est un modèle distribué qui représente l'espace selon un maillage irrégulier construit par le croisement de différentes couches de données géographiques. Il est constitué de 31 400 mailles sur tout le bassin versant et 234 stations de contrôle sont utilisées pour le valider. Le modèle est couplé avec le code MAGE/ADIS-TS et contient un module simulant les effets de transfert ou rétention d'eau dans le réseau hydrographique par les barrages et dérivations.

Les barrages, les dérivations et les ouvrages de transferts d'eau ne sont pas représentés explicitement dans le modèle mais juste leurs effets sur les débits dans les cours d'eau. Des fonctions d'objectifs FO (consignes de prélèvement ou de rejet de l'ouvrage au pas de temps journalier) sont construites à partir de leur influence moyenne interannuelle, qui ont été déduites des chroniques de débits de stations influencées (aval) et non influencées (amont ou période antérieure, ou issues de régionalisation de simulations hydrologiques). Ces FO ont été construites indépendamment des gestionnaires des barrages, et peuvent représenter un fonctionnement hydroélectrique typique des ouvrages des Alpes du Nord, avec une tendance au stockage en été et au relargage en hiver, ou bien un fonctionnement mixte qui stocke au printemps/début d'été et relargue en été (soutien à l'irrigation) et en hiver (production d'électricité).

Le choix et la construction des projections climatiques se sont appuyés sur le projet Explore-2 qui propose une approche multi-scénarios et multi-modèles appliquée de manière uniforme sur le territoire métropolitain pour l'ensemble du XXI^{ème} siècle. Explore-2 travaille notamment sur 3 scénarios de gaz à effet de serre (RCP 2.6, 4.5 et 8.5) déclinés en différentes projections (72 au total). De manière à rendre mieux visibles les contrastes entre les futurs possibles, Explore-2 a sélectionné quatre de ces projections, sur le scénario d'émission 8.5 (le plus pessimiste) pour construire quatre narratifs. Pour l'OSR 6, les simulations prospectives ont été réalisées pour 5 des 72 projections Explore-2, et incluent deux des narratifs, qui correspondent à :

- a) fort réchauffement et fort assèchement en été.
- b) réchauffement modéré et changement de précipitations.

Il faut ajouter à ceci 3 scénarios virtuels de gestions des barrages et dérivations :

- 1) maintien des FO actuelles.
- 2) adaptation des FO aux effets du changement climatique.

3) fourniture de plus d'eau en période estivale.

Les scénarios de gestion des barrages et dérivations sont des scénarios purement exploratoires qui n'ont pas été discutés avec les acteurs et ne sont en rien des prédictions ou des recommandations sur ce qui va se passer réellement dans le futur.

Les simulations sur le seul effet du changement climatique montrent pour 2070-2100 des différences variant de - 15 à + 15% des débits moyens annuels des affluents (par rapport à la période de référence 1976-2005). Globalement les débits augmentent au nord (Saône et Rhône amont de Lyon) et baissent au sud. La médiane à Beaucaire est peu affectée et augmente de 5%. En termes de saisonnalité, on observe sur tous les affluents une forte augmentation en hiver (+ 10 à +50 %) et une baisse en été (-5 à -50%). La variabilité à Beaucaire en été est de -25 %. L'augmentation est associée à la hausse des précipitations au Nord et à l'augmentation des températures dans les Alpes (précipitations liquides et fonte accrue de la neige), la diminution est due à la baisse des pluies printanières et la fonte précoce de la neige.

Les 3 scénarios de gestion de barrage montrent des tendances assez proches, avec une différence surtout marquée pour l'Isère et la Durance. Sur ces affluents les scénarios 2 et 3 diminuent les débits hivernaux (consignes de volumes restitués plus faibles) et les augmentent en été par des lâchers. Au final, l'effet de ces scénarios de gestion est modeste par rapport aux effets du changement climatique.

En conclusion, l'impact du changement climatique est notable sur le débit des affluents et la saisonnalité des flux. Il faut souligner que les projections climatiques et le modèle ne sont pas, en l'état actuel, adaptés à traiter des événements de crues rapides ni des extrêmes, ce qui est limitant pour traiter l'ensemble des processus contrôlant le transport des matières en suspension. Il a cependant permis de fournir les projections hydrologiques aux chercheurs qui en avait besoin.

Questions et commentaires :

1) Pourquoi le barrage de Génissiat n'a pas été pris en compte ?

Les barrages sur le fleuve ne sont pas pris en compte car, à l'échelle où l'on travaille, leur capacité de stockage est faible et on estime qu'ils sont transparents. Si on a besoin de modéliser leurs effets, il les prendre en compte dans MAGE.

2) Qu'en est-il de l'intégration des échanges d'eaux franco-suisse ?

Nous avons intégré les éléments à notre FO du Lac Léman. On prend donc en compte les débits réservés, mais pas les débits futurs (hypothèse que la régulation future du Léman sera identique à la régulation actuelle).

3) Qu'en est-il des apports de lacs alpins ?

Ils sont incorporés mais nous n'avons pas de consignes FO à leur appliquer. Pour information le lac du Bourget va maintenant être géré avec des marnages pour les roselières.

4) Le modèle selon vous n'est pas bon pour les crues mais qu'en est-il des étiages ?

J2000 est normalement meilleur sur les étiages, mais nous n'avons pas regardé ce point précis. Un diagnostic de J2000 a été réalisé dans le cadre du projet Explore 2 (le rapport est disponible

ici : <https://doi.org/10.57745/S6PQXD>). J2000 se situe dans la moyenne des autres modèles d'Explore 2 ; la représentation des étiages est plutôt correcte sur le Rhône. Les fiches de synthèse sur chaque station sont mises à disposition sur le portail DRIAS-Eau. Par ailleurs pour les crues, MAGE a besoin de données horaires mais nous disposons que de journalières, donc la représentation est mauvaise. Enfin, les projections climatiques ne sont pas bonnes sur les précipitations extrêmes notamment car elles ne prennent pas en compte les phénomènes de convections.

3. Modélisation prospective des transferts de Matières en suspension

Présentation : M Fressard, C. Fabre, S Bizzi, F. Branger, H. Piégay

La construction d'un modèle hydro-sédimentaire spatialement distribué à l'échelle du bassin versant du Rhône a été initiée dans l'OSR 5 et a montré des résultats prometteurs pour l'estimation des flux depuis les versants vers le chenal et dans le chenal. Cette modélisation a été construite en couplant trois modèles élémentaires : INVEST-Sediment, J-2000 Rhône et CASCADE.

Démarrée dans le sous bassin de l'Arc, l'approche s'est étendue à tout le bassin du Rhône dans l'OSR 6. L'objectif était de développer une approche à l'échelle des sous-bassins (INVEST-Sediment) qui sont ensuite connectés à une modélisation hydrologique et du linéaire (J-2000 et CASCADE). En plus de mieux intégrer les affluents, ce travail devait permettre de proposer des scénarios pour l'évolution des débits solides du Rhône et ses affluents dans le contexte du changement climatique.

Les trois modèles utilisés pour ce travail sont : 1) INVEST-SDR (production sédimentaire des versants et connectivité au réseau hydrographique); (2) J-2000 Rhône (transferts hydrologiques et débits dans le réseau) et (3) CASCADE (transferts de sédiments dans le réseau hydrographique et connectivités : transport, dépôt, remobilisation).

INVEST-SDR (Hamel et al., 2017) évalue les apports des sources sédimentaires en utilisant les équations du modèle d'érosion RUSLE (Renard et al., 1995) puis des probabilités de transport versant/cours d'eau calculées à partir de l'index de connectivité – IC (Borselli et al., 2008; Vigiak et al., 2012). Cette partie du travail a demandé un effort considérable pour la construction d'une base de données complète, avec notamment l'incorporation et le traitement des données de 245 stations météo pour évaluer l'érosivité des pluies. Les autres paramètres intégrés dans le modèle (érodibilité des sols, végétation et pente/relief...) ont été dérivés à partir de plusieurs bases de données disponibles à l'échelle du bassin versant (RRP-Sols, Théia Land, et IGN BD-Alti). Ce modèle travaille à l'échelle pluriannuelle et ne peut donc pas intégrer des variabilités extrêmes à l'échelle d'un épisode. Les sorties de flux modélisés comparées aux flux observés montrent un bon ajustement du modèle (R^2 de 0.89).

CASCADE (Schmitt et al., 2017) permet de définir des tronçons de fleuve entre lesquels les matières en suspension vont se propager. Il peut fournir des résultats sous forme cartographique avec transferts et dépôt. Les flux prédits montrent là encore un bon ajustement avec les observations, sauf pour la Durance, sans doute à cause de la forte variabilité des moyennes annuelles. Le modèle ne prend pas en compte la gestion sédimentaire des ouvrages et ils sont considérés comme transparents à l'échelle annuelle, sauf pour les barrages de Serre-Ponçon et Vouglans qui interceptent ici l'intégralité des flux amont. Les flux en amont du Lac Léman ne sont pas pris en compte.

La projection des sorties des 6 modèles climatiques utilisant le scénario de gaz à effet de serre RCP 8.5 a été faite dans INVEST-SDR et CASCADE, où elle joue respectivement sur l'érosivité des pluies et le débit prospectif. On observe de forts contrastes sur les différences des projections de 2070-2100 par rapport à la période de référence (1990-2020) en fonction des

scénarios, et l'on peut simplement en retenir de grandes tendances, qui seraient une diminution de l'érosion sur Durance-Drôme et une augmentation (ou faible réduction) sur la Saône.

En conclusion, le couplage des modèles INVEST-SDR / J2000-Rhône / CASCADE est maintenant fonctionnel et peut intégrer des scénarios d'évolution. Les scénarios testés montrent une grande diversité des trajectoires possibles pour les flux sédimentaires avec une tendance globale vers une diminution. Plusieurs évolutions sont encore possibles sur les modèles, avec notamment l'intégration de scénarios d'usage des sols, de plus d'ouvrages, et des facteurs correctifs à une échelle régionale pour mieux représenter les apports liés aux processus gravitaires de versant (pas simplement le ruissellement). Par ailleurs, l'intégration d'autres classes granulométriques, notamment les sables, constitue une des perspectives majeures de ce travail pour l'OSR 7.

Questions et commentaires :

- 1) Est-ce que l'humidité antécédente des sols est intégrée au modèle ? On l'a vu récemment, les pluies sur sols saturés n'ont pas la même incidence que les pluies sur sols secs.

La réserve utile des sols et son état de saturation ne sont pas intégrés dans la composante érosion du modèle. Cela ne fait pas partie des paramètres les plus significatifs retenus pour l'équation RUSLE. En revanche, elle est intégrée dans la composante débit via J-2000 Rhône.

- 2) Comment améliorer la qualité des prédictions en domaine de montagne ? Vous avez évoqué dans la présentation que tous les processus ne sont pas représentés dans le modèle RUSLE. Que manque-t-il ?

En montagne, les processus gravitaires de versants (glissements, chute de blocs etc.) ne sont pas pris en compte explicitement dans le modèle. Peu de travaux de référence existent pour les intégrer aux modèles de transport sédimentaire. On se basera principalement sur des inventaires et l'analyse de leur connectivité au réseau hydrographique pour les prendre en compte dans l'OSR 7. De même, les processus de fonte de neige ne sont pas pris en compte, mais des routines basées sur les équations RUSLE existent.

- 3) Est-ce que les scénarios pourraient intégrer l'évolution de l'occupation des sols, face au changement climatique notamment ?

Potentiellement oui, mais les scénarios d'évolution de l'occupation du sol restent difficiles à déployer à cette échelle de travail du fait de leur complexité (facteurs anthropiques et naturels de changements). Quelques scénarios très simples de tendance générale pourraient être testés localement.

- 4) Quid de l'érosion/artificialisation des berges et de la remobilisation des marges alluviales ? Est-ce intégré au modèle, ou est-ce en prévision ?

CASCADE diffuse le produit de sources dans le réseau via des formules de capacité de transport. Il ne prend pas en compte explicitement ces processus et leur contribution au transport solide. Ceci-dit, il serait possible, pour les secteurs les plus sensibles, de les matérialiser sous forme de sources sédimentaires additionnelles dans le modèle, permettant de prendre en compte leur contribution au flux. Cela reste difficile à généraliser, mais cela peut être introduit localement.

- 5) Vous avez de bons résultats entre les flux de matières modélisés et observés, sauf pour la Durance, pourquoi à votre avis ?

Il y a eu de récentes mises à jour et recalcul des flux mesurés en station, notamment consolidés, tendaient à se rapprocher davantage des sorties proposées ici par CASCADE.

- 6) Est-ce que ces résultats seraient incorporables à la modélisation 1D MAGE / ADIS-TS ?
On voit notamment l'intérêt avec les estimations proposées sur les affluents, ce que ne fait pas le modèle 1D ?

On peut imaginer une comparaison des résultats, mais l'intégration directe reste difficile du fait des pas de temps qui ne correspondent pas.

- 7) La modélisation fait une estimation à échelle interannuelle, est-il possible d'avoir des sorties de modèle au pas de temps mensuel, voire plus fin ?

Le principe général des équations RUSLE se base sur des estimations de moyennes interannuelles. Certaines adaptations des équations ont été réalisées (par ex. MUSLE) à des pas temps plus fins et pourrait être adaptées sur la base des données déjà disponibles. De même, une nouvelle version de CASCADE, D-CASCADE est en cours de développement et permettra, là aussi, d'affiner l'échelle temporelle de modélisation.

4. Modélisation de scénarios de propagation de contaminants particuliers

Présentation : P. Boyer

La modélisation du transfert d'eau et de matière en suspension a grandement avancé dans l'OSR, mais celle du transfert de contaminants associés aux particules n'a fait l'objet que de simulations de faisabilité par modélisation 1D. L'intérêt de cette dernière serait de reproduire un panache de contamination dont les transferts par dispersion, sédimentation, érosion et suspension dépendraient de paramètres dans les différentes branches du fleuve, tels que le débit, la concentration en MES, la granulométrie et l'affinité du contaminant pour les particules.

Le code CASTEAURx de l'IRSN destiné à reproduire le transfert de radionucléides dissous et particulaire a été amélioré dans cet objectif et dans le cadre de l'axe E. Dans l'axe D, il a été proposé d'utiliser ce même modèle avec des scénarios d'apports de contaminants à forte et faible affinité pour les particules et de différentes zones sources, pour tester les conséquences sur le fractionnement liquide-solide des polluants des projections hydrologiques données par J2000 pour les périodes 2070 et 2100. Cette action permet de travailler cette question pour la première fois à l'échelle du linéaire, et d'initier des outils et des réflexions pour certains enjeux du Plan Rhône 2021-2027.

Le code CASTEAURx est développé à l'IRSN pour reproduire la dispersion et la propagation de radionucléides sous formes dissoute et particulaire dans un réseau hydrographique spatialisé. Pour l'OSR 6, il a été utilisé pour réaliser une évaluation préliminaire des effets que pourrait avoir le changement climatique sur le fractionnement liquide-solide des contaminants. La

démarche consiste à intégrer dans CASTEAURx les projections de J2000 pour les débits moyens journaliers aux échéances 2070 et 2100, puis d'identifier les tendances que l'on pourrait observer par rapport à aujourd'hui sur l'évolution de la répartition liquide-solide des contaminants. La méthodologie relative aux calculs est détaillée dans le livrable de l'action D.4.

Dans les concepts qui sous-tendent le modèle de fractionnement liquide-solide des contaminants du code CASTEAURx, il est supposé que la fixation des polluants est régulée par deux couches sur les particules : une couche interne dite non réactive qui n'échange que très lentement les contaminants et une couche superficielle réactive qui les adsorbe rapidement et proportionnellement à un coefficient de fractionnement liquide-solide à l'équilibre. Ces deux paramètres sont spécifiques à chaque polluant de sorte que les contributions échangeable – non-échangeable sont dépendantes de la taille des particules : plus le grain est fin, plus la contribution échangeable est importante.

Pour ces évaluations préliminaires, le scénario climatique Explore 2 le plus contrasté (CCLMHadGEM2-ES_CCLM4-8-17_1960-2100) a été appliqué à deux scénarios de sources permanentes de contaminants : un rejet industriel et un apport par érosion des sols du bassin versant. La démarche se réfère au cas du ^{137}Cs , un radionucléide rejeté dans le fleuve par certaines Installation Nucléaire de Base (INB) et déposé sur tout le bassin versant à la suite des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl. Sur le Rhône, les rejets autorisés de ^{137}Cs par les INB ne peuvent se faire qu'en dessous de $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$. Au-dessus, le ^{137}Cs provient donc de l'érosion des sols du bassin-versant où, en raison de longs temps de contact, il a pu se répartir entre toutes les couches des particules. Lorsque ces particules sont érodées vers le fleuve, c'est donc essentiellement le stock présent dans les couches superficielles échangeables qui s'équilibre avec l'eau et alimente les concentrations dissoutes. Ce comportement a motivé la conceptualisation du modèle pour évaluer la répartition solide-liquide du ^{137}Cs en fonction de la charge, de la granulométrie des particules en suspension et également de son origine.

Pour esquisser des tendances en fonction de la nature des contaminants, les deux scénarios ont été appliqués : 1) au ^{137}Cs pour lequel le code est calé grâce aux données acquises depuis plusieurs années par l'IRSN à la station SORA à Arles et 2) à deux contaminants arbitraires, l'un supposé 10 fois plus mobile que le ^{137}Cs et l'autre supposé 10 fois moins mobile.

Pour les matières en suspension, l'interprétation des résultats se réfère aux écarts relatifs entre aujourd'hui et 2070-2100 des moyennes journalières annuelles de la charge et la taille des matières en suspension. Les résultats des polluants sont eux aussi interprétés en fonction des écarts relatifs des ratios liquide-solide, des fractions liquide-solide et des flux solides. Bien que préliminaires, ces résultats permettent de dégager quelques tendances aux échéances de 2070 et 2100 :

- Matières en suspension : Les résultats tendent vers une augmentation de la charge en hiver et une baisse en été, avec une augmentation du flux solide annuel d'environ 7%. La fraction des particules réactive aux contaminants diminue en hiver et augmente en été en réponse aux variations du débit qui s'accompagnent d'une augmentation de la taille moyenne des particules en suspension lorsqu'il augmente et une diminution lorsqu'il diminue.

- Polluants - scénario rejet : ce scénario correspond à des échanges solide-liquide dominés par les processus d'adsorption. Les résultats suggèrent une diminution du ratio solide/liquide en hiver et une augmentation en été, tendances qui s'amplifient entre 2070 et 2100 et qui sont d'autant plus fortes que l'affinité particulière du polluant est importante. La contribution de la fraction solide augmente significativement en hiver pour les polluants les plus mobiles et diminue pour tous en été en raison de la baisse de la charge en suspension. Pour les trois types de polluant, la contribution des fractions particulières au flux total reste stable en hiver et décroît en été avec une accentuation en 2100 par rapport à 2070.
- Polluant - scénario érosion bassin versant : Pour ce scénario, c'est le processus de désorption qui domine les échanges solide-liquide. Les résultats pour le ratio solide/liquide montrent une forte augmentation en été qui s'amplifie entre 2070 et 2100 et s'atténue pour les polluants les moins mobiles. La contribution des fractions particulières reste quasi-stable entre 2070 et 2100. Elle présente une légère augmentation en hiver accentuée par la mobilité et une baisse plus marquée en été atténuée par la mobilité. L'évolution de la contribution des fractions particulières au flux total est très similaire pour les trois types de polluants avec une forte augmentation en hiver et une forte baisse en été qui s'accroissent entre 2070 et 2100 sous l'effet de l'évolution des charges en suspension sur ces mêmes périodes.

Ces premières évaluations de l'effet du changement climatique sur le fractionnement liquide-solide des contaminants aux horizons 2070 et 2100 reflètent uniquement les conséquences des évolutions du débit et des matières en suspension. Elles mettent en perspectives la prise en compte des évolutions d'autres paramètres tels que l'érodabilité des bassins versant, des pratiques et des sources de contaminants, de la production primaire et de l'eutrophisation.

Questions et commentaires :

- 1) Sur l'aspect des rejets il faudra penser à prendre en compte les apports des villes (voir travaux Axe B sur ce sujet).
- 2) Il semble y avoir une étape charnière qui est le passage des débits à la granulométrie des particules, puisque le modèle s'appuie beaucoup là-dessus. Puisque les autres présentations ont montré que l'évolution du débit à Beaucaire était la résultant de débits contrastés des affluents, ces derniers auront donc un rôle important, peut-être aussi sur les tailles des grains apportés.

5. Présentation EDF

Présentation C. Martinet

EDF réalise des extrapolations de flux solides sur la Durance à l'aide d'une combinaison de 3 modèles : Sediment'eau, RUSLE et Mordor TS2. Le couplage de Sediment'eau et RUSLE montre une très bonne comparaison avec des données 2011-2020, mais il est impossible de caler le pas de temps journalier à cause du transport inter-mailles. Le modèle intègre les retenues

intermédiaires qui laissent passer les sédiments, tandis que les sédiments ne passent pas à travers les retenues de Serre-Ponçon et Sainte-croix. De très bonnes performances de prédiction des flux solides sont obtenues à Cadarache, et le taux d'export de chaque affluent peut être estimé. Les perspectives sont de passer du débit naturel au débit influencé, mais il y a un manque de données pour les retenues intermédiaires.

6. Points évoqués en discussion générale

A l'échelle globale, les composantes de changement d'occupation des sols et/ou de gestion des ouvrages pourraient être plus influentes que le facteur climatique, et il faudrait pouvoir les prendre en compte. Il y a cependant une limite technique à ceci qui est de trouver des scénarios disponibles et crédibles pour ces facteurs, surtout à l'échelle du Rhône. Cela pourrait peut-être se faire dans un premier temps à l'échelle de sous-bassin, en s'appuyant sur d'autres projets de recherche.

Les travaux d'EDF montrent que l'utilisation du modèle RUSLE semble bien fonctionner à l'échelle journalière, bien qu'il ait été conçu pour des temps plus long. L'adaptation de RUSLE à l'échelle journalière pourrait donc être travaillé dans l'OSR.

Deux points devraient être regardés pour le futur : la gestion du Lac Léman et le scénario en lien avec la problématique des centrales nucléaires : un débit d'étiage plus prononcé et des bas débits. Sur l'usage de l'eau la partie prélevée par les centrales n'a pas été intégrée dans J2000.

A ce jour il n'y a pas de lien entre les modèles cités ci-dessus et les études/impacts possibles sur les nappes d'accompagnement. Ceci pourrait être discuté en rapport avec des actions de la ZABR sur Crépieux-Charmy ou Avignon.

7. Références

- Borselli, L., Cassi, P., Torri, D., 2008. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. *Catena* 75, 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
- Hamel, P., Falinski, K., Sharp, R., Auerbach, D.A., Sánchez-Canales, M., Denny-Frank, P.J., 2017. Sediment delivery modeling in practice: Comparing the effects of watershed characteristics and data resolution across hydroclimatic regions. *Science of The Total Environment* 580, 1381–1388. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.103>
- Radakovitch O., Fressard M, Branger F., Boyer P., Le Coz J., Coquery M. (2022). *Synthèse du séminaire « Identifier les scénarios du changement pour anticiper les impacts sur le transfert sédimentaire dans le Rhône »*. Rapport final. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d’action. Action D1. 22 p. <https://hal.science/OSR/hal-03750544v1>
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). US Government Printing Office Washington, DC.
- Schmitt, R. J., Bizzi, S., & Castelletti, A. (2016). Tracking multiple sediment cascades at the river network scale identifies controls and emerging patterns of sediment connectivity. *Water Resources Research*, 52(5), 3941-3965.
- Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L.T.H., McInnes, J., Roberts, A.M., 2012. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology* 138, 74–88. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.026>

8. Annexes

Annexe 1 - Le traitement des scénarios du changement pour anticiper les impacts sur le transfert sédimentaire dans le Rhône. Introduction

Le traitement des scénarios du changement pour anticiper les impacts sur le transfert sédimentaire dans le Rhône

Introduction – O. Radakovitch

Séminaire Scientifique Axe D | Action D1

OSR 1

2009

Phase de lancement

OSR 2

2010-2013

3 axes et 12 actions pour dresser un état des lieux

OSR 3

2014

Phase de transition
Maintien des suivis

OSR 4

2015-2017

5 axes - 22 actions

OSR 5

2018-2021

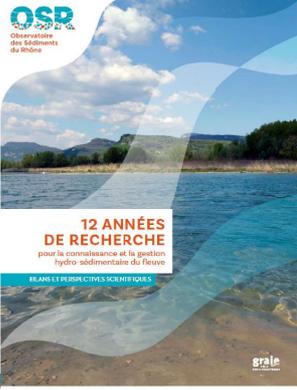
4 axes - 14 actions

OSR 6

2021-2023

5 axes - 21 actions





Utiliser 10 ans de progrès pour repenser l'OSR 6

Bases de données sur des domaines associés au transfert sédimentaire (apports, stocks, contamination, cartographies, flux...)

Connaissances

Développement des modèles numériques capables de reproduire les processus et les flux hydrosédimentaires sur le corridor

Outils

Scénarios prospectifs pour anticiper les changements qui pourraient affecter, à moyen terme, le transfert de sédiments et contaminants associés

Changement climatique
Changement d'occupations des sols
Apparition de nouvelles « contaminations »

Structure de l'OSR6

(H. Lepage, M. Coquery, B. Morandi)

5 Axes de recherche

Axe A
 Comprendre le fonctionnement hydrosédimentaire du fleuve

Axe B
 Comprendre les sources et la dynamique des MES et des contaminants dans le bassin du Rhône

Axe C
 Développer des méthodes pour restaurer la qualité des habitats et évaluer les effets des actions

Axe D
 Prévoir les changements pour anticiper les impacts

Axe E
 Coordonner et transférer (coordination, modélisation, bancarisation, valorisation, réseau de suivi)

Créer des scénarios plausibles.

Poser les bases d'une modélisation de ces scénarios.

Jouer ces scénarios.

Axe D: Prévoir les changements pour anticiper les impacts

- **D1: Identification des scénarios du changement**
- D2: Modélisation prospective des transferts hydrologiques et des débits
- D3: Modélisation prospective des transferts sédimentaires
- D4: Modélisation des scénarios de propagation de contaminants particuliers.



5

Séminaire initial - Janvier 2022

- 4 experts extérieurs (J. Guiot, H. Budzinski, J. Boé, E. Sauquet)
- 3 partenaires institutionnels (AE RMC, EDF & CNR)
- Rappel des outils de modélisation dans OSR 6
- Travail en groupe (eau, sédiments, contaminants) pour prioriser les scénarios les plus intéressants et traitables.



Séminaire final - Février 2024

Objectifs:

- Confronter les sorties et résultats obtenus dans les actions D2, D3 et D4.
- Dresser un catalogue des changements possibles et de leurs impacts.

Déroulé:

- 9h45-10h30: Action D2, Flora Branger
- 10h30-11h15: Action D3, Mathieu Fressard
- 11h15-12h00: Action D4, Patrick Boyer
- 12h00-12h30: Modélisation flux solide Durance, Cécile Martinet, EDF
- 12h30-13h: échanges et conclusion



Programme d'actions de
l'Observatoire des Sédiments du Rhône

OSR7 | 2024 - 2027

OSR 7 Axe D: Prévoir les changements pour anticiper les impacts

- D1: Intégrer l'érosion dans le modèle hydrologique J2000-Rhône
- D2: Modéliser le transport de sédiments grossiers à l'échelle du bassin sous scénarios de changement climatique et de gestion des ouvrages
- D3: Quantifier l'impact hydro-sédimentaire de la fonte et du retrait glaciaire
- D4: Evaluer l'influence potentielle de la fonte des glaciers alpins sur les apports en MES et contaminants
- D5: Communication, valorisation et géo-visualisation des résultats issus de la modélisation prospective



Observatoire
des Sédiments
du Rhône

Dispositifs scientifiques cadres



Partenaires techniques et financiers



Cofinancé par
l'Union européenne

Annexe 2 - Modélisation prospective des transferts hydrologiques et des débits

Modélisation prospective des transferts hydrologiques et des débits

Flora Branger, INRAE Riverly

J. Bonneau, N. Pellerin, L. Troudet, J. Le Coz, E. Sauquet

Séminaire Scientifique Axe D | Action D1

15 février 2024

Plan de la présentation

- Objectifs et démarche générale
- Rappels sur le modèle J2000-Rhône
- Choix et construction des scénarios
- Résultats des scénarios simulés avec J2000-Rhône
- Mise en perspective par rapport aux résultats du projet Explore2
- Conclusions et perspectives

Objectifs et démarche générale

- Action D2 : modélisation prospective des changements sur les débits du Rhône
- Modélisation à l'échelle du Bassin Versant pour obtenir une vision spatialisée et l'évolution des contributions des différents affluents du Rhône
 - › Modèle hydrologique distribué J2000-Rhône
- Construction de scénarios selon les facteurs de changement principaux identifiés lors du séminaire de l'action D1 en janvier 2022 :
 - › Le changement climatique
 - › La gestion des grandes retenues hydroélectriques
- Travail en synergie avec deux autres projets :
 - › Explore 2 (financement MTES / OFB) : projections climatiques
 - › ContinuumMES (financement Agence de l'Eau RM&C) : chaînage de modélisation bassin versant – fleuve Rhône

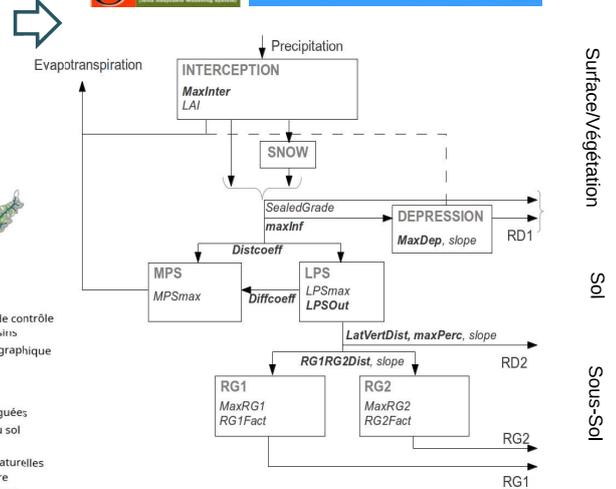
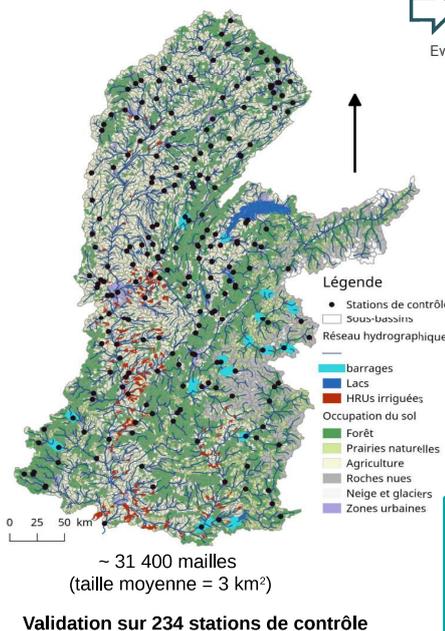
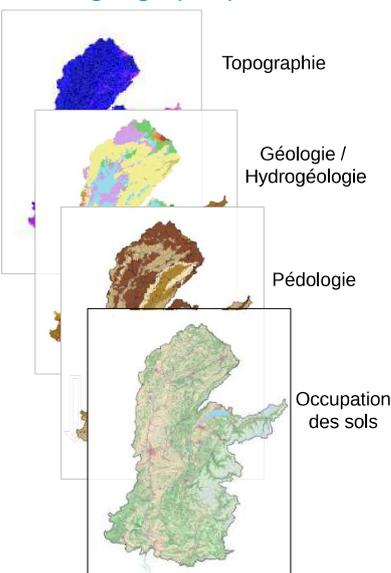
3

Principes du modèle J2000-Rhône

Découpage de l'espace :
croisement de couches
géographiques



J2000-Rhône



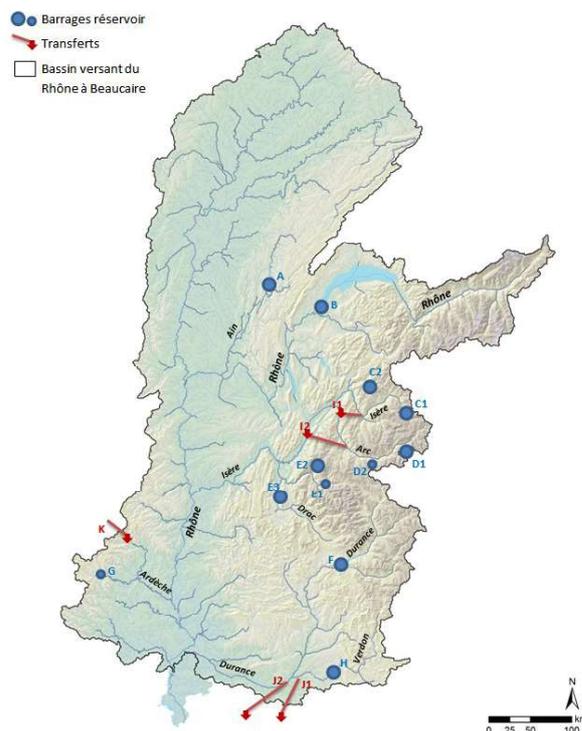
Couplages

Barrages/Dérivations (Module J2000)
MAGE / ADIS TS (hydrodynamique 1D fleuve Rhône)

4

Barrages et dérivations dans J2000-Rhône

	Ouvrage	Type	Capacité max (Mm ³)	Degré d'influence sur le débit (m ³ /s)
A	Vouglans	Barrage	600	+/- 30
B	Léman	Barrage	89000	+/- 50
C1	Tignes	Barrage	230	+/- 25
C2	Roselend	Barrage	210	+/- 25
D1	Mont-Cenis	Barrage	330	+/- 15
D2	Bissorte	Barrage	50	+/- 3
E1	Chambon	Barrage	50	+/- 4
E2	Grand Maison	Barrage	140	+/- 7
E3	Monteynard	Barrage	440	+/- 25
F	Serre Ponçon	Barrage	1040	+/- 100
G	Chassezac	Barrage	58	+/- 7
H	Sainte Croix	Barrage	760	+/- 15
I1	Isère-Arc	Dérivation		60
I2	Arc-Isère	Dérivation		40
J1	Verdon-Canaux	Transfert		20
J2	Durance-Canaux	Transfert		140
K	Loire-Ardèche	Transfert		8

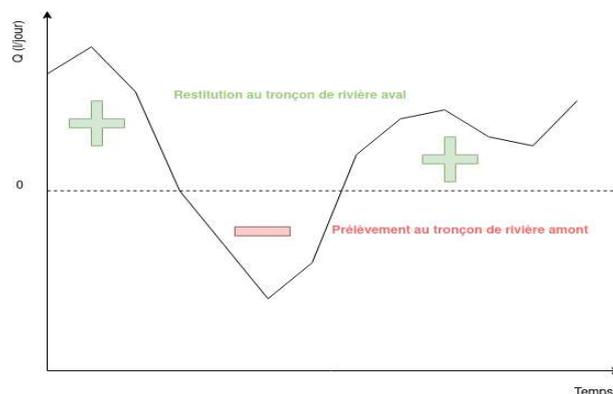


5

Barrages et dérivations dans J2000-Rhône

Fonctionnement des barrages

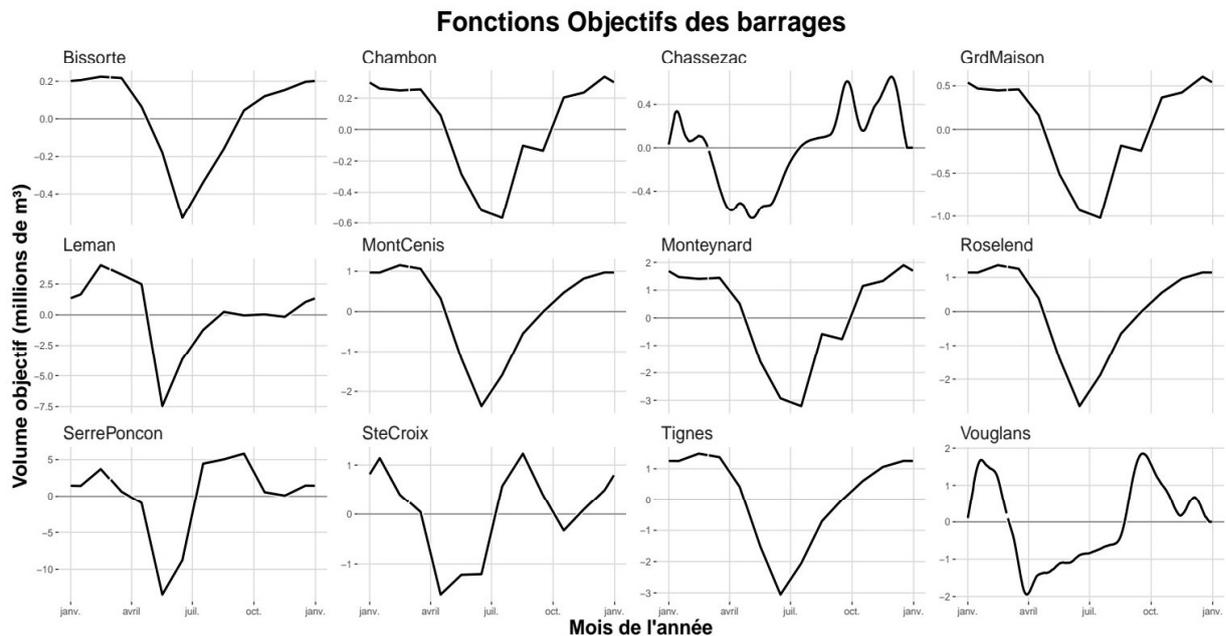
- **Fonctions Objectifs (FO)** : Consignes de prélèvement ou de rejet de l'ouvrage au pas de temps journalier.
- **Construction des FO** : Utilisation des chroniques de débit de stations de mesures influencé (aval) et non influencé (amont) pour obtenir la signature des ouvrages (Cipriani et al., 2014, étude OFB).



!/ FO ≠ courbe de remplissage

5 6

Barrages et dérivations dans J2000-Rhône



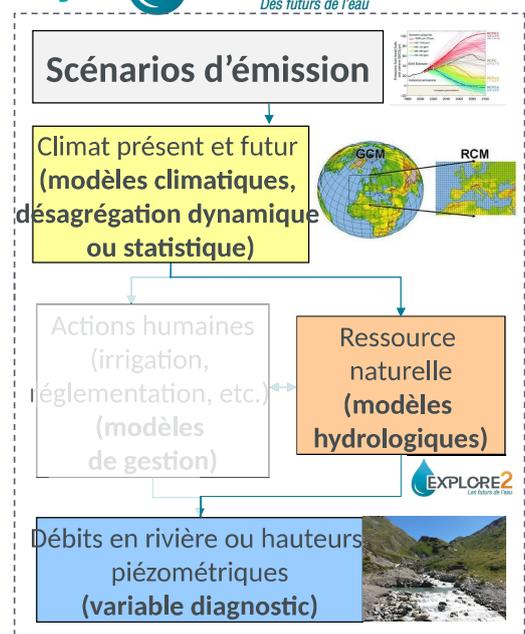
6 7

Choix et construction des scénarios

Projections climatiques : appui sur le projet Des futurs de l'eau

- Objectifs : actualiser les connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie (ressource et aléa) et en faciliter le transfert vers les acteurs de l'eau
- **Une approche « emboîtée »** pour accéder au climat local et aux échelles des bassins versants
- **Des représentations simplifiées** porteuses d'incertitudes à tous les niveaux de modélisation

 **Une approche multi-scénarios et multi-modèles appliquée de manière uniforme** sur le territoire métropolitain et sur l'ensemble du XXI^e siècle pour explorer **une large gamme de futurs possibles** et pour apprécier les **incertitudes** aux différents niveaux de modélisation du climat et de l'hydrologie

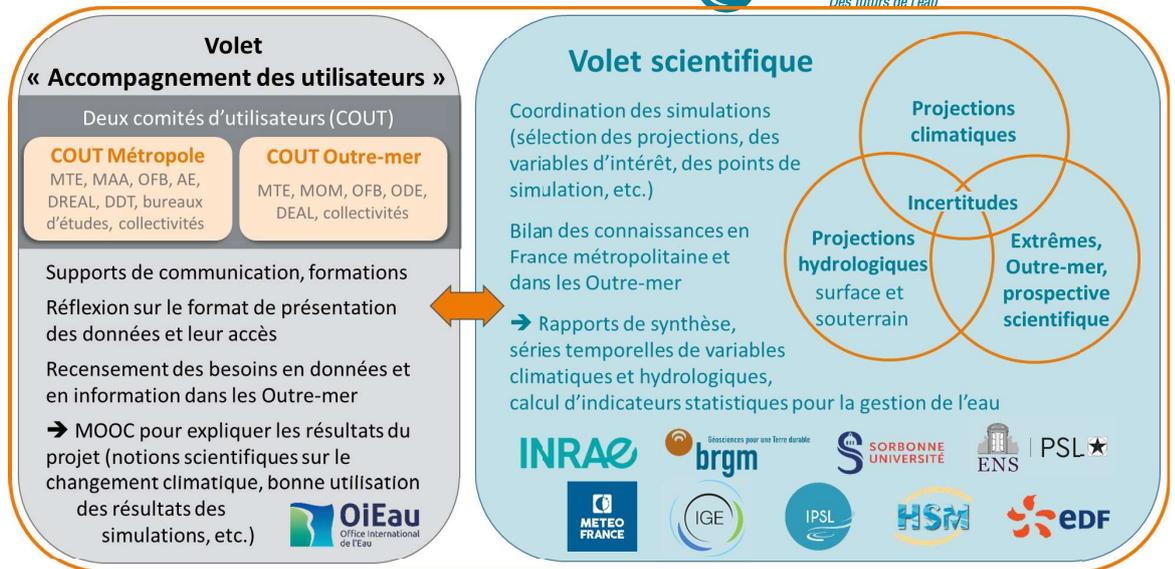


8

Choix et construction des scénarios

Projections climatiques : appui sur le projet EXPLORE2

- **Durée :**
3 ans
(2021-2024)
- **Coût total :**
2,2 Me
- **Financement :**
partenaires du projet, MTE (DGEC, DGPR, DGALN), OFB



Co-financements :  MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE
 OFB OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ

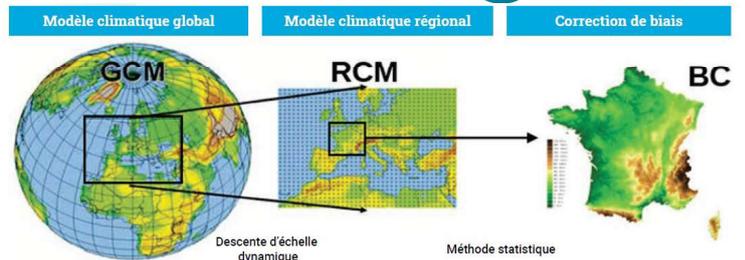
Assistance à maîtrise d'ouvrage :  ACTeon environnement

9

Choix et construction des scénarios

Projections climatiques : appui sur le projet EXPLORE2

- Trois scénarios de gaz à effet de serre RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 déclinés en différentes projections (simulations Euro-Cordex / exercice international CMIP5)



- Chroniques de précipitations, températures, etc. sur une grille 8 X 8 km au pas de temps journalier sur l'ensemble du XXIe siècle
- Sélection de couples GCM/RCM sur la base d'expertise : incertitudes et cohérence avec les premiers résultats de CMIP6
- Deux méthodes de correction de biais : ADAMONT (Météo France) et CDF-t (LSCE)

10

Choix et construction des scénarios

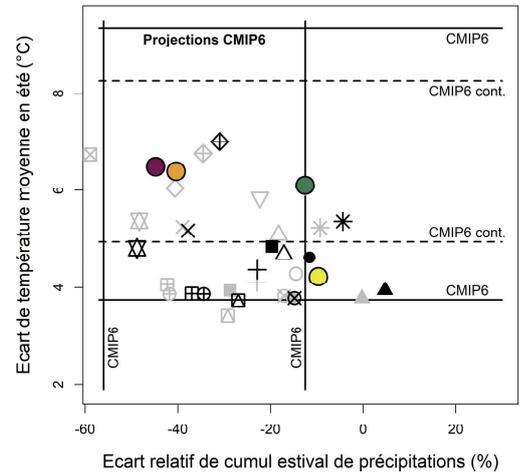
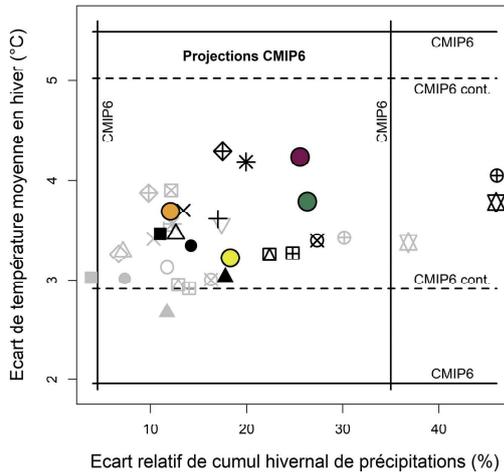
Projections climatiques : appui sur le projet Explore 2

- 17 couples GCM/RCM avec 17 projections sous RCP8.5, 9 sous RCP4.5 et 10 sous RCP2.6, corrigés de biais par deux méthodes (ADAMONT et CDF-t)

Changement en fin de siècle sous RCP8.5

1 point =
1 climat

en gris méthode CDF-t
en noir et couleur
méthode ADAMONT



11

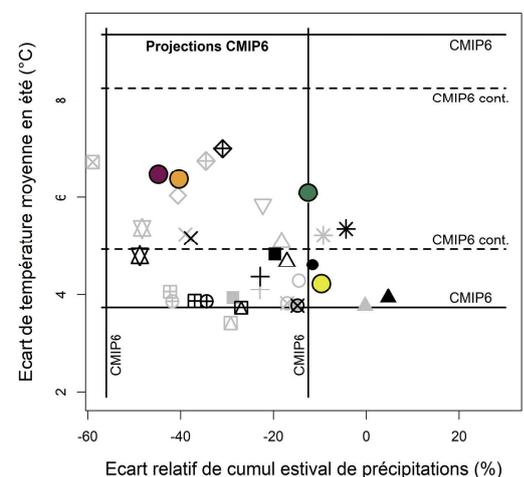
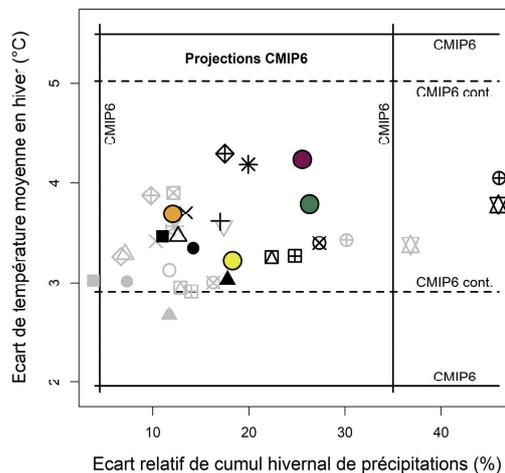
Choix et construction des scénarios

Projections climatiques : appui sur le projet Explore 2

- Volonté de représenter les contrastes entre futurs possibles et de construire des narratifs sur la base de 4 projections climatiques contrastées (expertise Météo-France)

Changement en fin de siècle sous RCP8.5

-  HadGEM2-ES rcp85 CCLM4-8-17 ADAMONT
Fort réchauffement et fort assèchement en été
-  EC-EARTH rcp85 HadREM3-GA7 ADAMONT
Sec toute l'année, recharge moindre en hiver
-  CNRM-CM5 rcp85 ALADIN63 ADAMONT
Modéré en réchauffement et changement de précipitations
-  HadGEM2-ES rcp85 ALADIN63 ADAMONT
Chaud et humide à toutes les saisons



Choix et construction des scénarios

Projections climatiques : appui sur le projet Explore 2

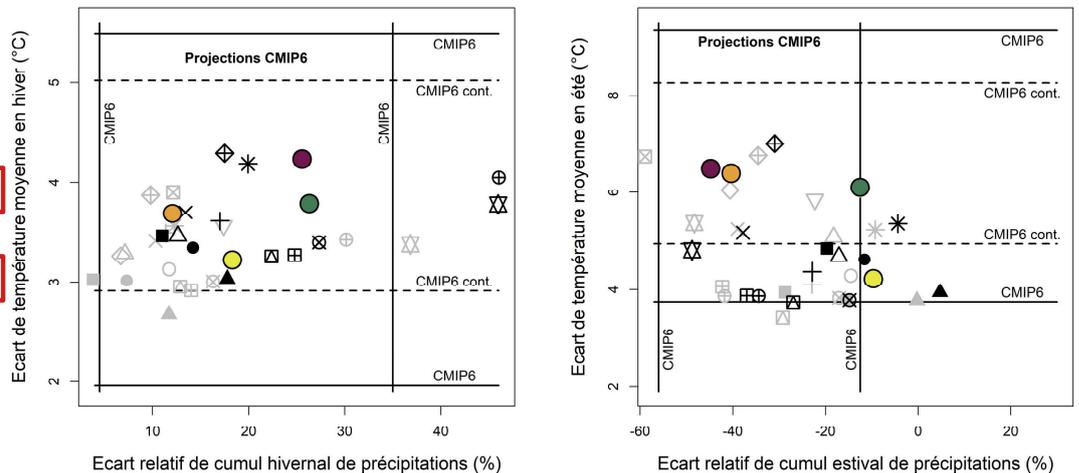


- Pour l'OSR6 : sous-sélection de 6* projections sous RCP 8.5

* dont une a entre-temps été éliminée du jeu final et 2 font partie des narratifs sélectionnés

Changement en fin de siècle sous RCP8.5

- HadGEM2-ES rcp85 CCLM4-8-17 ADAMONT
Fort réchauffement et fort assèchement en été
- EC-EARTH rcp85 HadREM3-GA7 ADAMONT
Sec toute l'année, recharge moindre en hiver
- CNRM-CM5 rcp85 ALADIN63 ADAMONT
Modéré en réchauffement et changement de précipitations
- HadGEM2-ES rcp85 ALADIN63 ADAMONT
Chaud et humide à toutes les saisons



13

Choix et construction des scénarios

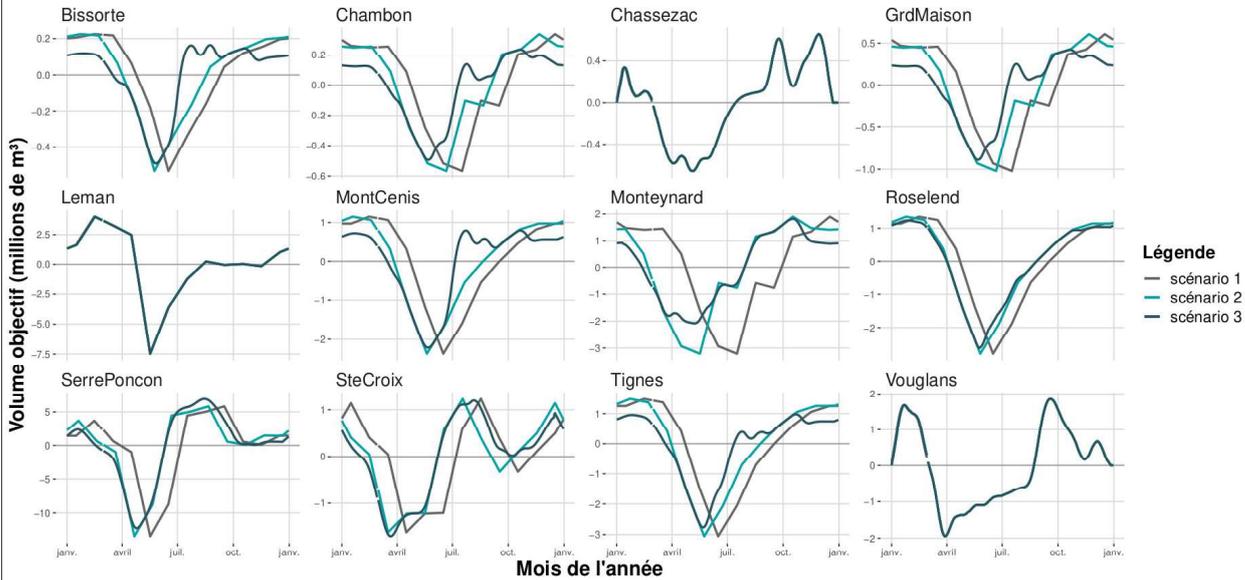
Scénarios de gestion des barrages et dérivations

- Scénarios virtuels, construits indépendamment des données d'exploitation et sans prendre en compte les contraintes de gestion opérationnelles
- Objectif de vision globale du régime (pas de préconisation de gestion)
- Trois scénarios :
 - **Scénario 1** : maintien des fonctions objectif actuelles ;
 - **Scénario 2** : adaptation des fonctions objectif aux effets du changement climatique: décalage temporel pour suivre l'onde de fonte dans les Alpes ; réduction des apports de la Loire à l'Ardèche ;
 - **Scénario 3** : fourniture de plus d'eau durant la période estivale (JAS), de façon à maintenir les débits influencés historiques (période de référence).

Choix et construction des scénarios

Scénarios de gestion des barrages et dérivations

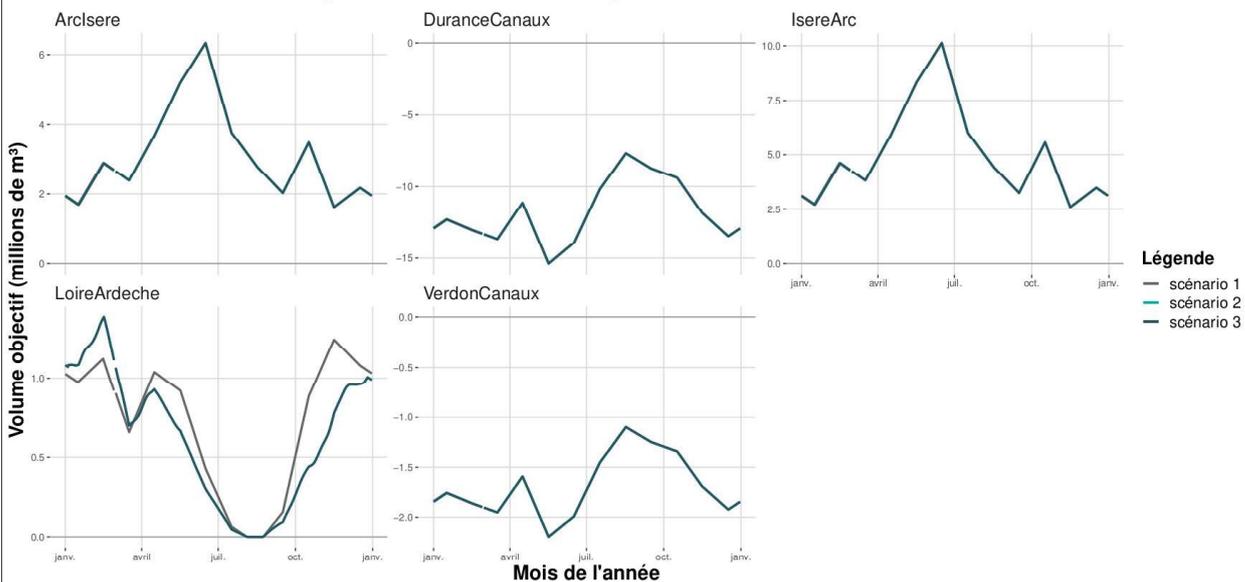
Fonctions Objectifs des barrages pour l'ensemble des 3 scénarios



Choix et construction des scénarios

Scénarios de gestion des barrages et dérivations

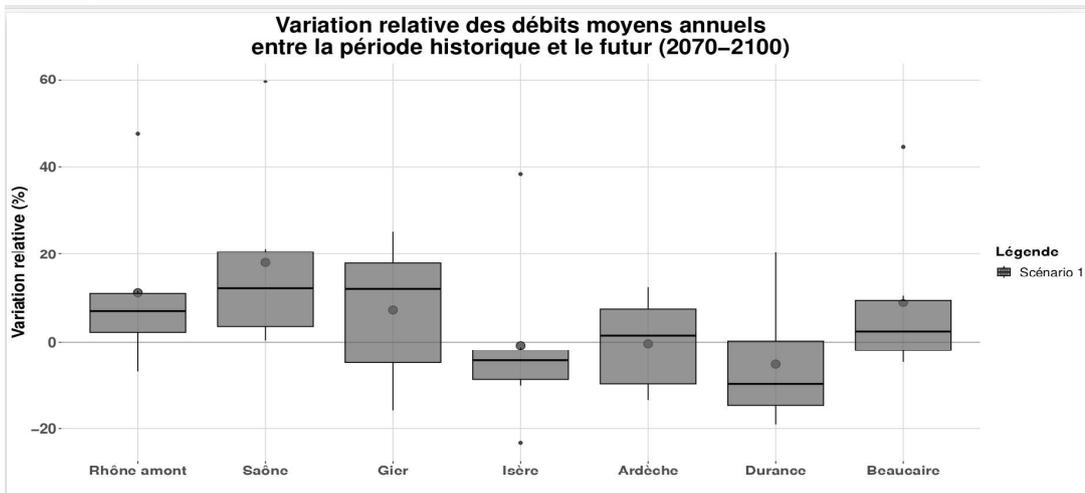
Fonctions Objectifs des dérivations pour l'ensemble des 3 scénarios



Résultats des simulations

Scénario 1 : variabilité du climat

Variation relative par rapport à la période historique (1976-2005) – 6 projections climatiques

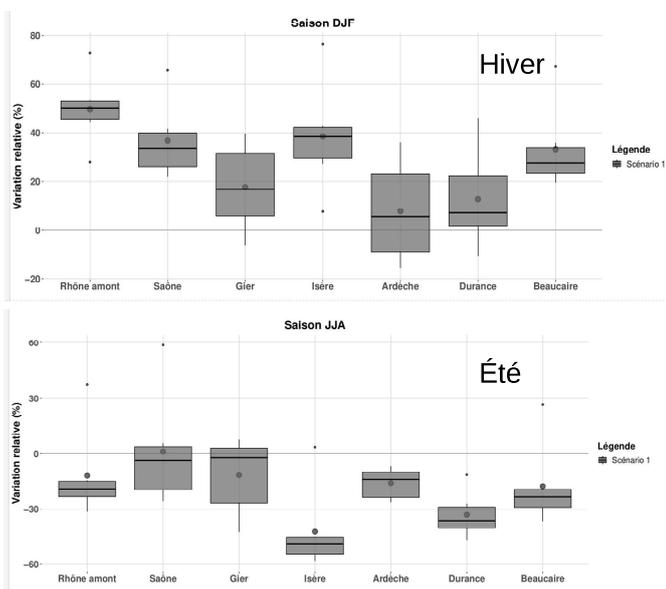


Débits moyens annuels : variabilité spatiale (affluents Nord vs Alpes)

Résultats des simulations

Scénario 1 : variabilité du climat

Variation relative par rapport à la période historique (1976-2005) – 6 projections climatiques



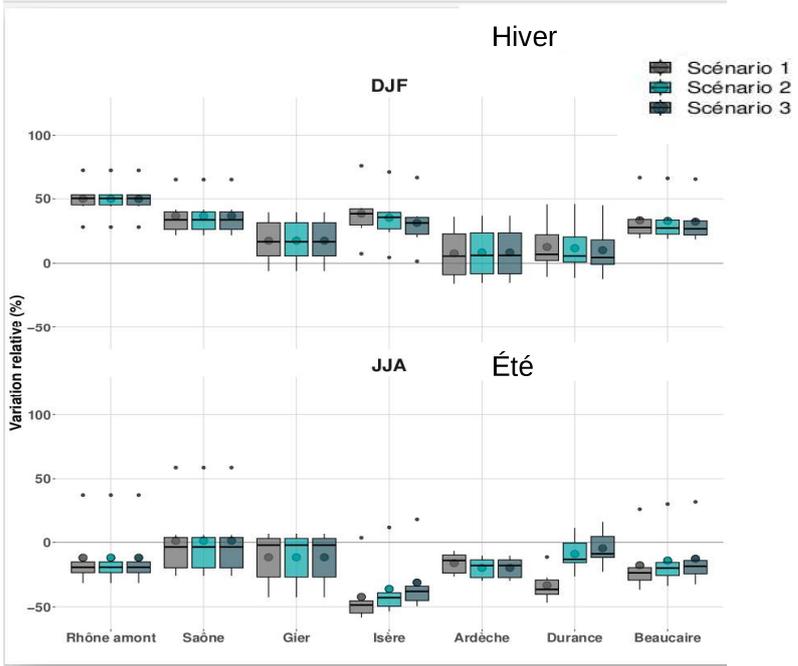
Débits moyens saisonniers :

Augmentation des débits en hiver : augmentation des précipitations au Nord et moins de stockage de neige

Forte diminution des débits en été : baisse des précipitations et fonte précoce de la neige

Résultats des simulations

Scénarios 1 à 3 : influence des scénarios de gestion



Débits moyens saisonniers

Résultats identiques pour les 3 scénarios pour Rhône amont, Saône et Gier, identiques pour scénarios 2 et 3 pour Ardèche

Hiver : diminution des débits car consigne de volumes restitués plus faible

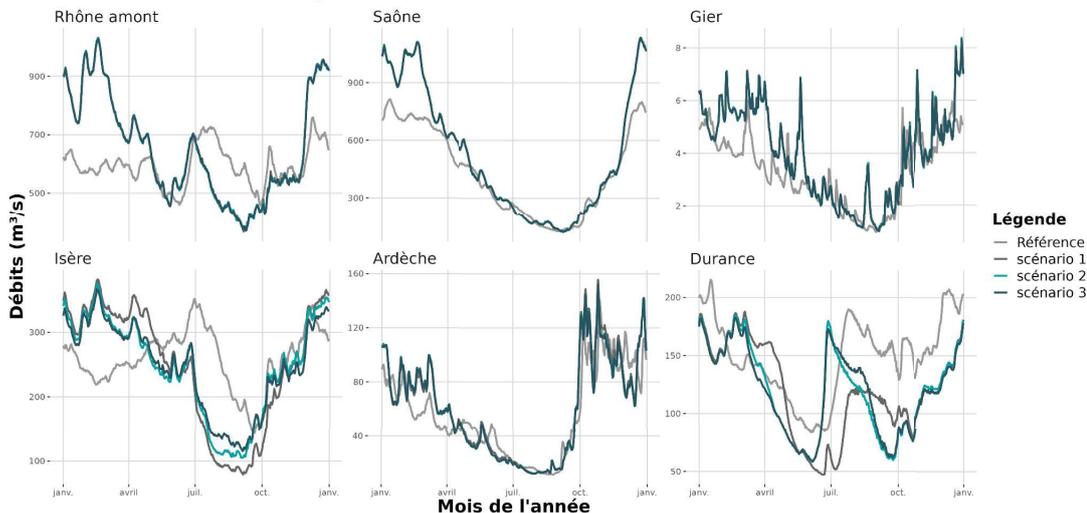
Été : augmentation des débits car augmentation des lâchers

Résultats des simulations

Scénarios 1 à 3 : influence des scénarios de gestion

Débits moyens interannuels (régimes)

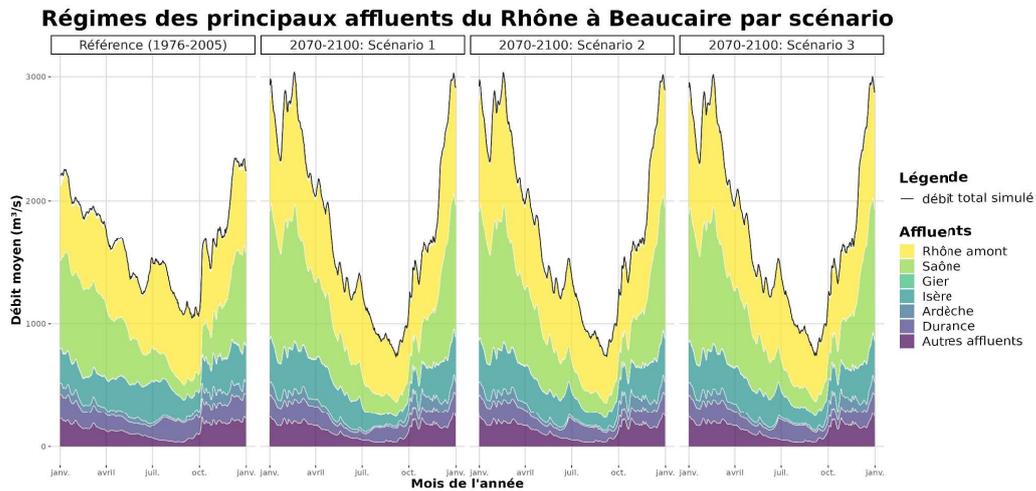
Moyenne interannuelle des affluents



Résultats des simulations

Scénarios 1 à 3 : influence des scénarios de gestion

Contribution des principaux affluents à Beaucaire (projection CNRM-CM5 / ALADIN63 / ADAMONT)



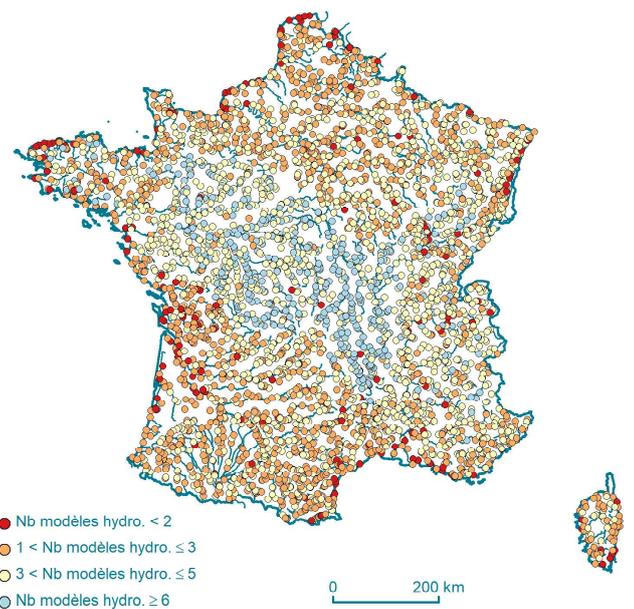
21

Mise en perspective : projet Explore2

Volet Hydrologie



- **Eaux de surface et eaux souterraines**
- Une « hydrologie de référence » sur laquelle on peut bâtir des exercices prospectifs
- Multi-modèles : 9 modèles d'hydrologie de surface (EROS, GRSD, J2000, MORDOR-TS, MORDOR-SD, ORCHIDEE, SIM, SMASH, ISBA-CTIP)
- ~ 4000 points de simulation en hydrologie de surface
- **Evaluation des modèles en temps présent aux 611 points d'évaluation (🏠 fiches)**
- **Production des projections hydrologiques aux points de simulation**



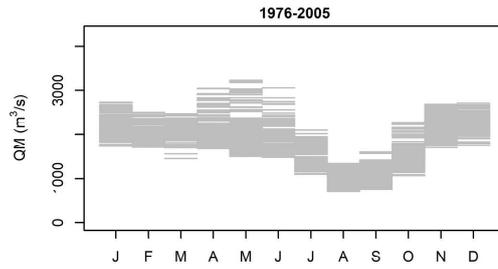
22



Premier aperçu des résultats des projection hydrologiques sur le BV Rhône

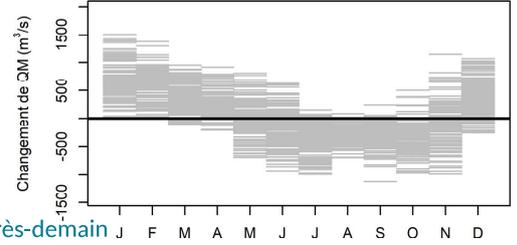
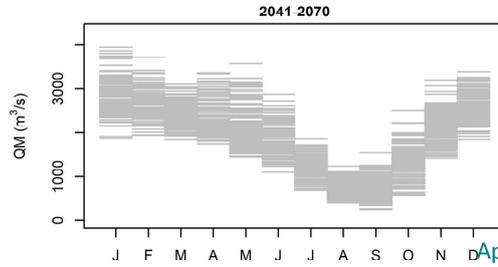
Le Rhône à Beaucaire

Aujourd'hui

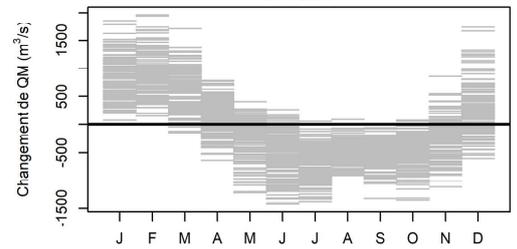
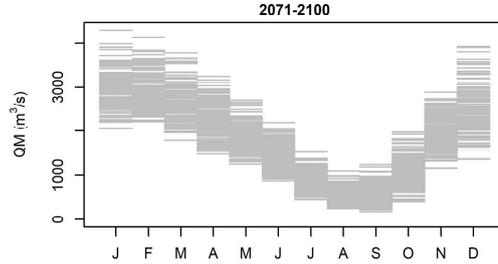


Evolution des écarts à la référence 1976-2005 sous RCP8.5

Demain



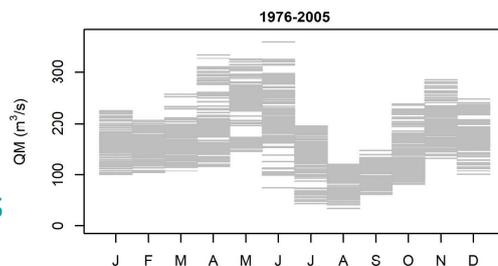
Après-demain



Premier aperçu des résultats des projections hydrologiques sur le BV Rhône

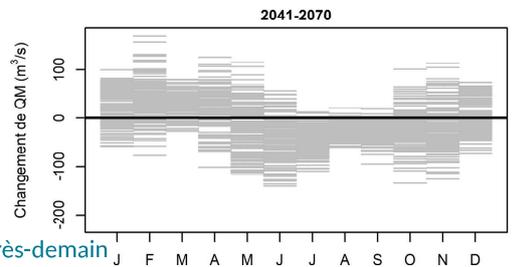
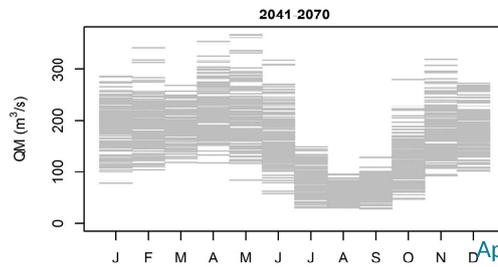
La Durance à Cavailon

Aujourd'hui

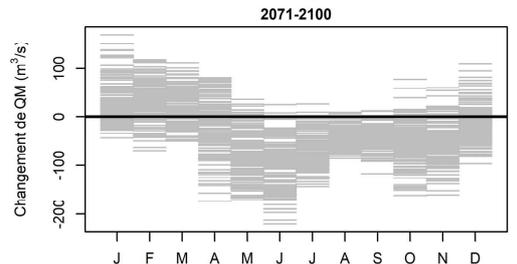
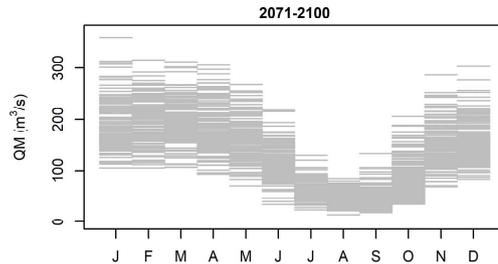


Evolution des écarts à la référence 1976-2005 sous RCP8.5

Demain



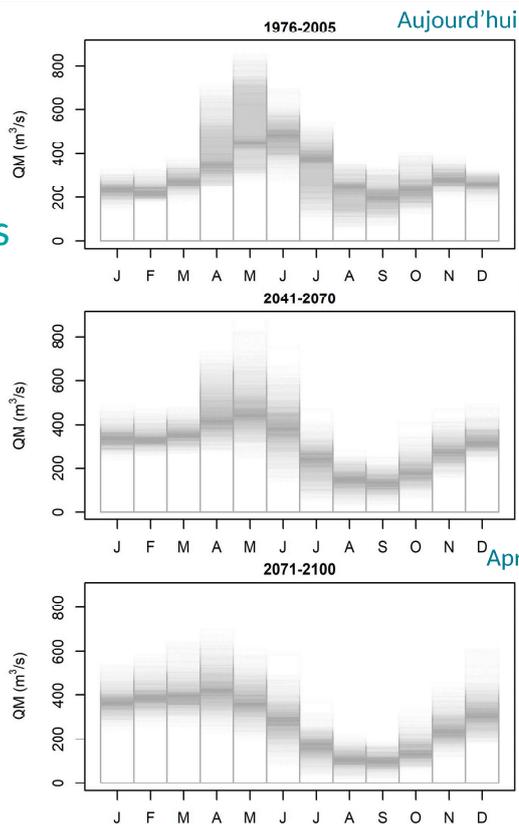
Après-demain



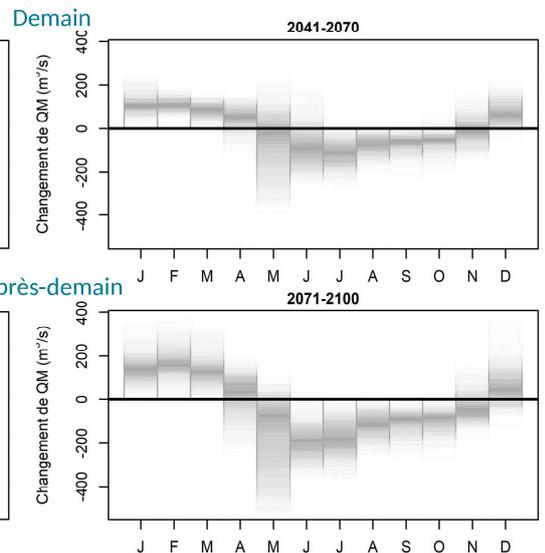


Premier aperçu des résultats des projections hydrologiques sur le BV Rhône

L'Isère à Beaumont-Monteux

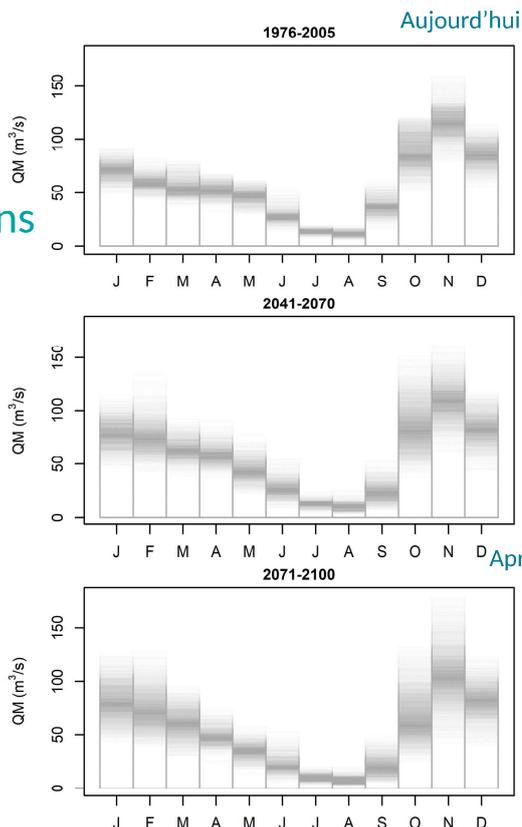


Evolution des écarts à la référence 1976-2005 sous RCP8.5

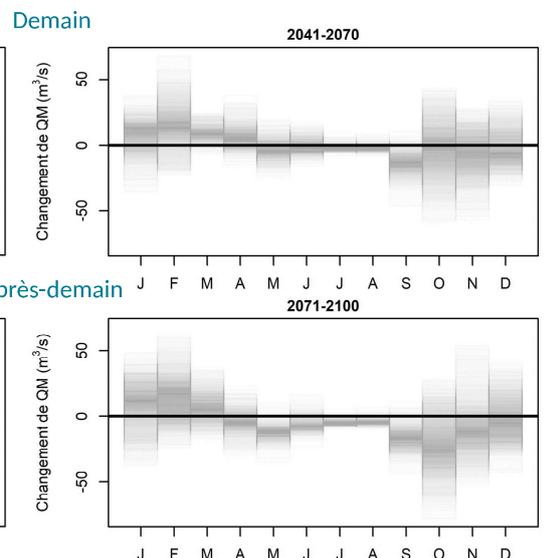


Premier aperçu des résultats des projections hydrologiques sur le Rhône

L'Ardèche à Sauze



Evolution des écarts à la référence 1976-2005 sous RCP8.5



Conclusions

Sélection de projections climatiques et production de projections hydrologiques sur le fleuve et ses affluents jusqu'en 2100

Scénarios théoriques de gestion des principaux barrages

Bonne cohérence des simulations J2000-Rhône avec les résultats multi-modèles du projet Explore 2

Impact fort du changement climatique : modification du régime de débit du fleuve, notamment du point de vue des affluents alpins

- Le Rhône à Beaucaire aura des débits encore plus contrastés à horizon 2070-2100
- Impact possible de la stratégie de gestion des barrages sur certains affluents mais influence limitée sur le fleuve Rhône

27

Conclusions

Information sur les flux de MES liés aux variations de régime (fonte des neiges, changement de saisonnalité des pluies)

La chaîne de modélisation reproduit mal les événements de crue, principale cause de la mobilisation des MES + pas de temps journalier mal adapté

Projections hydrologiques fournies aux partenaires OSR pour travailler sur la partie sédiments et contaminants

28

Perspectives

- Fin de l'exploitation des résultats du projet Explore 2 : colloque de restitution en juin 2024
- Améliorations du modèle J2000-Rhône : prise en compte de la contribution glaciaire (en cours), correction de biais sur les précipitations dans les Alpes
- Couplage avec l'érosion et le transfert de sédiments à l'échelle de la HRU (OSR7)
- Prise en compte d'autres facteurs de changement ?

22 29



Observatoire
des Sédiments
du Rhône

Dispositifs scientifiques cadres



Partenaires techniques et financiers



Annexe 3 - Modélisation prospective des transferts de MES

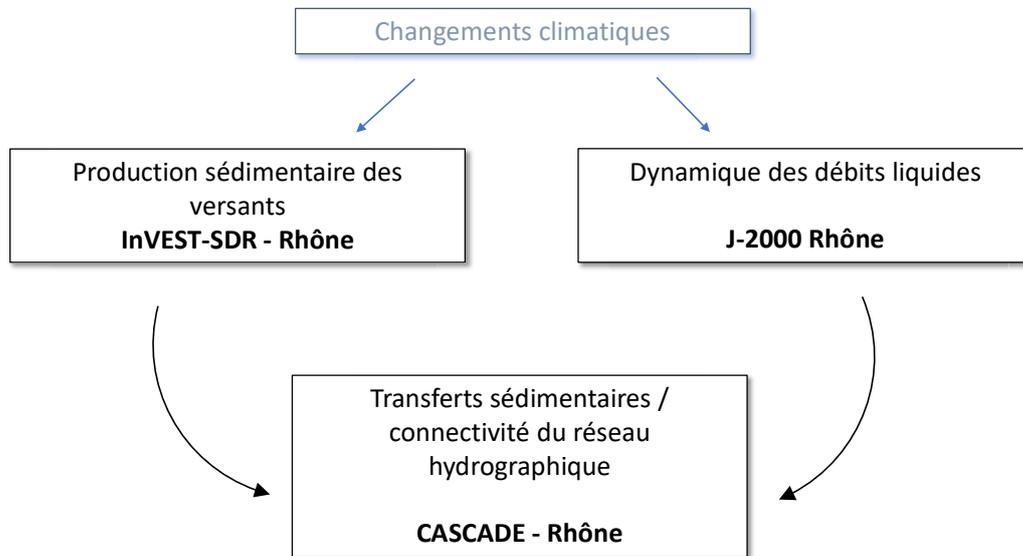
Action D3 : Modélisation prospective des transferts de MES

Mathieu Fressard (CNRS-EVS), Clément Fabre (CNRS-EVS), Simone Bizzi
(Univ. Padoue, it), Flora Branger (Riverly), Hervé Piegay (CNRS-EVS)

1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS

- La construction d'un modèle hydro-sédimentaire spatialement distribué à l'échelle du bassin versant du Rhône a été initiée dans le cadre de l'OSR5
 - *Approche qualitative à l'échelle du bassin versant*
 - *Approches quantitatives à échelle locale (+/- 100km²)*
- OSR6 : déployer l'approche quantitative sur l'ensemble du bassin versant
 - *Production de données spécifiques*
 - *Couplage/chainage de modèles : zones sources (versant) transport (cours d'eau)*
- Modèles adaptés à la prise en compte des scénarios de changements climatiques

1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS

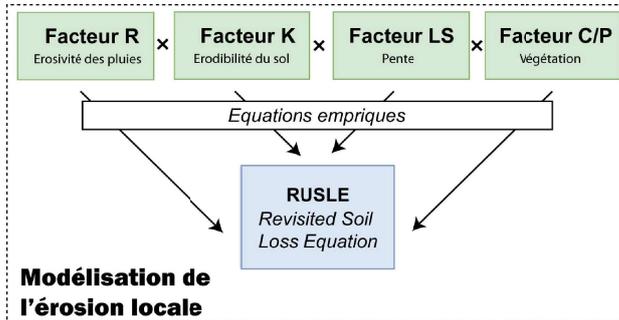


ORGANISATION DE LA PRÉSENTATION

1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS
2. PRODUCTION SÉDIMENTAIRE DES VERSANTS
3. TRANSFERTS DE M.E.S DANS LE RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE
4. SCENARIOS DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET IMPACT SUR LES DYNAMIQUES SÉDIMENTAIRES DU FLEUVE
5. DISCUSSION
6. CONCLUSION

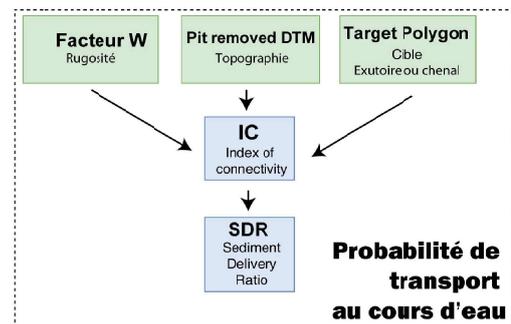
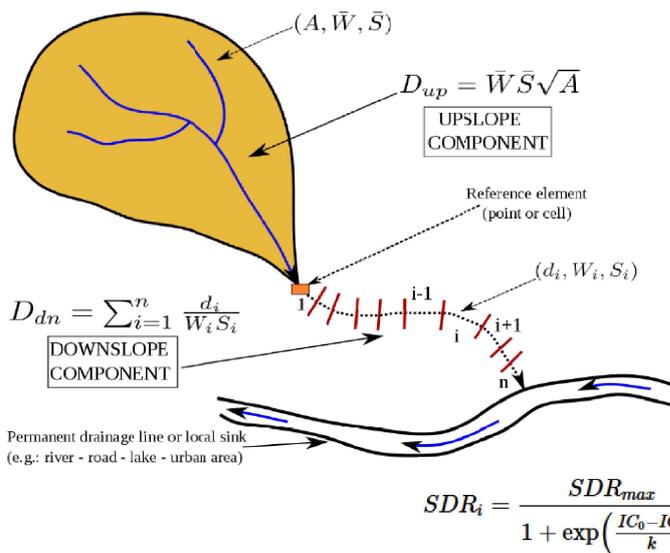
2. PRODUCTION SÉDIMENTAIRE DES VERSANT

InVEST SDR - Rhône



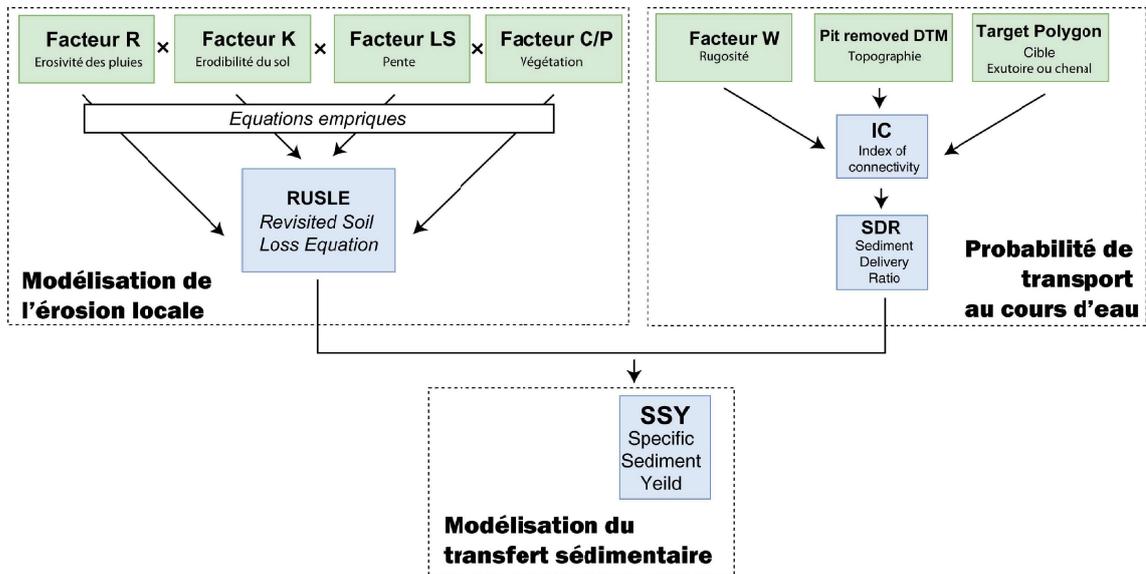
2. PRODUCTION SÉDIMENTAIRE DES VERSANT

InVEST SDR - Rhône



2. PRODUCTION SÉDIMENTAIRE DES VERSANT

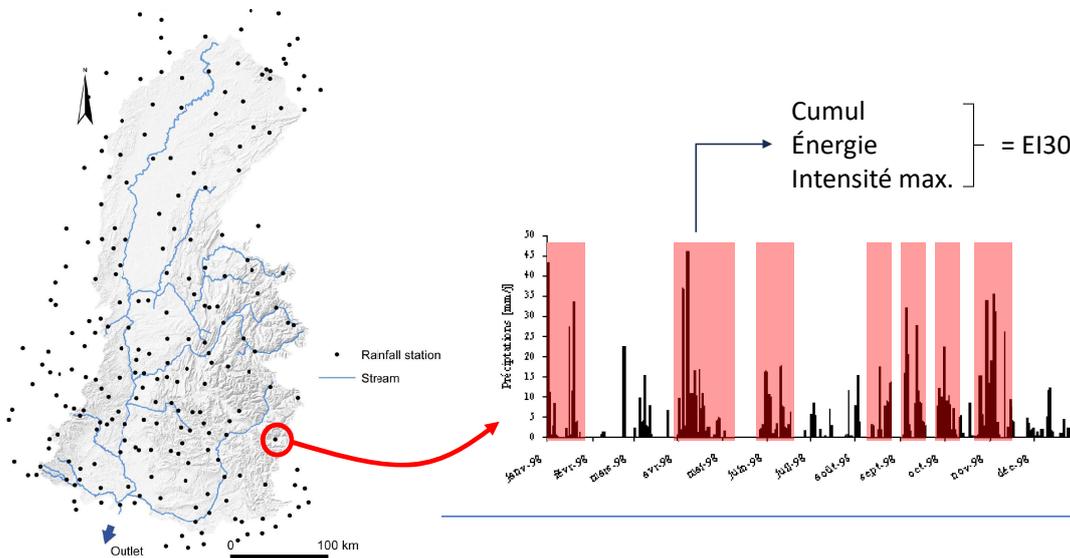
InVEST SDR - Rhône



2. PRODUCTION SÉDIMENTAIRE DES VERSANT

Erosivité des pluies (R factor)

Mesure de l'érosivité des pluies sur 245 stations météo (6 min / 15 ans)



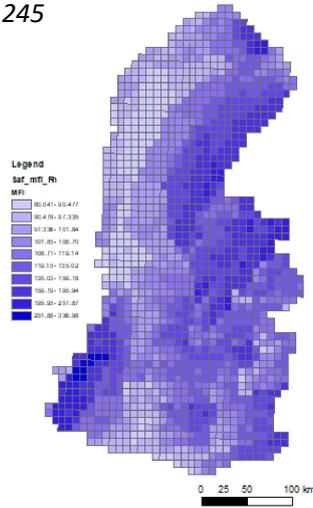
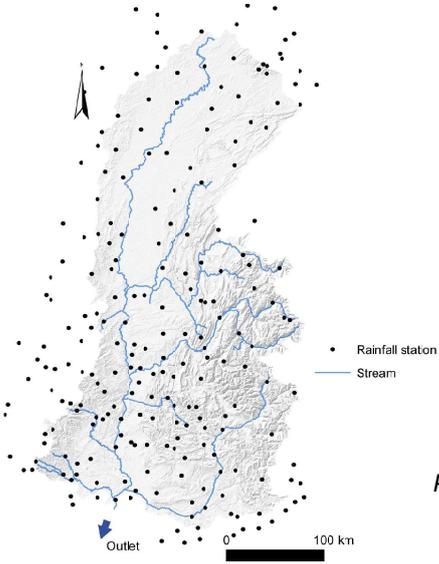
$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} (EI_{30})_k$$

Moyenne interannuelle

2. PRODUCTION SÉDIMENTAIRE DES VERSANT

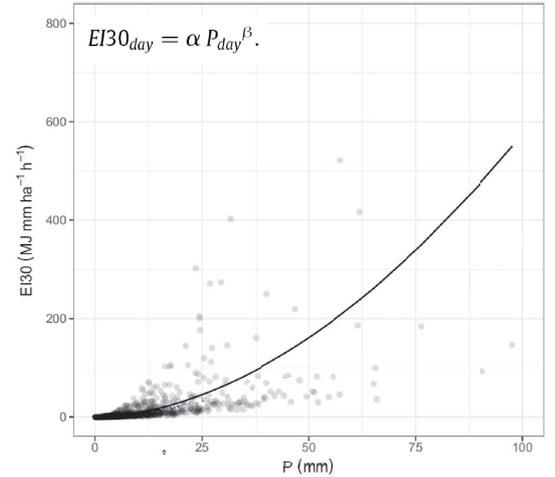
Erosivité des pluies (R factor)

Mesure de l'érosivité des pluies sur 245 stations météo (6 min / 15 ans)



Précipitations journalières (grille SAFRAN)

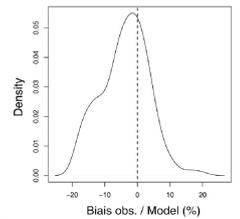
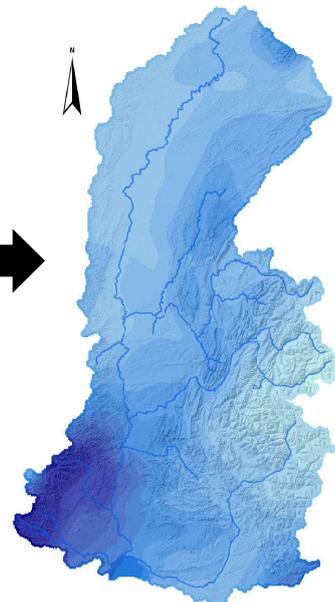
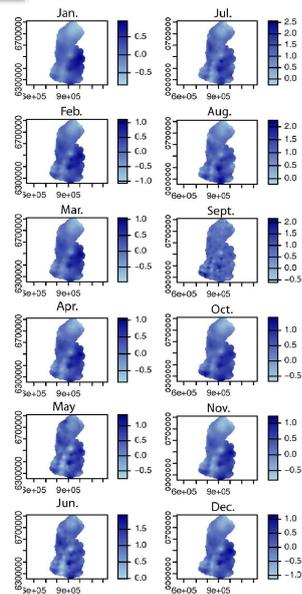
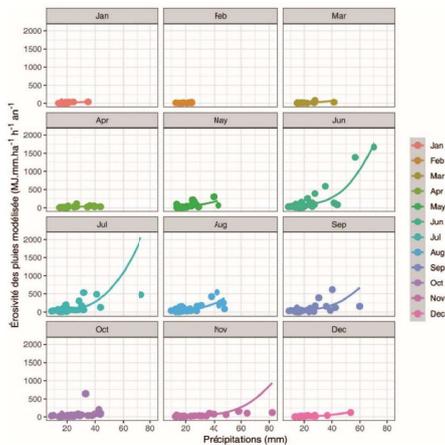
Calage d'une fonction exponentielle entre le R factor et les PP (pas de temps journalier)



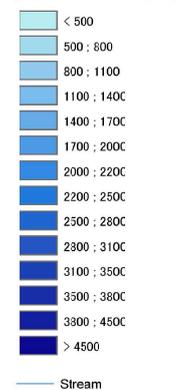
2. PRODUCTION SÉDIMENTAIRE DES VERSANT

Erosivité des pluies (R factor)

Modèle multi-niveaux au pas de temps mensuel



R factor (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹)

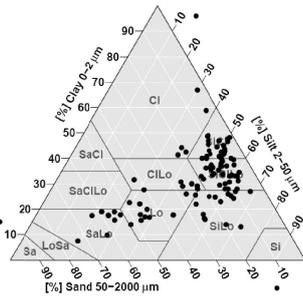


2. PRODUCTION SÉDIMENTAIRE DES VERSANT

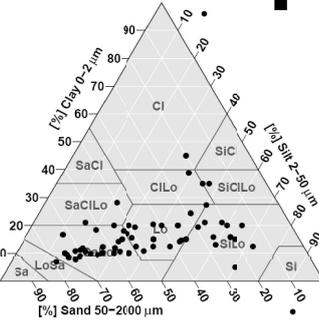
Érodibilité des sols (K factor)



Texture des sols (21)



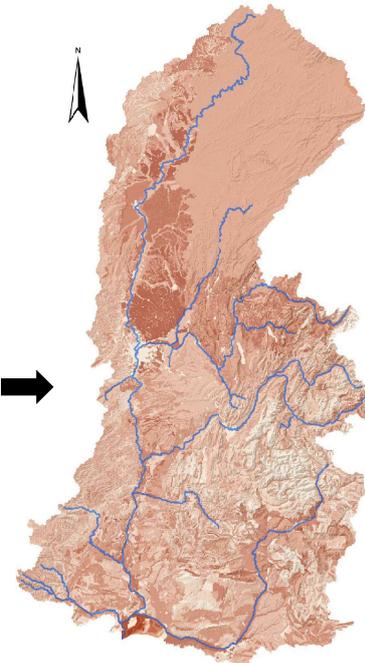
Texture des sols (07)



+

Teneur MO
Teneur EG
Structure
Perméabilité

➔



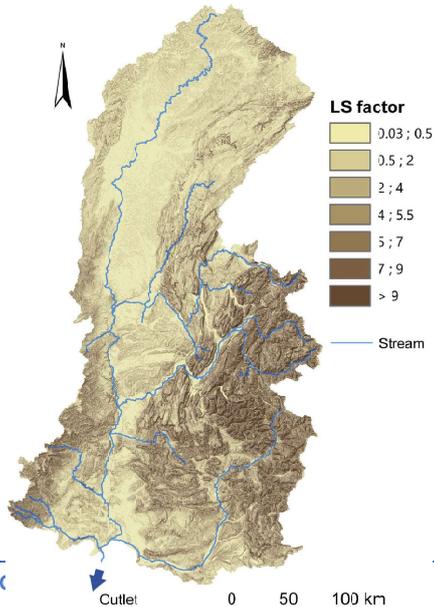
Référentiel Régional Pédologique (RMT)

0 50 100 km

2. PRODUCTION SÉDIMENTAIRE DES VERSANT

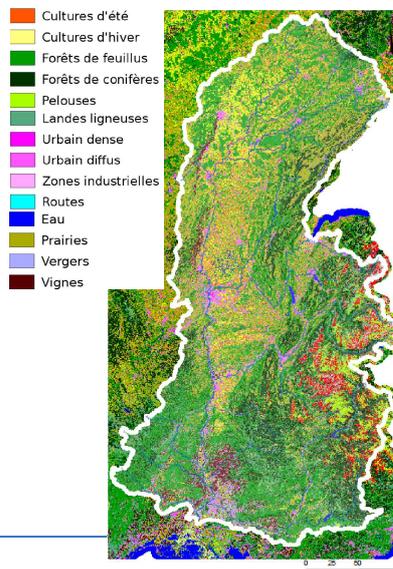
Facteur pente/relief (LS)

MNT (IGN) 25x25m



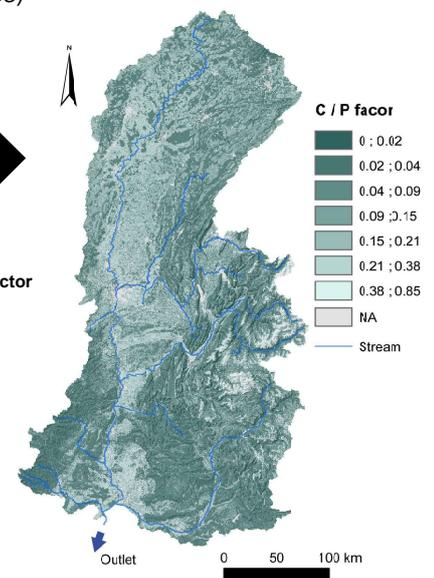
Couvert végétal (C)

Carte d'occupation du sol (Théia-land OSO)



➔

C/P factor

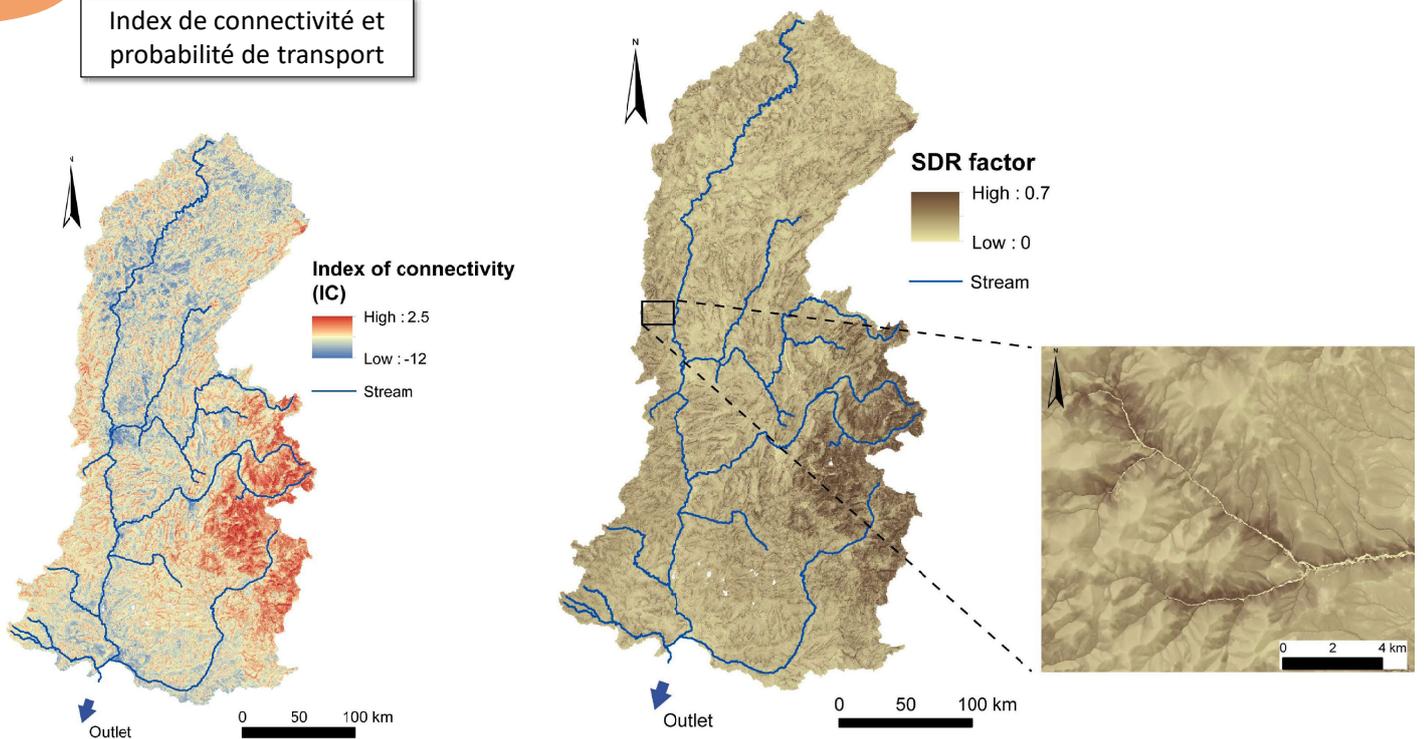


0 50 100 km

0 50 100 km

2. PRODUCTION SÉDIMENTAIRE DES VERSANT

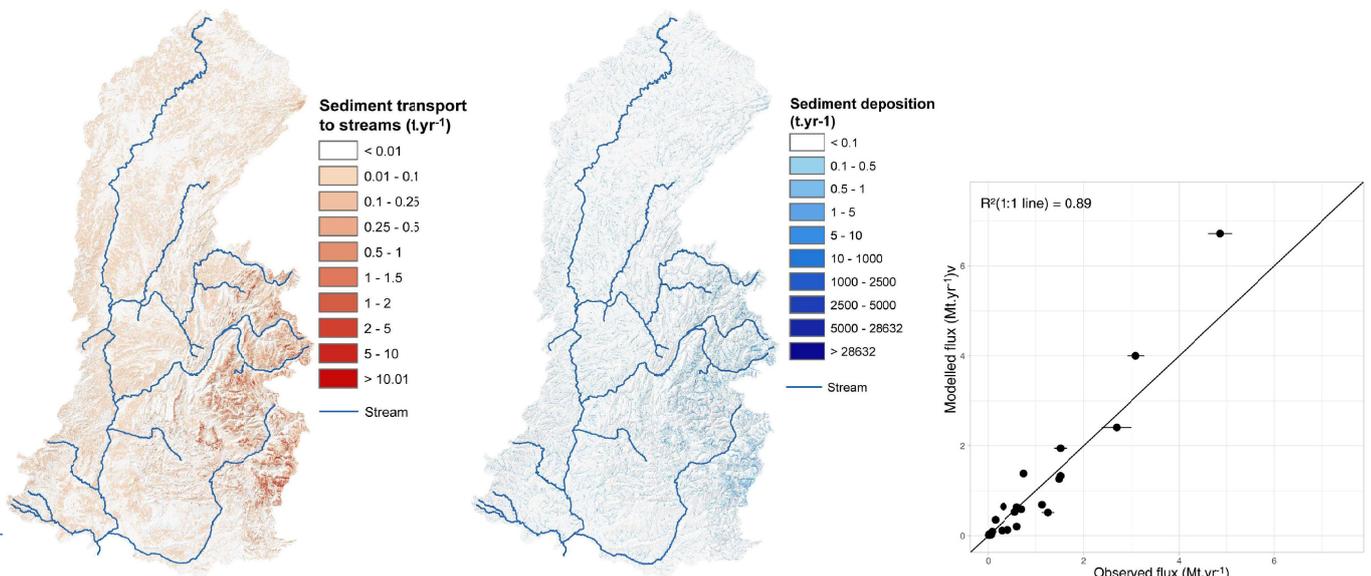
Index de connectivité et probabilité de transport



2. PRODUCTION SÉDIMENTAIRE DES VERSANT

Modèle InVEST – SDR Rhône

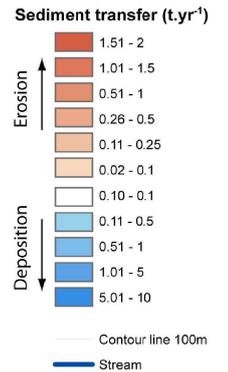
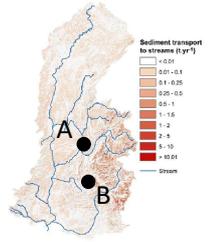
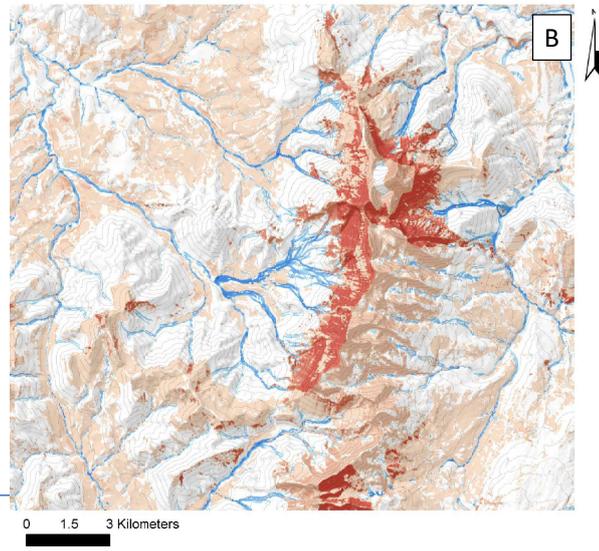
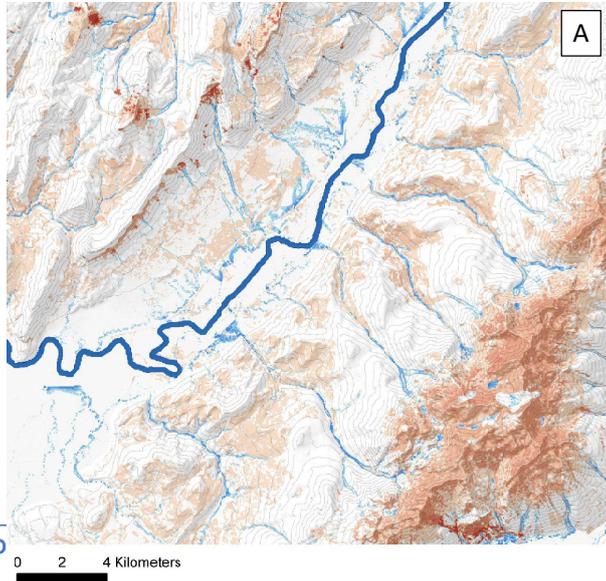
Cartographie des zones d'érosion et de dépôt entre les versants et le cours d'eau



2. PRODUCTION SÉDIMENTAIRE DES VERSANT

Modèle InVEST – SDR Rhône

Cartographie des zones d'érosion et de dépôt entre les versants et le cours d'eau

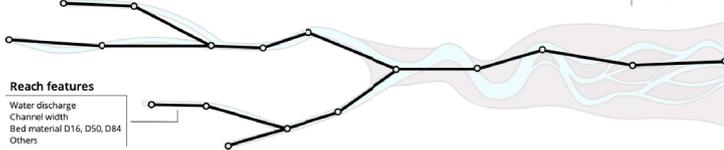


3. TRANSFERTS DANS LE RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

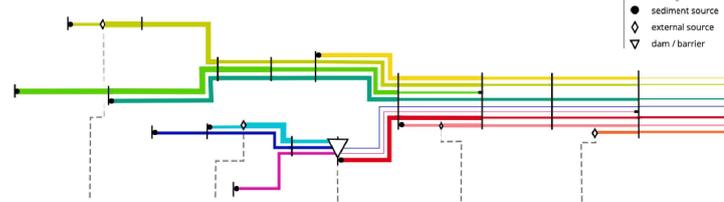
Le modèle CASCADE

Transport solide dans le réseau hydrographique

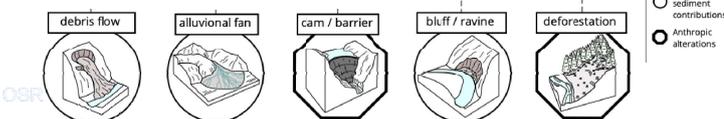
Extraction de Réseau hydrographique et caractérisation



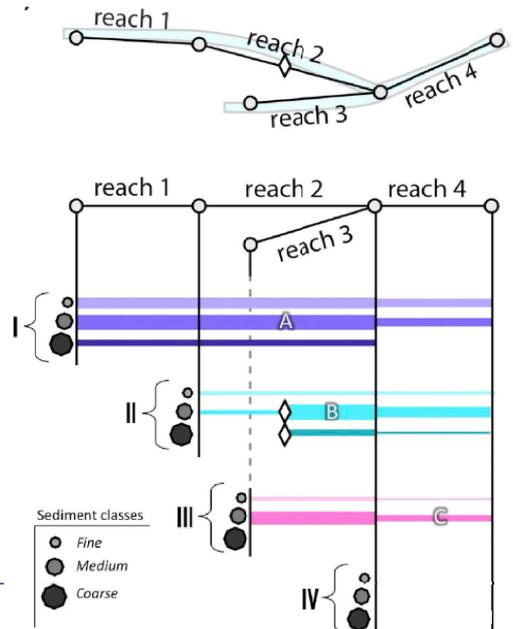
Modèle de transfert de sédiments



Sources sédimentaires et obstacles

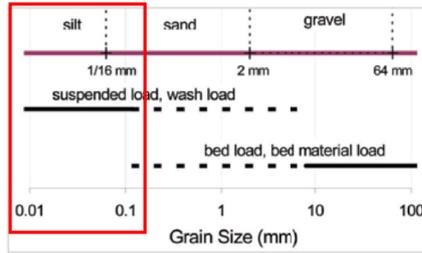


Traçage possible selon la taille des particules



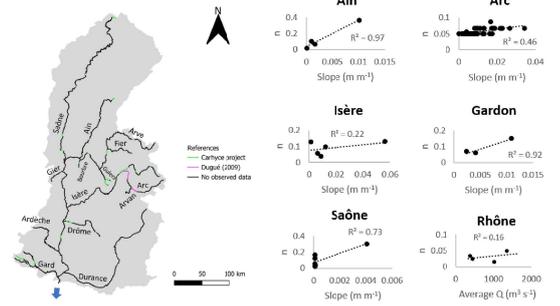
3. TRANSFERTS DANS LE RÉSEAU HYDROGRAPHI

Le modèle CASCADE : données d'entrée



Wilcock et al., 2009

Travail focalisé sur les MES



Cartographie du coefficient de Manning-Strickler



0 50 100 km

Réseau hydro : Rhône et principaux affluents

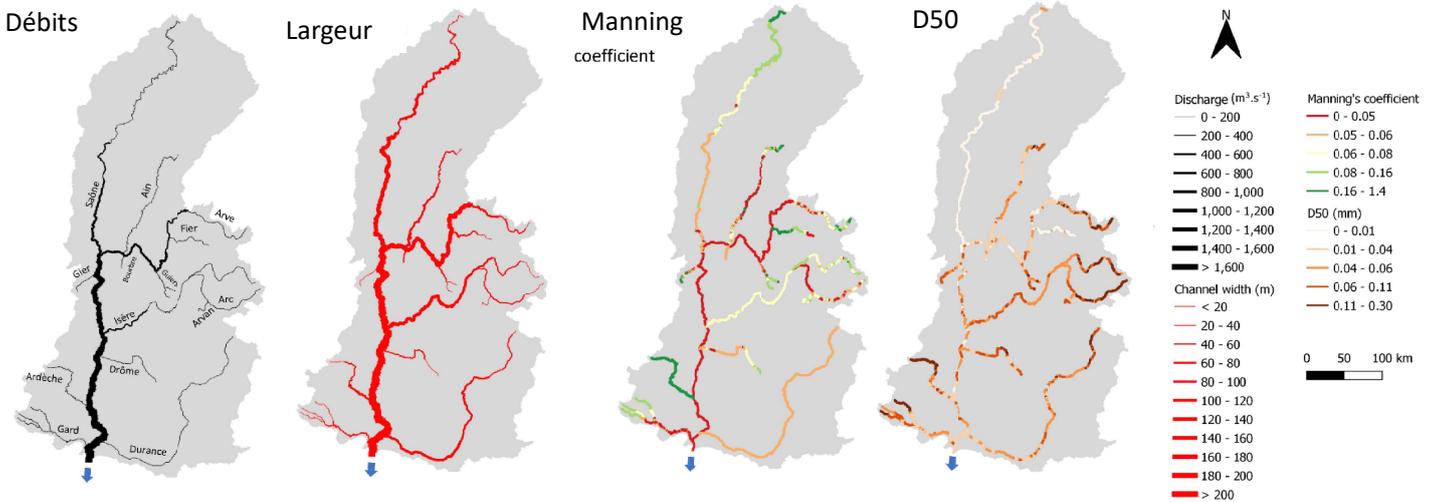
Données d'entrée du modèle :

- Quantiles des débits (J-2000 Rhône)
- Largeur de bande active (Morel et al. 2019)
- Capacité de transport (Yang, 1973)
- Granulométrie (mesures OSR)
- Sources sédimentaires (InVEST-SDR Rhône)
- Barrages (Vouglans, Serre-Ponçon)

17

3. TRANSFERTS DANS LE RÉSEAU HYDROGRAPHI

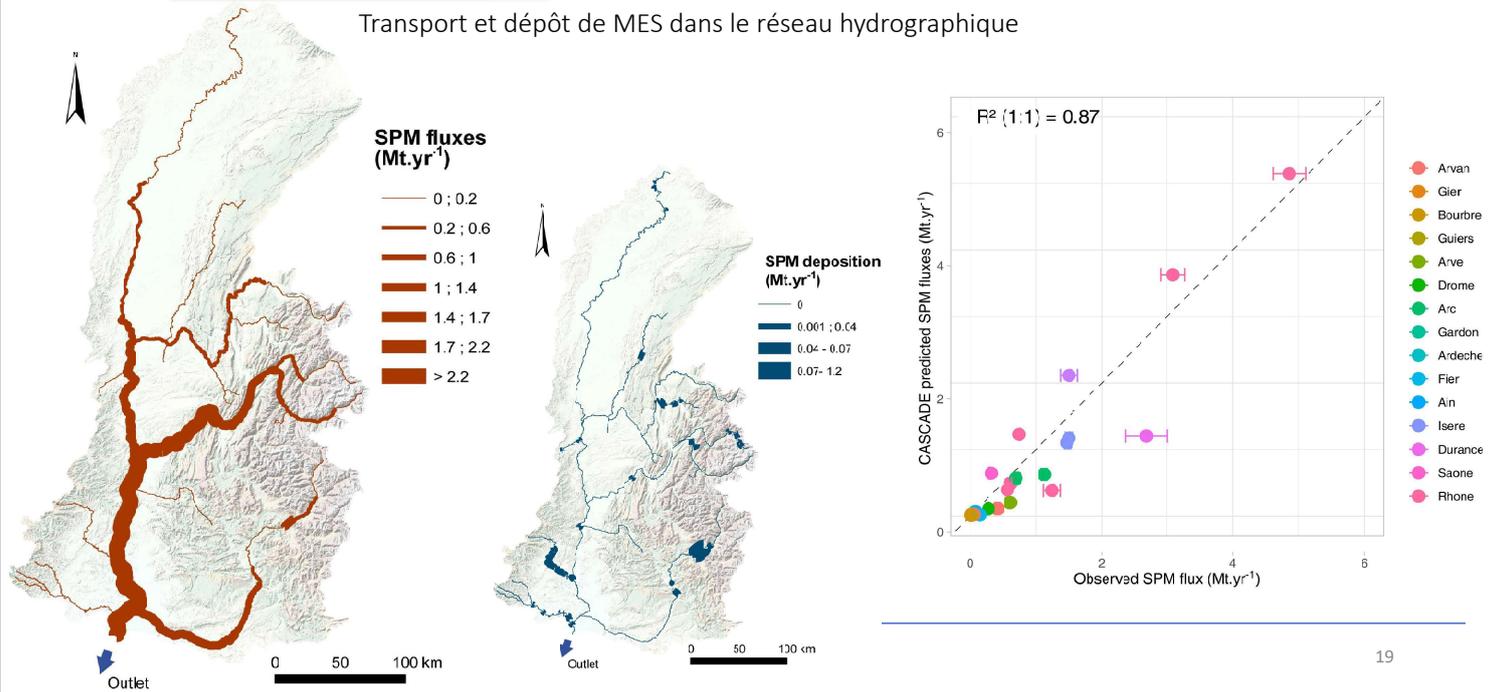
Le modèle CASCADE : données d'entrée



3. TRANSFERTS DANS LE RÉSEAU HYDROGRAPHHI

Le modèle CASCADE : résultats

Transport et dépôt de MES dans le réseau hydrographique

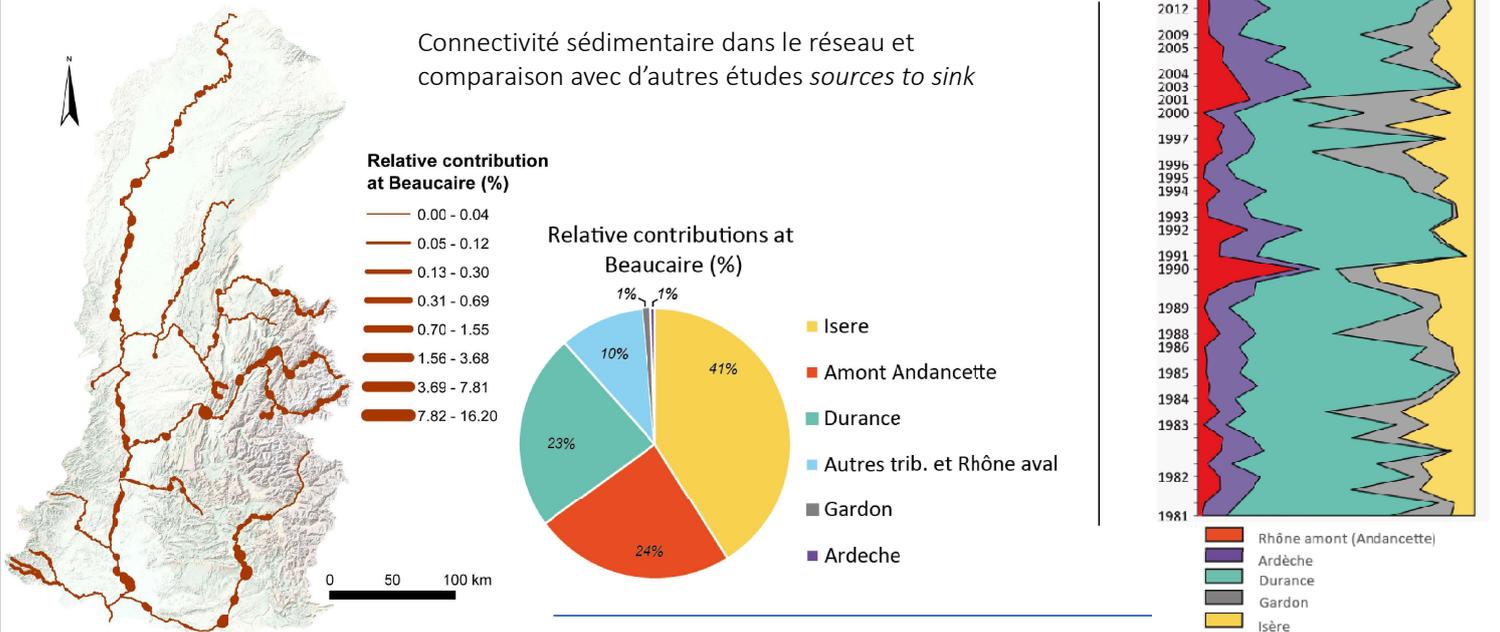


19

3. TRANSFERTS DANS LE RÉSEAU HYDROGRAPHHI

Le modèle CASCADE : résultats

Connectivité sédimentaire dans le réseau et comparaison avec d'autres études *sources to sink*

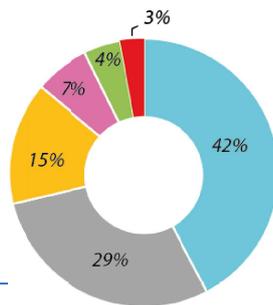
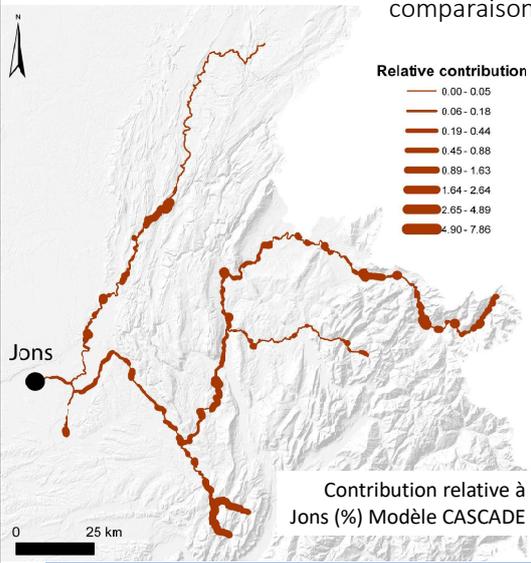


Bégorre et al., 2022 (Geomorphology)

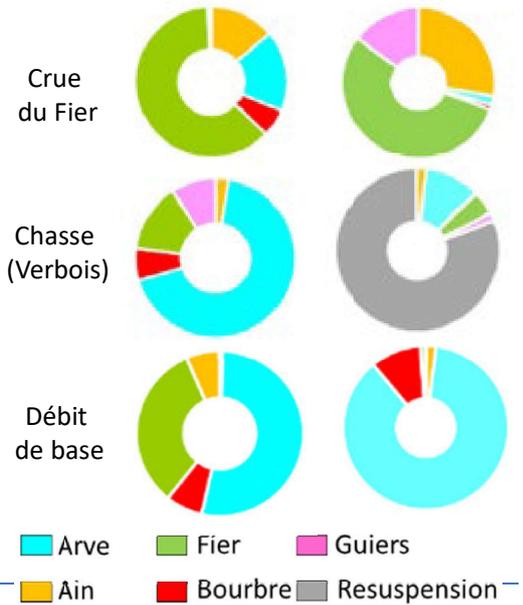
3. TRANSFERTS DANS LE RÉSEAU HYDROGRAPHI

Le modèle CASCADE : résultats

Connectivité sédimentaire dans le réseau et comparaison avec d'autres études *sources to sink*



Fingerprinting Modèle MAGE / Adis TS



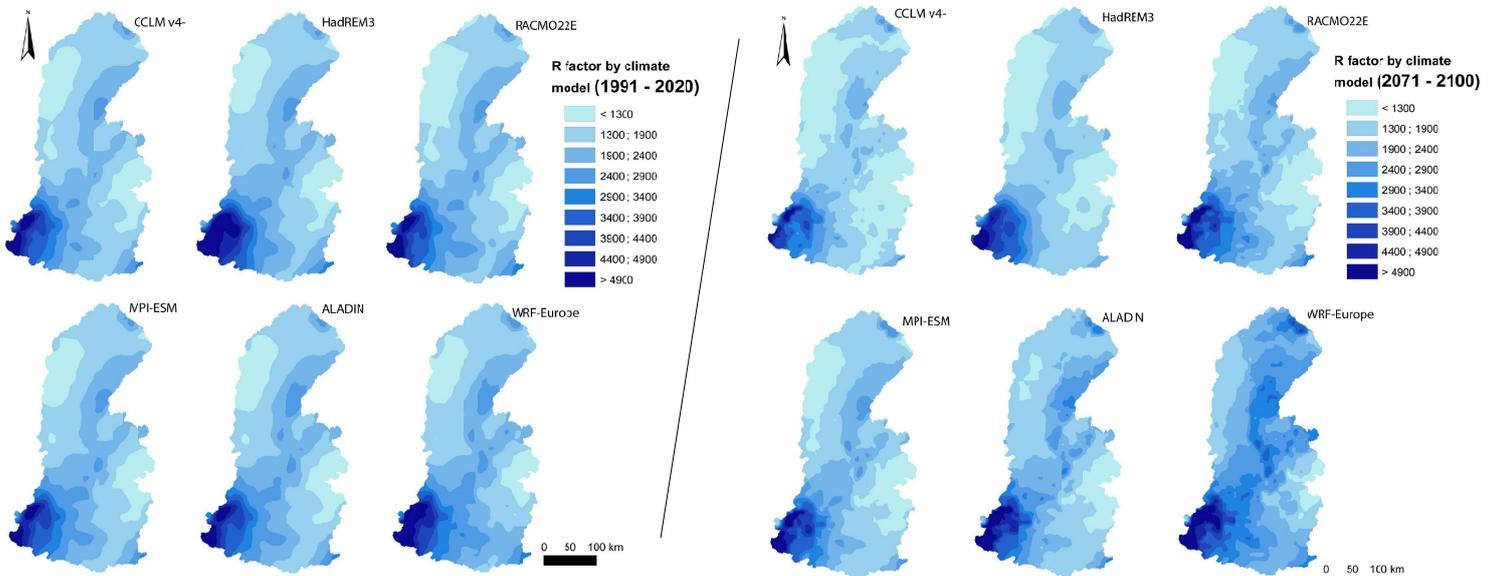
Dabrin et al. 2021, Journal of soils and sediments

4. SCENARIOS DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

- Sélection du scénario RCP 8.5 (pessimiste)
- Implémentation des projections selon 6 modèles climatiques
- Scénarios Interviennent à deux niveaux dans les modèles :
 - Erosivité des pluies (R) : InVEST-SDR
 - Débits prospectifs (action D2 OSR6) dans CASCADE

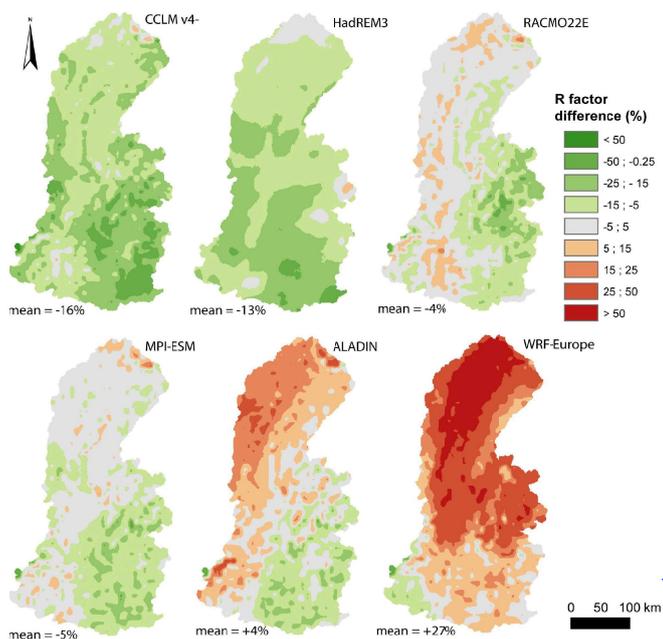
4. SCENARIOS DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Travail sur 6 modèles de prospective climatique

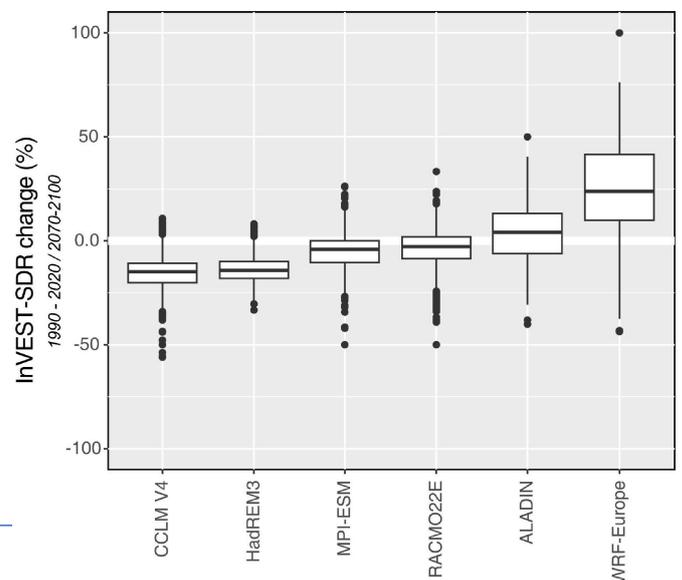


4. SCENARIOS DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Evolution de l'érosivité des pluies entre la période 1991>2020 et 2071 -> 2100

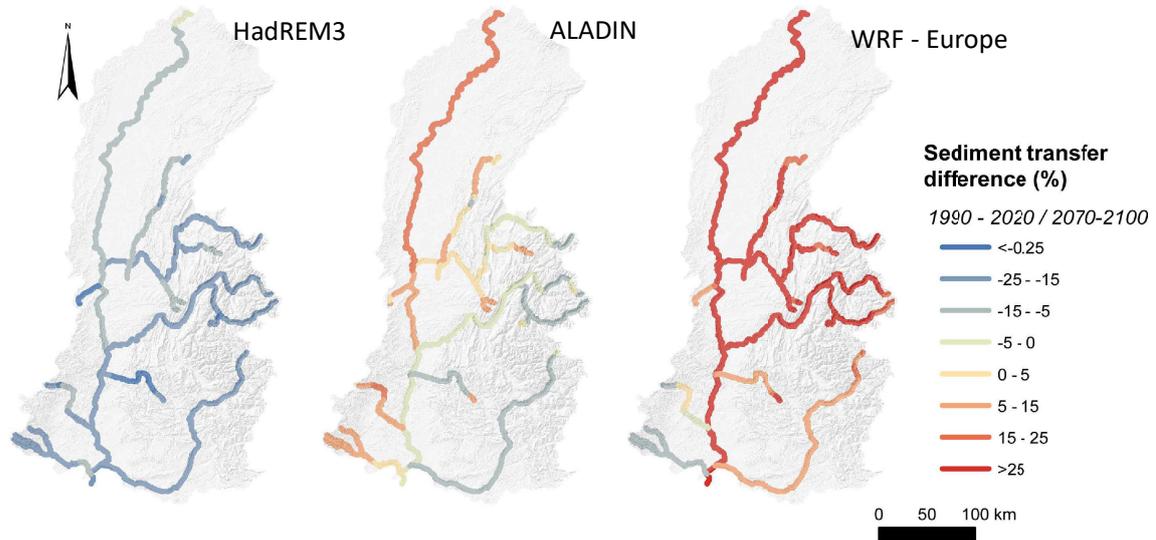


Incidence sur les vitesses d'érosion à l'échelle du bassin versant (diff. 1991->2020 et 2071 -> 2100)



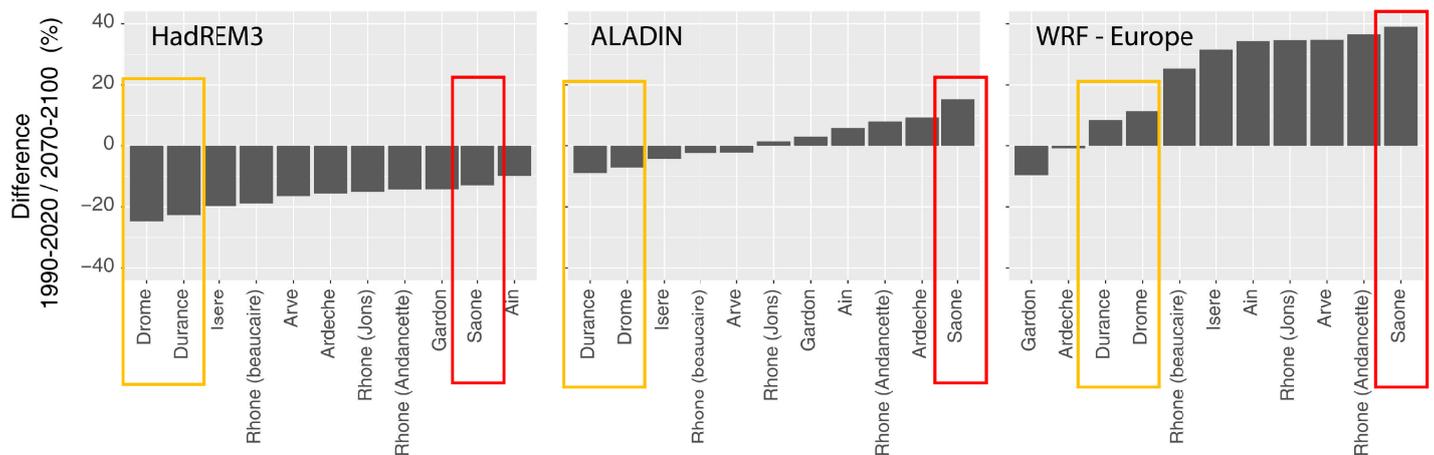
4. SCENARIOS DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Une évolution très contrastée en fonction des modèles climatiques utilisés



4. SCENARIOS DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Une évolution très contrastée en fonction des modèles climatiques utilisés



- Durance et Drôme : baisse ou faible évolution des volumes exportés
- Saône : augmentation probable des transferts

5. DISCUSSION

- Modèle InVEST-SDR Rhône = prise en compte érosion par **ruissellement de surface** : comment intégrer d'autres **processus (gravitaires)**?
- Marge de progression possible sur la **représentation de l'occupation du sol**

- CASCADE : intégration d'une plus grande diversité d'ouvrages dans la modélisation
- Apport d'une modélisation dynamique (D-CASCADE) et comparaison avec d'autres modèles spatialisés à des échelles équivalentes (par ex. SWAT)
- Travail au passage à la modélisation des sables et sédiments grossiers : quelles données pour le calage (sources) et pour la validation (mesures)?

- Scenarios de changement climatique (CMIP 5) très contrastés en fonction des modèles utilisés.
- Quel apport des versions CMIP 6 pour la représentation des événements majeurs?

6. CONCLUSION

- Couplage de trois modèles : (1) production sédimentaire des versants, (2) débits liquides et (3) débits solides pour l'estimation des transferts de MES à l'échelle du bassin versant du Rhône
- Bonne estimation des ordres de grandeur par comparaison aux flux mesurés en station
- L'application de scénarios de changements climatiques montre une très grande diversité des trajectoires possibles à horizon 2070 – 2100 par rapport à l'actuel
- Perspectives d'évolution / amélioration des modèles pour l'OSR7



Observatoire des Sédiments du Rhône

Dispositifs scientifiques cadres



Partenaires scientifiques



Partenaires techniques et financiers

