



HAL
open science

Analyse spatiale des zones sources de MES

Matthieu Fressard, Flora Branger, J. Conjard, O. Le Flem, C. Scoazec, A.
Perrin

► **To cite this version:**

Matthieu Fressard, Flora Branger, J. Conjard, O. Le Flem, C. Scoazec, et al.. Analyse spatiale des zones sources de MES. [Rapport de recherche] INRAE; CNRS. 2021. hal-03293119

HAL Id: hal-03293119

<https://hal.science/hal-03293119>

Submitted on 20 Jul 2021

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

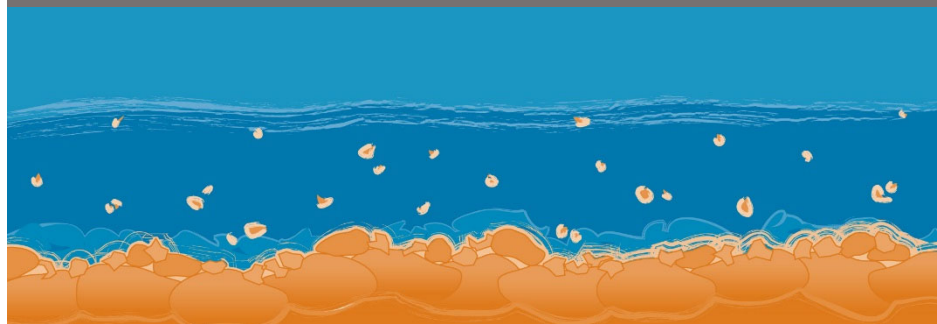
Analyse spatiale des zones sources de MES

OSR5 2018-2020

Rapport final



Plan
Rhône



Analyse spatiale des zones sources de MES

Rapport final – Version du 15 juin 2021

Axe C	Approfondissement des connaissances pour établir le diagnostic de l'état fonctionnel du Rhône
Action C1	Interprétation des concentrations, des flux et des sources
Sous-Action C1.2	Analyse spatiale des sources de MES

Personnes impliquées	Equipe de recherche
M. Fressard	UMR EVS
F. Branger	INRAE RIVERLY
J. Conjard (stagiaire)	INRAE RIVERLY
O. Le Flem (stagiaire)	UMR EVS
C. Scoazec (stagiaire)	UMR EVS
A. Perrin (stagiaire)	UMR EVS

Pour citer ce document :

Fressard M., Branger F., Conjard J., Le Flem O., Scoazec C., Perrin A. (2021). *Analyse spatiale des zones sources de MES*. Rapport Final. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), 5^{ème} Programme d'Actions, 17 p.

Résumé

Afin de disposer d'informations sur les sous-bassins versants du Rhône dont les transferts sédimentaires ne sont pas suivis en station, une démarche d'analyse spatiale et de modélisation a été mise en place dans le cadre de l'OSR 5. L'objectif est double : (1) proposer une première spatialisation à l'échelle du bassin versant basée sur une approche qualitative (système multicritère) et (2) proposer un calage méthodologique sur plusieurs sous-bassins versants d'une approche quantitative. A l'échelle du bassin du Rhône l'approche multicritère a permis de proposer rapidement une hiérarchisation des zones sources de MES en fonction de leur potentiel de production, mais reste difficile à valider quantitativement. Pour l'approche quantitative, le modèle RUSLE-SDR a été appliqué sur trois sous-bassins versants sélectionnés dans des contextes géomorphologique variés. Les résultats montrent une bonne adéquation entre le modèle et les mesures réalisées en station. Enfin, une première application du modèle CASCADE (connectivité sédimentaire) a été proposée sur le bassin versant de l'Arc (Isère) afin de mieux caractériser les transferts de sédiments dans les cours d'eau et l'influence des ouvrages sur les transferts sédimentaires. En définitive, le calage de cette approche sur les sous bassins versants permettra d'envisager une couverture globale du bassin versant du Rhône durant l'OSR 6.

Mots-clés

OSR ; Rhône ; Sources de MES ; transferts sédimentaires ; analyse spatiale ; SMCE ; RUSLE-SDR ; CASCADE ; J2000

1. INTRODUCTION	4
2. CARTOGRAPHIE DES ZONES SOURCES DE MES DU RHONE A ECHELLE REGIONALE	4
2.1. Acquisition des données spatialisées	4
2.2. Pondération des facteurs et validation	5
2.3. Résultats	5
3. MODELISATION DES TRANSFERTS SEDIMENTAIRES A L'ECHELLE DU SOUS-BASSIN VERSANT	6
3.1. Méthode.....	7
3.1.1. Modélisation de l'érosion.....	7
3.1.2. Modélisation de la connectivité sédimentaire.....	7
3.1.3. Couplage des modèles et validation	7
3.2. Résultats	8
3.2.1. Bassin versant de l'Arc (Isère).....	9
3.2.2. Bassin versant du Gier	11
3.2.3. Bassin versant de la Drôme.....	11
4. MODELISATION DE LA CONNECTIVITE SEDIMENTAIRE : PREMIERE APPLICATION AU BASSIN VERSANT DE L'ARC	13
4.1. Méthode	13
4.2. Résultats	13
5. PERSPECTIVES	15
6. REFERENCES	16

1. INTRODUCTION

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'axe C de l'OSR 5 « Interprétation des concentrations, des flux et des sources » qui a pour objectif une analyse détaillée des acquisitions de mesures et leur traduction en recommandations opérationnelles. L'objectif de cette action C.1.2 est de replacer les mesures des flux sédimentaires dans un contexte spatial plus large (bassin du Rhône) afin de faire le lien entre les bassin/sous-bassins versants instrumentés et non instrumentés.

Trois tâches principales ont été conduites dans le cadre de l'action C.1.2. « Analyse spatiale des zones sources de MES » : (1) l'identification et la caractérisation globale des zones sources de MES à l'échelle du bassin versant du Rhône par approche qualitative (système multicritères) ; (2) le calage d'un modèle quantitatif de transfert sédimentaire sur plusieurs sous-bassins versants du Rhône (INVEST-Sediment Delivery) ; (3) l'application exploratoire du modèle de connectivité sédimentaire CASCADE sur le bassin versant de l'Arc (Isère).

Ce travail a obtenu l'appui de quatre stages de master 1 et 2 (Conjard, 2019 ; Le Flem, 2019, Scoazec, 2020 et Perrin, 2020).

2. CARTOGRAPHIE DES ZONES SOURCES DE MES DU RHONE A ECHELLE REGIONALE

2.1. Acquisition des données spatialisées

La cartographie à l'échelle du bassin versant du Rhône a été conduite par une approche qualitative de type combinaison de carte d'index. Quatre critères principaux ont été considérés comme contributeurs à la production de MES à l'échelle du bassin : Topographie, géologie, pédologie et climat. A partir de ces 4 critères, 7 sous-critères ont été dérivés et représentés cartographiquement sur l'ensemble du secteur : déclivité de la pente, courbure de la pente, lithologie, état de surface des sols, occupation du sol, intensité des précipitations et proportion neigeuse des précipitations. L'ensemble des données a été acquis selon une grille raster d'une résolution de 25m à partir des données directement disponibles sur les différentes plateformes publiques (IGN, BRGM, AEE etc.) Pour les précipitations la réanalyse SAFRAN de Météo-France a été utilisée via une convention d'utilisation avec INRAE (pour la recherche publique).

2.2. Pondération des facteurs et validation

A partir de ces différents critères représentés cartographiquement, une pondération basée sur la méthode AHP a été appliquée (Analytic Hierarchy Process, Saaty, 1988 ; Vaidya & Kumar 2006). Cette méthode se déploie en quatre étapes successives : (1) Décomposition du problème complexe en une structure hiérarchique ; (2) comparaisons binaires (matrice non normalisée) ; (3) Détermination et synthétisation des priorités (matrice normalisée) ; (4) évaluation de la cohérence des jugements.

Un lot de 24 pondérations successives a été réalisé, en faisant varier la hiérarchie des différents facteurs. Pour sélectionner la carte finale, l'ensemble des 24 cartes a été comparé aux flux moyens annuels issus de 16 stations de mesure en continu des MES sur le Rhône et ses affluents.

2.3. Résultats

La carte finale pondérée retenue hiérarchise les différents facteurs selon l'ordre suivant : climat, topographie, géologie, pédologie. Cette carte est en effet la seule à permettre de respecter la hiérarchisation des différents cours d'eau en fonction de leur transferts sédimentaires spécifiques mesurés : Arve, Isère, Durance, Fier, Ardèche, Gier, Saône (Figure 1).

D'une manière générale, cette méthode permet de proposer rapidement une hiérarchisation des zones sources de MES en fonction de leur potentiel de production à une échelle Régionale.

Cependant, cette méthode est essentiellement basée sur une approche qualitative experte et reste difficile à valider à partir des données de terrain. En effet, la comparaison avec les valeurs de concentration en MES mesurées dans les cours d'eau demeure incertaine puisque la carte finale ne propose qu'une classification discrète sans estimation quantitative. La qualité de la validation reste alors très dépendante des méthodes de discrétisation utilisées. De même, la comparaison avec les modèles de transferts sédimentaires spatialisés (cf. section suivante) ne montre que des taux de superposition correcte de l'ordre 10 à 20% sur les bassins concernés.

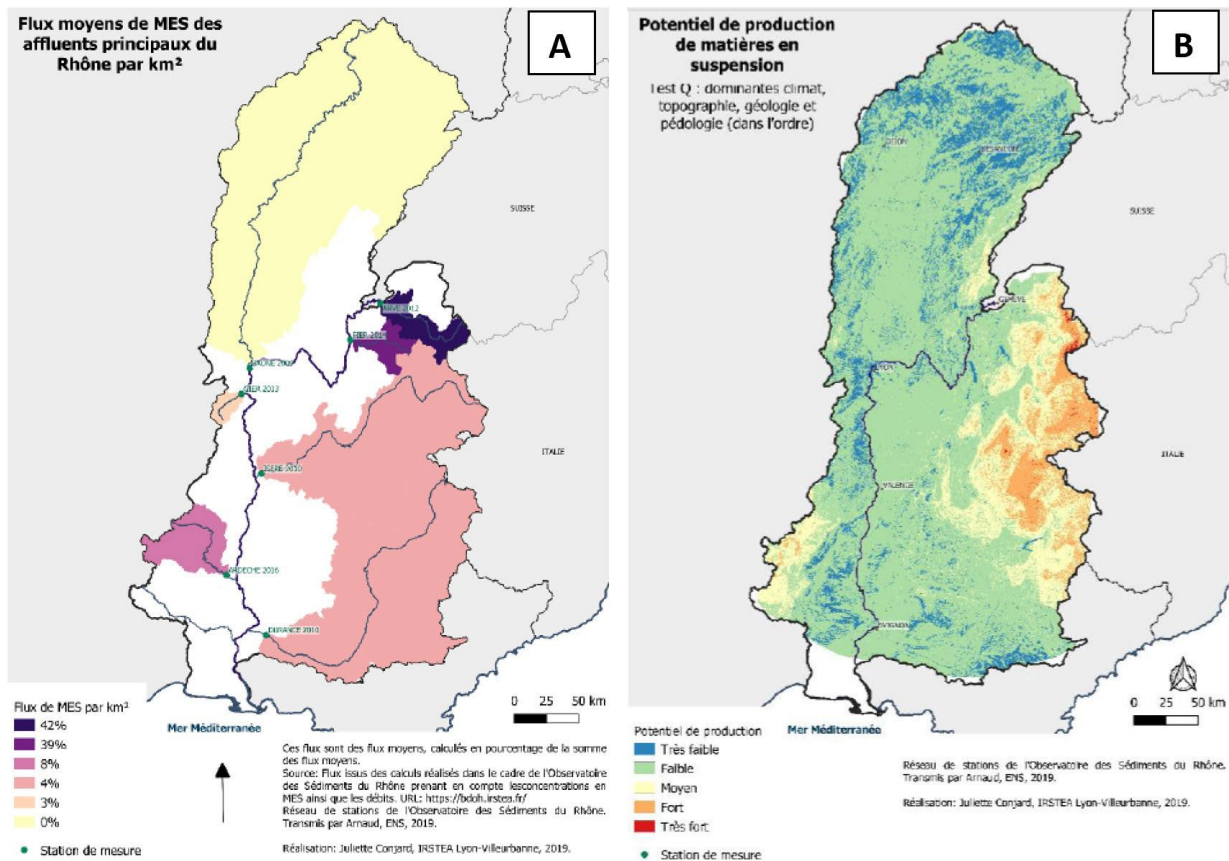


Figure 1 : Exemples de cartographies réalisées à l'échelle du bassin versant du Rhône (A) Carte de validation des flux moyens de MES par affluent du Rhône ; (B) carte finale du potentiel de production de MES pour le bassin versant

3. MODELISATION DES TRANSFERTS SEDIMENTAIRES A L'ECHELLE DU SOUS-BASSIN VERSANT

Les transferts sédimentaires ont été modélisés pour trois sous bassins versants d'ordre 3 afin de caler la méthode et de vérifier le pouvoir prédictif du modèle (bassin versant de l'Arc, du Gier et de la Drôme). Après une série de test de différents modèles sur ces deux secteurs d'étude bien connus en termes de dynamique sédimentaire, le choix s'est porté sur le modèle INVEST-Sediment Delivery qui offre le double avantage de prédire efficacement les transferts tout en étant peu consommateur de données. Ce dernier point constitue un critère de choix important dans une logique d'application au bassin Rhône dans son ensemble.

3.1. Méthode

3.1.1. Modélisation de l'érosion

Le modèle d'érosion est basé sur l'équation universelle des pertes en sol (Wischmeier & Smith, 1960) appliqué à des données spatialisées type raster (RUSLE, Renard et al., 1991) suivant l'équation suivante.

$$RUSLE_i = R_i \times K_i \times LS_i \times C_i \times P_i$$

où R_i est l'érosivité des pluies, K_i l'érodibilité du sol (ou du substrat), LS_i le facteur topographique (longueur et déclivité de la pente), C_i le facteur de couvert végétal et P_i le facteur de pratique agricole. Ce modèle permet de disposer d'une estimation de la composante « ablation » du système érosif en tout point de l'espace selon le maillage raster.

3.1.2. Modélisation de la connectivité sédimentaire

Pour compléter le modèle d'érosion, un modèle de connectivité sédimentaire basé sur une normalisation de l'IC de Borselli et al. (2008) et Vigiak et al. (2012), a été utilisé. Cet outil permet de cartographier le ratio de fourniture sédimentaire (sediment delivery ratio - SDR) en tout point de l'espace. En d'autres termes, cet indice offre une estimation de la proportion de sédiments érodés sur un pixel i rejoignant efficacement un puits sédimentaire déterminé a priori (exutoire du bassin ou cours d'eau) selon l'équation suivante.

$$SDR_i = \frac{SDR_{max}}{1 + \exp\left(\frac{IC_0 - IC_i}{K}\right)}$$

Où SDR_i est le ratio de fourniture sédimentaire (sediment delivery ratio) pour chaque pixel du bassin versant, IC_i est la valeur de l'index de connectivité, IC_0 et K sont des paramètres de calage respectivement établis à 0.5 et 2.

Pour chaque bassin versant, deux modèles de connectivité sont testés : un premier modèle considérant la connectivité à l'exutoire du bassin versant, un second considérant la connectivité au chenal principal.

3.1.3. Couplage des modèles et validation

Le couplage des deux modèles RUSLE et SDR (Fig. 2) permet de proposer une estimation des transferts sédimentaires annuels moyens depuis les versants vers les cours d'eau ou vers

l'exutoire d'un bassin versant. Les valeurs sont exprimées en $t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$. La validation est réalisée par comparaison des valeurs modélisées avec les moyennes interannuelles de transport de MES mesurées aux différentes stations suivies de longue date dans le cadre des sites ateliers de l'Arc-Isère et de l'OSR. (Thollet et al., 2018 ; Thollet et al., 2021).

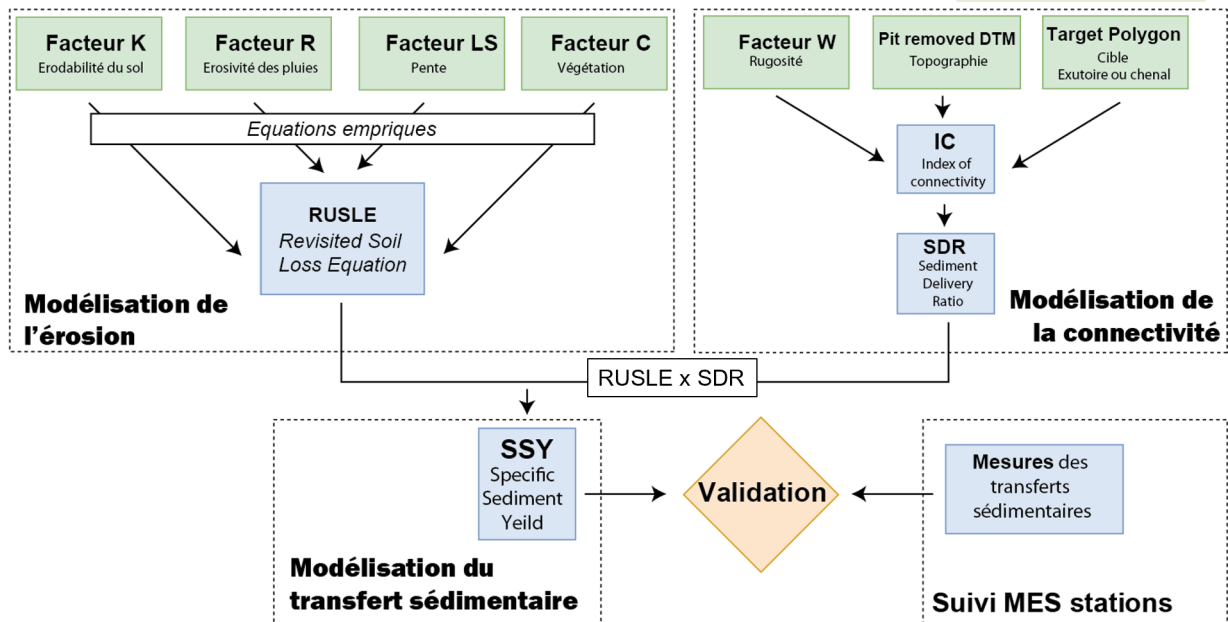


Figure 2 : Diagramme synthétique de la méthodologie employée pour la modélisation des transferts sédimentaires

3.2. Résultats

Les résultats sont présentés sous forme de cartes à l'échelle du 1/50 000^{ème} pour chaque sous bassin versant. Elles permettent de localiser les principales zones contributives au transfert sédimentaire total. De même, les zones déconnectées du bassin ou faiblement contributives peuvent également être appréciées. La figure 3 montre la relation entre le transfert sédimentaire modélisé et les flux interannuels moyens mesurés en station, pour la validation de la procédure de modélisation. Globalement, même si certains modèles apparaissent largement sous ou surestimant les taux de transfert pour certains sous bassins versants Alpains (notamment pour le cas de l'Arvan), la modélisation sur les grands sous bassins reste performante par rapport à d'autres méthodes (c.f. Delmas et al., 2009).

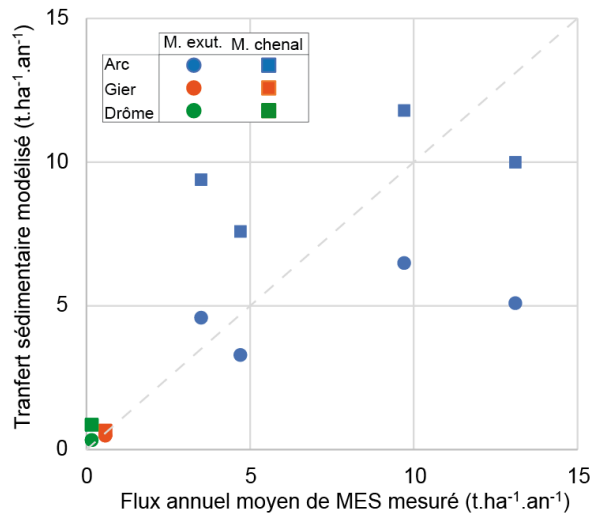


Figure 3 : Relation entre flux annuel moyen de MES mesuré en station et transferts sédimentaire modélisé par *RUSLE-SDR* pour l'ensemble des modèles appliqués

3.2.1. Bassin versant de l'Arc (Isère)

La figure 4 illustre le résultat de la modélisation sur le bassin versant de l'Arc avec un zoom sur le sous bassin versant de l'Arvan. D'une manière générale, les cartes modélisées montrent que les têtes de bassins versants constituent les zones sources principales d'apport sédimentaire aux cours d'eau. Les vitesses d'érosion élevées dans les secteurs de très forte pente permettent de contribuer à hauteur de plus de 10 t.ha⁻¹.an⁻¹ malgré une connectivité relativement faible. Par opposition, les secteurs de bas de versant et proches du chenal principal, malgré une connectivité forte, sont caractérisés par une contribution relative limitée.

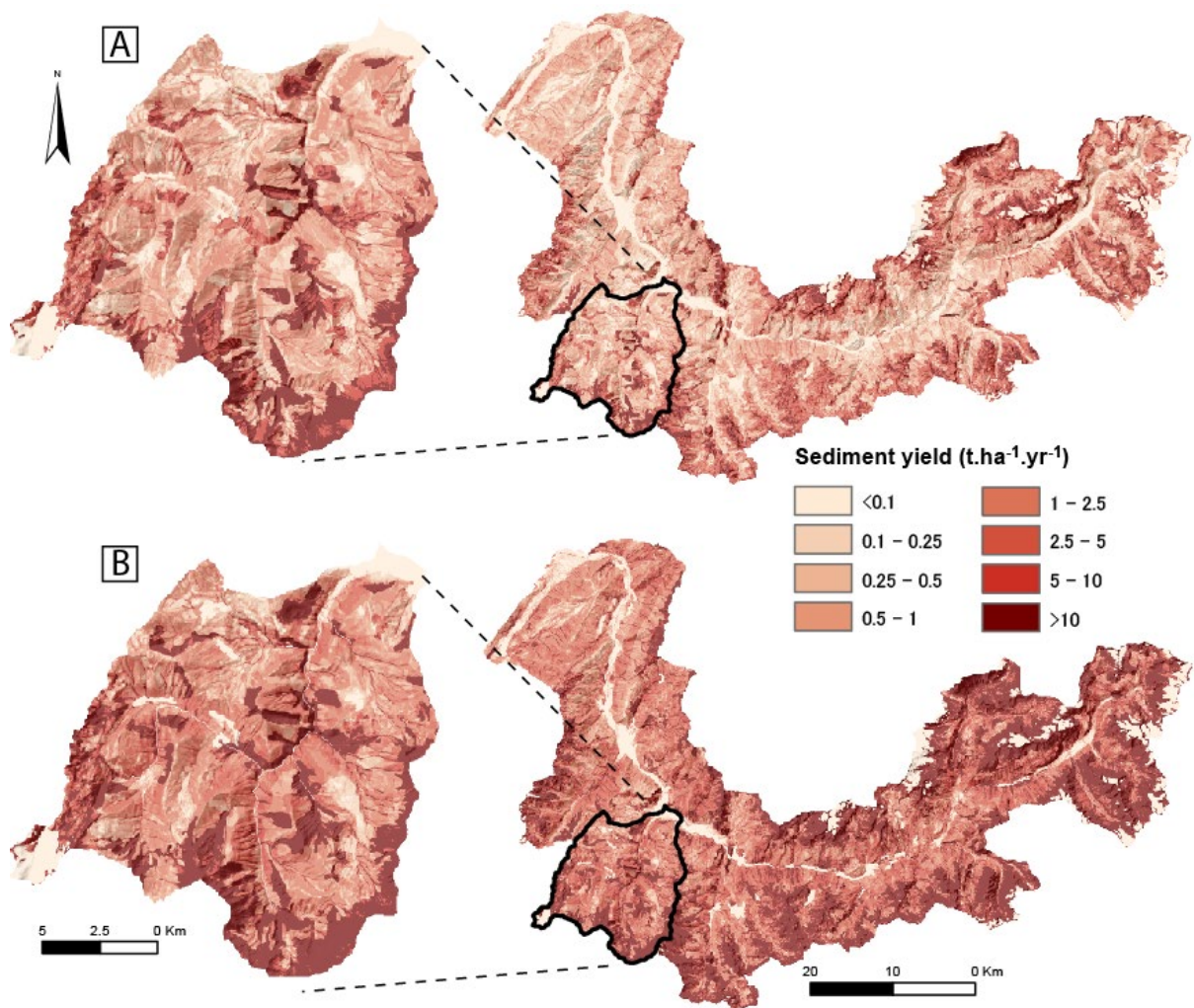


Figure 4 : Résultats du modèle RUSLE-SDR sur le bassin versant de l'Arc (73). (A) Cartes modélisées et (B) tableau de validation des résultats

La comparaison des modèles avec les valeurs mesurées en station montre des ordres de grandeur cohérents (figure 4.B). Pour les parties aval du bassin versant (stations de Pontamafrey et Chamousset) les modèles de transfert vers les exutoires apparaissent plus performants que les modèles de transfert vers des cours d'eau. Pour le sous bassin versant de l'Arvan, la tendance inverse peut être observée, avec des modèles type « chenal » plus performants que les modèles type « exutoire ». Ce résultat peut être interprété comme une meilleure efficacité des parties amont des bassins versants à transférer les sédiments, contrairement aux parties aval qui auront une plus grande tendance au stockage. Par ailleurs, le fonctionnement des retenues de fond de vallée et leur capacité de piégeage de sédiments n'est pas pris en compte explicitement dans cette modélisation (uniquement via la topographie le long du chenal), ce qui peut aussi expliquer une moins bonne performance du modèle « chenal » pour les stations aval (Pontamafrey et Chamousset).

3.2.2. Bassin versant du Gier

La moyenne du transfert sédimentaire interannuel mesuré en station pour le bassin versant du Gier est de $0.57 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$. Le modèle considérant la connectivité à l'exutoire prédit un transfert sédimentaire de $0.5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ et le modèle de connectivité au chenal $0.67 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$. Ainsi, les valeurs modélisées apparaissent proches des valeurs mesurées ce qui constitue un bon point de validation pour ce bassin versant.

D'une manière générale, les principales zones contributives sont localisées dans les fonds de vallées des principaux affluents caractérisés par un encaissement important impliquant une forte concentration des flux (figure 5). Ces zones sont, d'autre part, principalement alimentées à l'amont par des systèmes cultureaux au fort potentiel érosif (vignes et vergers). Par opposition, le fond de vallée apparaît comme faiblement contributeur du fait des faibles pentes et de la dominance d'occupation du sol de type urbain/péri-urbain alternant avec les secteurs de prairie.

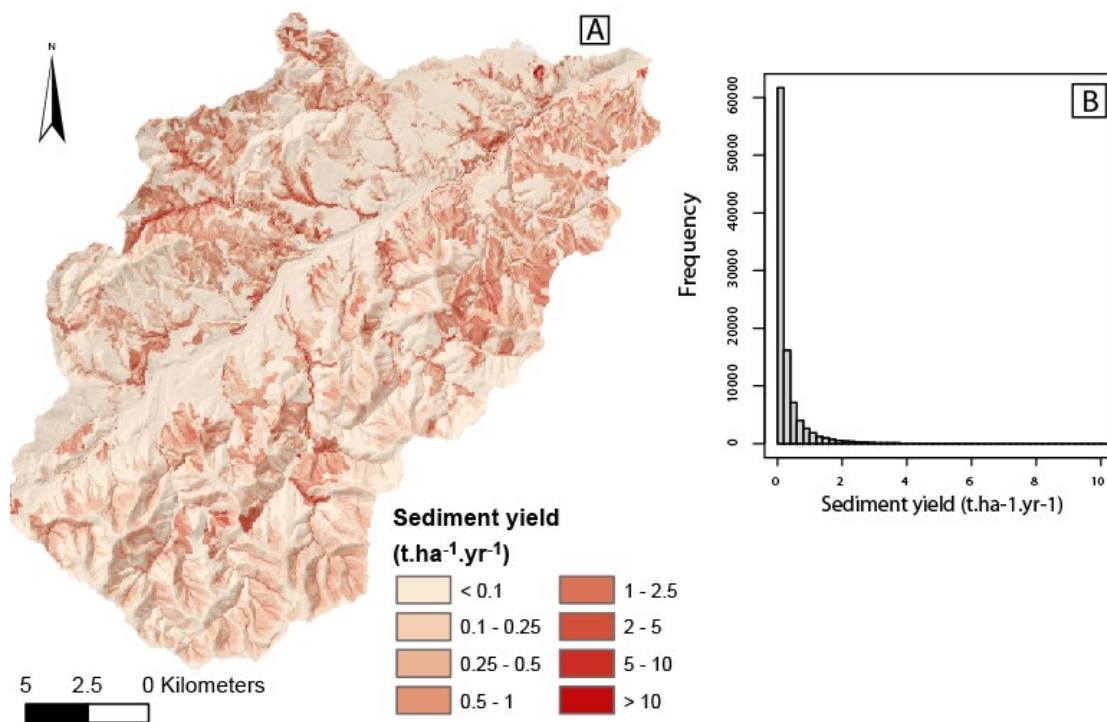


Figure 5 : Résultats du modèle RUSLE-SDR sur le bassin versant du Gier (69). (A) Carte modélisée et (B) histogramme de la distribution des vitesses d'érosion

3.2.3. Bassin versant de la Drôme

Pour le bassin versant de la Drôme, les taux de transferts sédimentaire spécifiques sont assez faibles puisque la moyenne interannuelle mesurée en station est de l'ordre de $0.16 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$.

Les deux cartes modélisées prédisent un taux de transfert supérieur à ces valeurs, respectivement $0.34 \text{ t.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$ pour le modèle « exutoire » et $0.87 \text{ t.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$ pour le modèle « chenal ». Les zones contributives sont globalement bien distribuées sur l'ensemble du bassin versant avec localement des zones très érosives sur les crêtes et sur les secteurs de badlands qui sont tempérés par une faible connectivité au chenal (Figure 6). Les zones caractérisées par une mise en valeur agricole de type viticoles ou vergers apparaissent là aussi comme fortement contributrices au transfert total. Cependant, ce bassin versant est aussi caractérisé par un couvert forestier relativement dense ainsi qu'un découplage important entre les versants et le chenal, ce qui permet d'expliquer, en partie, la faible fourniture sédimentaire du bassin en comparaison de son potentiel érosif.

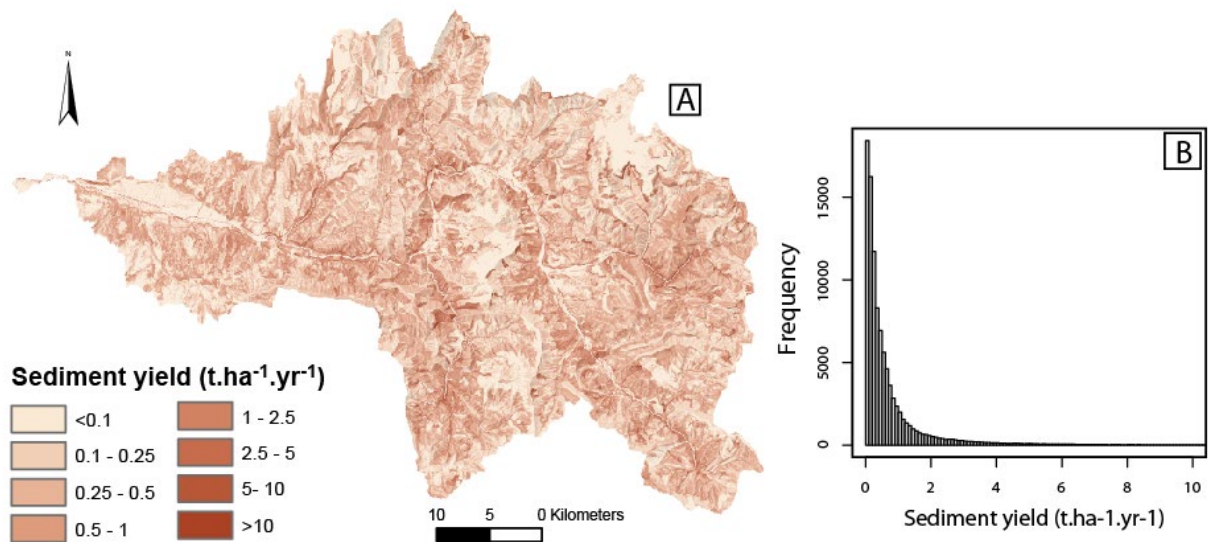


Figure 6 : Résultats du modèle RUSLE-SDR sur le bassin versant de la Drôme (26). (A) Carte modélisée et (B) histogramme de la distribution des vitesses d'érosion

La comparaison des résultats sur les 3 sous-bassins montre globalement une meilleure performance du modèle hydro-sédimentaire sur les bassins versants plus agricoles et moins aménagés pour l'hydroélectricité (Gier et Drôme vs Arc-en-Maurienne).

Par rapport à l'objectif d'une modélisation sur l'ensemble du bassin versant du Rhône, cela montre que des avancées sont encore nécessaires pour une meilleure représentation des transferts sédimentaires en zone alpine : notamment prise en compte du couvert neigeux et des barrages hydroélectriques.

4. MODELISATION DE LA CONNECTIVITE SEDIMENTAIRE : PREMIERE APPLICATION AU BASSIN VERSANT DE L'ARC

Les modèles de transferts sédimentaires basés sur l'approche RUSLE-SDR ne permettent pas de prendre en compte de manière explicite le transfert de sédiments dans les cours d'eau, qui répondent à des processus physiques différents de ceux des versants. Le modèle CASCADE (Schmitt et al., 2016) a été spécialement développé pour modéliser la connectivité sédimentaire fonctionnelle dans les masses d'eau. Ainsi, l'application conjointe de ces deux modèles permet d'envisager une modélisation des transferts sédimentaires plus intégrée.

4.1. Méthode

Le modèle CASCADE conceptualise le réseau hydrographique sous forme de linéaires caractérisés par des caractéristiques géométriques décrivant la morphologie (largeur, longueur des tronçons, taille du lit mineur/majeur). La circulation des sédiments se fait nœud à nœud, au travers des tronçons, d'amont vers l'aval. Cette combinaison tronçon et nœud, permet de représenter le transport sédimentaire à travers une « cascade », qui inclut différentes caractéristiques de la rivière, dont les barrages (Tangi, 2019).

La circulation sédimentaire se fait sous forme d'équations différentielles spécifiquement concentrées sur la définition de la capacité de transport et le calcul de la distribution granulométrique des sédiments transportés. La modélisation du transport des sédiments sous CASCADE permet le suivi de la charge sédimentaire selon différentes fractions granulométriques. Cette approche permet d'estimer la contribution relative de chaque tronçon à la fourniture sédimentaire totale du cours d'eau. Les zones sources de sédiments sont implémentées sous forme de points d'entrée dans le réseau via des données issues de la modélisation RUSLE-SDR moyennées pour de petits sous bassins versants élémentaires. Ce premier essai de modélisation a été réalisé sur la base de débits moyens obtenus à partir du modèle J2000-Rhône (Branger et al., 2018). L'ensemble de la procédure de modélisation est déployé sous le logiciel MATLAB puis analysé sous SIG.

4.2. Résultats

Les premiers résultats de la modélisation pour un débit moyen montrent une bonne adéquation entre le modèle et les observations de terrain sur la location des zones de transport actives et les zones principales de dépôts (Figure 7). Ainsi, l'effet des barrages, des confluences et des zones torrentielles sont clairement visibles sur le plan cartographique.

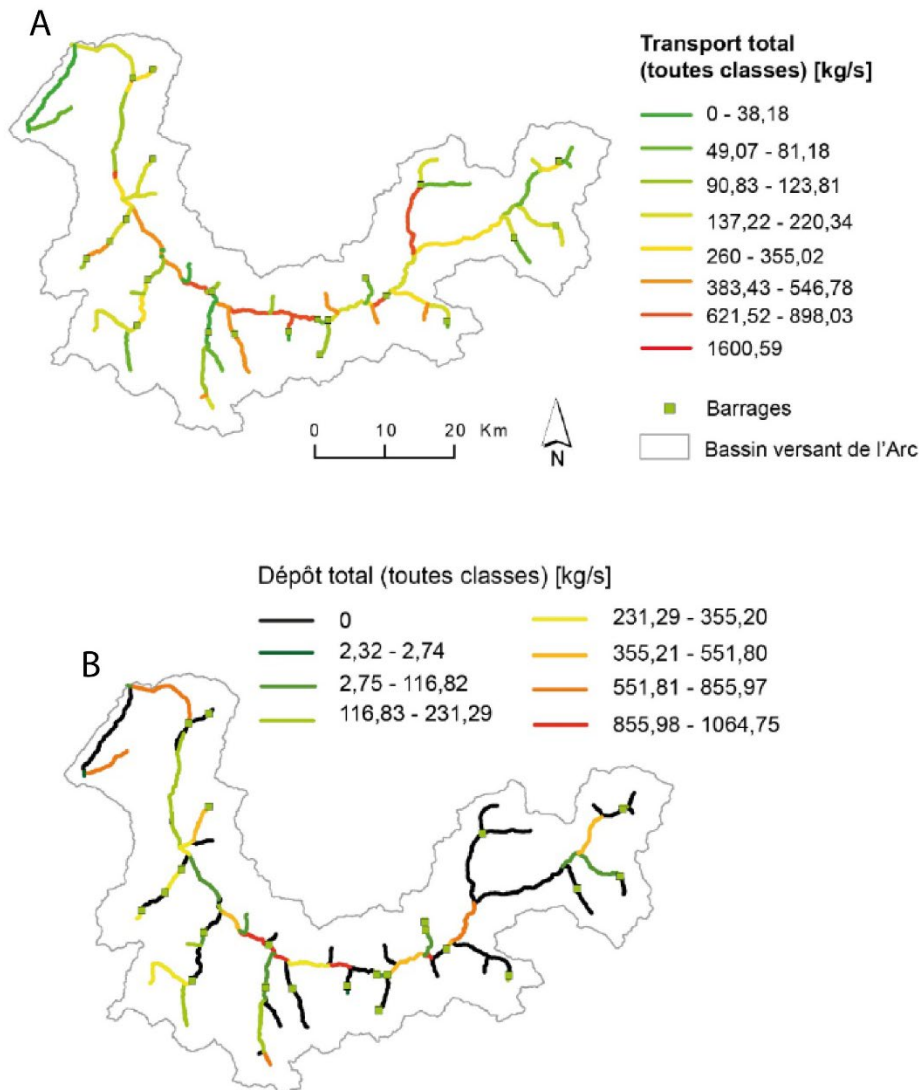


Figure 7 : Cartes des transferts sédimentaires modélisées à partir de CASCADE. A) carte du transport sédimentaire toutes fractions granulométriques confondues et B) cartes des dépôts sédimentaires toutes fractions granulométriques confondues

Il reste cependant aujourd'hui difficile de proposer une validation quantitative fiable, dans la mesure où les flux modélisés pour les MES apparaissent largement sous-estimés par la modélisation. Cette discordance est principalement imputable à l'utilisation du seul débit moyen pour les calculs de transfert. En ce sens, un travail complémentaire devra être conduit

sur l'intégration de scénarios hydrologiques dans le modèle CASCADE pour permettre une optimisation de la qualité des modélisations.

5. PERSPECTIVES

Les résultats de modélisation obtenus dans le cadre de l'OSR 5 sont encourageants et permettent d'envisager d'étendre la couverture spatiale des modèles à l'ensemble du bassin versant du Rhône dans le cadre de l'OSR 6. La principale limite d'application réside dans le temps nécessaire pour l'acquisition, le traitement et l'homogénéisation des données de base. Globalement, le modèle RUSLE-SDR apparaît comme un bon compromis entre complexité et qualité des résultats et servira de support de base pour la modélisation des transferts sédimentaires pour l'OSR 6.

Des essais complémentaires sont encore nécessaires pour valider la modélisation des transferts sédimentaires dans le réseau hydrographique dans la mesure où les résultats de la modélisation CASCADE ne sont, à l'heure actuelle, pas encore pleinement satisfaisants. En ce sens, d'autres modèles prédictifs pourront être testés, comme par exemple le modèle SWAT sédiments, dont l'interopérabilité avec RUSLE est opérationnelle.

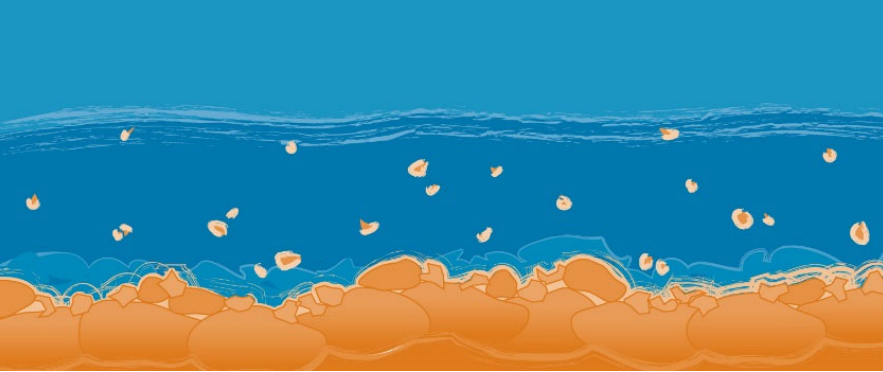
A la suite de l'application de ces modèles, une analyse exploratoire de l'effet de différents scénarios de changement climatiques pour le Rhône sera testée afin d'estimer les impacts. Enfin, les enjeux restants, liés à la question de l'identification et la quantification de la production sédimentaire des bassins versants, portent sur le passage d'une approche essentiellement spatiale à une approche spatio-temporelle. Cela passe par le développement d'une approche de modélisation couplée à un modèle hydrologique distribué à même de représenter la dynamique de la production et du transfert sédimentaire dans le temps et l'espace. Les questions scientifiques associées sont plus spécifiquement : la question de la désagrégation temporelle (flux annuel -> journalier -> horaire) ; celle de la régionalisation des paramètres (transfert des paramètres du modèle d'érosion des sous-bassins où il y a des données de calage vers les autres) ; et celle de la connectivité sédimentaire le long du réseau hydrographique.

A terme (OSR 6), ce travail vise à mettre à disposition des scientifiques et des gestionnaires un outil pour estimer les flux sédimentaires de sous-bassins non suivis et ainsi permettre une interprétation plus fine des dynamiques sédimentaires sur le Rhône. D'autre part, différents scénarios de changements (climatiques, occupation du sol, pratiques de gestion...) pourront être testés, afin d'en estimer les conséquences à l'échelle du bassin ou du sous bassin d'intérêt.

6. REFERENCES

- Branger, F.; Gouttevin, I.; Tilmant, F.; Cipriani, T.; Barachet, C.; Montginoul, M.; Le Gros, C.; Sauquet, E.; Braud, I. & Leblois, E. (2018), 'Un modèle hydrologique distribué pour étudier l'impact du changement global sur la ressource en eau dans le bassin versant du Rhône' 3ème conférence internationale IS Rivers, 4-8 juin 2018, Lyon, France'.
- Borselli, L., Cassi, P., & Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75(3), 268-277.
- Conjard, J. (2019). Mise en place d'une méthode d'identification des potentielles sources de matières en suspension d'un bassin versant. Application au bassin versant du Rhône. Analyse spatiale multicritère hiérarchique intégrée à un Système d'information Géographique. Mémoire de Master 2, Parcours GEOSPHERES - GEOgraphies - eSPaces - Homme / Environnement - Ressources – Systèmes. Université Grenoble-Alpes.
- Le Flem, O. (2019). Modélisation des transferts sédimentaires dans deux sous bassins versant du Rhône : Cas de l'Arc et de l'Ardière. Mémoire de Master 2, Parcours GEONUM – Géographies Numériques, Université Lyon 2 Lumière.
- Perrin, A. (2020) Modélisation des transferts sédimentaires dans deux sous-bassins versant du Rhône : Le Gier et la Drôme. Mémoire de master 1, Université Lyon 2 lumière (M. Fressard, dir.).
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., & Porter, J. P. (1991). RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of soil and Water Conservation*, 46(1), 30-33.
- Saaty, T. L. (1988). What is the analytic hierarchy process?. In *Mathematical models for decision support* (pp. 109-121). Springer, Berlin, Heidelberg.
- 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.
- Scoazec, C. (2020) Modélisation du transfert des MES dans le bassin versant de l'Arc (Savoie). Mémoire de master 2, Université de Tours (M. Fressard, dir.)
- Tangi, M., Schmitt, R., Bizzi, S., & Castelletti, A. (2019). The CASCADE toolbox for analyzing river sediment connectivity and management. *Environmental Modelling & Software*, 119, 400-406.
- Thollet, F.; Camenen, B; Le Coz, J.(INRAE) et Némery, J.; Rousseau, C. (Ense3 et IGE), 2018. Suivi du transport sédimentaire sur les rivières Arvan, Arc et Isère. <https://dx.doi.org/10.17180/OBS.ARC-ISERE>
- Thollet, F.; Le Bescond, C.; Lagouy, M.; Gruat A.; Grisot, G.; Le Coz, J.; Coquery, M.; Lepage, H.; Gairoard, S.; Gattacceca, J.C.; Ambrosi, J.-P.; Radakovitch, O., Dur, G., Richard, L., Giner, F., Eyrolle, F., Angot, H., Mourier, D., Bonnefoy, A., Dugue, V., Launay, M., Troudet, L., Labille, J., Kieffer, L. (2021): Observatoire des Sédiments du Rhône; INRAE. <https://dx.doi.org/10.17180/OBS.OSR>
- Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of operational research*, 169(1), 1-29.
- 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(1), 74-88.

Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1960) A Universal Soil-Loss Equation to guide conservation farm planning. Int. Congr. Soil Sci. Trans. 7th. VI. 2: 418-425.



Observatoire des Sédiments du Rhône

Plan
Rhône
Saône

RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*

agence
de l'eau
RHÔNE MÉDITERRANÉE
CORSE
établissement public de l'État

AVEC LE SOUTIEN DE L'UNION EUROPÉENNE

L'EUROPE S'ENGAGE
pour le Rhône
et la Saône
avec le FEDER

UNION EUROPÉENNE

CNR

EDF

La Région
Occitanie
Pyrénées - Méditerranée

RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR

La Région
Auvergne-Rhône-Alpes

cnrs

EVS
Environnement
Vie Société

cerege
CENTRE EUROPÉEN
DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT
DES GÉOCHIMIES DE L'ENVIRONNEMENT

INRAE

MENTPE
L'école de l'aménagement durable des territoires

IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Ifremer

mio
Mediterranean Institute
of Oceanography

ZA
Zone
Atelier
LTER FRANCE BASSIN DU RHÔNE

ohm
Observatoire Hommes-milieux - Vallée du Rhône

LabEx
DRIHM

cnrs

INVESTISSEMENTS
D'AVENIR

Observatoire des Sédiments du Rhône

GRAIE – OHM Vallée du Rhône

66 bd Niels Bohr – CS 52132

69603 Villeurbanne Cedex

www.graie.org/osr/

Contact :

bertrand.morandi@graie.org