



HAL
open science

Projet de sujet de thèse sur l'utilisation des données satellites en appui à la validation de modèles de ruissellement intense.

Pascal Breil

► To cite this version:

Pascal Breil. Projet de sujet de thèse sur l'utilisation des données satellites en appui à la validation de modèles de ruissellement intense.. 2019. hal-03793776

HAL Id: hal-03793776

<https://hal.inrae.fr/hal-03793776>

Submitted on 1 Oct 2022

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.

Projet de sujet de thèse sur l'utilisation des données satellites en appui à la validation de modèles de ruissellement intense.

Co-encadrement Irstea-ONERA-CNES

La thèse sera co-encadrée par:

- à Irstea par Isabelle Braud (DR) et Pascal Breil (CR), tous deux membre de l'UR Riverly ;
- à l'ONERA par Xavier Briottet (HDR) et par Laure Roupioz ; Ingénieure de recherche en télédétection. Département optique et techniques associées.
- au CNES par Jean-Marc Delvit (directeur de Eo-Lab) et Gwendoline Blanchet, ingénieure de recherche au service eo-lab DNO/OT/LOT.

Problématique

D'après la base de données des catastrophes naturelles (1982 à nos jours), les inondations par ruissellement pluvial intense représentent en France la moitié des dégâts liés aux inondations qui elles couvrent 85% des déclarations. C'est donc un poste important de dépense pour la société. Cependant et à la différence des inondations par débordement, il existe peu de données d'évaluation des modèles de prédiction des zones où le ruissellement est le plus susceptible de se produire, cela modulo une pluie suffisante. Compte tenu du montant que représente cette catégorie d'inondation (ex :100 millions pour l'événement orageux qui a frappée l'Aude en 2018) et des effets attendus sur la moitié Sud de la France du changement climatique d'ici 2100, à la fois sur les pluies intenses et l'évolution des sols face aux sécheresses, le développement d'actions de prévention est nécessaire. Cela passe par une fiabilisation des modèles de prédiction du ruissellement intense.

La cartographie prédictive des aléas liés au ruissellement intense (érosion, dépôt, submersion qui influence les transferts des substances comme les engrais et les pesticides présents dans les parcelles agricoles) est développée depuis 2010 par IRSTEA à l'aide de la méthode IRIP¹, cela dans le cadre de la Directive Inondation de l'Europe et en partenariat avec la DGPR². Cependant, il n'existe pas de mesures directes du ruissellement intense et des conséquences associées. L'évaluation des cartes est donc réalisée à partir de « vérités de terrain » comme les traces de ruissellement intense, les déclarations individuelles dans le cadre des CatNat et des Calamités agricoles. Ces données ne fournissent cependant qu'une vision partielle des zones impactées car elles concernent très souvent des dégâts aux infrastructures, aux biens et parfois aux personnes. L'évaluation est donc biaisée ou tout du moins partielle faute d'une connaissance plus exhaustive des zones impactées, en particulier celles qui sont situées hors des enjeux.

D'une manière plus large, les flux de matières et de substances liés au ruissellement sont à l'origine de transferts d'énergies, en particuliers de nutriments, dont on peut supposer qu'ils conditionnent pour partie les biomasses bactériennes des sols et les biomasses végétales. Ce processus est notable dans les bandes enherbées situées en sortie de vignobles par exemple car le transport est facilité par les terres à nu. Le ruissellement intense peut quant à lui créer des pulses de transfert – dépôt en masse depuis les surfaces de grandes cultures vers des zones d'accumulation. L'étude de l'évolution spatio-temporelle des biomasses végétales des zones réceptrices est aujourd'hui possible depuis les images satellites avec différents indices. Elle pourrait compléter l'analyse des conséquences du ruissellement intense sur le moyen terme alors que les signes d'érosion et de dépôt disparaissent à court terme du fait de l'homme ou de la nature.

Approche

La montée en puissance de la donnée satellite de ces dernières années à très haute résolution (THR) et haute fréquence (HF) met à disposition de la communauté scientifique de nouveaux moyens d'investigations sur l'analyse des phénomènes de la zone critique. Des centres d'expertise scientifique (CES) se sont développés à cet effet autour de la plateforme THEIA³ qui vise à produire des applications dédiées avec les chercheurs pour ensuite les mettre en production. Les raisons en sont que les volumes d'information et les prétraitements requis des images font appel à des moyens et compétences spécifiques. Il est donc nécessaire de s'associer à des « professionnels » pour utiliser ces nouvelles sources de données.

La problématique du ruissellement intense est abordable du fait des fréquences de passage et finesse de résolution disponibles depuis quelques années seulement. L'utilisation des données satellites Pléiades à haute résolution spatiale (70 cm) et haute fréquence temporelle (de 1 à quelques jours selon la programmation), couvrant des aires de 20 X 20 km², offre des perspectives intéressantes pour inventorier les conséquences du ruissellement intense après un événement météorologique majeur. Ces données sont d'ailleurs utilisées via des campagnes d'acquisition spécifiques par « l'Emergency Management Service – Mapping de Copernicus » pour délimiter les zones touchées en période de crise durant des catastrophes naturelles, cela en appui aux services de secours.

Mais peu nombreuses sont les études menées sur la détection du ruissellement de surface par la télédétection. Le phénomène de ruissellement étant mal connu et c'est souvent les débordements et crues [18] ou encore l'érosion et les

¹ Indicateurs du Ruissellement Intense Pluvial (IRIP)

² Direction Générale de Prévention des Risques

³ <https://theia.cnes.fr/atdistrib/rocket/#/home>

glissements de terrain que l'on cherche à détecter avec ces nouvelles données. Il ressort de l'état de l'art une utilisation majoritaire d'images Landsat pour la détection des aléas issus du ruissellement pluvial. L'apport complémentaire de la haute fréquence temporelle ainsi que d'images aériennes et de données terrain représente un atout non négligeable. La réalisation de classification pour caractériser l'occupation du sol semble également pertinente. L'utilisation d'indices spectraux tels que : NDVI, NDWI, IB, RIBS, PIDS, SAVI donne des résultats intéressants mais sur des cas d'étude souvent limités dans l'espace et sans réelle perspective de généralisation. Les auteurs d'une revue bibliographique récente sur l'application de la télédétection pour suivre l'érosion des sols [28] indiquent que l'utilisation de l'information à haute résolution spectrale est limitée en raison de son coût d'acquisition. Les processus de détection des dépôts et coulées de boue sont également peu mentionnés dans la littérature. C'est pourtant une manifestation des aléas liés au ruissellement intense.

Une autre piste émerge qui est celle de l'intelligence artificielle ou réseau de neurones basée sur des méthodes d'apprentissage de types probabiliste. L'objectif est d'automatiser le principe de l'expertise humaine d'où la nécessité d'un très grand nombre de données pour constituer la base d'apprentissage (WikiStat). Largement utilisé, cet outil permet aussi bien de détecter les contours linéaires que curvilignes [27] et peut être employé dans de nombreux domaines exemples de la reconnaissance faciale, de la détection des tumeurs). Les réseaux de neurones peuvent être utilisés en télédétection dans l'analyse d'images multi-spectrales pour extraire des informations spécifiques, réaliser des classifications et faire de la reconnaissance de forme [3]. Ainsi, l'emploi de filtres morphologiques curvilignes et le recours à l'intelligence artificielle sont deux pistes exploitables dans le cadre du projet de thèse. En particulier car suite aux événements survenus dans l'Aude en octobre 2018, le CNES a mis un point un algorithme de détection par intelligence artificielle des vignobles sinistrés. La thèse prendrait appui aussi sur ces travaux.

Le projet de recherche sur le ruissellement intense a été discuté avec le CNES et l'ONERA à l'occasion d'une journée de présentation début 2018 du potentiel des données satellites pour le secteur de l'eau. Cela a donné lieu en 2019 à une collaboration autour d'un stage de M2, co-encadré par Irstea et l'ONERA-CNES sur l'analyse des possibilités de détecter des traces de ruissellement intense à l'aide des images Pléiades (THR, HF). Les premiers résultats mettent en évidence les limites des indices standards (NDVI, NWDVI, BI) et des signatures spectrales (V, R, IR) alors que les impacts au sol sont « détectés » par l'œil humain sur les images en fausses couleurs. Par ailleurs un test de détection de vérités terrain sur les images pléiades 0.5m puis agrégées à 1m, 5m et 10m révèle le caractère multidimensionnel des traces de ruissellement intense depuis la rigole d'érosion, les désordres aux infrastructures et les zones d'accumulation d'emprise variable (décamétrique à hectométrique). Des indices dérivés du NDVI (SAVI, SARVI) semblent plus prometteurs [19]. L'apport combiné des données hyper-spectrales et des satellites SAR (3D) ouvrent des perspectives sur des questions de recherche dans le traitement de l'information et pour l'analyse de contexte et l'analyse comparative diachronique. Par ailleurs les transferts de sol générés par les événements de pluie intense sont à même de modifier les caractéristiques hydrodynamiques avec par exemple l'apport de particules fines dans les bas-fonds ou zones d'accumulation et la perte de matière organique dans les zones érodées. Ces transferts, accompagnés par les nutriments mais aussi les phyto-sanitaires, pourraient modifier les distributions des biomasses dans les mois et années qui suivent. Cela pourrait être comparé au « flood pulse concept » qui a posé l'hypothèse de l'effet majeur des inondations sur la productivité biologique d'une rivière. Aujourd'hui Les indices d'humidité, de stress hydrique et de biomasses végétales sont 'mesurés' via les données de télédétection. Il paraît possible de traquer ces évolutions moyennant une validation terrain.

Recherche : méthode et moyens, partenariat

Le principe d'un travail de recherche plus systématique, combinant modélisation hydrologique du ruissellement intense, sources satellites et vérités terrain est discuté en partenariat entre Irstea et ONERA-CNES. Il prendrait la forme d'une thèse co-encadrée et financée pour moitié par chacun des partenaires. Le CNES et l'ONERA font de leur côté une demande de demi-bourse pour le même sujet.

Suite aux travaux exploratoires menés dans le cadre du stage de master co-encadré en 2019 il est apparu que les aléas liés au ruissellement intense étaient bien visibles sur les images à haute résolution spatiale mais que l'utilisation d'indices spectraux seuls ne permettait pas leur détection. Cependant l'utilisation combinée d'images satellites et de données annexes pour développer des masques (ex: données cadastrales et occupation du sol) ainsi que d'acquisitions antérieures à l'événement étudié, offre des perspectives prometteuses pour la détection de ces aléas. Des images satellites de très haute résolution spatiale (résolution sub-métrique) sont d'ores et déjà disponibles sur des sites d'intérêt pour l'étude du ruissellement intense :

- Sur le département de l'Aude, des images Pléiades ont été acquises juste après les inondations du 15 octobre 2018 et d'autres programmations trimestrielles Pléiades sont prévues pendant deux ans pour le suivi de la reconstruction. Certaines de ces images ont déjà été étudiées dans le cadre du stage et ont montré un gros potentiel.
- Sur l'île de la Réunion, de nombreuses images Pléiades ont été acquises sur ce site pilote pour le CNES (<https://lareunion.kalideos.fr/drupal/fr>) fortement exposé aux risques liés aux inondations et aux pluies intenses flash. Les acquisitions stéréoscopiques Pléiades déjà réalisées sur ce site permettront d'avoir accès à un modèle numérique de surface de meilleure précision que la donnée IGN standard, ce qui devrait permettre d'améliorer la modélisation avec IRIP.

Les images Pléiades THR seront mises à disposition pour cette thèse par le CNES.

En complément de ces données, une couverture annuelle SPOT6-7 de la France pourra être utilisée. Malgré une résolution spatiale deux fois moins bonne que Pléiades, les images du satellite SPOT6-7 permettront de couvrir éventuellement d'autres sites d'intérêt pendant le déroulement de la thèse.

Les données hyperspectrales acquises par le nouveau satellite PRISMA seront également considérées afin d'approfondir l'étude et la caractérisation des surfaces impactées par le ruissellement intense. Ce satellite, lancé en mars 2019, fournira bientôt des données à 30m qui pourraient être exploitables dans le cadre de cette étude. En complément, et selon les conditions et l'occurrence d'événements climatiques extrêmes, une campagne d'acquisitions aéroportée pourrait être envisagée via l'ONERA afin de collecter des données hyperspectrales et/ou thermique à très haute résolution spatiale.

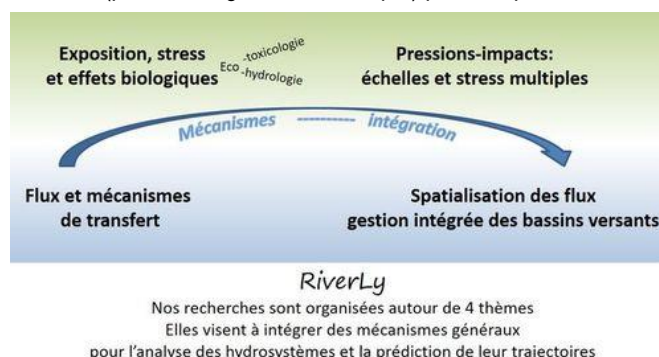
Les acquisitions régulières de données Pléiades post-événement sur le site de l'Aude ainsi que la disponibilité de la couverture nationale annuelle SPOT6-7 sont une opportunité unique d'étudier de manière approfondie l'impact à long terme du ruissellement intense sur l'écosystème d'une zone impactée à haute résolution spatiale. Des données à haute répétitivité temporelle, comme Sentinel 2 ou Landsat, bien qu'ayant des résolutions spatiales plus faibles (10-30m) seront également utilisées. Disponibles gratuitement sur une longue période de temps, ces données apportent une grande richesse d'information pour étudier l'évolution spatiale et temporelle de la végétation. Des approches pour combiner les données à hautes résolutions spatiales et les données à hautes résolutions temporelles seront explorées. La disponibilité des données de télédétection THR est donc assurée au moins sur deux territoires cibles qui sont l'Aude et l'île de la Réunion via le CNES pour les données payantes ou prioritaires. Le co-encadrement avec le CNES et l'ONERA assure la compétence spécifique pour la télédétection.

Comité de pilotage

Le sujet fait appel à des compétences en traitement des données satellites, en hydrologie du ruissellement qui implique l'usage de données pédologiques et en évaluation des biomasses végétales comme indicateurs long terme des transferts des substances de surface. Un partenariat est en discussion avec le CES-BIO⁴ pour bénéficier de l'expertise du groupe dans le comité de thèse. Le comité de pilotage intégrera des représentants de l'Irstea, du CNES et de l'ONERA mais aussi du CES-BIO qui développe des travaux sur l'évaluation des biomasses végétales via les données satellites. Des expertises en sciences du sol et en modélisation de l'érosion agricole seront recherchées au sein d'INRAE avec le LISAH⁵ dont l'ex-directeur a été rapporteur de la thèse de L.R. Lagadec [20] qui portait sur l'évaluation du modèle IRIP en contexte ferroviaire. En particulier l'expertise du nouveau CES Épaisseur Optique de la végétation (VOD) réunit des membres des équipes IPSA et Tetis travaillant à partir d'observations hyperfréquences multi-capteurs (SMOS, SMAP, AMSR2, ASCAT, Sentinel-1) au développement de produits de suivi de la végétation. Contact sera pris avec Jean-Pierre Wigneron (INRA) pour évaluer l'intérêt de collaborer sur ce point.

Objectif de la thèse : Améliorer l'évaluation des modèles de ruissellement intense à partir de « proxy » données les plus exhaustives possibles.

Au sein du programme de recherche de l'UR RIVERLY, l'évaluation des modèles est un axe de travail qui entre dans « la spatialisation des flux et la gestion intégrée des bassins versants » et qui tente de répondre en particulier à « l'anticipation des risques accentués (par le changement climatique) pour les prochaines décennies ».



L'objectif de la thèse est à vocation générale pour le développement de la modélisation des risques liés au ruissellement intense, ce qui inclut la modélisation de l'érosion agricole aussi développée par l'équipe du LISAH (UMR INRA, IRD, SupAgro). La thèse servira donc de lieu de collaboration avec des collègues du futur institut INRAE.

⁴ Centre d'Etude Spatiale de la BIOSphère, Unité mixte de recherche CNRS, UPS, CNES, IRD.

⁵ Le LISAH (Laboratoire d'Etude des Interactions entre Sol-Agrosystème-Hydrosystème, est une unité mixte de recherche sous tutelle de l'INRA, l'IRD et SupAgro.) travaille en particulier sur la modélisation des aspects de transfert des polluants avec les phénomènes érosifs ainsi que sur l'effet de l'agencement des paysages. Les modèles sont intégrés dans la plateforme OpenFLUID et un partenariat serait à envisager avec ces collègues, dont certains INRA.

L'absence de mesures directes a conduit les hydrologues à « supposer » la composante ruissellement dans la formation des crues. L'usage des traceurs géochimiques s'est parfois avéré concluant mais a souvent posé de nouvelles questions, en particulier sur les temps de séjours et les chemins de l'eau [2] [16].

Le travail de thèse s'articule autour de **4 hypothèses** qui ont vocation à confronter les prédictions d'un modèle de ruissellement intense⁶ développé par l'équipe « Hydrologie des bassins versants » avec les indicateurs de réponse au sol qui sont vus de manière la plus exhaustive possible par les mesures de télédétection. Cela implique bien sûr de calibrer ces indicateurs avec des vérités terrain. Il faut cependant savoir que les déclarations de calamités agricoles vont maintenant se faire en ligne (loi de modernisation de l'Etat) directement par les exploitants et que les dossiers papiers avec « informations détaillées et photos » ne seront plus centralisés et validés. A la place des contrôles sur 5% des déclarations seront réalisés par les agents des DDTM. Pour les déclarations individuelles de CatNat il en sera de même par les communes. Il semble donc urgent de « remplacer » ces informations par les données satellites.

Pour la télédétection cela ouvre un nouveau champs d'investigation car il s'agit de détecter des variations spécifiques au sol à court et long terme, avant et après un événement de pluie majeur, cela avec de nouvelles sources de données de la télédétection (THR, HF) qu'il faudra savoir combiner de manière efficace. C'est donc un travail de recherche qui demande de l'innovation à la fois dans le domaine de la télédétection et celui de l'hydrologie sur la modélisation du ruissellement intense.

A propos des modèles de ruissellement en hydrologie

D'une manière générale les modèles en hydrologie ont vocation à simuler les écoulements en cours d'eau, que ce soit pour prévoir la ressource en eau et son exploitation ou caractériser l'amplitude des événements extrêmes. Ils peuvent être à base conceptuelle, probabiliste ou mécaniste, ou encore une combinaison de ces types de modèles. On distingue les modèles globaux dans lesquels le bassin versant est un transformateur de la pluie en débit, des modèles spatialisés qui s'appuient sur la distribution a priori connue des caractéristiques au sol comme la géologie, pédologie et l'occupation du sol. A mi-chemin sont les modèles semi-distribués qui assimilent l'espace à l'emboîtement de modèles globaux caractérisés par des occupations de sol dominantes. Beaucoup de modèles intègrent une composante ruissellement pour expliquer les montées rapides de débit en réponse aux pluies. Cependant cette contribution aux écoulement ne peut être validée de manière fiable faute de traceurs suffisamment diversifiés [16] et de moyens de les suivre pour repérer les zones ruisselantes. Cela reste donc une composante conceptuelle qui joue le rôle d'un paramètre d'équilibrage dans le bilan hydrologique d'une crue. Suite à une étude bibliographique détaillée [10] un modèle dédié a été développé pour répondre à ce manque [11]. Ainsi le modèle IRIP a été développé spécifiquement pour représenter la composante liée au ruissellement intense. Le choix d'un modèle géomatique, et donc spatialisé, à base de score sur les facteurs favorables à trois étapes identifiées du ruissellement intense, a été développé pour représenter les réponses de surface et sub-surface aux ruissellements extrêmes. L'observation des dégâts causés par ce ruissellement intense en tous les points de la France métropolitaine (Base CatNat) démontre que les caractéristiques au sol jouent un rôle important dans sa genèse, cela pour des pluies fortes mais de régimes bien différents entre les influences méditerranéennes et celles de la Manche par exemple. Le modèle IRIP : Indicateurs du ruissellement Intense Pluvial, est un modèle hydrologique statique, au sens où il ne produit pas d'hydrogramme de ruissellement en fonction d'une chronique de pluie mais révèle les lieux les plus propices à sa genèse, cela pour une pluie probabilisée de période de retour 30 ans. Cette période de retour minimale est retenue à l'expérience acquise à partir des données terrain pour le déclenchement des aléas inhabituels sur les surfaces non imperméabilisées. Les hypothèses de ce modèle, le choix des facteurs au sol et des indicateurs dérivés, ont été testés de manière expérimentale sur un bassin versant, cela au travers d'un dispositif de mesures de la pluie, de l'humidité du sol et de témoin de lame d'eau constituées en surface, en 14 points d'observations sélectionnés selon les prédictions du modèle et pendant une année complète [13]. Les résultats expérimentaux ont ainsi confirmé de manière statistique au travers d'une centaine d'événements pluvieux les choix des indicateurs produits par le modèle IRIP.

Le modèle IRIP

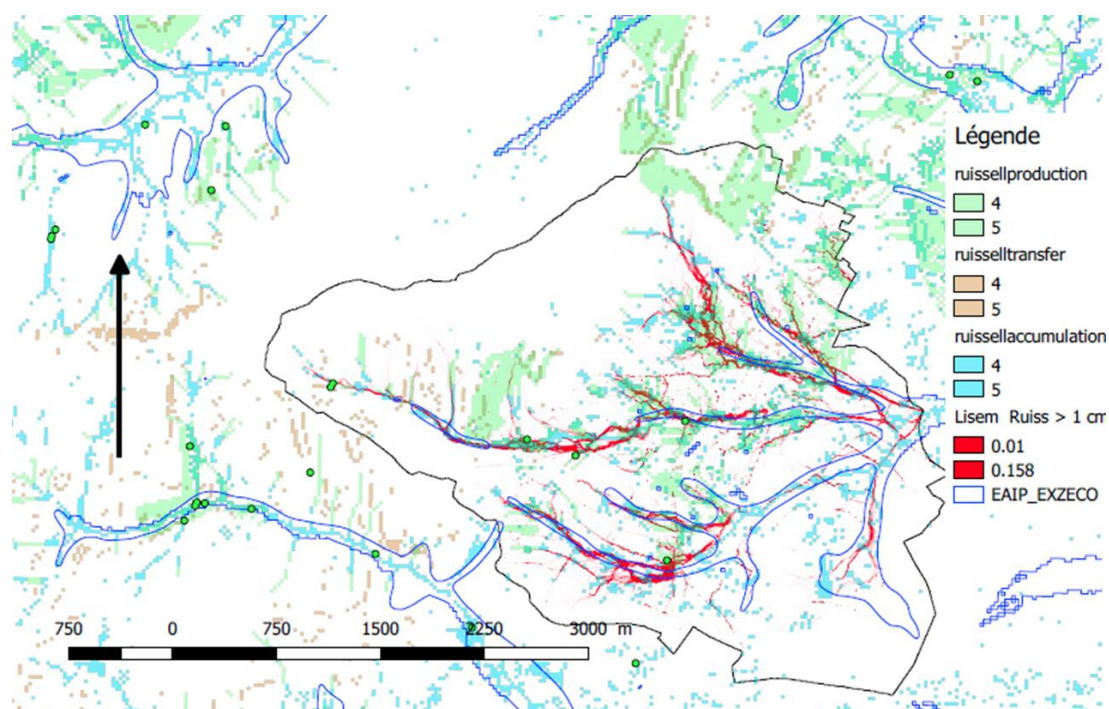
Sa construction a été actée suite à une étude bibliographique des modèles d'érosion [11]. Face à la diversité des résolutions spatiales des couches d'information nécessaires (topographie, pédologie et occupation du sol) et de leurs contenus sous forme de classes plus ou moins précises, le choix d'une méthode de score a été préféré à un modèle quantitatif. L'hypothèse principale étant que plus le nombre de facteurs favorables au ruissellement intense s'exprimait, plus la réalisation des deux aléas associés (érosion et accumulation) était probable. La démarche d'évaluation menée depuis 2011 a consisté à tester la robustesse des cartes d'aléas transfert-érosion et accumulation-inondation par comparaison avec des conséquences géolocalisées dans différents contextes pédo-climatiques que l'on a identifié aux 22 hydroécocorégions (HER)⁷ cartographiées pour la France pour la Directive cadre Eau. La robustesse a été évaluée pour l'instant dans 10 HER comme la capacité du modèle à produire des cartes pré-opérationnelles, c'est-à-dire à retrouver *a minima* 80% des incidents géo-référencés avec au maximum 20% de territoire en aléas forts (>= 3 sur 5

⁶ IRIP : Indicateurs du Ruissellement Intense Pluvial

⁷ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/hydroecoregions-de-niveau-2-her-2/>

niveaux en terme de score). La récente mise à disposition des lame d'eau radar de météo France a permis de restreindre les territoires d'évaluation aux zones couvertes par les pluies intenses. L'évaluation n'a cependant porté que sur les incidents liés aux enjeux impactés (déclarations individuelles en CatNat et en Calamités agricoles). Il convient de vérifier à l'aide des données satellites le maintien ou l'amélioration de ces conditions de robustesse à l'aide de « tous » les incidents occasionnés par le ruissellement intense. C'est aussi l'unique façon d'étudier la sensibilité des facteurs du modèle et donc de son amélioration potentielle. Ensuite, à partir de 90% de détection on peut estimer que le modèle a un caractère prédictif qui permet de simuler le changement de l'occupation du sol pour développer une prévention efficace.

La figure suivante illustre les zones de production, de transfert et d'accumulation de niveaux 4 et 5 sur un petit bassin versant du Grand-Chalon. Dans ce cas les cartes d'aléas de transfert et accumulation ont permis d'identifier 98% des 56 incidents déclarés en CatNat avec 6% du territoire en aléas forts sur le territoire du Grand Chalon, cela dans la zone de pluies intenses qui a généré ces incidents. On distingue les zones de production, de transfert-érosion et d'accumulation-inondation, ce qui permet de définir des prescriptions en terme d'urbanisme par exemple dans le cadre d'un zonage pluvial. Les incidents sont repérés par des ronds verts. Le modèle IRIP, calculé avec un MNT de 25m est ici comparé à un modèle mécaniste d'écoulement de surface (LISEM) qui utilise un MNT de 1m de résolution. On note la superposition de la lame d'eau supérieure à 1 cm modélisée par LISEM, pour un événement pluviométrique réel estimé à T=30 ans, avec l'aléa accumulation par le modèle IRIP. L'enveloppe EAIP (ligne bleue) est la vision du débordement de talweg par la méthode Exzeco du CEREMA.



Les hypothèses de travail

L'étudiant en thèse organisera son travail autour de 4 hypothèses à tester à l'aide des données de modélisation et de la télédétection.

Hypothèse 1:

Les données satellites THR-HF-HS nouvelle génération sont à même de déceler les désordres produits aux sols et aux infrastructures causées par les aléas liés au ruissellement intense : érosion, coulées de boues, arrachage de cultures, emportements de structures linéaires (routes, voies ferrées, murs, réseaux de drainage urbains,...).

Evaluation de l'hypothèse 1:

Les données satellites sont traités par différentes méthodes de télédétection pour isoler les désordres identifiés au travers de différentes sources d'informations (déclarations CatNat individuelles, déclarations calamités agricoles individuelles, coupures réseaux routier et ferré, campagnes de terrain après un événement majeur,...). Le développement de méthodes spécifiques (recherche) est imaginé, en particulier par rapport à ce qui est observé sur le terrain.

La détection de l'aléa érosion : cet aléa prend différentes formes car il peut concerner plusieurs types d'environnements. Ainsi en territoire agricole il crée des réseaux arborescents qui s'élargissent d'amont en aval avec la concentration du flux. Les zones fortement incisées sont marquées par l'absence de végétation même quelques mois après l'événement pour les érosions profondes. Les cultures peuvent être déracinées. En territoire artificialisé, les réseaux linéaires qui coupent les versants sont ravinés latéralement et (ou) déchaussés. Les couches de forme des routes sont mises à jour après emportement du bitume et étalement du ballast. Selon les configurations topographiques et de nature de terrain l'aléa érosion alterne avec l'aléa dépôt. C'est en particulier le cas dans les zones de départ après la zone de production où des séquences métriques d'érosion et dépôt se succèdent. On observe par exemple le comblement des petites terrasses viticoles selon les axes d'érosion et dépôts avec recréation d'une pente uniforme. L'aléa érosion peut cependant se terminer dans un cours d'eau pérenne ou temporaire qui fait disparaître les dépôts. La détection de l'aléa accumulation est aussi complexe. Selon les matériaux érodés et les distances de transport, on pourra distinguer des zones d'atterrissement de particules fines dans les ruptures topographiques concaves et les bas-fonds mais il pourra aussi s'agir de matériaux beaucoup plus grossiers, lavés de la fraction fine qui aura servi au transport et qui aura disparu dans un cours d'eau. Ce dernier cas est souvent le témoignage de coulées boueuses. On comprend qu'il existe des hypothèses explicatives aux différentes formes de réponses des aléas qui sont fortement liées à la topographie et aux caractéristiques des terrains traversés d'amont en aval par le ruissellement intense. La complexité des formes et couleurs est donc un défi pour l'analyse par images satellites qui devra intégrer la logique hydrologique. L'intelligence artificielle qui nécessite des données d'apprentissage est déjà en test au CNES pour évaluer l'état de destruction des vignobles. Elle sera explorée pour intégrer des données contextuelles difficiles à résumer par une combinaison de filtres et indices. Les zones de production du ruissellement ne sont pas considérées comme un aléa dans le modèle IRIP bien qu'il soit difficile de mettre la limite avec l'érosion hydrique qui met en mouvement les particules fines arrachées par l'énergie de la pluie. Ainsi les zones de production sur prairies et cultures montées montreront le couchage de l'herbe, le transport des flottants (brindilles, branches, feuilles) qui s'accumuleront dans les grillages et barbelés traversés (comme des laisses de crue). Autant d'indices dont il faudra évaluer la faisabilité de détection avec les images satellites.

Un premier travail d'investigation a été réalisé en 2018 au travers d'une collaboration Irstea/Cnes/Onera dans le cadre d'un stage de master. Celui-ci a permis une première série de test de filtre et indices validés en télédétection. Ces premiers résultats indiquent de manière statistique que seulement certains indices et filtres sont à même de détecter des éléments associés aux zones de transfert érosifs et de dépôts. Ceux-ci sont à revisiter plus en détail mais la faisabilité semble être d'ores et déjà acquise avec le filtre Sobel que l'on peut comparer à l'image RGB en fausses couleurs. La détection des zones d'accumulation est plus compliquée car les nuances dans le visibles sont déjà grandes selon la nature des matériaux. Des combinaisons d'indices sont à explorer entre état de surface et humidité dont on peut faire l'hypothèse de « planéité » et de teneur en eau plus prononcée du fait des matières fines accumulées, cela au moins pendant quelques mois après un événement de ruissellement important. Irstea (UMR Tetis) et le Cnes (Projet Tosca) ont développé un algorithme pour produire des cartes d'humidité. Les données utilisées proviennent des séries d'images Copernicus radar Sentinel-1 et optique Sentinel-2. L'algorithme d'inversion du signal radar utilise les réseaux de neurones.

« Utilisation des données satellites pour la détection des impacts du ruissellement intense au sol ». [14]

Tests des indices et filtres relevés dans la littérature

Objectif : Vérifier si la combinaison des valeurs des différentes bandes permettrait de faire ressortir les pixels correspondant à une zone touchée par un des trois aléas.

☐ Pléiades : exemple des filtres Sobel et LSD :



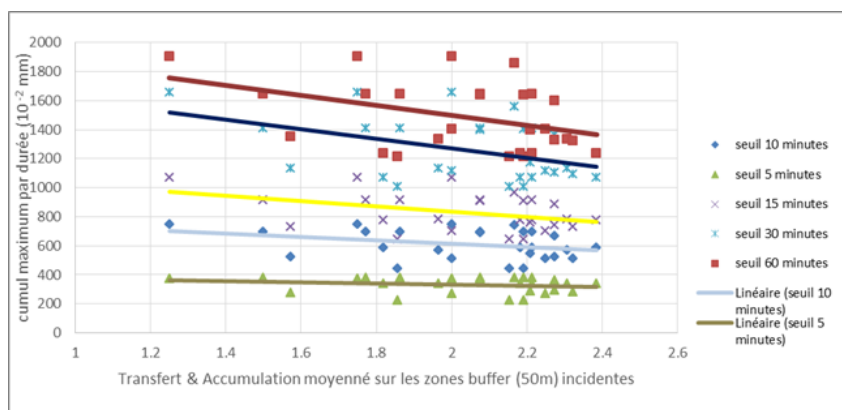
- Filtre Sobel prometteur dans la détection de l'aléa érosion.
- Filtre LSD inutilisable pour cette étude.

Hypothèse 2:

Si les niveaux de sensibilité prédits par le modèle IRIP dans les cartes de transfert érosif et d'accumulation d'eau ou de solides sont réalistes, alors nous pouvons postuler que la quantité d'eau précipitée pour déclencher l'incident (répertorié au sol) sera d'autant plus faible que le niveau de sensibilité autour de l'incident sera fort (et vice versa).

Evaluation de l'hypothèse 2:

Il faut évaluer les quantités d'eau précipitées sur différentes durées au droit des zones d'incidents déclarées. Il faut ensuite évaluer statiquement si une relation négative existe entre la quantité d'eau précipitée et le niveau de sensibilité au ruissellement prédit par IRIP dans la proximité de l'incident.



Cette hypothèse a été testée lors d'une étude sur le territoire du Grand Chalon (Dép. 71) qui a été impacté par une séquence orageuse sévère en juin 2016 [5]. Sur ce territoire 26 incidents liés au ruissellement intense, situés hors débordement de talweg vu par la méthode EXZECO, ont été géo-localisés. L'environnement de ces incidents a été caractérisé dans un cercle de 50m de diamètre par la valeur moyenne des aléas en transfert et accumulation calculés par le modèle IRIP. Les cumuls de lame d'eau radar ont été calculés sur différentes durées de 5 minutes à 1 heure. Les maximums précipités sur les différentes durées et pour chaque incident ont été sélectionnés. La figure suivante montre la tendance de la relation entre les cumuls pluviométriques maximums et les valeurs des aléas moyens dans la zone de chaque incident. La relation devient significativement négative à partir de 15 minutes et se renforce au-delà. Cependant l'échantillon des incidents reste limité et il est important d'accroître les cas d'étude avec d'autres sources d'informations, comme celles de la télédétection pour confirmer ce lien entre les niveaux localisés de sensibilité IRIP au ruissellement et la quantité de pluie pour déclencher un incident.

Hypothèse 3:

Si les zones de transfert et d'accumulation prédites dans les cartographies IRIP font sens, alors il est attendu après des pluies intenses, des transferts massifs d'éléments fins, d'engrais et de phyto-sanitaires depuis les zones de production du ruissellement comme les terres agricoles vers des zones aval d'accumulation. On peut postuler que ces transferts vont influencer les biomasses végétales des zones d'accumulation dans les années suivantes. Le corolaire est une perte en éléments fin des zones de production.



Evaluation de l'hypothèse 3:

Trois méthodes sont imaginées.

1- Evaluer l'évolution des biomasses végétales entre avant l'événement majeur et sur les années qui suivent au printemps par exemple. C'est une approche par télédétection qui peut utiliser la méthode du CES-VOD.

2- Evaluer l'activité photosynthétique par une analyse comparée des végétaux situés dans les zones rincées par rapports aux zones réceptrices. L'azote N15 permet de faire ce type de comparaison. C'est une approche par mesures de terrain. Une collaboration avec l'Institut des Sciences analytiques à Lyon est possible.

3- La perte en éléments fins et matière organique des zones de production et de transfert peut être caractérisée par une moindre rémanence de l'humidité des sols, aujourd'hui accessible via des mesures combinées de télédétection à THR et HF (voir utilisation des cartes d'humidité produite par Tetis-CNES).

Ce travail pourrait être confié à un stage de master en appui à la thèse.

Hypothèse 4:

La séparation en composantes rapide, moyenne et retardée pour expliquer les différentes contributions superficielle, hypodermique et de nappe aux débits de crue est un concept fortement ancré dans la communauté des hydrologues. Cette vision fait l'hypothèse implicite de la continuité des écoulements qui peut être sur le principe évaluée à l'aide de traceurs géochimiques. Ces études ne permettent pas vraiment de trancher pour des raisons de caractérisations des sources mais aussi de variations importantes de la signature de la pluie au cours d'un événement et des saisons [16]. On note par ailleurs depuis les observations de terrain que les manifestations du ruissellement intense sont le plus souvent très locales, en lien sans doute avec des intensités pluvieuses exceptionnelles elles même très locales [8]. L'hypothèse d'une contribution systématique à la formation d'un débit de crue dans les cours d'eau jaugés à proximité peut être discutée. On peut alors formuler deux hypothèses non exclusives l'une de l'autre : la surface du bassin versant jaugé est suffisamment petite pour que le ruissellement intense soit une composante de l'hydrogramme et, la zone de pluie intense est trop localisée pour que le cours d'eau puisse enregistrer un débit de crue significatif.

Evaluation de l'hypothèse 4 :

Elle peut être testée à partir de la distribution spatiale des lames d'eau radar et de la réponse hydrologique des cours d'eau jaugés à proximité. Il sera en particulier regardé les réponses des 10 plus petits bassins versants jaugés en France à la présence de cumul de lame d'eau nécessaires (tirés des lames d'eau radar sur 10 ans) pour déclencher des incidents. Ces cumuls seuils (selon les durées) seront tirés de l'hypothèse 2.

Ce travail pourrait être confié à un stage de master en appui à la thèse.

IRIP est un projet d'équipe

Le sujet proposé est à l'interface entre la modélisation des aléas et risques liés au ruissellement intense et l'utilisation d'une nouvelle génération de données qui pourrait contribuer de manière significative au développement de ce type de modélisation hydrologique dédié au ruissellement intense. Il fait appel à des compétences propres à l'équipe hydrologie des bassins versants qui participe à différents aspects du développement du modèle IRIP (P. Breil, I. Braud, E. Leblois, C. Poulard) ce qui en fait un projet d'équipe alimenté par plusieurs conventions (DGPR, AE-RMC, JPI-Water, Life-intégré). Une thèse CIFRE [20] co-encadrée par Irstea (Braud et Breil) et SNCF sur l'évaluation des cartographies IRIP en contexte ferroviaire a d'ailleurs été primée. Un travail collectif concerne en particulier la méthode de seuillage des lames d'eau radar qui a été testée sur un cas d'étude [5]. Elle bénéficie aujourd'hui d'une routine écrite en Python3 (Poulard C., Leblois E., Breil P., rapport en cours DGPR 2019) qui permet de traiter les événements d'intérêt tirés de la base des données lames d'eau radar, d'évaluer les seuils et la fréquence des lames d'eau radar associés aux incidents géo-référencés au sol.

Un aspect aussi développé est la gestion du ruissellement intense par les zones humides, cela dans le cadre de l'action GEMAPI portée par le département Eaux en aide aux collectivités [6] [15] (projet RIZHU, 2018-2020 pour l'Agence de l'Eau RMC, projet Life-intégré Artisan piloté par l'AFB, 2020-2027). Le lien avec l'effet du ruissellement intense sur les biomasses végétales à long terme fait écho au développement des outils de gestion des territoires tels que vus dans une approche Eco-Hydrologique qui fait partie du programme de recherche de l'UR Riverly.

Une action de coordination des résultats d'IRIP avec la thèse qui démarre au centre Irstea d'Aix en Provence (Equipe Risques Hydrométéorologiques) est actée pour alimenter la descente d'échelle du modèle SHYREG. Un rapport sur l'analyse de complémentarité des deux modèles a été produit en 2019 [1].

Le modèle IRIP permet d'aborder à la fois les questions de risques d'inondations par ruissellement et les risques de transfert de pollution depuis les systèmes agricoles (Etude 2019 par syndicat de la Flume pour Agence de l'Eau Loire Bretagne qui utilise les cartes IRIP à la résolution de 5m). Il se place ainsi comme un trait d'union avec les modèles développés par l'UMR LISAH dont un partenaire est l'INRA.

Il existe par ailleurs une attente des services opérationnels vis-à-vis de la question du ruissellement intense qui est transverse à différents règlements (GEMAPI, zonage pluvial, PLU, SDGEP, GEPU..). Tous ces éléments indiquent que ce projet démarré en 2009 avec la Région Rhône Alpes et l'Agence de l'Eau RMC devrait perdurer dans l'UR Riverly et le nouvel Institut INRAE, en particulier avec l'UMR LISAH, pour répondre à des questions de recherche appliquée.

La personne en thèse se construira un profil de compétence entre hydrologie et télédétection intéressant pour la directive inondation et les questions d'adaptation de l'occupation du sol au changement climatique avec un focus sur les risques liés au ruissellement intense. Comme indiqué la modélisation du ruissellement est peu validée faute de données. La compétence intra-disciplinaire sera donc à forte valeur ajoutée.

L'organisation du travail de thèse

Le schéma suivant montre l'organisation du travail de thèse en 5 étapes. Cette séquence linéaire n'exclut pas des aller retour entre les étapes si cela s'avère nécessaire mais il conviendra de veiller à respecter l'agenda.

- 1/ Il s'agira dans un premier temps de constituer la base de données des vérités terrain. Ce travail est en partie réalisé pour l'Aude pour l'événement des pluies d'orages d'octobre 2018; les déclarations de calamités agricoles (1359 parcelles identifiées) ont été récupérées auprès de la DDTM11 et critiquées. Il reste à récupérer les déclarations individuelles de catastrophe naturelle auprès de certaines communes de l'Aude qui centralise ces données pour les indemnisations (mais cela devrait disparaître dans les années à venir du fait des déclarations individuelles en ligne). Nous disposerons ainsi de données liées à des dégâts aux milieux urbain et rural. Les coupures de routes sont aussi gérées par la DDTM11 et seront considérées dans les éléments linéaires souvent impactés lors de ces événements. Un travail identique sera réalisé pour les zones sinistrées de l'île de la Réunion à l'occasion d'un événement particulièrement dévastateur. Il sera nécessaire d'identifier cet événement, de vérifier la disponibilité des données requises auprès des services de l'Etat puis de procéder à leur recueil. L'objectif est de disposer de 1000 à 2000 vérités terrain sur chacune des régions étudiées, cela pour servir une évaluation statistique suffisamment robuste. Les données de lame d'eau radar seront acquises au titre de la recherche auprès de Météo-France ainsi que les chroniques des postes pluviométriques d'intérêt pour développer des analyses fréquentielles si l'historique des données radar est trop limité. Ce travail sera encadré par les trois instituts. **Il devrait durer 9 mois en incluant le travail de collection et de critique, et se dérouler à Toulouse pour être à proximité du territoire de l'Aude. Une mission à l'île de la Réunion est à prévoir au moins avec le CNES qui s'y rend régulièrement. Un article type « data paper » est à prévoir.**

- 2/ Cette étape vise à évaluer **l'hypothèse numéro 1**. Les données satellites nécessaires à l'étude des événements datés seront récupérées par le CNES puis organisées et pré-traitées par l'étudiant pour permettre de compléter les tests en parti réalisés dans le stage de master d'A. Favro en 2019 [14]. Après l'évaluation des filtres et indices usuels pour détecter les vérités terrain, la recherche consistera à développer des combinaisons d'images satellites qui semblent donner des résultats pour détecter les traces d'érosion. Le caractère généralisable est cependant jamais démontré car les tests présentés concernent des zones restreintes. La question de la détection des zones d'accumulation constituera un point innovant car non évoqué dans la littérature scientifique. La comparaison des résultats des indices et filtres entre les deux territoires d'études (Aude et île de la Réunion) très différents sur les plans géologiques, pédologiques et climatiques servira à évaluer le caractère généralisable des résultats. Ce travail sera principalement encadré par l'ONERA. Viendra ensuite le test de modèles basés sur l'intelligence artificielle selon une approche développée par le CNES pour identifier les dégâts aux vignes sur le territoire de l'Aude. Ce type de modèle nécessite une phase d'apprentissage sur un jeu de vérités terrain puis une évaluation sur un jeu différent. Il sera important de vérifier la transportabilité d'un modèle de prédiction basé sur l'IA entre les deux sites d'études qui sont bien différenciés comme déjà indiqué. La capacité de prédiction de ces différents traitements des images satellites sera évaluée statistiquement et en différenciant les types d'aléas transfert-érosion et accumulation-dépôt. Une probabilité de détection sera calculée afin d'inclure un risque d'erreur dans l'évaluation du modèle IRIP. Le CNES fournira par ailleurs des modèles numériques de terrain à la maille de 5 m avec une précision moyenne de 0.2 à 0.5 m en vertical. **Cette étape devrait durer 15 mois et se dérouler à Toulouse pour bénéficier de l'encadrement et des moyens de traitements nécessaires. Un article sur les résultats innovants est à prévoir.**

- 3/ Le modèle IRIP sera appliqué aux deux territoires d'étude à la maille de 5m (déjà réalisé à la maille de 25m pour l'Aude). Des topographies précises seront fournies par le CNES via un traitement des images satellites. Ce travail sera principalement encadré par Irstea (INRAE). **Cette étape encadrée par Irstea devrait durer 3 mois et se dérouler à Lyon.**

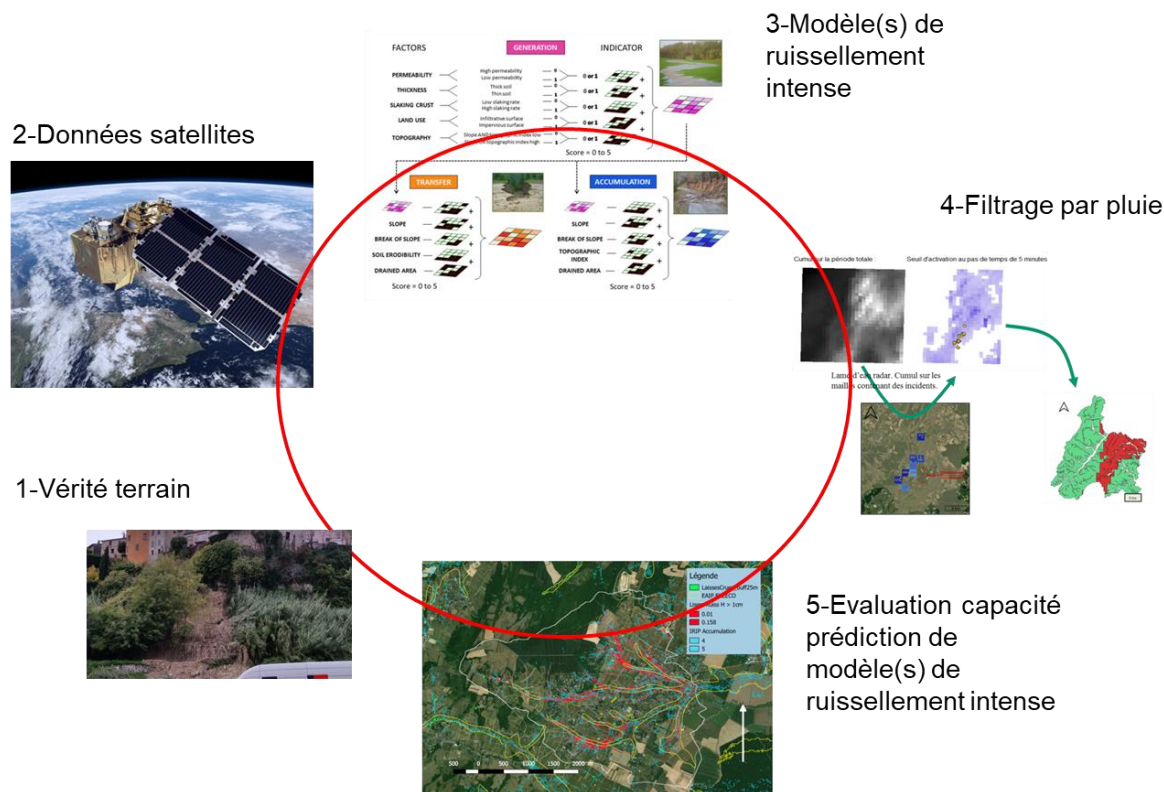
- 4/ Cette évaluation sera contrainte par l'emprise des pluies suffisamment fortes pour avoir déclenché ces dégâts. On s'appuiera pour cela sur **l'hypothèse numéro 2**. Irstea encadrera le suivi de ce travail. **Cette étape devrait durer 2 mois et se dérouler à Lyon.**

- 5/ L'évaluation de la cartographie IRIP sera basée sur la capacité du modèle à prédire des zones à forts aléas en transfert et accumulation dans les zones des vérités terrain et des dégâts télé-déTECTÉS. On espère ainsi avoir ainsi une évaluation quasi exhaustive des cartes d'aléas. Une condition de robustesse testée sur les applications IRIP réalisées sur 10 territoires appartenant à neuf hydro-écorégions différentes en France métropolitaine a permis de montrer que les prédictions étaient au minimum de 80% avec un maximum de 20% d'aléas forts dans les territoires étudiés. Les métriques d'efficacité seront la réduction du % des fausses alertes et des vérités terrain non détectées. La réduction des aires d'évaluation aux pluies intenses (étape 4) et la quasi exhaustivité des dégâts engendrés (étape 2) doivent concourir à cette amélioration de l'évaluation des cartographies produites par le modèle IRIP. Cette étape permettra de tester aussi des améliorations possibles des indicateurs du modèle lui-même, ce qui n'était pas réaliste en l'absence de données quasi exhaustive des dégâts. L'amélioration du modèle sera évaluée sur la base de l'augmentation du % de

détection et la réduction du % d'aléas forts pour un territoire donné. **Cette étape devrait durer 4 mois et se dérouler à Lyon. Un article sur l'amélioration de l'évaluation et les possibles améliorations du modèle est à prévoir.**

Les 3 mois restant sont dédiés à la rédaction de la thèse.

Le schéma suivant illustre la circulation de l'information dans le travail de thèse.



Analyse des risques liés à cette thèse

L'acquisition des vérités terrain sur le territoire de l'Aude est en partie réalisée. Elle doit être confirmée pour l'île de la Réunion mais un accord avec les services de l'Etat sera discuté avant la fin de l'année dans le cadre des actions menées avec la DGPR sur la directive inondation. Il en va de même avec les données lame d'eau radar de Météo-France dont l'essentiel est déjà disponible dans le cadre de ces actions pour la France métropolitaine.

Les données satellites sont du ressort du CNES qui dispose d'un accès privilégié pour développer la recherche. Les données pléiades THR et HF sont rapatriées des satellites à une fréquence trimestrielle pour les deux territoires étudiés. Les données des autres satellites à moins bonnes résolutions spatiale mais plus fréquentes sont aussi disponibles.

Les données en occupation du sol (THEIA/CES-BIO), les caractéristiques hydrodynamiques des sols (ESDAC) et la topographie (IGN) nécessaires au modèle IRIP sont disponibles pour la France métropolitaine. Pour l'île de la Réunion il faudra récupérer les données d'occupation des sols (IGN) et de topographie (IGN) et de pédologie. Cette dernière donnée sera recherchée auprès de la chambre d'agriculture ou tout autre organisme d'Etat.

La détection des dégâts au sol causé par l'érosion en utilisant les images satellites a déjà donné des résultats dans le stage de master d'Axelle Favro [14]. Il est espéré améliorer encore cette capacité de détection en l'étendant aux zones d'accumulation-dépôt. On évaluera l'intérêt des données satellites par leur capacité à détecter des dégâts non inventoriés mais vérifiables à partir des images en « visible » ou encore de contrôles terrain.

La méthode IRIP a été appliquée sur la totalité de la France métropolitaine en coordination avec le BRGM (rapport DGPR Breil et al., 2017). Les principes d'évaluation cartes produites ont évolué au cours du temps via les rapports annuels fournis à la DGPR (Breil et al., 2016, 2017, 2018) et une publication en cours de révision [4].

Références bibliographiques

- [1] Arnaud, P. ; Breil, P. (2019) Cartographie du ruissellement - Application des méthodes SHYREG et IRIP sur deux cas d'étude. <https://irsteadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00062032>
- [2] Auccour A.M., Bariac T., Breil P., Namour P., Schmitt L., Gnouma R., Zuddas P. (2013). Nitrogen patterns in subsurface waters of the Yzeron stream: effect of combined sewer overflows and subsurface-surface water mixing. *Water Science & Technology* Vol 68 No 12 pp 2632–2637 © IWA Publishing 2013 doi:10.2166/wst.2013.531
- [3] Benkouider, F., Hamami, L., Abdellaoui, A., Salmon, M., (2012). Extraction de routes par classification supervisée et par réseaux de neurones artificiels à partir d'images SPOT : Cas d'une ville oasienne (Algérie) [en ligne]. *Teledetection*, Editions des Archives Contemporaine / Edition scientifiques GB / Gordon and Breach Scientific Publishers, 11(1), pp. 237-249. <http://www.archivescontemporaines.com/revues/35ff.fhahshs01133603>
- [4] Braud I., Lagadec L.R., Moulin L., Chazelle B., Breil P. (under review) Evaluation of a model for mapping intense pluvial runoff hazard using proxy data of runoff-related impacts. Application to the railway context. Special Issue: Natural hazard impacts on technological systems and infrastructures; nhess-2019-208; <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci-discuss.net/nhess-2019-208/>
- [5] Breil P. et Gally T., (2019). 4.1 : CARTO ALEA (Zones inondables) 4.1.4 : Améliorations de la méthode IRIP au niveau national. Rapport DGPR/SRNH. pp25.
- [6] Breil, P. (2018). Intérêt des zones humides pour la prévention des inondations par ruissellement. *Revue Science Eaux & Territoires*, GEMAPI : vers une gestion plus intégrée de l'eau et des territoires, 26, 62-65, 09/11/2018. doi : 10.14758/SET-REVUE.2018.26.12 <http://www.set-revue.fr/interet-des-zones-humides-pour-la-prevention-des-inondations-par-ruissellement>
- [7] Breil, P. ; Gonzales Soza, E. ; Lagadec, L.R. ; Michaud, T. (2016). Expertise 'ruissellement intense', Vallon des Combes, Commune de Biot (06). Analyse et connaissance de l'événement du 03/10/2015. PUB00055537. Diffusion interne.
- [8] Breil, P. ; Bonnet Carrier, S. ; Gonzales Soza, E. ; Lagadec, L.R. (2016) Expertise de l'inondation par ruissellement intense suite à l'orage du 07/06/2016 sur la commune de Lucheux (80) <https://irsteadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00050477>
- [9] Dali, N., Derradji, Z., Breil, P. (2018). Contribution to flood risk management by the IRIP method at the level of Gareat El Taref catchment, Constantine's highlands, North-East of Algeria. *Journal of Water & Land development*, 38 (7-9): 95–104.
- [10] Dehotin, J., Breil, P. (2011a). Projet IRIP : Rapport bibliographique sur la cartographie de l'aléa inondation par ruissellement. <https://irsteadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00033498>
- [11] Dehotin, J., Breil, P. (2011b). Rapport technique du projet IRIP: Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement. <https://irsteadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00033496>
- [12] Dehotin, J., Chazelle, B., Laverne, G., Hasnaoui, A., Lambert, L., Breil, P., Braud, I. (2015a). Mise en œuvre de la méthode de cartographie du ruissellement IRIP pour l'analyse des risques liés aux écoulements sur l'infrastructure ferroviaire. *La Houille Blanche*, 6: 56-64.
- [13] Dehotin, J., Breil, P., Braud, I., de Lavenne, A., Lagouy, M., Sarrazin, B. (2015b). Detecting surface runoff location in a small catchment using distributed and simple observation method. *Journal of Hydrology*, 525: 113–129.
- [14] Favro A. (2019). « Utilisation des données satellites pour la détection des impacts du ruissellement intense au sol ». Rapport de Master Biodiversité Écologie Évolution, Spécialité : Aménagement du Territoire et Télédétection. Univ. Paul Sabatier. Toulouse. Co-encadrement ONERA/CNES/IRSTEA.
- [15] Fressignac, C., Breil, P., Matillon, Y., Nullans, A., Chazelle, B., Sarrazin, B., Vallod, D. (2016). Assurer la maîtrise du ruissellement grâce aux zones humides au voisinage des infrastructures de transport dans une perspective de conservation de la biodiversité. *Vertigo* - <http://journals.openedition.org/vertigo/17406> ; DOI : 10.4000/vertigo.17406
- [16] Gnouma R. (2006) Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron par Raouf Gnouma sous la direction de Bernard Chocat et de Pascal Breil. - Lyon, INSA. <https://www.theses.fr/fr/personnes/?q=gnouma>
- [17] Hasnaoui, A. (2013). Utilisation de la méthode Irip pour l'estimation des débits des petits bassins versants non jaugés (rapport de stage de fin d'étude), SNCF, Projets Systèmes Ingénierie.
- [18] Hostache, R., Puech, C., Raclot, D., (2007). Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR [en ligne]. *Cybergeo : European Journal of Geography*. DOI : 10.4000/cybergeo.7722. ISSN : 1278-3366 (Consulté le : 02/08/2019) <https://journals.openedition.org/cybergeo/7722>
- [19] Koena Sepuru and Timothy Dube (2017) An appraisal on the progress of remote sensing applications in soil erosion mapping and monitoring. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.10.005>
- [20] Lagadec L.R. (2017). Evaluation et développement de la méthode IRIP de cartographie du ruissellement. Application au contexte ferroviaire. <http://www.theses.fr/2017GREAU039>
- [21] Lagadec, L.-R., Braud, I., Breil, P., Chazelle, B., Moulin, L. (2018). Présentation et évaluation d'une méthode de cartographie du ruissellement pour améliorer la gestion des risques liés à l'eau sur les voies ferrées. Article du Congrès Lambda Mu 19 de Maîtrise des Risques et Sécurité de Fonctionnement. Dijon 21-23 oct. 2018, France <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02072678>
- [22] Lagadec, L.R., Breil, P., Chazelle, B., Braud, I., Moulin, L. (2016). Use of post-event surveys of impacts on railways for the evaluation of the IRIP method for surface runoff mapping, *FLOODRisk*, E3S Web Conf. 7 10005, 17-21 October 2016, doi: 10.1051/e3sconf/20160710005.
- [23] Lagadec, L.-R., Moulin, L., Braud, I., Chazelle, B., Breil, P. (2018). A surface runoff mapping method for optimizing risk analysis on railways. *Safety Science* - Special issue: Railway Safety, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01549762/document>, doi: 10.1016/j.ssci.2018.05.014
- [24] Lagadec, L.-R., Patrice, P., Chazelle, B., Braud, I., Dehotin, J., Hauchard, E., Breil, P. (2016). Description and evaluation of an intense surface runoff susceptibility mapping method. *Journal of Hydrology*, 541, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.05.049
- [25] Poulard, C., Royet, P., Leblois, E., Faure, J.-B., Breil, P., Proust, S., Deroo, L. (2017). Gérer des inondations par des ouvrages dispersés sur le bassin versant : principes et méthodes de diagnostic d'efficacité probabiliste. *Sciences Eaux & Territoires*, 23(2): 34-41.
- [26] Radojevic B. (2002) Méthode d'évaluation de l'influence urbaine sur le régime des crues d'un bassin versant de 130 km2. Thèse sous la direction de Bernard Chocat – INSA-Lyon et co-direction de Pascal Breil – Cemagref-Lyon <https://www.theses.fr/fr/personnes/?q=Radojevic>
- [27] Rouhana, R., (1998). Détection des linéaments dans les images de RADARSAT par un réseau neuronique cellulaire [en ligne]. Mémoire Master : Technologie des systèmes. Montréal : Ecole de technologie supérieur – Université du Québec, 96p. <https://www.etsmtl.ca/ETS/media/ImagesETS/Labo/LIVIA/memoires/TH-1998-rouhana.pdf>
- [28] Sepuraa, T.K., Dubeb, T. (2018). Understanding the spatial distribution of eroded areas in the former rural homelands of South Africa: Comparative evidence from two new noncommercial multispectral sensors. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation* 69 (2018) 119–132. <http://repository.uwc.ac.za/xmlui/handle/10566/3582>