



**HAL**  
open science

## **CARTO ALEA (Zones inondables) action 4.1.4: IRIP Valid**

Pascal Breil, Arnaud Cerbelaud, Jonathan Conteras Cobos, Noémie Sagnimorte, Christine Poulard

► **To cite this version:**

Pascal Breil, Arnaud Cerbelaud, Jonathan Conteras Cobos, Noémie Sagnimorte, Christine Poulard. CARTO ALEA (Zones inondables) action 4.1.4: IRIP Valid. [Rapport de recherche] INRAE RiverLy; CNES - Centre national d'études spatiales; ONERA – The French Aerospace Lab. 2022. hal-03634311

**HAL Id: hal-03634311**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03634311v1>**

Submitted on 7 Apr 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.

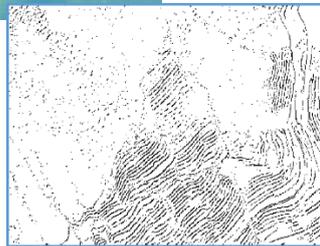
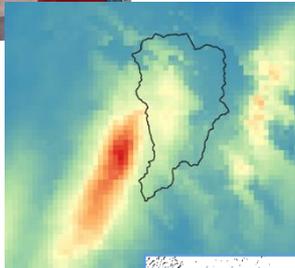
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**PROGRAMME MTES (DGPR / SRNH) - INRAE 2021**  
**Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques**

*Ces travaux bénéficient du soutien du Ministère chargé de l'environnement, de l'énergie et de la mer  
par décision de subvention n°21367400*

## **4.1 : CARTO ALEA (Zones inondables)**

### **4.1.4 : IRIP Valid**



DECEMBRE 2021 (Mars 2022)

**Breil Pascal (INRAE)**  
**Cerbelaud Arnaud (CNES-ONERA)**  
**Contreras Jonhatan (INRAE)**  
**Sagnimorte Noemie (INRAE)**  
**Poulard Christine (INRAE)**

INRAe, Unité de recherche RIVERLY  
5, rue de la Doua  
CS 20244,  
69625 Villeurbanne cedex

[www.inrae.fr](http://www.inrae.fr)



## Table des matières

I.	Préambule .....	4
a.	Les acteurs de cette action.....	4
b.	La thèse a produit 3 publications : .....	4
II.	Evaluation des dommages à partir d'images satellites Sentinel2 .....	6
a.	Matériel .....	6
b.	Méthode.....	6
c.	Résultats .....	7
d.	Les taux d'apprentissage .....	8
e.	Liaison entre probabilité de dommage « satellite » et déclaration de calamités agricoles....	9
f.	Liaison entre probabilité de dommage « satellite » et potentiel d'aléas de ruissellement intense (modèle IRIP) .....	10
g.	Analyse visuelle des effets de l'aléa de transfert fort .....	12
h.	Premières conclusions sur l'utilisation des images satellites.....	17
III.	Evaluation du rôle des terrasses agricoles vis-à-vis du ruissellement intense.....	17
a.	Hypothèse de travail .....	18
b.	Méthodes .....	18
c.	Résultats de la simulation numérique (Sagnimorte, 2021).....	18
d.	Résultats de l'approche statistique .....	20
e.	En conclusion.....	21
IV.	Utilisation des données de lame d'eau radar pour évaluer le cartographie IRIP .....	22
a.	Méthode (reprise de l'action 4.1.4 – 2018).....	22
b.	Application aux données de probabilité de dommages « satellites ».....	23
c.	Interface d'exploration spatiale et temporelle des données de lames d'eau radar .....	26
d.	Description de la chaîne de traitement des données de lame d'eau radar (C. Poulard) .....	27
V.	Annexe.....	34
a.	Annexe 1.....	34
b.	Annexe 2.....	36
c.	Annexe 3.....	37

## I. Préambule

### a. Les acteurs de cette action

Cette action 4.1.4 a été construite en 2020 pour palier au problème de l'évaluation des modèles de ruissellement qui sont proposés au niveau du SRNH dans le cadre de la Directive Inondation. Pour ce faire INRAE-RiverLy a co-rédigé un sujet de thèse avec le CNES et l'ONERA. La thèse est co-financée par le CNES et l'ONERA et est co-encadrée avec INRAE qui fournit le modèle IRIP et contribue via cette action DGPR aux moyens pour les missions, l'acquisition de données payantes, les frais de publication et de stage de master.

La thèse a démarré en octobre 2020. Trois zones d'études ont été retenues en 2021 : l'Aude qui a subi de fortes inondations en octobre 2018, la tempête Alex qui a frappé les Alpes Maritimes en octobre 2020 ainsi que deux cyclones qui ont frappé l'île de la Réunion en janvier et en avril 2018. Cette dernière zone a été retenue car elle dispose de longues séries de couvertures satellite et radar météo ainsi que des records de pluie au niveau mondial. Cela peut être considéré comme une préfiguration des événements méditerranéens en lien avec le changement climatique. Des missions de terrain ont été organisées en 2021 sur chacun des sites afin de collecter des informations directes (Retex post tempête Alex), ou indirectes (déclarations de calamités agricoles, coupures de routes, coulées de boue, documents et aménagements post crises) en rencontrant les services de l'Etat (DDTM, DEAL). Ces visites ont aussi permis d'évaluer à partir de « vérités terrain » les performances du modèle de détection basé sur les données satellites.

Cette action (rappel en annexe 0) explore la possibilité de géolocaliser après un événement pluvieux fort les modifications qui apparaissent entre deux images satellites prises avant et après l'événement de pluie. L'intérêt est de couvrir l'étendue de la zone sinistrée en complément de vérification terrain qui seront toujours partielle (contraintes de temps et d'accessibilité). L'objectif est d'accéder à une connaissance quasi exhaustive des points d'impacts avant que le temps ou l'action humaine ne les effacent. Le cas échéant, cela permettra d'évaluer sans biais important de méconnaissance (zone impactées non déclarées, non vues) les cartographies prédictives des aléas du ruissellement intense telles que proposées par le modèle IRIP.

Cette démarche est couplée à celle de l'usage des données de lames d'eau radar produites par Météo-France. En effet, les impacts et dommages liés au ruissellement intense nécessitent que les cumuls de pluie soient suffisants. Le croisement des points d'impacts avec les caractéristiques des pluies permet d'évaluer des seuils de cumul de pluie nécessaires à déclencher des dommages. Il est alors possible de restreindre l'évaluation d'un modèle de cartographie prédictive à la partie du territoire « où il a suffisamment plu ».

### b. La thèse a produit 3 publications :

1. La première fait suite à une présentation par A. Cerbelaud (thésard) dans le cadre du colloque SHF « Risque ruissellement : Diagnostic et Solutions » qui s'est tenu en décembre 2020. L'article a été publié dans la Houille Blanche<sup>1</sup>. Il présente les premiers résultats de l'analyse réalisée sur le territoire de l'Aude pour évaluer la sensibilité de différents indices et filtres spectraux. Les images sentinel2 (résolution spatiale de 10m) sont disponibles de manière régulière et donc avant et après un événement de pluie majeur. L'unité de travail est la parcelle cadastrale non urbanisée car la résolution des images sentinel2 ne permet de voir des détails infra-décamétriques. La base des vérités terrain comprend plusieurs centaines de parcelles endommagées et non endommagées. Ce jeu d'apprentissage est constitué à partir des déclarations de calamités agricoles, de visites de terrain et d'une expertise visuelle

---

<sup>1</sup> <https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/abs/2020/06/lhb200101/lhb200101.html>

sur image Pléiade à très haute résolution (0.5m). En effet, une image Pléiade est souvent disponible après un événement majeur, car commandé par l'EMS (Copernicus Emergency Management Service) sur la demande des services nationaux européens de gestion de crise (la sécurité civile en France). L'article propose un premier modèle de comparaison entre images avant et après événement;

2. La seconde, publiée dans les actes du colloque « International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2021 »<sup>2</sup> est plus technique. Elle présente l'intérêt d'éliminer un bruit saisonnier qui permet de gagner en capacité de détection. Un taux de détection de plus de 90% des vérités terrain (plusieurs centaines) est atteint. Le modèle de comparaison des images avant-après événement est entraîné sur une partie des parcelles agricoles endommagées puis évalué sur le reste des parcelles endommagées ou non. Cette étude confirme l'importance de combiner information spectrale, temporelle et contextuelle pour détecter à l'aide de l'imagerie optique les dommages engendrés par des pluies extrêmes, en particulier ceux causés par le ruissellement pluvial;

3. La troisième publication (2022) vient d'être publiée dans un journal international. Elle montre que le modèle de détection des parcelles endommagées, calé sur des données de l'Aude (Octobre 2018), est tout aussi efficace dans les Alpes Maritimes (Octobre 2020). Ce résultat atteste de la robustesse du modèle. Il reste à le confirmer sur la troisième zone d'étude qui est l'île de la Réunion.

En appui à ce travail de thèse, un stage de M2 a évalué, sur un plan statistique, le rôle des terrasses agricoles, en usage ou non, sur la présence des dommages dans les parcelles. En effet, le territoire des Alpes Maritimes comprend beaucoup de ces terrasses dans son paysage. Les tests menés sur le bassin versant de la Vésubie avec le modèle de comparaison d'images satellites Sentinel2 montrent que la probabilité de dommage des parcelles diminue en présence des terrasses. Ce résultat fait sens avec ce que montre d'autres études (bibliographie) ainsi que le résultat d'un autre master qui a développé une approche purement numérique (modèle Hydrus 2/3D).

L'acceptation pour publication des travaux basés sur la télédétection par des réviseurs externes atteste de la rigueur des résultats produits. A ce stade nous considérons que les taux de détections des dommages proposés par l'analyse des images satellites entre avant et après événement sont déjà utilisables pour évaluer les cartographies IRIP ainsi que d'autres modèles.

---

<sup>2</sup> <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLIII-B3-2021/693/2021/isprs-archives-XLIII-B3-2021-693-2021.pdf>

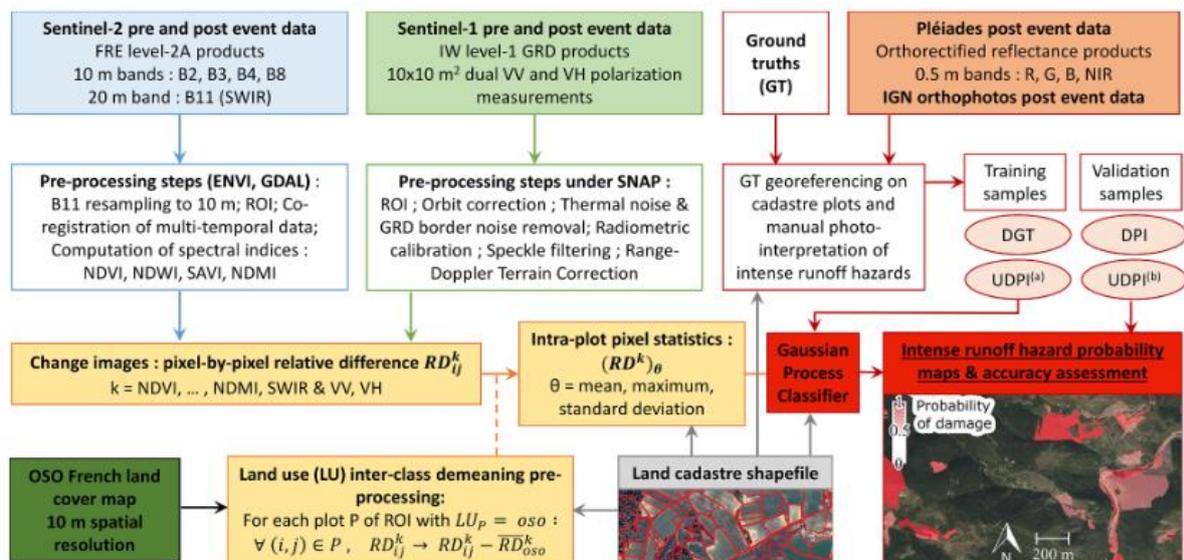
## II. Evaluation des dommages à partir d'images satellites Sentinel2

### a. Matériel

L'intérêt des images Sentinel2 est qu'elles sont acquises et stockées de manière régulière, en moyenne tous les 5 jours, avec une résolution de 10m. Les 4 bandes spectrales vont du visible au proche infra-rouge. Ces images sont produites par le programme Européen Copernicus. Elles sont accessibles sur différentes plateformes, dont celle du CNES. Les images sont livrées selon différents niveaux de prétraitements (ortho-correction, nébulosité, ...). En complément, l'utilisation d'images Pléiades à très haute résolution (0.5m) est possible *a posteriori* car les données sont souvent rapatriées au sol durant, ou alors juste après, des catastrophes naturelles par le « Emergency Centre Disaster Recovery Plan » de l'Agence Spatiale Européenne. Les images Sentinel2 sont fournies sous forme de dalle de 20km par 20km, soit 400 km<sup>2</sup>. Cela permet en général de couvrir assez bien les zones fortement impactées par un événement de pluie majeur.

### b. Méthode

La sélection des images les plus proches avant et après un événement de pluies intenses constitue la première étape du travail. Il faut en effet s'assurer de la qualité des images. La couche du parcellaire cadastral (Sc. IGN) est ensuite utilisée pour réaliser un découpage de l'espace en entités considérées comme homogènes du point de vue de l'usage du sol pour les parties agricoles et naturelles. Toutes les parcelles non agricoles et non naturelles sont exclues de l'analyse, ce qui englobe les surfaces urbanisées, les zones industrielles, les surfaces en eau (etc). Le principe est l'analyse de variance intra parcelle des différentes longueurs d'ondes réfléchies par les pixels de 10m, à base d'indices éprouvés pour comparer des images. Les calculs réalisés par la suite font appel à des traitements multiples et des algorithmes complexes (figure ci-dessous), basés sur l'apprentissage à partir de « vérités de terrain ». Ces vérités sont tirées soit des déclarations de calamités agricoles qui ont été bancarisées dans le cadre du rapport 4.1.4-2019 (DDTM66 et DDTM11) mais aussi d'observations via des images Pléiades dans le cadre de la thèse co-encadrée avec le CNES et l'ONERA depuis fin 2020. Pour donner l'esprit de la démarche, on peut résumer l'évaluation des dommages à la comparaison des variances intra parcelle « avant / après » des pluies intenses. La variance intra parcelle est corrigée de sa variance saisonnière qui dépend des pratiques agricoles et des états végétatifs des cultures. Cette correction est réalisée en traitant plusieurs images antérieures à l'événement, prise dans différentes saisons, en l'absence d'événement de pluie majeur entre ces images. Le résultat final est une probabilité, comprise entre 0 et 1, de dommage détecté dans chaque parcelle.

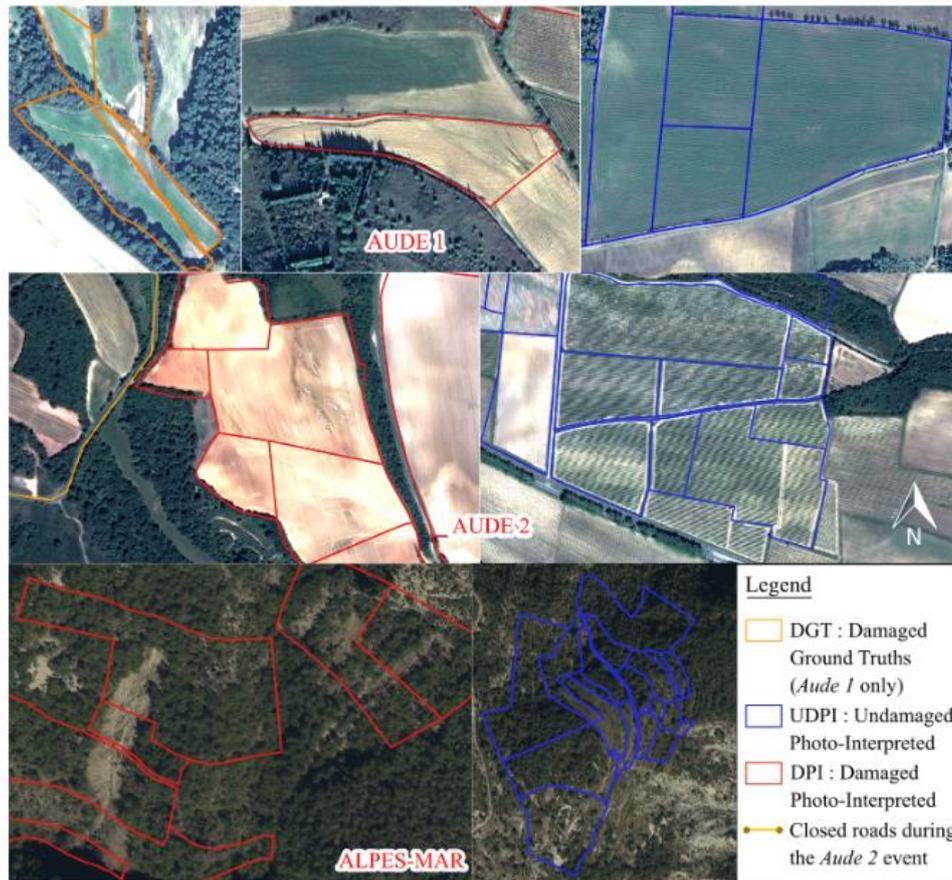


Circuit de traitement des images pour l'Aude et les Alpes Maritimes (Cerbelaud et al., 2021)

Les données d'apprentissage servent à « caler » la méthode d'évaluation. Il faut sélectionner à la fois des parcelles visiblement fortement affectées, moyennement affectées, peu et pas affectées.

### c. Résultats

Il sont détaillés dans une publication<sup>3</sup> et nous ne reprenons ici que quelques-uns des résultats. Cela permet d'exprimer un gradient de réponse. L'image ci-après visualise ce type de sélection avec une légende explicite. Les coupures de route sont des « vérités terrain » utilisables en calage ou vérification.



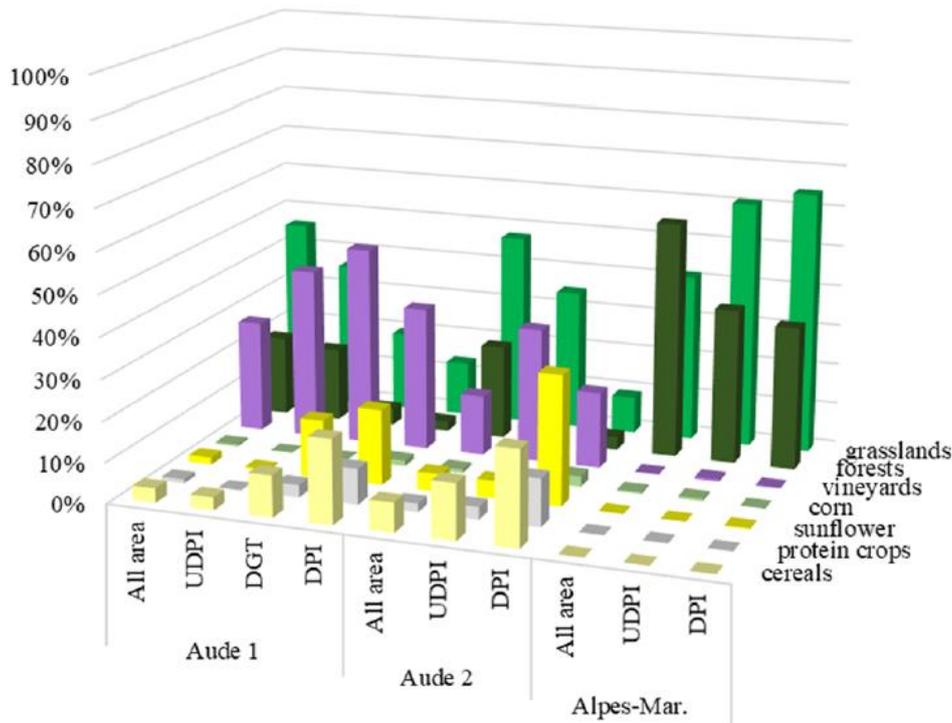
Le nombre de parcelles sélectionnées est de plusieurs centaines pour chacune des catégories (endommagées ou non) et selon que la vérité terrain est liée à l'expertise sur image Pléiade ou sur des données observées directement sur le terrain. Ces jeux contiennent pour moitié des données utilisées pour caler le modèle prédictif et pour moitié servent à l'évaluation des prédictions. Le tableau suivant (Cerbelaud et al., 2021) résume l'échantillon statistique. A titre de comparaison, pour l'Aude il y a 219 331 parcelles rurales dans l'image Sentinel2 traitée, ce qui indique que le % de parcelles d'apprentissage est de l'ordre de 0.5%.

Characteristics of sample classes in the three study zones.

Sample class	Aude 1: Oct. 15, 2018				Aude 2: May 11, 2020				Alpes-Mar: Oct. 3, 2020			
	Number of plots	Total surface (km <sup>2</sup> )	Median plot area (ha)	Mean slope (°)	Number of plots	Total surface (km <sup>2</sup> )	Median plot area (ha)	Mean slope (°)	Number of plots	Total surface (km <sup>2</sup> )	Median plot area (ha)	Mean slope (°)
UDPI (Undamaged photo-interpreted)	480	11.6	1.27	3.2	497	6.8	0.72	5.6	571	2.6	0.15	24.4
DGT (Damaged ground truths)	310	5.5	0.98	3.1								
DPI (Damaged photo-interpreted)	362	8.8	1.34	2.1	184	5.5	1.10	2.7	435	4.7	0.27	26.5

<sup>3</sup> Cerbelaud A., Roupioz L., Blanchet G., Breil P., Briottet X. (2021) A repeatable change detection approach to map extreme storm-related damages caused by intense surface runoff based on optical and SAR remote sensing: Evidence from three case studies in the South of France. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 182, December 2021, Pages 153-175 <https://doi.org/10.1016/j.isprs.2021.10.013> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271621002811>

La nature des cultures est aussi considérée car il faut disposer d'un large spectre de réponse pour l'apprentissage algorithmique. On peut noter la faible représentativité des cultures dans le bassin versant de la Vésubie dans les Alpes Maritimes, ainsi que le montre la figure suivante.



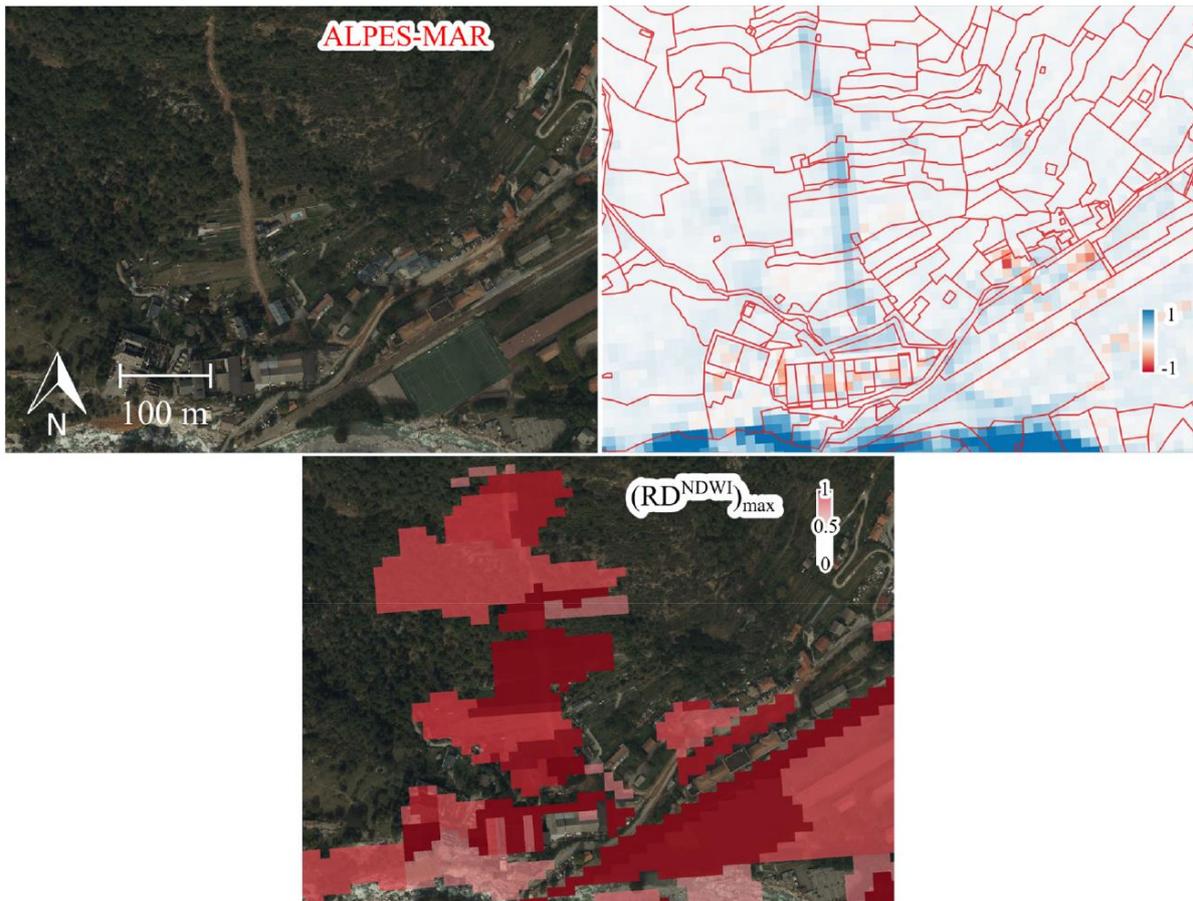
#### d. Les taux d'apprentissage

La capacité du modèle de comparaison est illustrée dans le tableau suivant (Cerbelaud et al., 2021) qui montre les scores de détection pour les parcelles endommagées (DPI), non endommagées (UDPI), les faux positifs (parcelles classées en dommage par le modèle alors qu'elles ne le sont pas d'après les données terrain ou l'expertise visuelle via Pléiade, et les faux négatifs (parcelles endommagées non vues par le modèle). Globalement les taux de détection sont proches de 90%. L'objectif est aussi d'abaisser au possible les taux de fausses alarmes, ce qui est le cas avec l'indice SAVI-Mean en comparaison de l'indice NDWI – Max, avec une moyenne de 9%.

Overall accuracy, producer accuracy by class and false alarm rates from closest change images using optical indicators only.

	550 training plots from <u>Aude 1 - Oct. 15, 2018</u> : 240 UDPI <sup>(1,a)</sup> and 310 DGT <sup>(1)</sup>					
	<u>Aude 1 - Oct. 15, 2018</u> 602 validation plots: 240 UDPI <sup>(1,b)</sup> and 362 DPI <sup>(1)</sup>		<u>Aude 2 - May 11, 2020</u> 681 validation plots: 497 UDPI <sup>(2)</sup> and 184 DPI <sup>(2)</sup>		<u>Alpes-Mar - Oct. 3, 2020</u> 1006 validation plots: 571 UDPI <sup>(3)</sup> and 435 DPI <sup>(3)</sup>	
Optical indicators ( $RD^*$ ) <sub>o</sub> combination	1. NDVI - Std 2. NDWI - Max	1. NDVI - Std 2. SAVI - Mean	1. NDVI - Std 2. NDWI - Max	1. NDVI - Std 2. SAVI - Mean	1. NDVI - Std 2. NDWI - Max	1. NDVI - Std 2. SAVI - Mean
Overall accuracy	89%	89%	91%	89%	88%	83%
UDPI	84%	88%	92%	95%	94%	97%
DPI	92%	89%	86%	71%	80%	65%
False discovery rate	10%	8%	19%	15%	9%	5%
False positive rate	16%	12%	8%	5%	6%	3%

Un exemple d'application concret, pris dans les Alpes Maritimes, est présenté dans la figure suivante (Cerbelaud et al., 2021) qui illustre une ligne d'érosion concentrée (image haute gauche) dont nous retrouvons la trace avec l'un des indices du modèle RD-NDVI appliqué à deux images Sentinel2, situées avant et après la tempête Alex (2020). L'image du bas restitue l'information à l'échelle des parcelles traversées qui sont alors affectées d'un niveau de probabilité d'endommagement. Les taux de détections augmentent avec l'intégration des variations saisonnières (Cerbelaud et al., 2021).



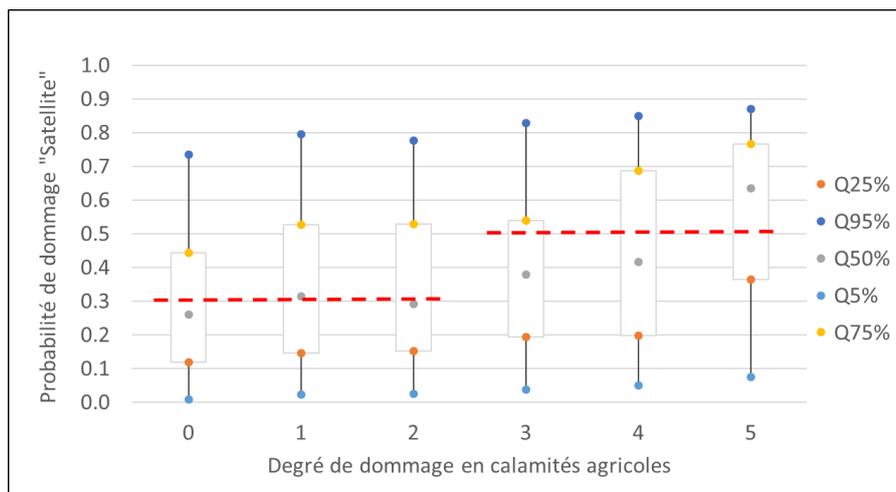
L'attribution au niveau de la parcelle des variations des indices calculés (NDWI, ...) depuis des pixels décimétriques est justifié ici par le fait que ce calcul est réalisé par parcelle. Ce choix repose sur l'hypothèse que l'usage du sol est en grande partie homogène dans les parcelles en prairie, pelouse, culture, y compris les vignes. Cette hypothèse est testée par exemple sur le bassin versant de la Vésubie (400km<sup>2</sup>, Alpes Maritimes). En se référant aux usages cités ci-avant, on constate que 26% des parcelles n'ont pas une occupation du sol homogène, que le % d'écart moyen à l'usage du sol qui domine est de 2%, avec un maximum de 19%. Nous considérons donc l'hypothèse de départ comme valide.

Un autre point de discussion concerne l'effet taille des parcelles. On constate sur l'image précédente que les niveaux de probabilité de dommage des parcelles traversées sont différents (nuances de couleurs rouge clair à rouge intense). On distingue assez bien le fait que le nombre relatif de pixels affectés (c'est à dire qui ont changé de signature radiométrique entre avant et après la tempête Alex) détermine le niveau de probabilité de dommage. Il faut donc pour la suite intégrer cette « lecture » de la probabilité dans les comparaisons avec d'autres sources d'informations comme les déclarations de calamités agricoles (cas de l'Aude) qui sont déjà à l'échelle de la parcelle et les prédictions IRIP qui sont, quant à elles, à l'échelle du pixel. Il faut donc considérer pour IRIP de rapporter le nombre de pixels en aléas à celui du nombre de pixels dans la parcelle.

#### e. Liaison entre probabilité de dommage « satellite » et déclaration de calamités agricoles

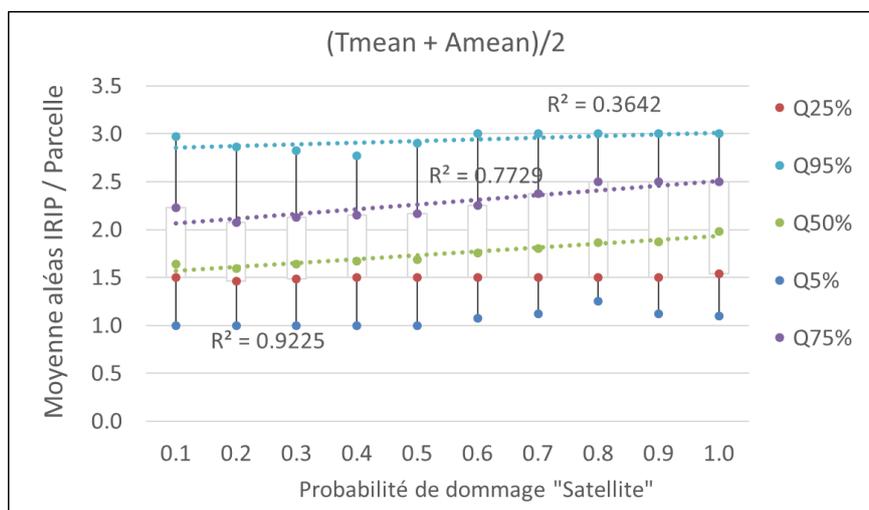
La base de données des calamités agricoles de l'Aude contient 1234 parcelles dans l'image satellite utilisée pour évaluer les dommages liés aux pluies intenses de 2018. Il est intéressant de comparer ces deux sources d'évaluation des dommages, en particulier au niveau de leurs intensités puisque les probabilités de dommage varient entre 0 (pas de dommages) et 1 (plus forte variation des signaux spectraux et indices associés) et que les déclarations de calamités agricoles contiennent un degré qui varie de 0 (moins de 10%) à 5 (100%) pour préciser l'emprise des dommages sur une parcelle.

Le graphique suivant illustre bien, à partir des distributions de fréquences, une relation croissante entre les gradients de dommages tirés de deux sources d'évaluation différentes. Il faut cependant considérer qu'une partie des données des déclarations en calamités agricoles a servi, avec les expertises visuelles via les images très haute résolution de Pléiade, à l'apprentissage du modèle qui produit les probabilités de dommage à partir des images Sentinel2. Néanmoins, la notion de degré de dommage n'entrait pas en ligne de compte, seulement la notion de dommage. La tendance croissante des différents quantiles avec le degré de dommage en calamités agricoles est donc interprétable. Il est à noter un « saut » des valeurs médianes (Q50%) des distributions entre le groupe 0-1-2 et 3-4-5, dont les valeurs moyennes de probabilité de dommage (tirets rouges) sont respectivement de 0.3 et 0.5. Cette valeur seuil de 0.5 de probabilité de dommage est d'ailleurs retenue dans les articles publiés pour distinguer les parcelles (>0.5) qui ont été assez fortement à très fortement impactées de celles qui sont peu ou pas, cela pour tenir compte de « bruits » non réductibles du fait de la diversité des signaux des surfaces traitées.



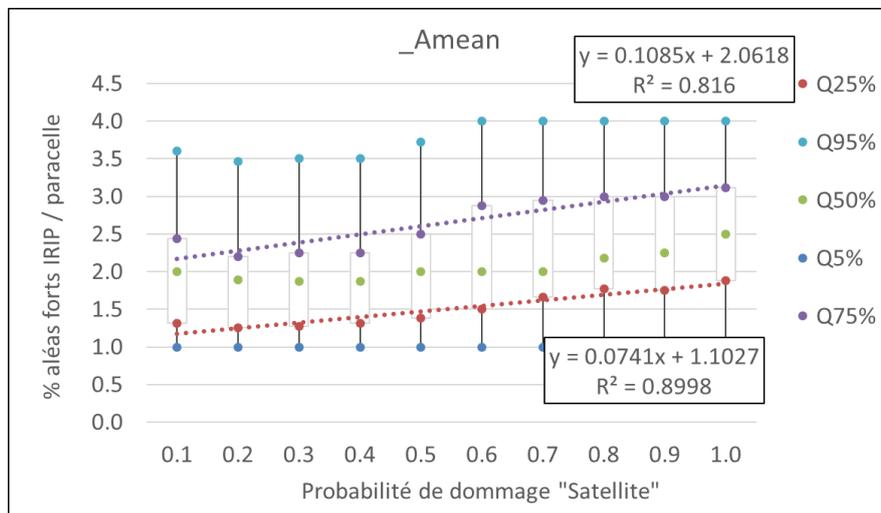
f. Liaison entre probabilité de dommage « satellite » et potentiel d'aléas de ruissellement intense (modèle IRIP)

Il est aussi intéressant d'évaluer la cohérence entre les probabilités de dommages et le potentiel de ruissellement calculé par la méthode IRIP au niveau des parcelles cadastrales. La figure suivante trace ainsi le potentiel moyen des parcelles pour les aléas Accumulation et Transfert dans le bassin versant de la Vésubie (400Km<sup>2</sup>, Alpes Maritimes, tempête Alex octobre 2020). Le nombre de parcelles est de 27406. Il n'y a pas de seuil de pluie imposé car nous regardons le lien entre deux gradients, de manière globale. Les parcelles avec une probabilité de dommage >0.5 représente 15% de la totalité des parcelles.

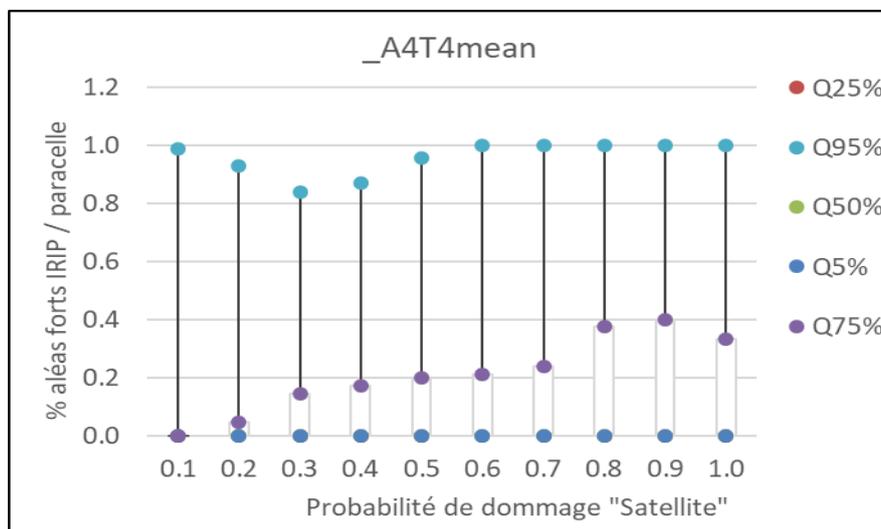


Le premier graphe montre une proportionnalité positive entre l'aléas d'accumulation et la probabilité de dommage vue par les images satellites, en particulier entre les quartiles 50% et 75%, un peu moins pour le quantile 95% si l'on se réfère aux coefficients de détermination des régressions figurées en pointillés. Il s'agit cependant d'une vision des aléas moyens de transfert et d'accumulation pris entre 0 et 5 dans chaque parcelle.

La même tendance apparaît ci-dessous pour l'aléa d'accumulation seul sur l'interquartile 25%-75%.



Une autre manière de tester cette relation est d'utiliser une combinaison des aléas les plus forts proposés par la méthode IRIP. Ainsi nous pouvons considérer les aléas de transfert et d'accumulation  $\geq 4$ . La relation positive entre les deux gradients ici apparaît clairement pour le quartile 75%. Il faut cependant comprendre l'écrasement des distributions de fréquence dans les classes de dommage. En effet, les quantiles inférieurs à partir de la médiane sont tous à «0», ce qui signifie que plus de 50% des parcelles classées en dommage présentent aucun aléas forts IRIP.

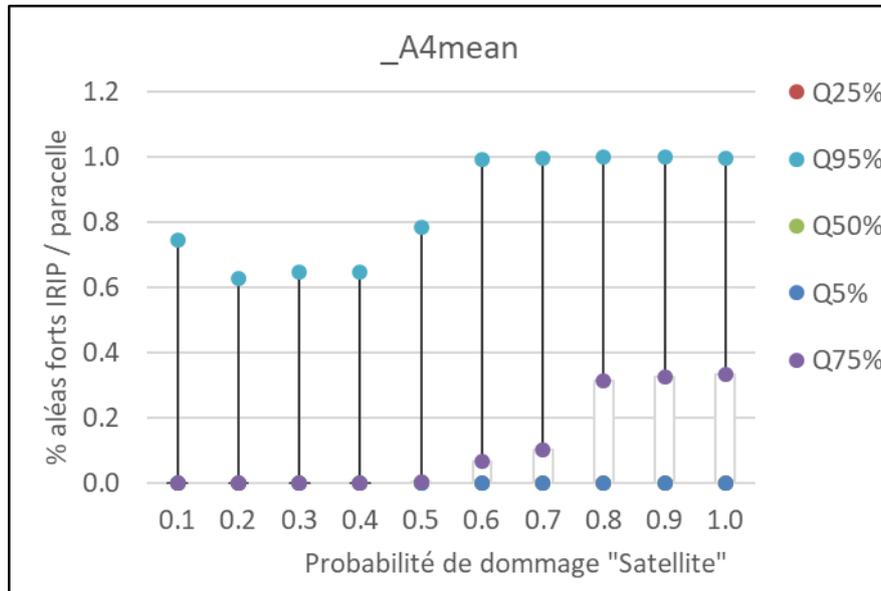


Le tableau ci-après indique le % de parcelles sans aléas forts par rapport au nombre total de parcelles traitées (24758), par classe de dommage. La seconde ligne du tableau donne le % de parcelles dans chaque classe. Nous voyons que les effectifs par classe décroissent rapidement depuis 22% jusqu'à 1.2 %, ce qui représente des effectifs allant de 5598 parcelles avec pas ou peu de dommages à 288 parcelles pour les plus endommagées.

% parcelles avec 0 aléas forts	76%	73%	67%	64%	63%	61%	61%	56%	56%	51%
% de parcelles par classe de dommage	22.6%	19.1%	21.3%	13.5%	8.5%	6.6%	3.5%	2.1%	1.5%	1.2%

Le tableau montre que pour les classes de probabilité de dommage  $>0.5$ , nous avons en moyenne 55% des parcelles vues comme assez fortement endommagées qui ne contiennent pas d'aléas forts IRIP. C'est à ce niveau que l'on peut se demander si la quantité de pluie reçue ne joue pas un rôle (§ IV. b, p24).

Il est aussi intéressant de regarder la contribution du transfert ( $T \geq 4$ ) dans la liaison T4A4 avec les classes de dommage. Nous voyons que le Transfert fort contribue à relever sensiblement le quartile 75% depuis la classe 0.2 jusqu'à la classe 0.9, ce qui donne une meilleure progression de la relation entre les deux gradients.



De ces comparaisons il ressort que les « quantités » en aléas forts du modèle IRIP, que l'on exprime en % de surface des parcelles concernées, sont cohérentes avec les classes de probabilité de dommage issues du traitement des images satellites. Cela confirme les résultats de l'article publié (A. Cerbelaud et al., 2021).

Les aléas de transfert fort ( $T \geq 4$ ) et d'accumulation fort ( $A \geq 4$ ) représentent respectivement 4.33% et 4.15% de la surface totale du bassin versant de la Vésubie. La contribution de l'aléa de transfert fort dans les faibles à fortes probabilités de dommage n'est donc pas liée à une sous-représentation spatiale du point de vue du modèle IRIP. Cependant, nous constatons ici que l'aléa d'accumulation est prépondérant dans les classes fortes de dommages. Est-ce un biais inhérent à la méthode d'analyse des images satellites ? L'aléas d'accumulation est-il mieux détecté ? Nous évaluons cette question ci-après à partir d'exemples concrets.

#### g. Analyse visuelle des effets de l'aléa de transfert fort

En terme de traitement des images, le modèle fait appel à des indices classiques de la télédétection (cf. rapport action 4.1.3 de 2020). Les expertises visuelles donnent aussi de bons résultats pour ce qui est de l'aléa d'accumulation qui se traduit par des dépôts assez continus avec des emprises souvent supérieures à la taille du pixel Sentinel2 (10m). Pour ce qui concerne l'aléa de transfert, il est associé à un processus d'érosion quand il est intense sur un sol peu cohésif, mais aussi à la mise en mouvement et déplacement d'éléments au sol dont des cailloux, des roches, des coulées boueuses, des accumulations de flottants comme les branches, des feuilles, le couchage de l'herbe. Il peut décaper un sol peu épais dans une pente, mobiliser la charge caillouteuses et la déposer en nappe y compris dans des pentes fortes dès lors que l'énergie du transport n'est plus suffisante. Nous analysons ci-après quelques cas pour montrer la diversité de sa manifestation et la complexité qui en découle pour le capter à partir d'images satellites, en particulier à la résolution Sentinel2 de 10m. Mais la raison est sans doute aussi dans la recherche d'indices plus adaptés à des processus de décapage suivi de dépôts clairsemés dans le sens de la pente. Les images suivantes sont prises dans le bassin versant de la Vésubie. Les pixels en rouge et en bleu

font 25m de côté. Ils représentent respectivement les aléas forts de transfert et d'accumulation (T et A  $\geq 4$ ). Les flèches indiquent les directions et sens d'écoulements majeurs. Les polygones en jaune, orange et rouge sont des parcelles affectées des probabilités de dommages, via les images Sentinel2, comprises respectivement entre 0.4-0.6 ; 0.6-0.8 et 0.8-0.99 .



Un zoom est réalisé sur l'image précédente pour analyser les effets du transfert érosif prédit par le modèle IRIP (pixels rouges). La route qui nous intéresse ici est hors domaine privé (en limite de parcelles).



L'image suivante est extraite de la source IGN<sup>4</sup> qui permet de comparer à partir de photos aériennes une situation avant (gauche) et après (droite) la tempête Alex. On note à l'aide des cadres repères que la roche qui surplombe la route (cadre gauche) a été « lustrée » ou « rabotée ». La route située dans le cadre est couverte de cailloux qui ont transités par cet axe. En l'occurrence le modèle de probabilité de dommage a bien détecté des changements de surface puisque les parcelles sont dans les classes jaune et orange. Le modèle IRIP a aussi prédit un fort potentiel de ces secteurs à produire du transfert de ruissellement depuis le cadre blanc haut à celui situé plus bas dans la photo aérienne. Cela illustre la cohérence des deux méthodes mais l'évaluation de la probabilité de dommage reste basse aux alentours.



Le cas suivant illustre une connexion entre une zone de transfert et une zone d'accumulation. Des troncs d'arbres couchés servent de repère juste au-dessus des pixels de transfert (rouge) du milieu de l'image. Les probabilités de dommage sont aussi basses pour la parcelle concernée car elle est  $\leq 0.4$ .



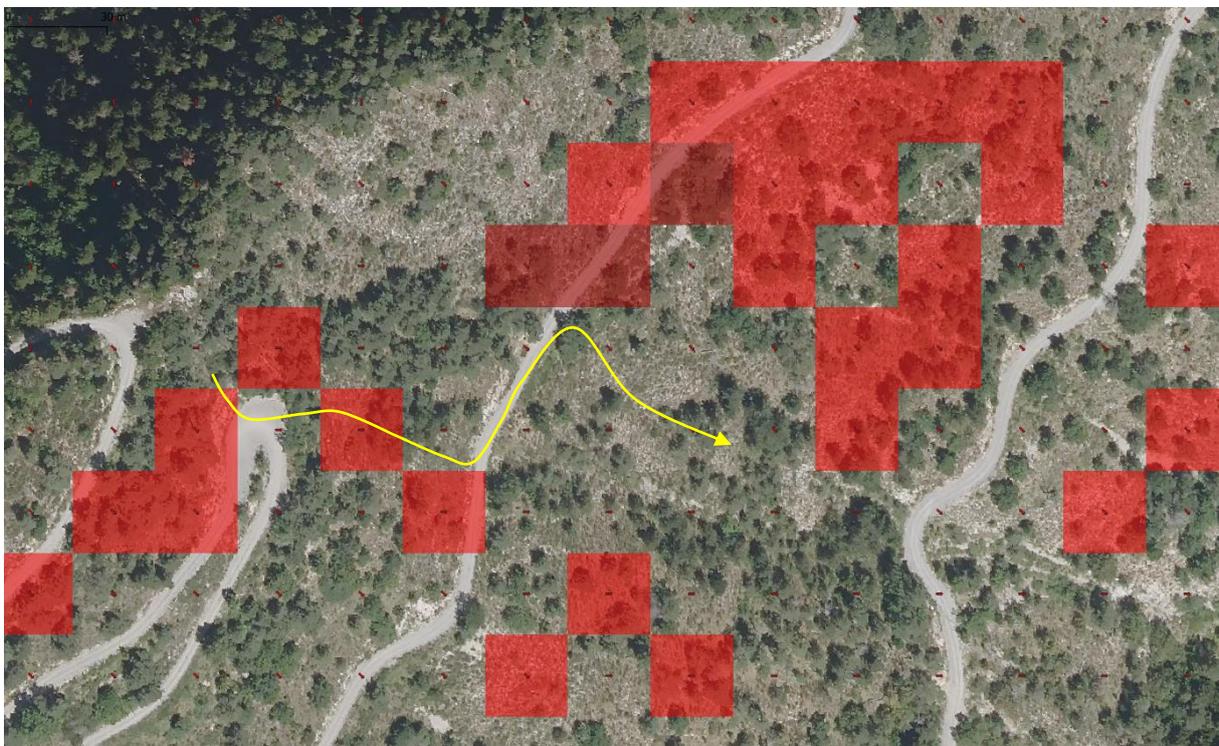
Ensuite, les images comparées depuis le site IGN<sup>5</sup> montrent que la zone de transfert révèle des déplacements de cailloux selon les directions d'écoulement, la disparition mais aussi l'apparition de certains détails très fins comme des cailloux roulés, découverts, et aussi des ridules d'herbes couchées

<sup>4</sup><https://alex.ign.fr/historique/comparer/>  
<sup>5</sup><https://alex.ign.fr/historique/comparer/>

ou de dépôts successifs organisés en lignes perpendiculaires aux axes d'écoulement. Pour la zone d'accumulation, le changement d'aspect de surface, de rugosité ainsi que d'un tronc d'arbre, constituent des changements plus étalés et sans doute perceptibles par le modèle de comparaison des images Sentinel2. La probabilité de dommage reste cependant faible.



Un troisième exemple est situé dans une parcelle de probabilité de dommage  $\leq 0.2$ . Nous voyons néanmoins en comparant les deux images qui suivent que l'aléa de transfert fort ( $\geq 4$ ) est bien la cause d'un mouvement de matériaux qui traverse le virage d'une route amont pour rejoindre une route aval en érodant des matériaux en place, suivre cette route sur 30m puis s'épandre dans une pente, ce qui explique que ce ne soit pas une zone d'accumulation d'après le modèle IRIP.



La maille Sentinel de 10m x 10m (carré blanc) devrait avoir détecté cette zone d'épandage qui représente 3 mailles Sentinel. Cependant la surface de la parcelle considérée est de 0.2 km<sup>2</sup>. Le changement relatif est peut-être trop faible dans ce cas. Cela pose la question de l'effet de taille variable des parcelles cadastrales dans le principe du modèle de probabilité de dommages. Cette parcelle contient en fait des modifications portant sur de petits détails, dont la mise à nu de roche par l'érosion de sols fins et instable sur les pentes.



Un dernier exemple montre des étalements de matériaux en travers d'une route en aval des zones de transfert forts  $\geq 4$  IRIP (pixels rouge de 25m). L'effet d'ombrage peut perturber le calcul des indices utilisé par le modèle de probabilité de dommage.



A partir de ces analyses au cas par cas, nous pouvons conclure que la méthode de détection des dommages à partir des images satellites et d'indices combinés pour comparer des états sol avant et après

un événement de pluies intenses, sous évalue sans doute dans sa configuration actuelle les effets du transfert qui sont moins faciles à détecter à l'échelle d'une parcelle cadastrale, de taille variable.

#### h. Premières conclusions sur l'utilisation des images satellites

A partir de ces premiers résultats encourageants de l'usage de la télédétection, utilisée sur deux territoires assez différents en occupation du sol et relief, nous faisons l'hypothèse de disposer via le traitement comparé des images « avant/après » de données « quasi exhaustives » des dégâts liés à un événement de ruissellement intense.

- Cela ouvre la possibilité de réellement évaluer le caractère prédictif des modèles de cartographie du ruissellement intense. Ceci, car les jeux de données utilisés jusque-là ne représentaient qu'une partie des dégâts, souvent biaisée par le domaine du système d'assurance auquel ces dégâts ou sinistres étaient rattachés.
- Dans le cas présent, l'exercice est limité à la partie rurale, du fait de la résolution trop grossière des images Sentinel (10m) pour aborder le milieu urbanisé (métrique à sub-métrique). La disponibilité presque uniquement « après » des données Pléiade en est la raison. Cependant, la piste consiste en 2022 à intégrer ces données Pleiade pour évaluer leur degré de liaison avec des données plus grossières.
- L'hypothèse d'homogénéité des parcelles peut être remise en cause mais semble acceptable (§II. d, p9) car des grandes parcelles peuvent contenir plusieurs types de cultures. C'est une limite qui est aussi considérée dans la méthode (Cerbelaud et al., 2021).

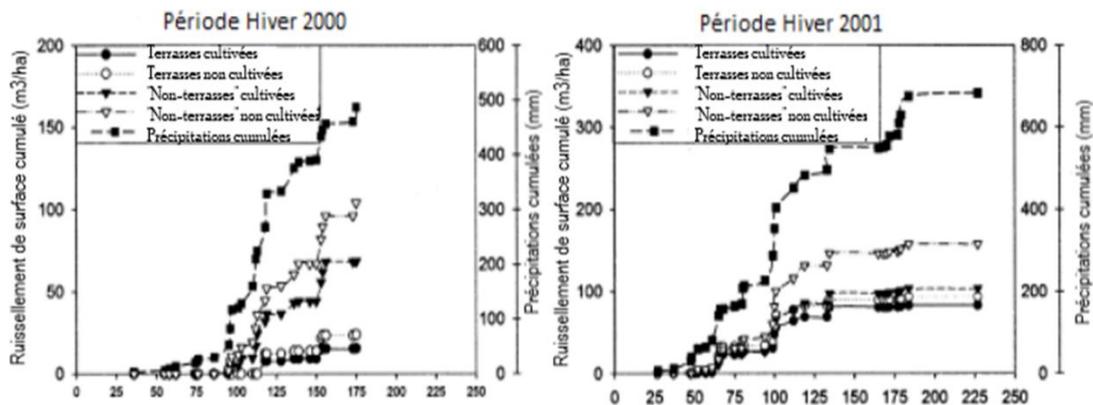
### III. Evaluation du rôle des terrasses agricoles vis-à-vis du ruissellement intense

Les conséquences du changement climatique dans le pourtour méditerranéen sont des pluies plus intenses au sein de longues périodes sèches. Ces caractéristiques sont favorables à l'assèchement des terres, à la perte des couverts végétaux permanents, à la minéralisation de la matière organique, tous ces facteurs contribuant à l'érosion des sols sous l'effet du ruissellement intense. La figure suivante montre des terrasses situées dans les Alpes Maritimes où s'est produit la tempête Alex, fin 2020. Elles sont aujourd'hui entretenues pour la production d'olives.



Les terrasses aménagées dans les pentes ont été développées sous différents climats (Afrique, Europe, Asie, Amérique du Sud) avec l'objectif de faciliter l'exploitation agricole mais aussi de réduire l'érosion des sols. Les effets induits pour la matrice sol sont une meilleure humidification, une augmentation de la teneur en matière organique et des sels minéraux qui ne sont plus transférés à distance par le ruissellement.

Les terrasses sont une illustration de l'ingénierie écohydrologique car l'action de l'homme modifie les intensités et directions des flux d'eau, ce qui en retour favorise la production de biomasse végétale et l'humidité des sols qui sont plus riches en matière organique. Peu de travaux existent sur le rôle hydrique et agricole des terrasses mais les résultats disponibles sont déjà très intéressants.



La figure qui précède est tirée de l'expérimentation menée par Hammad et al. <sup>6</sup> en 2004. Elle montre l'effet des terrasses sur le ruissellement en zone de culture de blé sous climat méditerranéen. Sur deux saisons hivernales (2000 et 2001) le ruissellement mesuré représente entre 0.1 et 0.25 du cumul pluviométrique pour les cultures de blé sur terrasses contre 0.4 à 0.6 pour les cultures de blé en pente. La rétention de pluie est donc de 0.6 à 6 fois supérieure en présence de terrasses. La publication (Hammad et al., 2004) montre aussi un meilleur rendement à l'hectare lié à une meilleure humidité du sol et la présence de matière organique en plus grande quantité dans le sol. La question reste cependant posée du comportement des terrasses dans le cas de pluies très intenses.

#### a. Hypothèse de travail

Nous formulons l'hypothèse que les terrasses agricoles sont des aménagements capables de réduire l'effet du changement climatique au sol en réduisant par exemple les dégâts liés au ruissellement intense lors des phénomènes orageux importants.

#### b. Méthodes

Pour tester cette hypothèse nous utilisons deux approches :

1- la simulation numérique des écoulements à l'aide du modèle Hydrus 2/3D dans des pentes avec et sans terrasses pour juger de l'effet sur le ruissellement à partir des équations de la physique des sols (Sagnimorte, rapport de master 2021). Des valeurs moyennes des caractéristiques pédologiques de la zone PACA sont retenues pour ces simulations ainsi qu'une pluie intense réelle. Un module complémentaire couplé à Hydrus permet de simuler la composante ruissellement.

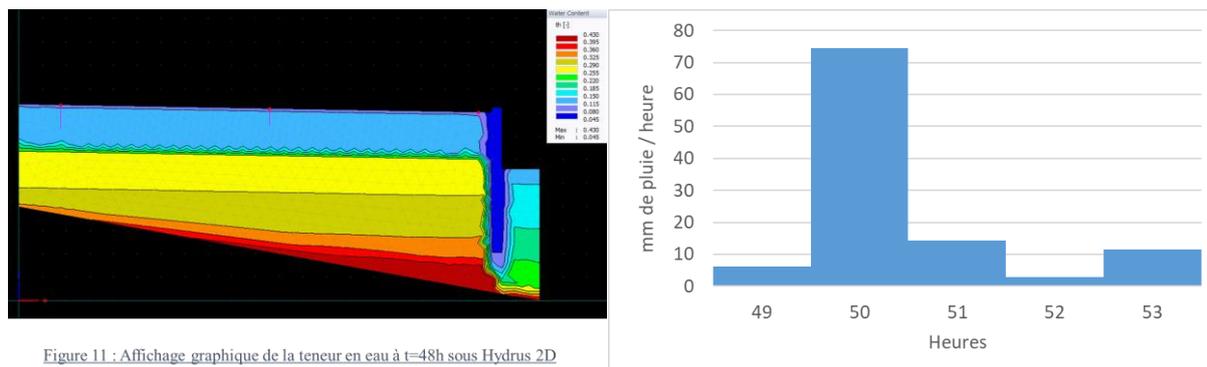
2- l'étude statistique des dommages liés au ruissellement intense dans les Alpes Maritimes (Sud de la France) lors de la tempête Alex survenue en 2020 qui a produit dans cette zone des cumuls de pluie journaliers de 500mm. Les dommages sont détectés par comparaison des images satellites Sentinel2 avant et après la tempête Alex (Cerbelaud et al., 2021). Les terrasses sont détectées par filtrage d'une image aérienne à résolution sub-métrique (sce. IGN 2020 / Métropole Nice Côte d'Azur) (Contreras, rapport de master 2021).

#### c. Résultats de la simulation numérique (Sagnimorte, 2021)

L'approche numérique est réalisée avec forte pluie simulée et en présence de racines ou non (Hydrus 2/3D + module ruissellement). La figure suivante représente le modèle construit sous Hydrus pour simuler une terrasse agricole composée d'un horizon sablo-limoneux en surface et de limon en

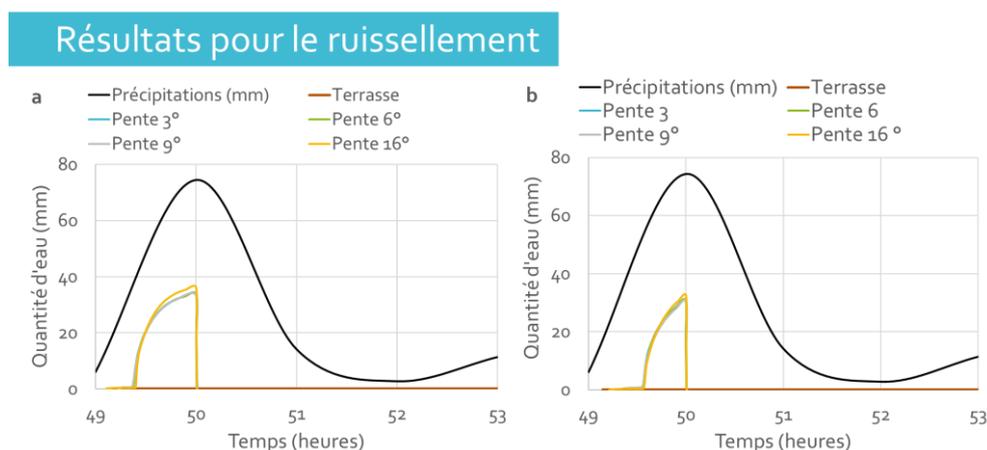
<sup>6</sup> Hammad, A. A., Haugen, L. E., & Børresen, T. (2004). Effects of stonewalled terracing techniques on soil-water conservation and wheat production under Mediterranean conditions. *Environmental Management*, 34(5), 701-710.

profondeur. La profondeur retenue du sol est de 50 cm au début de la terrasse et 70 cm au niveau du mur.



La largeur de la terrasse considérée est de 500 cm. La comparaison est réalisée avec un sol limoneux de 50 cm d'épaisseur, sans terrasse, avec des pentes variant de 3° à 16°. Pour les simulations de fortes pluies, le modèle tourne pendant 48h de simulation sans pluie au préalable pour laisser les flux hydriques s'équilibrer (figure de gauche, ci-dessus). Le scénario de pluie intense qui cumule 108 mm en 5 heures est tiré d'un événement réel enregistré à Nice en 2015 (figure de droite, ci-dessus).

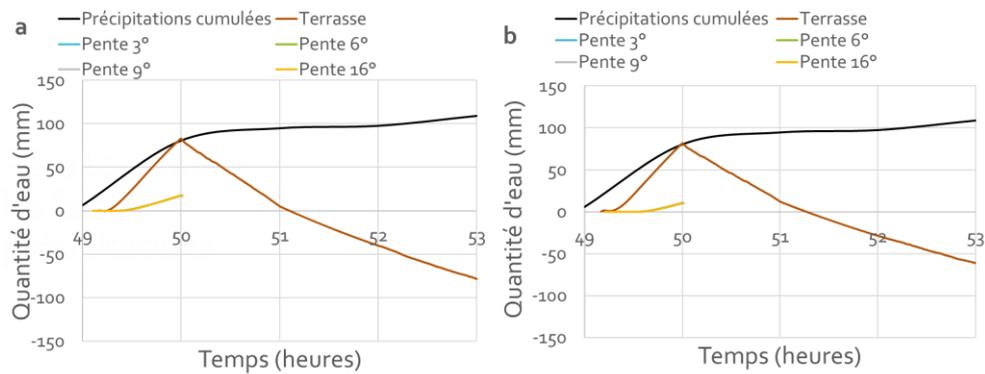
La figure suivante illustre la quantité d'eau ruisselée en présence d'une terrasse ou de pentes différentes, sans végétation à gauche et avec végétation à droite. La pluie est représentée par la ligne courbe (en noire). Il n'apparaît aucun ruissellement sur la terrasse, avec ou sans végétation alors qu'il démarre à environ 40mm de pluie par heure et atteint pratiquement 38mm de lame d'eau pour les différentes pentes quand la pluie culmine à 74mm. En présence de végétation, la terrasse ne présente à nouveau pas de ruissellement alors que les pentes ruissellent avec toutefois une lame d'eau légèrement moins épaisse (35mm). Dans le détail (non présenté ici) on peut différencier les réponses entre les pentes qui ruissellent légèrement plus (+1mm) avec de fortes pentes.



La figure suivante correspond aux mêmes conditions de simulation mais pour exprimer la quantité d'eau qui s'accumule puis s'infiltré. La pluie est représentée cette fois en cumul. Il est notable que la terrasse stocke en surface jusqu'à 70mm durant la première heure puis infiltre cette lame d'eau statique dans l'heure qui suit et devient négative lorsque le sol de surface passe en désaturation. Cela met en évidence que le ruissellement implique deux conditions : la formation d'une lame sur le sol et sa mise en mouvement via l'effet gravitaire produit par une pente. Dans le cas de la terrasse, l'absence de pente favorise la formation d'une lame d'eau de surface qui reste sur place.

La formation de cette lame d'eau provient du fait que l'intensité de la pluie, qui atteint ici 74mm en une heure, dépasse la vitesse d'infiltration du sol qui est d'environ 36mm par heure. Sur les pentes, le stockage est moins important du fait de la mise en mouvement.

## Résultats pour la pluie effective



### d. Résultats de l'approche statistique

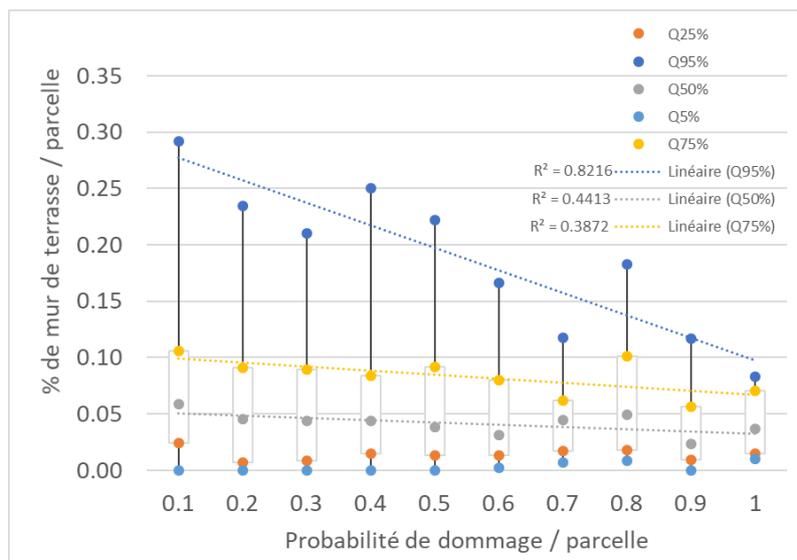
Un ensemble de 1362 parcelles rurales du bassin versant de la Vésubie (400 km<sup>2</sup>, Alpes Maritime) ont été sélectionnées sur les critères d'avoir reçu au moins 47mm de pluie en 1 heure durant la tempête Alex en 2020, et avec une occupation du sol du type pelouse, prairie ou verger. Les pluies horaires maximales reçues en 1 heure varie de 47mm à 56mm avec une moyenne de 50mm. La présence de terrasses dans ces parcelles a été détectée par filtrage d'un modèle numérique de terrain à résolution fine (0.25m) agrégé au mètre pour pouvoir traiter 400 km<sup>2</sup>. Le principe consiste, à l'aide d'un traitement SIG, à mettre en évidence les fortes ruptures concaves qui correspondent aux pieds des murs de soutènement. Cela permet de caractériser la présence des murs sous forme de mailles raster dans chaque parcelle et de calculer ainsi le % de mailles en « mur » dans une parcelle. L'autre variable d'intérêt est constituée par la probabilités d'endommagement de chaque parcelle, qui est calculée à partir des images satellites (cf partie II de ce rapport).



La figure ci-dessus illustre une zone de test avec les parcelles endommagées en rouge. Les zones en forêt et les terrasses en prairie sont bien visibles. Les murs de soutènement détectés par le filtre appliqué

au modèle numérique de terrain correspondent aux lignes noires (en fait des mailles raster de 1m). On note qu'il existe sous forêt des terrasses, sans doute abandonnées, à proximité de celles en prairie.

La figure suivante montre les distributions de fréquences des % de murs de terrasse dans les parcelles en fonction des déciles de la probabilité d'endommagement des parcelles. Les % de murs sont compris entre 0 et 0.3 pour la classe 0-0.1 de la probabilité de dommage et entre 0.02 et 0.08 pour la classe 0.9-1. Des régressions linéaires sont réalisées pour les fréquences 0.9, 0.75 et 0.5 des % de murs. Toutes les pentes sont négatives. Les coefficients de détermination, tous significatifs, sont donnés en légende. Cette figure met en évidence que plus il y a de terrasses dans une parcelle, moins la probabilité d'endommagement est forte dès lors que le % de murs dépasse 5%. Rappelons que les 1362 parcelles ont été sélectionnés sous conditions d'avoir reçu au minimum 47mm de pluie en 1 heure.



Le tableau qui suit teste la probabilité d'indépendance entre les terrasses, qui ont moins ou plus de 5% de murs détectés, avec les probabilités de dommages inférieures ou supérieures à 0.5. Le test indique que l'indépendance est peu probable (0.015) et la matrice des écarts relatifs montre qu'il y a 18% moins de terrasses endommagées pour les probabilités de dommage supérieure à 0.5.

	Matrice observée			Matrice théorique indépendance			Ecart relatifs (obs-theo) / theo			
	<= 0.05	> 0.05		<= 0.05	> 0.05		<= 0.05	> 0.05		
<= 0.5	617	564	1181	<= 0.5	632	549	1181	<= 0.5	-0.02	0.03
> 0.5	112	69	181	> 0.5	97	84	181	> 0.5	0.16	-0.18
	729	633	1362		729	633				
P{KHI2} =	0.0155									

#### e. En conclusion

Nous avons pu voir à partir d'une approche numérique (théorique) que les précipitations importantes sur une faible durée peuvent être stockée puis infiltrées dans les terrasses. Cela implique des sols dont la conductivité hydraulique à saturation est proche ou supérieure à 36 mm / heure. Il faut aussi considérer que le sol d'une terrasse n'est pas homogène car remanié par construction sur une profondeur de plusieurs dizaines de cm quand on se rapproche des murs de soutènement. La capacité d'infiltration est alors plus élevée et ce d'autant que les terrasses sont peu parcourues par des véhicules agricoles lourds. Sur un plan numérique, les terrasses permettent de réduire le ruissellement en comparaison des zones en pentes de même capacité d'infiltration, cela y compris pour de faibles pentes. Cela permet donc aussi la réduction de l'érosion du sol par processus hydrique (impact des gouttes de pluie) et par transport. De même, les résultats ont montré une meilleure redistribution de l'eau accumulée dans le temps pour la terrasse et le fait qu'elle favorise l'infiltration de l'eau dans le sol. Par ailleurs, la prise en compte des racines des végétaux a aussi montré que même sur une courte durée (quelques heures) la présence de

cultures tels que des oliviers, caractéristique de la région PACA, a un impact positif sur le rabatement du ruissellement.

Afin d'évaluer ces résultats théoriques, fondés sur la modélisation des processus physiques, nous avons testé sur un plan statistique, l'effet des terrasses sur la distribution des dommages dans les parcelles. Les probabilités de dommage sont déduites de l'analyse des images satellites Sentinel, avant et après l'événement majeur de pluie survenu pendant la tempête Alex de 2020. Les résultats obtenus indiquent un rôle des terrasses sur la diminution de la probabilité de dommage, cela à partir d'un seuil de 5% de présence de murs de soutènement dans les parcelles. C'est donc une confirmation de l'intérêt de ces aménagements de versant, y compris sous fortes pluies, pour réduire les aléas associés au ruissellement intense en aval. Il faut aussi considérer le rôle des terrasses sur le plan de la régulation hydrologique de la ressource en eau pour des pluies moins fortes.

## IV. Utilisation des données de lame d'eau radar pour évaluer le cartographie IRIP

### a. Méthode (reprise de l'action 4.1.4 – 2018)

Le modèle IRIP figure les lieux de plus fort potentiel de ruissellement dans l'espace d'un bassin versant. Pour vérifier le caractère prédictif des lieux ainsi identifiés, il faut évaluer leur proximité avec des dommages constatés au sol lors de pluies intenses. La connaissance des dommages à partir des observations au sol est forcément partielle car elle répond souvent à des types d'assurance associés aux biens qui sont touchés. Deux inconnus persistent alors pour réellement évaluer les prédictions : la connaissance exhaustive des dégâts, que nous approchons aujourd'hui à partir des données satellites, et la connaissance des zones qui ont reçu assez de pluie pour provoquer un ruissellement intense. Sur ce deuxième point, l'apport de la donnée « lame d'eau radar » fournie par Météo-France à la maille de 1km<sup>2</sup> et au pas de 5 minutes est essentielle. La question est cependant de savoir comment utiliser une telle information. En effet, le ruissellement intense peut être le résultat de pluies longues qui vont saturer la couche supérieure du sol ou encore de pluies courte mais intenses. Une approche consisterait à comparer au sol et dans le temps la quantité de pluie exprimée par la LER (Lame d'Eau Radar) à la capacité d'infiltration à saturation (Ks) du sol. Il serait alors possible de détecter en différents points de l'espace du bassin versant, et à différents moments, les zones qui auraient ruisselé une ou plusieurs fois durant l'événement de pluies intenses. Cette approche est critiquable du fait qu'elle ne considère pas les transferts de ruissellement d'une maille à l'autre. Cet apport de l'amont peut contribuer à saturer en particulier les zones dites d'accumulation dans la modélisation IRIP. Dans le détail cela compliquerait l'usage de cette information. Une autre façon de faire est de ne s'intéresser qu'aux cumuls de pluies les plus forts sur une durée définie. Cela revient à échantillonner en chaque maille kilométrique les quantités de LER les plus fortes précipitées pour différentes durées. De là, nous nous sommes intéressés à l'identification d'un seuil minimal de quantité de LER sur une durée courte et capable d'initier un ruissellement intense ayant provoqué un incident répertorié. La durée courte testée s'étend entre 5 minutes et 60 minutes pour rester cohérent avec des temps de transfert du ruissellement sur de courtes distances. Ce choix est en accord avec la modélisation IRIP qui apporte de l'information sur le ruissellement intense dans les versants et non dans les cours d'eau où les temps de concentrations dépassent rapidement l'heure au-delà de quelques kilomètres carrés de bassin versant.

La méthode a été développée selon les 5 étapes suivantes :

1. Choix de 5 durées : 5, 10, 15, 30 et 60 mn
2. Calcul du Cumul Glissant par Durée (cgd) sur la durée de l'événement pluvieux pour chaque maille de pluie-radar où se situe un dommage.
3. Sélection des maximums des Cumuls Glissants par Durée pour chaque maille de pluie-radar où se situe un dommage.

4. Sélection du minimum des maximums des Cumuls Glissants par Durée de l'étape 3. Ce minimum représente la quantité minimale, pour une durée de pluie fixée, pour déclencher un ruissellement dommageable.

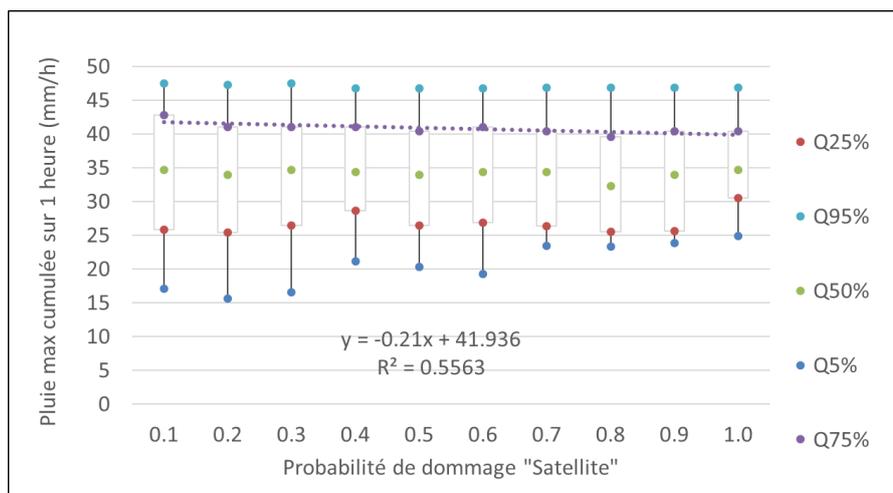
5. Découpage du territoire de validation selon les mailles pluie-radar ayant atteint ou dépassé le minimum requis de pluie cumulée pour générer un dommage durant la totalité de l'événement pluvieux et cela pour chacun des cgd sélectionnés.

6. Evaluation de l'hypothèse « les dommages sont liés à des aléas forts prédits par le modèle IRIP » à l'aide du test du Chi2 appliqué à une table de contingence sur ce territoire de validation.

Le point 5 permet de réduire le territoire d'évaluation aux zones à fortes intensités pluvieuses afin de ne pas travailler sur une zone non impactée par les pluies. Cela permet de réduire le nombre de faux positifs dans la matrice de contingence (ou de confusion) qui sert au test.

#### b. Application aux données de probabilité de dommages « satellites »

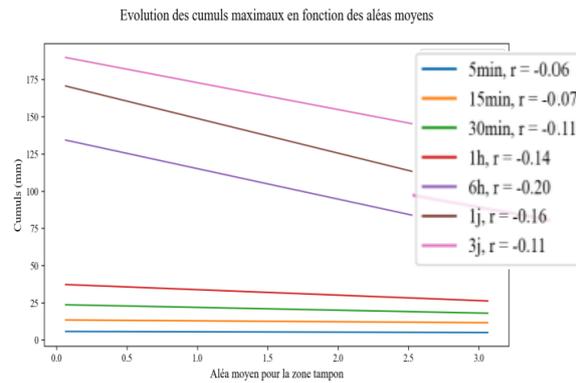
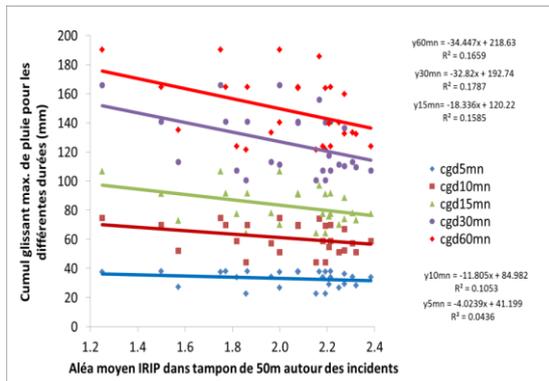
Son application dans le contexte des données de probabilité de dommage proposé par l'analyse des images satellites Sentinel2 est nouveau. En effet, les probabilités de dommage, comprises entre 0 et 1 couvrent la quasi-totalité d'un bassin versant, à l'exception des zones urbaines, et l'unité représentative est la parcelle cadastrale et non plus la maille du MNT. Par ailleurs, il faut noter que les dommages qui sont bien marqués à partir des images satellites Pleiades, ou encore des degrés de calamités agricoles, apparaissent pour les probabilités supérieures ou égales à 0.5 (Cerbelaud et al, 2021). Nous cherchons donc à adapter la démarche de recherche du « minimum des maximums » présentée au §IV.a . La figure ci-dessous illustre la distribution des plus forts cumuls horaires reçus par 4096 parcelles du bassin versant de la Vésubie (400 km<sup>2</sup>, Alpes Maritimes) dont l'occupation du sol est « prairie ou culture ou pelouse ou verger ou vigne ».



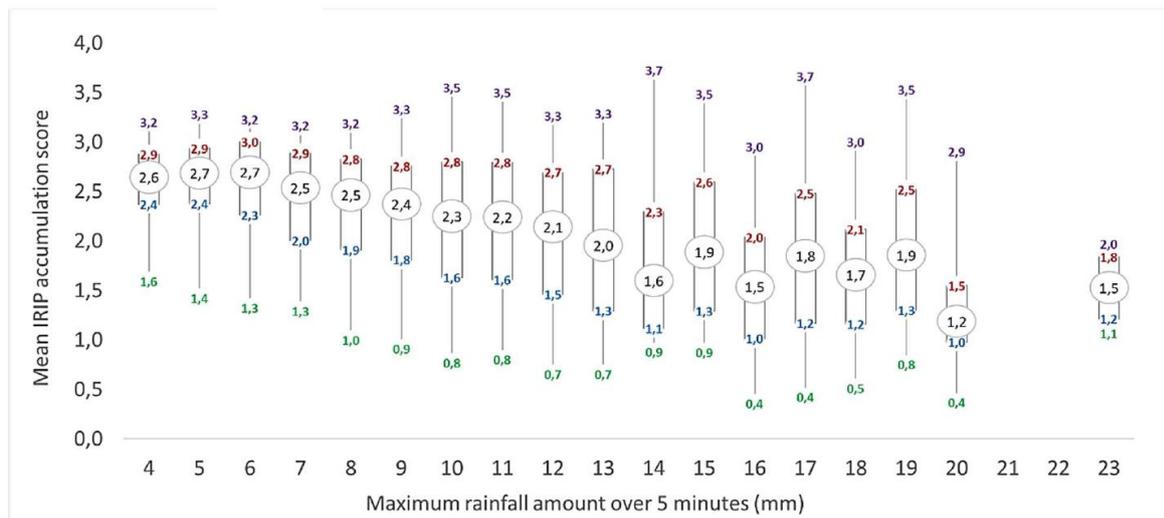
Il est à noter la légère diminution de la valeur des quantiles 75% et 95% avec l'augmentation de la probabilité de dommage. La raison de cette relation négative est à rapprocher de résultats déjà présentés dans la validation du modèle IRIP (action 4.1.4, 2018 & 2020) où il avait été mis en évidence que la quantité de pluie nécessaire pour déclencher des dommages au sol diminuait avec l'augmentation du potentiel de ruissellement situé dans le périmètre de 25 ou 50m des dommages constatés. C'était une première validation indépendante du modèle IRIP. La figure de gauche, ci-dessous, montre la relation entre les moyennes des aléas IRIP calculées dans des tampons circulaires de 50m autour de 27 proxys de dommages géo-référencés dans la zone périurbaine du Grand Chalon (71). Les pentes des régressions sont négatives et significatives pour les maximums des cumuls de pluie radar sur les durées de 15, 30 et 60 minutes. Nous retrouvons des résultats similaires dans la figure de droite pour plus de 1000 parcelles du département des Pyrénées Orientales (66) déclarées en calamités agricoles suite à un événement de pluies intenses. Dans ce cas les durées des cumuls de pluie radar sont significatifs à partir de 30 minutes et jusqu'à 3 jours. Les cumuls des pluies sont, comme le montrent les échelles verticales de ces deux graphes, comparables en amplitudes mais pas en durées. Cela laisse supposer que le ruissellement a été

provoqué par excès d'infiltration pour l'événement de Chalon sur Saône et par excès de saturation dans le cas des Pyrénées Orientales, pour lequel les pluies ont été longues.

L'hypothèse d'une pente nulle a été testée pour chaque durée à l'aide d'un test de Student. A partir de la durée 30 minutes, les pentes sont significativement différentes de 0. On note que la pente négative augmente avec la durée du maximum de cumul pluviométrique. Ce résultat montre que plus une parcelle agricole est considérée sensible aux aléas de ruissellement prédits par IRIP, moins grande est la quantité de pluie nécessaire à générer un incident sur cette parcelle. C'est un élément de validation indirecte du modèle IRIP.

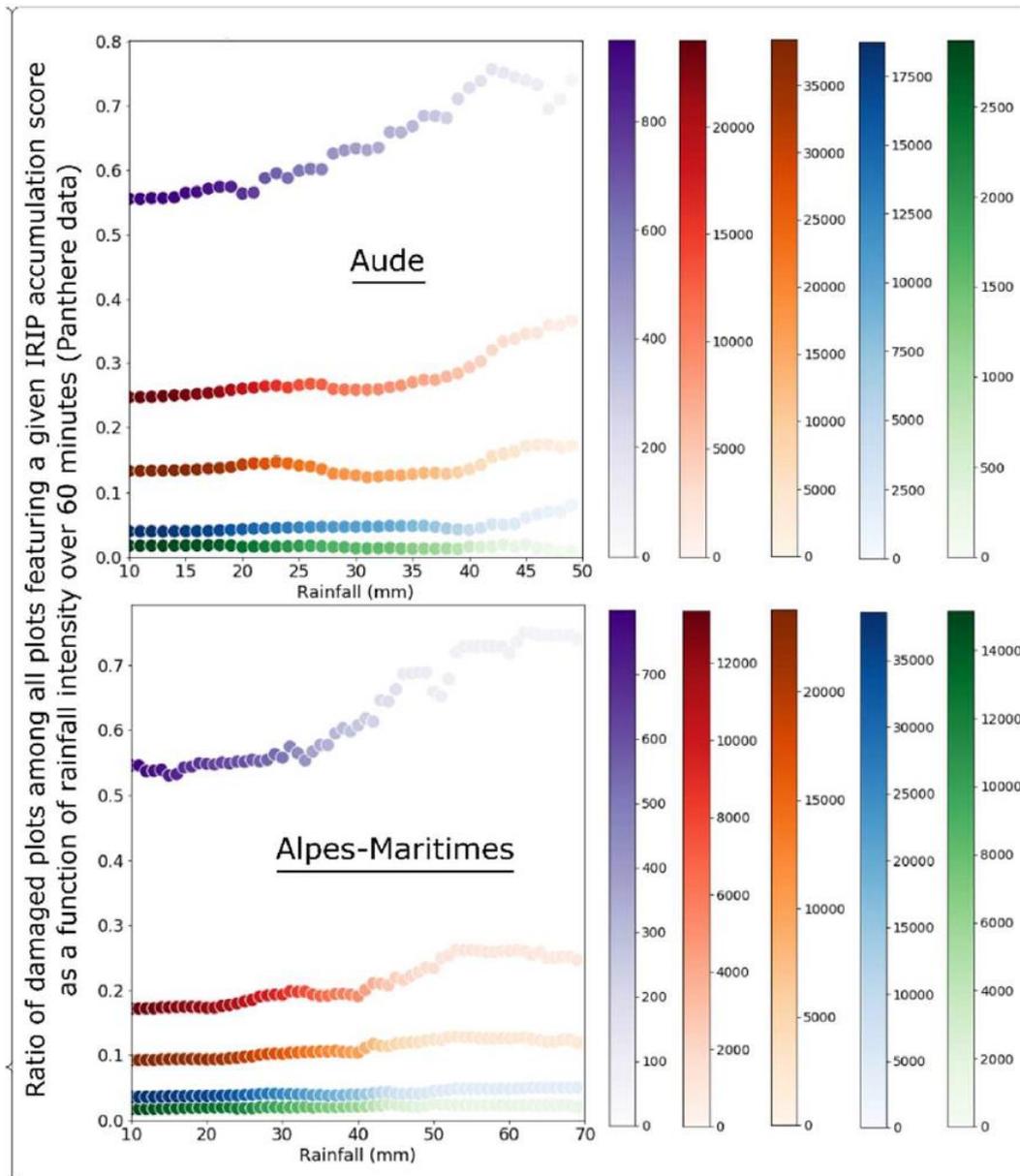


Ces relations sont confirmées sur nos nouveaux territoires d'étude de l'Aude et des Alpes-Maritimes (Cerbelaud et al., 2022), avec ici la comparaison directe entre la quantité d'aléa d'accumulation IRIP dans 19000 parcelles, détectées comme impactées par les images satellites, avec la quantité de pluie radar reçue dans ces parcelles (figure suivante).



L'entité spatiale d'étude étant la parcelle, il est ici considéré la moyenne de l'aléa d'accumulation. La décroissance est nette avec la diminution de la quantité d'aléa et l'augmentation de la quantité de pluie, ici en 5 minutes. Cette relation a aussi été vérifiée pour 15 et 30 minutes et ensuite pour des durées de cumul plus longues mais avec plus de dispersion. Si l'on convient d'une vitesse d'infiltration moyenne du sol de 0.01 mm/sec pour des sols argilo-limoneux de ces zones d'étude, cela représente 3, 9 et 18 mm de pluie infiltrée en 5, 15 et 30 minutes. Cela veut dire que le processus dominant de ruissellement a sans doute été l'excès de saturation pour les deux zones d'étude. Il faut aussi noter l'augmentation de la dispersion des scores de l'accumulation pour les parcelles qui reçoivent le plus de pluie. Cette tendance peut résulter d'un processus d'engorgement lié à l'intensité de la pluie qui fait que le potentiel d'accumulation d'une parcelle devient alors moins discriminant.

La figure suivante (Cerbelaud et al., 2022) montre (à gauche) l'évolution du nombre de parcelles endommagées en fonction de la quantité minimale de pluie reçue en 1 heure, cela en considérant le potentiel de ruissellement de chaque parcelle (aléa d'accumulation  $\leq$  à 1, à 2, ... à 5). A droite, échelle colorimétrique du nombre de parcelles concernées. Par exemple, pour l'Aude, il y a 900 parcelles qui atteignent un score IRIP de 5 en accumulation (au moins 1 pixel de 25m parmi n pixels dans une parcelle). Dans ce sous ensemble de parcelles endommagées, 55% ont reçu au maximum 10 mm de pluie et 65% ont reçu au moins 35 mm de pluie en 1 heure. On se référera à l'article pour plus de détails<sup>7</sup>.

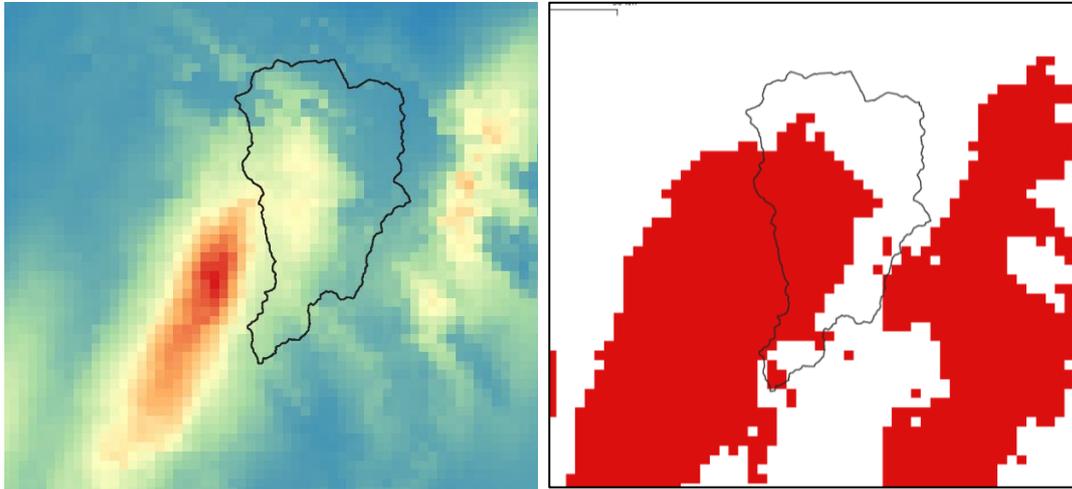


Compte tenu des résultats présentés, pouvons-nous définir un seuil de pluie à partir duquel des dommages « importants » apparaissent ? A priori oui. L'intérêt de la figure qui précède est de montrer que dans l'Aude comme dans les Alpes Maritimes, un seuil de cumul de pluie situé entre 30 et 40 mm en 1 heure, semble expliquer l'accroissement du nombre de parcelles endommagées, et cela d'autant plus que le potentiel de ruissellement des parcelles est élevé. Les périodes de retour associées des pluies sont comprises entre 5 et 10 ans pour ces régions. Il faut cependant considérer que nous disposons de

<sup>7</sup> Cerbelaud, A.; Breil, P.; Blanchet, G.; Roupioz, L.; Briottet, X. Proxy Data of Surface Water Floods in Rural Areas: Application to the Evaluation of the IRIP Intense Runoff Mapping Method Based on Satellite Remote Sensing and Rainfall Radar. *Water* 2022, 14, 393. <https://doi.org/10.3390/w14030393>

valeurs de pluie qui sont des moyennes de signaux radar calculées sur des mailles carrées de 1 km<sup>2</sup>. Les intensités locales sont sans doute plus élevées.

Les figures suivantes illustrent le principe du seuillage sur les données LER. A gauche, la LER des valeurs maximales mesurées sur 1heure, pas forcément concomitante pendant l'événement, s'étale sur deux jours, est représentée en gradation du bleu au rouge.



Elle varie de 1.2 mm/h à 108 mm/h. A droite, le seuil de 30 mm est appliqué. Cela découpe une sous-zone (en rouge) du bassin versant (limite noire, bassin versant de la Vésubie) dans laquelle il est possible d'évaluer la relation entre les dommages et la quantité de pluie radar, sous condition de pluie minimale.

Pour conclure cette partie, nous pouvons dire que nous disposons aujourd'hui d'une démarche et d'une méthode d'évaluation des cartographies du ruissellement intense qui utilise une modélisation a priori (ici la méthode IRIP) et des données externes d'évaluation que sont les images satellites Sentinel2 et les lames d'eau radar de météo-France. Ces éléments sont de nature à permettre une évolution du déterminisme du modèle IRIP qui dispose aujourd'hui de deux terrains d'entraînement avec des niveaux de dommage quasi exhaustifs sur ces territoires, si l'on considère les milieux non urbanisés. L'accès à des dommages intra-urbain fait l'objet de la recherche développée en 2022 en intégrant a posteriori l'information d'images Pléiades à très haute résolution spatiale.

### c. Interface d'exploration spatiale et temporelle des données de lames d'eau radar

La dispersion des potentiels de ruissellement des parcelles selon les cumuls de pluie mérite d'être explorée plus en détail. En particulier, il sera intéressant d'évaluer quels types de processus de ruissellement domine ou s'enchaîne entre excès d'infiltration et de saturation, apparaît puis disparaît au cours d'un événement dans chaque parcelle. Ce pourrait être un moyen de mieux discerner les situations de pluie les plus à même de créer des dommages selon les potentiels de ruissellement des parcelles. Le principe d'exploration consiste à simuler cette évolution au pas de 5mm en faisant un bilan cumulé entre infiltration et ruissellement. Cela revient à évaluer par exemple au bout d'une heure la quantité de ruissellement par rapport à l'évolution temporelle de la pluie reçue. Pour cela il faut considérer en première approximation la valeur de la conductivité hydraulique du sol à saturation qui est approximée par la donnée l'ESDAC, à la maille de 250m. Il sera proposé d'automatiser cette simulation sous l'interface d'exploration des LER. Développement à prévoir avec C. poulard.

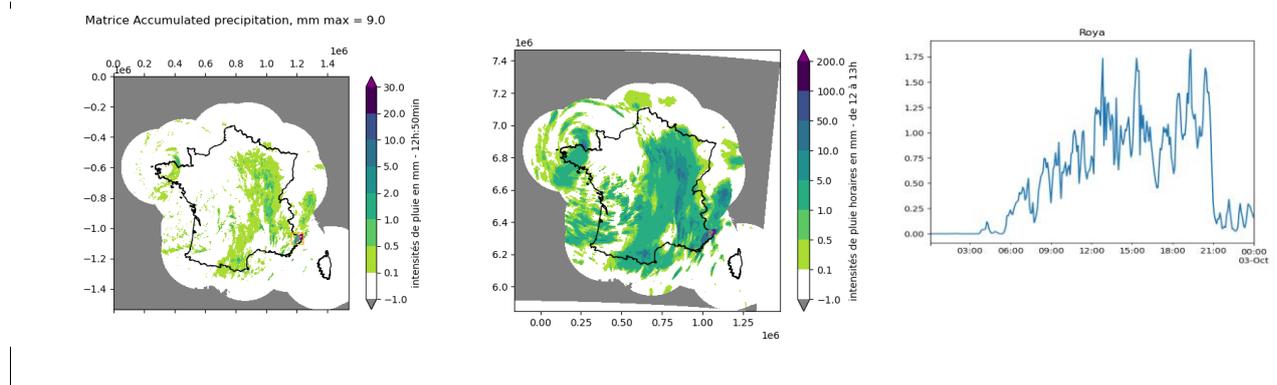
Un autre point qui ressort de l'article publié en 2022 est la sensibilité des scores IRIP à la valeur de la production amont. En fait la méthode IRIP résume l'effet des mailles amont drainées par une maille aval. L'effet des pluies sur ces zones de production amont n'est pas considéré dans les analyses qui confrontent les parcelles endommagées aux prédictions des scores IRIP. Les caractéristiques de ces zones sont aussi à explorer pour mieux comprendre les différentes réactivités des parcelles aux cumuls de pluie. L'idée serait d'identifier des caractéristiques des zones de production amont qui mèneraient à considérer plus de 2 possibilités (actuellement 0 ou 1 dans la méthode IRIP) pour nuancer la contribution des zones de production amont.

#### d. Description de la chaîne de traitement des données de lame d'eau radar (C. Poulard)

Lecture et analyse de lame d'eau radar au format netcdf pour l'étude d'événements  
Application à l'étude de la tempête Alex (octobre 2021)

Scripts python, avec modules netcdf4 et geopandas

Mots clefs : cartes de lames d'eau radar, étude événementielle par pixel et par emprises.



#### Introduction :

Cette note présente les travaux d'analyse des fichiers de Lames d'Eau Radar (dans la suite, LER) et informations associées (code qualité) au pas de temps 5 minutes durant l'épisode de tempête « Alex », qui a notamment touché les bassins de la Roya et de la Vésubie.

Il s'agit de développer des scripts pour visualiser et critiquer (au sens large) les LER, et d'automatiser des traitements simples réalisables manuellement sous QGIS : visualisation, changement de projection, chroniques moyennes de bassin, extraction des maximum par pixel ou par bassin...

#### Données et métadonnées

Les données utilisées ici sont les champs de lame d'eau radar fournies en 2021 pour l'étude de l'épisode de la tempête Alex. On dispose de 3 répertoires avec des noms faisant explicitement référence à la date d'une journée au format AAAAMMJJ, 20201002, 20201003 et 20201004.

A l'intérieur de chaque répertoire se trouvent des champs à 5 minutes, au format netcdf. Les noms sont explicites, et contiennent la date et le pas de temps. Par exemple, pour le premier champ du 03/10/2020, de 0 à 5 minutes, le nom est :

cumul\_france\_1536-1km-5min\_202010030000.nc

La première étape consiste à lire les métadonnées, avec par exemple l'outil Panoply ou avec le module python NetCDF 4.

Comme le format NetCDF s'affirme comme un standard pour les données, il était intéressant de créer des outils de diagnostic en amont des outils de visualisation, pour généraliser plus facilement l'usage de ces scripts, et de documenter ce travail par cette note. Ce travail prépare donc l'adaptation des codes précédemment écrits pour traiter des LER Panthère fournis à des format binaire plus classiques (TIFF) – notamment pour le calcul des relations Intensité-Durée-Fréquence et l'analyse d'événements - à l'utilisation de futures archives Panthère (ou autre) au format NetCDF.

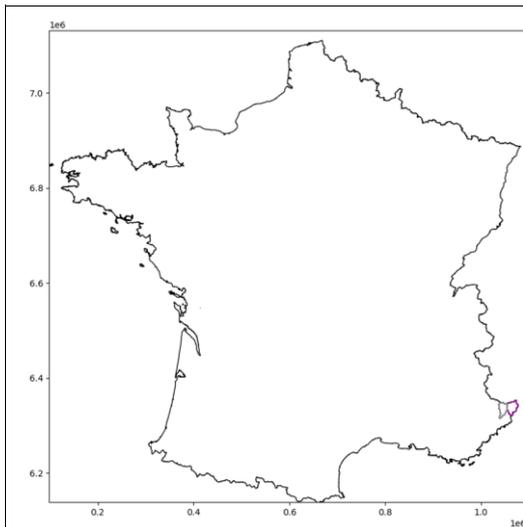


Figure 1: Localisation en France des bassins de la Roya et de la Vésubie

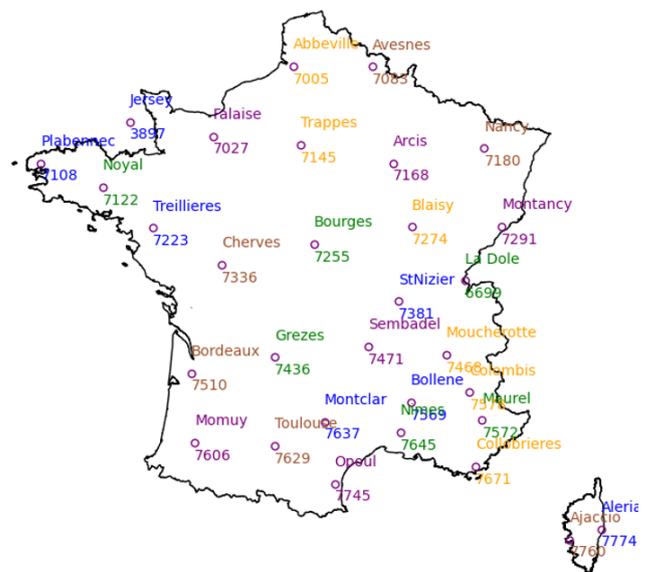


Figure 2: Localisation des radars pluviométriques, d'après les métadonnées

#### Métadonnées de chaque fichier netcdf

Contrairement aux fichiers binaires « bruts », qui doivent être fournis avec les métadonnées pour pouvoir être exploités, les fichiers netcdf contiennent les champs de métadonnées, lisibles en s'appuyant sur des codes comme Panoply ou des modules comme netcdf4, écrits en fonction des conventions du format.

En complément, les données sont néanmoins accompagnées d'un fichier radar\_produit\_cumul5min.pdf qui décrit les données (utile en validation) et un fichier de licence.

Chaque fichier contient toutes les informations utiles à son exploitation, ce qui entraîne une très grande redondance puisque, par exemple, les coordonnées de tous les points de grille sont présents dans chaque fichier. Encore faut-il vérifier que cette information est bien commune avant d'entreprendre les traitements qui demandent que les champs partagent effectivement les mêmes points de grille. Un script de diagnostic sera donc proposé ; il permet de vérifier quelles données sont communes ( les coordonnées), lesquelles sont variables (champs de LER et champs de code qualité), et a mis en évidence des variations de la liste des pluviomètres actifs.

Ainsi, le fichier du jour 20201003, minute 0 : 20201003/cumul\_france\_1536-1km-5min\_202010030000.nc interrogé par netCDF4 donne les informations suivantes :

```
<class 'netCDF4._netCDF4.Dataset'>
root group (NETCDF4 data model, file format HDF5):
  contact: radarsmf@sedoo.fr
  institution: Meteo-France
  name: French Mosaic of accumulated precipitation during 5min in 1km resolution
  Conventions: CF-1.7
  version: CF-1.7
  crs_proj4_string: +proj=stere +lat_0=90 +lon_0=0 +lat_ts=45 +ellps=WGS84
+datum=WGS84 +units=m +x_0=619652.074055906 +y_0=3526818.3379318174
  nw_corner_latitude: 53.67
```

nw\_corner\_longitude: -9.965  
x\_pixels\_number: 1536  
x\_resolution\_in\_m: 1000.0  
y\_pixels\_number: 1536  
y\_resolution\_in\_m: 1000.0  
dimensions(sizes): X(1536), Y(1536), time(1), string\_length(50), radar\_image(50)  
variables(dimensions): int32 grid\_mapping(), int32 X(X), int32 Y(Y), int64 time(time), int64 time\_coverage\_start(time), int64 time\_coverage\_end(time), |S1 data\_mf\_products(time, string\_length), int64 radar\_image\_time(time, radar\_image), float32 radar\_image\_latitude(time, radar\_image), float32 radar\_image\_longitude(time, radar\_image), int32 radar\_image\_wmoid(time, radar\_image), |S1 radar\_image\_name(time, radar\_image, string\_length), int32 QUALITY(time, X, Y), int32 ACRR(time, X, Y)

### Métadonnées générales

On trouve des informations explicites sur la nature du fichier dans son nom (**French Mosaic of accumulated precipitation during 5min in 1km resolution**), le producteur de la donnée (Meteo-France) et un numéro de version.

### Métadonnées géographiques

On trouve des informations sur :

- ⑩ le système de projection **crs\_proj4\_string**, a priori commun à tous les champs : il est défini par la chaîne de caractères « **+proj=stere +lat\_0=90 +lon\_0=0 +lat\_ts=45 +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +units=m +x\_0=619652.074055906 +y\_0=3526818.3379318174** », ce qui est un format standard compris par d'autres modules (comme geopandas). C'est une projection stéréographique.

(nw\_corner\_latitude, nw\_corner\_longitude) : les coordonnées en (latitude, longitude) du point situé au Nord Ouest, qui est une information redondante avec le système de projection et les informations sur les points de grille mais utile pour vérifications :

- ⑩ le nombre de points de grille selon les axes X et Y et l'espacement entre deux points de grille (ici, 1000m en X comme en Y)

Les données sont fournies sous forme de matrice pour cette projection, que nous appelons dans la suite « projection du netcdf » pour rester générique, et leur représentation cartographique dans cette projection sera donc une grille rectangulaire ; ici c'est même une grille carrée. Pour la visualisation, on choisira une représentation par maille<sup>8</sup>. Par contre, dès que l'on reprojette, par exemple en Lambert 93, cela déforme la grille ; et techniquement on peut aussi obtenir une représentation en maille (au prix de la définition ou continue avec interpolation et tracé d'isolignes<sup>9</sup>).

### Métadonnées sur les variables

Des paramètres sont définis ; on retrouve les dimensions en X et en Y et celle en temps, ici un seul pas de temps :

dimensions(sizes): X(1536), Y(1536), time(1), string\_length(50), radar\_image(50)

Les vecteurs ou matrices seront ensuite définis par rapport à ces tailles, par exemple les champs ont pour dimension (time, X, Y).

On s'intéressera en particulier au champ de lame d'eau radar (**ACRR**) et un champ de qualité (**QUALITY**) qui dépend de la couverture radar. Comme time=1, on rappelle qu'on a un champ par fichier.

Nos tests diagnostic montrent que les cartes de qualité évoluent d'un pas de temps à un autre, et que le nombre de radars actifs peut également changer (un radar est momentanément disponible).

---

<sup>8</sup>Avec la méthode matshow

<sup>9</sup>Respectivement avec la méthode Python pcolormesh et contour (ou contourf pour des isolignes)

ZI\_Accumulated\_precipitation(mm)\_max = 6.6

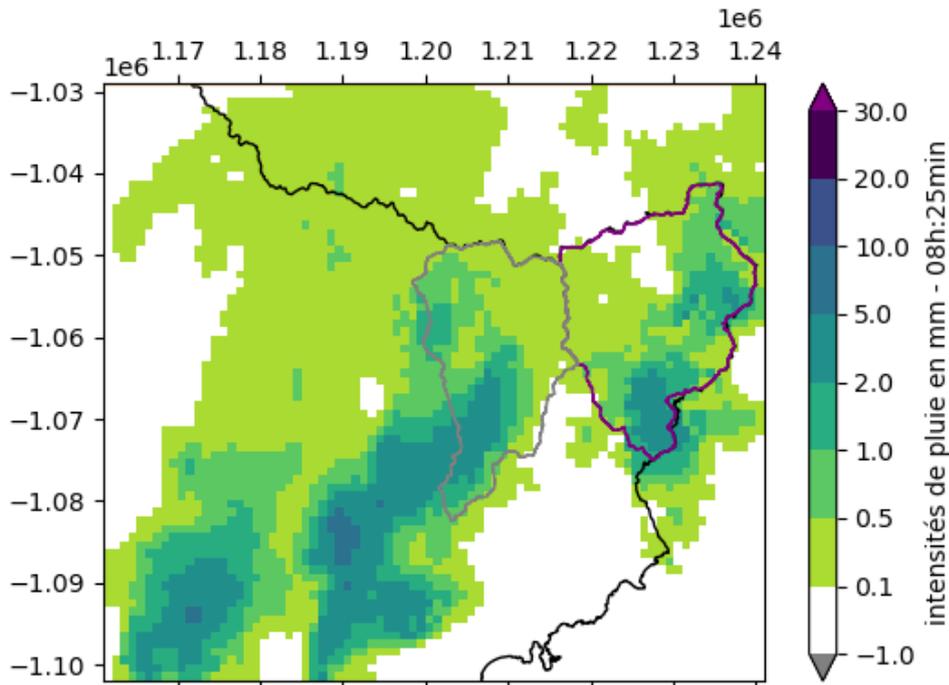


Figure 3: Cartographie d'un champ de cumul de pluie à 5 minutes restreinte au rectangle de la Zone d'Intérêt, en projection stéréographique du fichier netcdf

### Zones d'étude

Les données sont disponibles sur la France entière, mais on va surtout s'intéresser à la « zone d'intérêt », ZI, qui englobe les bassins de la Roya et de la Vésubie, définie par rapport à la grille (ligne et colonne de départ et nombre de lignes et de colonnes).

Pour calculer des variables par bassin, il faut définir leurs contours. On va utiliser la bibliothèque de shapes fournies par l'IGN pour tracer les contours de la France, et les limites des bassins. Ces données sont en projection Lambert 93 (epsg:2154), il faudra donc choisir entre la projection stéréographique des netcdf et le Lambert 93 pour les représentations et les calculs.

### Méthodes

Les scripts proposés, écrits en Python, permettent :

- ⑩ dans un premier temps, de lire les **métadonnées**
- ⑩ ensuite, de proposer un **diagnostic** pour repérer ce qui change d'un fichier à l'autre (coordonnées, codes qualité, liste des radars...)
- ⑩ enfin, une fois que les données ont été correctement cernées, de sortir des figures et fichiers de données en effectuant des traitements simples : champs de moyennes à pas de temps fixe (rééchantillonnage), repérage des champs maxima sur des durées de 5 min à 1j, calcul de chroniques moyennes sur des emprises (bassins versants).

### Visualisation des données sans traitement

Des cartes représentant directement les données lues dans les fichiers sont créées pour chaque pas de temps de 5 minutes pour :

- ⑩ les champs de LER, au choix dans un des deux systèmes de projection (initiale, stéréographique, ou Lambert 3) , à partir des matrices extraites de la variable ACRR et des points de grille
- ⑩ les champs de code qualité, à partir des matrices de la variable QUALITY et des points de grille

- ⑩ la localisation des radars du premier pas de temps, à partir des vecteurs extraits de radar\_image\_latitude, radar\_image\_longitude et |\$| radar\_image\_name ; en pratique on ne trace la carte que s'il y a évolution de la liste d'un pas de temps à l'autre .

Il faut faire attention à la définition des différents champs du fichier, en particulier les matrices de champ sont stockées comme transposées du champ voulu.

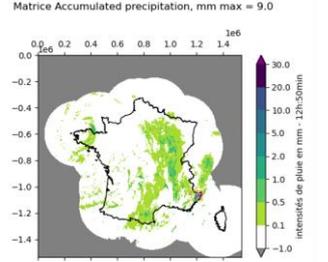
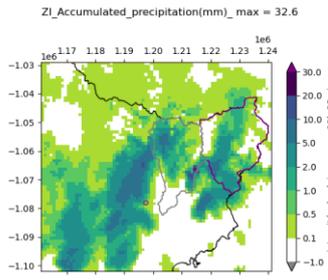
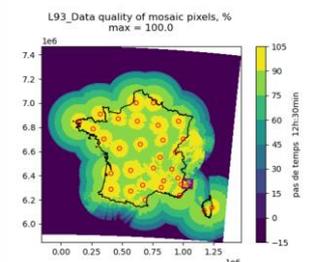
*Visualisation des données après traitement simples : re-échantillonnage temporel et spatial, recherche de maxima...*

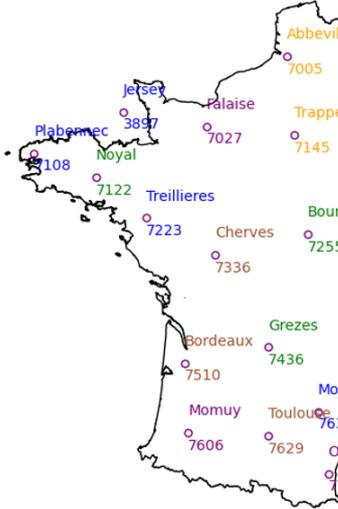
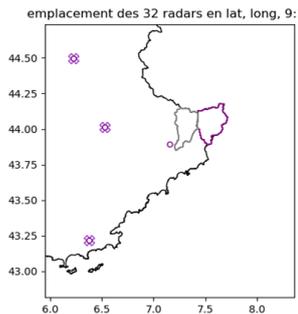
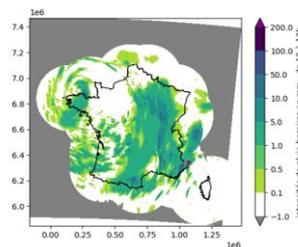
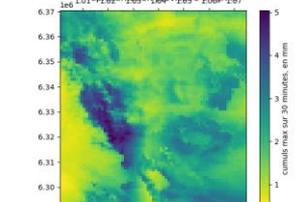
En complément, on peut constituer des matrices d'information calculées à partir des matrices initiales, ou des chroniques de valeurs moyennes sur des emprises, par exemple, et construire des figures.

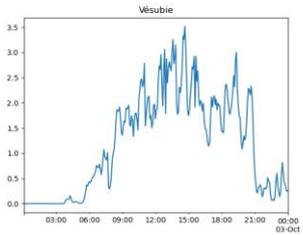
Sont déjà disponibles :

- ⑩ des cartes de mise à jour de la localisation des radars si la liste change d'un pas de temps à l'autre ;
- ⑩ les cartes de champs de LER agrégées au pas de temps horaire (avec en parallèle un fichier grid ASCII restreint à la zone d'étude) ;
- ⑩ une carte par jour du champ des valeurs maximales de la journée sur 5 min, 10 min, etc. à 1 j (liste accessible dans le code, liste\_durees\_min) (avec en parallèle un fichier grid ASCII restreint à la zone d'étude)
- ⑩ les chroniques de LER moyennes sur les bassins versants étudiés, sous forme de graphique et de fichier (format texte)

*Résultats*

Visualisation des données après traitement simple		
<p>Champs de LER France métropolitaine, cumulés à 5 minutes, au choix dans un des deux systèmes de projection (initiale, stéréographique, ou Lambert 3), à partir des matrices extraites de la variable ACRR et des points de grille</p> <p><b>288 cartes par jour (figures) en png, + en svg si souhaité</b> même code couleur pour toutes</p>	<p>Figure 4: exemple du champ de lame d'eau radar du 02/10/2020 de 12h45 à 12h50, avec zone d'étude (Sud-Est), dans la projection stéréographique définie dans ce fichier</p> <p>crs_netcdf_Matrice Accumulated precipitation, mm_cumul_france_1536-1km-5min_202010021250.png</p>	
<p>Mêmes champs, restreints à la zone d'étude</p>	<p>Figure 5: exemple du champ de lame d'eau radar du 02/10/2020 de 12h20 à 12h25 restreint à la zone d'étude (Sud-Est), dans la projection stéréographique définie dans ce fichier</p> <p>crs_netcdf_ZI Accumulated precipitation(mm)_cumul_france_1536-1km-5min_202010021225.png</p>	
<p>champs de code qualité, à partir des matrices de la variable QUALITY et des points de grille</p>	<p>Figure 6: exemple du champ de codes qualité du 03/10/2020 de 12h25 à 12h30 en Lambert 93</p> <p>L93_Data quality of mosaic pixels, %_cumul_france_1536-1km-5min_202010031230.png</p>	

<p>Localisation des radars du premier pas de temps, à partir des vecteurs extraits de radar_image_latitude, radar_image_longitude et  S  radar_image_name</p>	<p>La liste des radars peut évoluer d'un pas de temps à l'autre . Plutôt que de tracer cette carte « initiale » il serait plus intéressant de tracer une carte « finale » avec tous les radars rencontrés.</p>	
<p>Visualisation des données après traitement simples : rééchantillonnage temporel et spatial, recherche de maxima...</p>		
<p>Cartes de mise à jour de la localisation des radars si la liste change d'un pas de temps à l'autre ;</p>	<p>La carte, ici zoomée sur le Sud-Est, fait figurer par des croix les radars actifs au pas de temps courants, et par des cercles ceux actifs au pas de temps précédent. Sur 4 radars actifs au pas de temps précédent, le plus proche de la zone d'étude n'est plus actif au pas de temps courant.</p> <p>carte_des_radars_maj_9h10.png</p>	
<p>Cartes de LER agrégées au pas de temps horaire (avec en parallèle un fichier grid ASCII restreint à la zone d'étude) ;</p>	<p>Figure 7: sortie du code : carte de cumul horaire, le 02/10 de 12 à 13h, en Lambert 93</p>	
<p>une carte par jour du champ des valeurs maximales de la journée sur 5 min, 10 min, etc. à 1 j (liste accessible dans le code, liste_durees_min) (avec en parallèle un fichier grid ASCII restreint à la zone d'étude)</p>	<p>Les cartes des maxima sur différentes durées, ici 15 minutes, permet d'identifier les zones les plus arrosées brièvement ou sur la durée. A cette phase du développement, on a gardé un format «matrice» avec des coordonées Lambert93, mais il faudra proposer une matrice en projection initiale et reprojeter si</p>	

	on a besoin de Lambert 93 on devra appliquer la reprojection L93_Max_des_cumuls_duree_030.png	
Chroniques de LER moyennes sur les bassins versants étudiés, sous forme de graphique et de fichier (format texte)	L93_Vésublicronique.png	

### Discussions

L'application Panoply et le PDF fournis sont de précieux documents pour vérifier que les cartes sont correctement lues (vérifier par exemple l'ordre ligne / colonnes!).

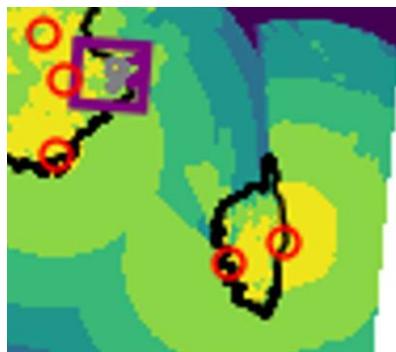
Les scripts développés permettent d'automatiser les traitements pour extraire l'information des cartes, par rapport à une utilisation « manuelle » de QGis, qui reste possible et même souhaitable ponctuellement à des fins de vérification.

Il pourront être adaptés au fur et à mesure des besoins.

L'utilisateur doit dans cette version « entrer dans le code » pour désactiver l'écriture des cartes et fichiers dont il n'a pas besoin (quelle projection, France entière ou zone restreinte, LER seule ou code qualité...). Le code sera modifié pour rendre cette étape plus facile, avec une initialisation explicite en début de code par exemple.

Ensuite, la modification prioritaire sera de permettre d'**analyser plusieurs répertoires « journée » à la fois**, pour bien couvrir l'épisode.

Il faut rester attentif à un éventuel changement de projection. La projection initiale, par définition, propose un champ bâti sur une grille rectangulaire, ce qui facilite l'établissement de cartes. Si on a une bonne raison de reprojeter, le tracé de cartes sur grille « irrégulière » sera plus complexe. Sur l'exemple d'un champ de codes qualité ci-dessous, on a utilisé une représentation en « contour », donc autrement dit en classes de valeurs, après interpolations. La carte ci-dessous semble montrer que les radars (cercles rouges) et les maxima des codes qualités (aplats de couleur « en cercles concentriques ») coïncident et sont bien positionnés par rapport aux traits de côte.



## V. Annexe

### a. Annexe 1

<b>Titre complet de l'action</b>	IRIP- Valid		
<b>Action n°</b>	4.1.4		
<b>Responsable INRAE (Unité)</b>	Breil Pascal (RIVERLY)		
<b>Responsable DGPR-Bur.</b>	Hortense BLANCHET		
<b>Contexte et enjeu</b>	Les inondations par ruissellement intense sont présentes dans 50% des déclarations de catastrophe naturelle par inondation [www.catnat.net]. Les coûts induits sont estimés du même ordre par le CCR. La modélisation prédictive des aléas associés au ruissellement intense était peu abordée dans la modélisation hydrologique et des développements ont été réalisés dans le cadre de cette convention. La DGPR est en attente de méthode de cartographie de ce type d'aléas pour compléter les travaux de cartographie des inondations requis par le Directive Inondation (2007/60/CE).		
<b>Objectifs du projet</b>	Fiabiliser les modèles de cartographie des aléas liés au ruissellement intense. Pour cela évaluer le potentiel des données satellites acquises au plus près des dates d'événement pour retrouver les stigmates au sol (dégâts souvent réparés dans les semaines qui suivent). L'acquisition récurrente d'images permet aussi de suivre des effets induits à moyen et long terme des mouvements de sol et éléments associés lors des épisodes de ruissellement intense (perte en sol, transfert de fertilisants et pesticides vers points bas avec effet sur végétation et production, colmatage petits cours d'eaux).		
<b>Travaux déjà réalisés et travaux prévus</b>	<p><b>Résultats 2019 et 2020</b></p> <p>Un master co-encadré en 2019 par Irstea, CNES et ONERA a permis de tester différents indices et filtres de traitement usuels en télédétection. Ces premiers résultats retraités, expertisés en 2020, sont encourageants. Les zones de dépôt requièrent la combinaison d'images et d'algorithme de contexte par intelligence artificielle. Cela a donné lieu à la proposition d'une thèse qui a reçu un financement CNES-ONERA (démarrage octobre 2020). Le CDD de l'action 4.1.b (2020) via la convention DGPR n'a pu être réalisé pour raison administrative du nouvel institut INRAE. Trois actions de substitution sont programmées d'ici la fin de l'année 2020 (si validées par DGPR) : La participation au REX dans les Alpes Maritimes ; La participation au colloque SHF sur l'état des connaissances sur les inondations par ruissellement ; L'accueil du doctorant une semaine au centre INRAe de Lyon pour formation à IRIP-plugin et présentation de sa thèse aux hydrologues.</p> <p><b>Travaux prévus 2021 à 2023:</b></p> <p>Afin de disposer d'une évaluation plus exhaustive de la méthode IRIP (et d'autres modèles de représentation du ruissellement) il est proposé d'utiliser la nouvelle génération de données satellites hautes fréquence et très haute résolution dans le cadre d'un travail de thèse financée par CNES et ONERA. La couverture des pluies radar horodatées de météo-France, sera utilisée pour caractériser l'intensité des zones actives durant les événements. L'accès « à la demande » auprès de AERIS (pour Météo-France) permet d'investiguer les événements récents (tempête Alex,..). Les sites pilotes proposés en sus des événements récents sont l'Aude et l'île de la Réunion qui bénéficient tous deux de programme du CNES avec l'ESA pour l'acquisition systématique (bancairisation) des données très hautes résolution Pleiade. De même ces sites disposent de données de lame d'eau radar à 5 minutes. La thèse a pour objectif de traiter les données satellites afin de disposer de données de dégâts liés au ruissellement intense «quasi exhaustives» sur deux territoires impactés très différents par leurs topographie, pédologie et climatologie (pluies cycloniques...préfiguration d'événement catastrophiques en France métropolitaine ..tempête Alex), ceci afin d'évaluer de manière approfondie le modèle Irip (ou autre modèle de ruissellement). La demande sur les trois années de thèse consiste en un appui aux missions à mener sur les différents territoires pour collecter les vérités terrain et les données de prévention en place ; participer à des conférences expertes. Une mission en 2021 à la Réunion est donc planifiée pour collecter les informations et visiter les sites régulièrement impactés avec la DEAL (ST-Denis). Cette action fusionne en 2021 avec les actions 4.14. (IRIP_REG) et 4.1.7. (IRIP_LER).</p>		
<b>Durée ...</b>	<i>Durée</i>	<i>Début de l'action</i>	<i>Fin de l'action</i>
	3 ans	2021	<b>2023</b>

Produits et valorisations projetés	Nature	Cibles visées	Échéancier
	Trois rapports sur les connaissances acquises et sur méthode d'étalonnage de la méthode IRIP (lien avec fiche action IRIP-Plugin XXX) sur un territoire à partir de données satellites et lames d'eau radar.	Services instructeurs, BE, gestionnaires de territoire, serv. urbanisme, ..tous impliqués dans le groupe test de la fiche action IRIP-Valid	Déc. 2021 : rapport sur les bases « incidents » liées au ruissellement intense (Aude, La Réunion, Pyrénées orientales, Alpes-Maritimes). Déc 2022 : rapport sur l'apport de la télédétection THR pour l'analyse des dégâts au sol. Déc 2023 : Rapport sur l'évaluation du modèle IRIP.
<b>Équipe de travail INRAE</b>	UR Rivery, équipe Bassins Versants : Breil P., Poulard C., Leblois E.		
<b>Partenariats envisagés</b> (noms, rôle)	Thèse Co-encadrée CNES/ONERA/INRAE sur usage des données de télédétection pour caractériser les impacts au sol liés au ruissellement intense. Evaluation, étalonnage et amélioration du modèle IRIP. Thésard : Cerebelaud A. (2021-2023). Encadrement : Briottet X. (Dir. Thèse, CNES) ; Blanchet G. (CNES) ; Roupioz L. (ONERA) ; Breil P. (INRAE). <b>Une proposition consiste à proposer de tester aussi les cartographies SHYREG et CEREMA pour les territoires évoqués. Cela nécessiterait des fiches actions des personnes impliquées. Dans ce cadre il serait aussi intéressant que le CNES et l'ONERA deviennent des partenaires de la convention DGPR .</b>		
<b>Références ou bibliographie sommaire</b>	Publication : Braud I., Lagadec L.R., Moulin L., Chazelle B., Breil P. (2020) 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; Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 20, 947–966, 2020; <a href="https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/20/947/2020/nhess-20-947-2020.pdf">https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/20/947/2020/nhess-20-947-2020.pdf</a>  Colloque « Risque ruissellement : Diagnostic et Solutions » (30 novembre - 2 décembre 2020) <a href="https://preview.inwink.com/ruissellement/">https://preview.inwink.com/ruissellement/</a> Communications : <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Potentiel de l'imagerie satellitaire à très haute résolution pour évaluer et cartographier les dommages causés par le ruissellement intense</b> / Pascal BREIL1, Axelle FAVRO1, Laure ROUPIOZ2, Xavier BRIOTTET2, , Gwendoline BLANCHET3, Jean-Marc DELVIT3 – accepté pour publication dans la Houille Blanche.</li> <li>• <b>Contexte pédoclimatique et ruissellement intense</b> / Pascal BREIL1, Hélène ABEKHZER1, Tristan GALLY1</li> <li>• <b>Co-animation atelier modélisation des inondations par ruissellement intense.</b></li> </ul>		
<b>Date de mise à jour de la fiche :</b>	27/11/2020		

<b>Coût complet prévisionnel des moyens mis en place par INRAE pour l'exécution des travaux</b>	<b>40 047€</b>
---	----------------

N° sous-action	Durée déclarée en 2020	CDD	Nom action	Correspondant INRAE	Correspondant DGPR	Coût complet € HT - Convention	Subvention accordée € HT - Convention	Taux subvention MTEs	N° de programme budgétaire	Thématique risque
4.1.4	2020-2021		IRIP-Valid	Pascal BREIL (RIVERLY)	Hortense BLANCHET (BRIL)	43 047	21 728	50%	0181-10-04	inondations

## b. Annexe 2

### Actions 2022

1. Maintenant que 3 jeux d'incidents « quasi exhaustifs » sont disponibles, il est possible d'évaluer la sensibilité des différents facteurs des cartes IRIP dans la détection des parcelles endommagées. De là nous pouvons imaginer d'introduire des pondérations dans les facteurs qui sont les plus sensibles pour améliorer les cartes IRIP. Ce travail sera confié à un stage de master 6 mois basé à INRAE mais qui devra se déplacer régulièrement au CNES ou à l'ONERA pour de courts séjours. En effet le stagiaire sera co-encadré par P. Breil et A. Cerbelaud.

Coût estimé : gratification 6 mois = 3.7 k€ + 2.0 k€ de frais de mission + 2.0 k€ de PC portable = 7.7k€

2. La robustesse du modèle de détection étant démontrée (il a été calé sur l'Aude et a donné de bons résultats sur les Alpes Maritimes et semble prometteur pour l'Ile de la Réunion car tests en cours), il est prévu de l'améliorer en introduisant la donnée Pleiade post événement à très haute résolution (0.7m). Il sera ainsi constitué un filtre multi-capteurs qui implique des traitements plus complexes. Cela peut potentiellement permettre de détecter des résultats en zone urbanisée.

Coût estimé : temps thèse pris en charge par CNES et ONERA

3. Il sera testé comme unité spatiale de travail les polygones d'occupation du sol, qui sont homogènes par définition (produit du CES-OSO). En effet les parcelles cadastrales agricoles, en particulier quand elles sont grandes, peuvent présenter plusieurs usages agricoles qui augmentent la variabilité intrinsèque des signaux radiométriques. Cela peut réduire la capacité de détection des variations entre avant et après un événement de pluie majeur.

Coût estimé : temps thèse pris en charge par CNES et ONERA

4. Utilisation des données de lame d'eau radar « Antilope –ré-analyse » produites par Météo-France. Ces données sont recalées sur les pluviomètres au sol. L'objectif est d'évaluer si des seuils de pluies peuvent être associés à des caractéristiques au sol pour expliquer le déclenchement des dommages détectés. Le coût de mise à disposition pour la recherche est de 150 euros par zone d'étude. Compte tenu de possibles événements à venir en 2022, nous tablons sur 6 zones d'étude dont 3 sont déjà connues.

Coût estimé : # 1 k€

5. Les missions de terrain devront continuer pour affiner la catégorisation des dégâts via les images satellites. En particulier la différenciation entre l'arrachage, le couchage des cultures, l'érosion diffuse et concentrée. Nous prévoyons 6 campagnes dont une à la Réunion si un cyclone venait à frapper l'île en 2022.

Coût estimé : 5 campagnes en métropole (3 personnes \* 4 jours \* 5 = 60 \* 100 = 6 k€) + 1 campagne à la Réunion (2 personnes \* 10 jours) = 7 k€. Total = 13 k€.

6. L'acceptation pour publication de ces travaux par des réviseurs externes atteste de la rigueur des résultats produits. A ce stade nous considérons que les taux de détections des dommages proposés par l'analyse des images satellites entre avant et après événement sont déjà utilisables pour évaluer les cartographies IRIP ainsi que d'autres modèles proposés à la DGPR pour la Directive Inondation (Exzeco, Shyreg descente d'échelle, WaterSed). Cette possibilité sera proposée aux partenaires. Le cas échéant, le temps de permanent de cette sous-action sera comptabilisé (mise à disposition des données, méthode d'évaluation).

- personnel permanent : 35 jours niveau CR1-HC
- 1 stage en master 2 : gratification 6 mois.
- Frais de mission (terrain)
- Equipement

**Coût total : 57.2 k€ / Demande SRNH : 34.3 k€ / taux de subvention : 60%**

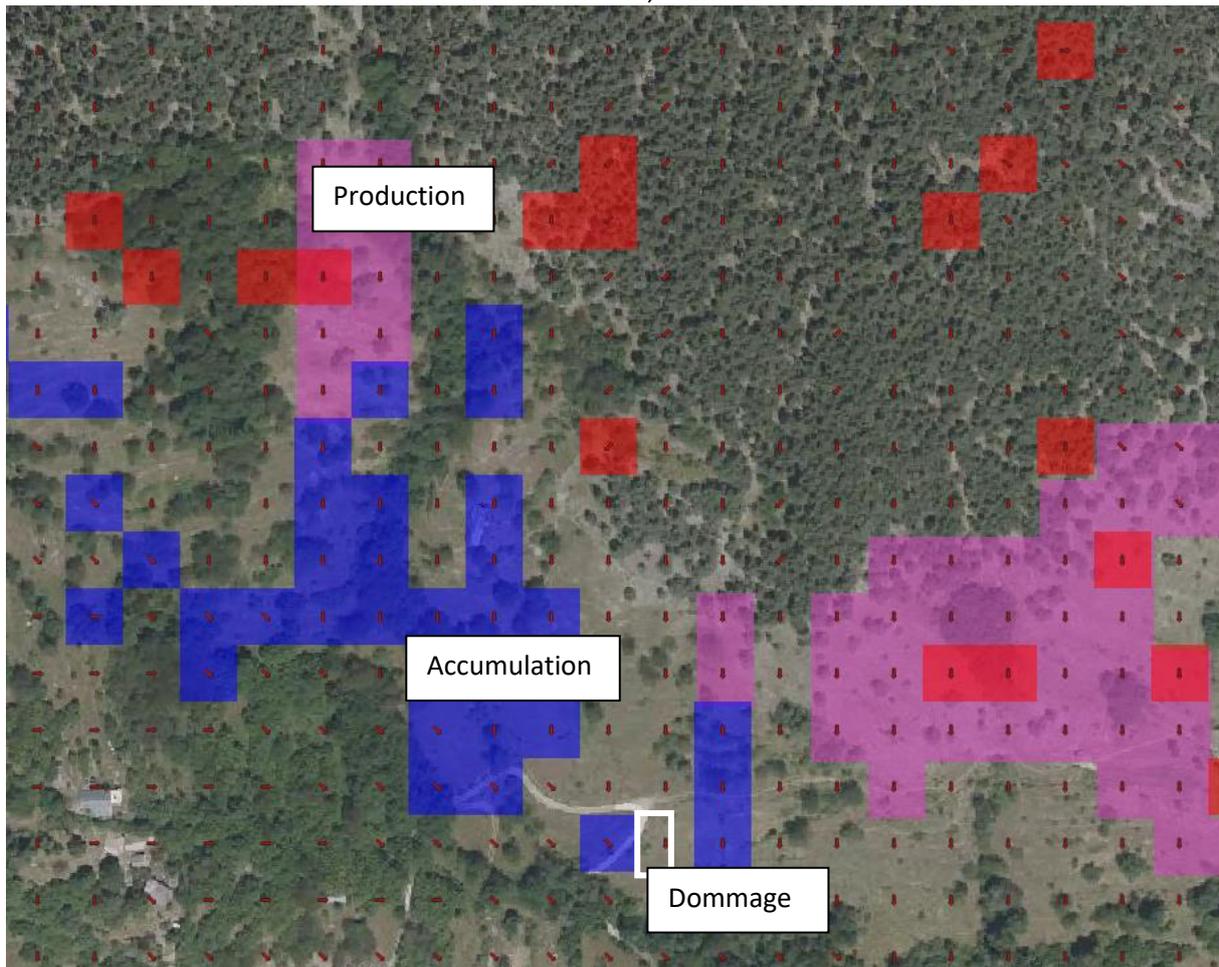
c. Annexe 3

Illustration

Observation images aériennes



Prédiction IRIP avec contexte des aléas de Production, Transfert et Accumulation





## Résumé

Les travaux développés dans le cadre de l'action 4.1.4 en 2021 ont concerné l'apport de la télédétection pour caractériser l'emprise des dommages au sol, suite à des pluies intenses. L'objectif était de répondre au manque de données d'évaluation et de validation des modèles de représentation des effets du ruissellement intense.

Les résultats sont prometteurs et ont fait l'objet de trois publications, l'une dans la Houille Blanche, suite au colloque sur les inondations par ruissellement organisé par la SHF et l'ANEB fin 2020, et l'autre dans une revue internationale spécialisée dans la télédétection en 2021 et la dernière dans une autre revue internationale début 2022. Les principaux résultats sont repris dans la partie II de ce rapport. Le modèle de comparaison des images satellites avant-après des pluies intenses s'avère être très performant après apprentissage, cela d'autant plus que le modèle « calé » dans l'Aude a fonctionné dans les Alpes Maritimes. Les taux de détection des vérités terrain sont proches de 90% et les taux de faux positifs et de faux négatifs cumulés sont voisins de 10%. La confrontation des probabilités de dommage des parcelles cadastrale « vues » par la télédétection avec les potentiels de ces parcelles à ruisseler (méthode IRIP) est tout à fait cohérente et validée sur un plan statistique.

La partie III de ce rapport aborde l'évaluation de l'effet des terrasses agricoles sur le ruissellement intense car des solutions d'atténuation sont à considérer dans la perspective du changement climatique. Un premier travail purement numérique et à base d'équations de l'hydrodynamique des sols permet de confirmer le rôle des terrasses agricoles sur la réduction du ruissellement intense et sa conversion en infiltration. La deuxième approche du rôle des terrasses a été de tester d'un point de vue statistique, suite à la tempête Alex dans les Alpes Maritimes, si les probabilités de dommages des parcelles étaient significativement différentes selon la présence plus ou moins importante des terrasses. Ces dispositifs sont assez répandus sur les massifs de la côte méditerranéenne pour différents types de cultures. Là aussi les résultats ont confirmé l'intérêt de ces aménagements.

La partie IV du rapport s'intéresse à l'usage des lames d'eau radar pour tester le lien entre les cumuls de pluie maximums sur différentes durées avec les probabilités de dommage dans les parcelles qui ont été arrosées. Les résultats de la dernière publication montrent bien la liaison entre les quantités de pluie reçues par les parcelles et la quantité d'aléa en accumulation prédite par le modèle IRIP. De même nous retrouvons la relation, vue sur d'autres territoires, qui exprime le fait que plus une parcelle a un fort potentiel de ruissellement selon IRIP, moins la quantité de pluie nécessaire à déclencher des dommages est importante. Il reste néanmoins à réduire le taux des fausses alarmes liées aux prédictions du modèle IRIP « qui voit tout et même trop ». Pour cela, des tests de sensibilité du modèle IRIP ont aussi été réalisés dans la dernière publication car nous disposons avec les images satellites d'une quasi-exhaustivité des dommages. Cela permet d'envisager la modification des poids de certains facteurs, dont ceux de la production amont et de l'indice de Beven. Ce sera l'objet d'un stage de master en 2022. L'autre piste d'amélioration concerne l'analyse de l'évolution des phases de ruissellement et d'infiltration au cours d'un événement en utilisant l'outil d'analyse des lames d'eau radar.