

# DEVELOPPEMENT DE PRODUITS 3D INNOVANTS POUR LES BESOINS DU SECTEUR DE L'ASSURANCE EN CAS D'ÉVÉNEMENTS DE FORTS VENTS

Zoé Papirer<sup>1</sup>, Henri Giraud<sup>1</sup>, Danielle Alves Teixeira da Silva<sup>1</sup>, Oscar Narvaez Luces<sup>1</sup>, Hervé Tong<sup>2</sup>, Emilie Bronner<sup>3</sup>, Dimitri Lallement<sup>3</sup>, Dawa Derksen<sup>3</sup>

1 : ICube-SERTIT, Parc d'Innovation, 300 Boulevard Sébastien Brant, CS 10413, 67412 Illkirch Graffenstaden, France ; [z.papirer@unistra.fr](mailto:z.papirer@unistra.fr) ; [henri.giraud@unistra.fr](mailto:henri.giraud@unistra.fr)

2 : Descartes Underwriting, 148 rue de Courcelles, 75017 Paris, France

3 : Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), 18 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, Cedex, France

## Résumé

Les événements de forts vents comme les tempêtes, les orages, les tornades, les ouragans, etc. engendrent parfois des catastrophes sur le plan humain, mais aussi sur le plan matériel. Étant donné que ces événements peuvent se produire à n'importe quel endroit sur la planète, ce sujet représente de forts enjeux pour le secteur assurantiel. En effet, pouvoir évaluer de manière précise et rapide l'ampleur des dégâts causés par tous ces phénomènes climatiques constitue à l'heure actuelle un réel défi pour les acteurs de ce domaine. Dans ce contexte, les données satellitaires d'observation de la Terre représentent un vrai atout pour le développement de ce genre de solutions innovantes. Cependant la télédétection fait actuellement face à plusieurs verrous techniques pour cartographier l'impact de ces événements extrêmes. Parmi ceux-ci, la faible résolution temporelle et spatiale des données satellitaires est probablement le principal. En effet, les dégâts engendrés par ce genre de catastrophes étant bien souvent très localisés, l'utilisation d'images ayant une résolution spatiale de l'ordre du mètre est requise. Par ailleurs, l'impact de l'illumination, des zones d'ombre, du relief ou encore des nuages sur les images peut en affecter la qualité, et ainsi perturber la détection. L'objectif est de développer un nouveau service basé sur des produits innovants, permettant de cartographier les dégâts survenus après un événement de forts vents, en se basant sur l'exploitation de données 3D couvrant les zones impactées. Pour cela, des Modèles Numériques de Surface (MNS) sont générés à partir d'images satellitaires acquises avant et après l'événement, puis combinés afin de pouvoir mieux délimiter les zones ayant subi des dégâts. Grâce à cette technique et du fait de la nature des données utilisées, le produit développé permet de répondre au besoin de l'utilisateur en surmontant les verrous actuels.

**Mots-clés :** Tempête, Évaluation des dégâts, Télédétection, Pléiades, Modèles Numériques de Surface, MNS, Assurance

## Abstract

*Extreme wind events such as thunderstorms, tornadoes, hurricanes, typhoons, etc. can be responsible for disasters in terms of human lives, but also in terms of assets. Considering that these events represent a worldwide threat, it is a particularly interesting topic for the insurance sector. Indeed, being able to accurately and quickly identify the impact of such climatic phenomena on buildings, energy or forestry assets is currently a real challenge. In this context, Earth Observation satellite data represent an undeniable benefit for developing such innovative solutions. However, satellite remote sensing is currently facing several technical obstacles to map the impact of extreme wind events, the main one being probably the satellite imagery low temporal and spatial resolution. Indeed, since the extent of damages is often very limited spatially, using imagery with spatial resolution around or below one meter is required. Furthermore, the consequences of sun illumination, shadow areas, relief or even clouds can affect imagery quality, with a negative impact on damage detection. The objective is to develop a new service with innovative damage mapping products based on 3D data over the impacted areas. This requires the generation of Digital Surface Models (DSM) from stereoscopic satellite images acquired before and after the catastrophic event, combining the resulting DSM layers for improving the damage detection. These cutting-edge satellite sensor capabilities, offering sub-meter spatial resolution and 3D capacities, bring enhanced accuracy for damage estimations, to quantify economic losses, and evaluate changes to the landscape.*

**Keywords:** Storm, Damage assessment, Earth Observation, Pléiades, Digital Surface Models, DSM, Insurance

## 1. Contexte du projet

Depuis plusieurs années, les effets du changement climatique sont maintenant bien tangibles et se font ressentir de façon concrète, affectant de plus en plus de populations et territoires à travers la planète. Outre la tendance globale de hausse des températures, ces effets se traduisent également par un accroissement de phénomènes climatiques dont la puissance parfois dévastatrice peut engendrer de véritables catastrophes.

Parmi les événements les plus importants et potentiellement les plus destructeurs, les phénomènes de forts vents comme les tempêtes, tornades, ouragans, typhons etc. peuvent représenter une menace bien réelle tant sur le plan humain que sur le plan matériel. En effet, le montant des pertes résultant de tels événements peut s'avérer très conséquent, d'autant plus dans ce contexte de changement climatique où l'intensité et l'impact de ces catastrophes naturelles connaissent une tendance à la hausse.

Du fait de l'augmentation du risque que représente cette menace, à la fois si l'on considère la fréquence des événements mais aussi l'élargissement des zones impactées, ce sujet représente un enjeu très fort pour le secteur assurantiel. En effet, pouvoir évaluer de manière précise et rapide l'ampleur des dégâts causés par ces phénomènes climatiques, et ce peu importe le type de bien considéré, constitue à l'heure actuelle un réel défi pour les acteurs de ce domaine. Les biens qui peuvent être impactés lors d'épisodes de vents extrêmes sont de différentes natures : les structures en dur telles que les entrepôts et les habitations, les infrastructures énergétiques comme les panneaux solaires ou éoliennes par exemple, ou bien encore les forêts et les zones arboricoles pour lesquelles le passage d'une tempête ou d'une tornade peut provoquer la destruction de plantations entières. De plus, en raison de l'augmentation globale du coût des catastrophes naturelles, les clients doivent de plus en plus faire face à une augmentation des tarifs des couvertures d'assurance, et parfois même à de grandes difficultés simplement pour pouvoir assurer leurs biens.

Ces besoins ont été identifiés depuis un certain temps par la société Descartes Underwriting, qui en tant qu'acteur de l'industrie de l'assurance paramétrique reçoit régulièrement des requêtes de la part de clients à la recherche de contrats d'assurances permettant de couvrir leurs pertes liées à des événements de forts vents. Par ailleurs, l'entreprise mène ponctuellement des études de marché afin d'identifier les besoins clients, les limites des produits et services proposés actuellement par les autres acteurs assurantiers ainsi que les perspectives futures de développement, et peut s'appuyer sur ses équipes de commerciaux couvrant les principales régions du monde ainsi que sur ses relations étroites avec les courtiers en assurance pour recueillir leurs retours sur les couvertures proposées.

Cependant, malgré le fort intérêt de la part des clients, l'étape d'expertise des pertes reste à l'heure actuelle encore très laborieuse du fait de la nécessité d'envoyer physiquement un expert sur place (voir plusieurs dans certains cas) afin de pouvoir estimer les dégâts. Cela pose plusieurs problèmes pour les clients : une lenteur des procédures logistiques et administratives avec régulièrement un manque de réactivité de la part des assureurs, ainsi que la subjectivité des estimations des sinistres.

Le développement de couvertures d'assurances capables de couvrir les pertes subies lors de tels événements, mais basées sur des données et des processus plus automatisés, constituerait ainsi une réelle plus-value pour ces clients. Pour cela, le potentiel des données satellitaires d'observation de la Terre pour le développement de ce genre de solutions innovantes est indéniable. Pour autant certaines limites, qu'elles soient d'ordre technique (résolution spatiale insuffisante), ou bien relevant d'autres facteurs (manque de données d'archive par exemple) ont jusqu'ici freiné l'exploitation de ces données pour cartographier l'impact des tempêtes, tornades et autres phénomènes du même genre.

En effet, les dégâts engendrés par ces événements extrêmes étant bien souvent très localisés, l'utilisation

d'images ayant une résolution spatiale de l'ordre du mètre est requise. De plus, l'impact de l'illumination, des zones d'ombre, du relief ou encore des nuages sur les images peut en affecter la qualité, et ainsi perturber la détection. Par ailleurs, en ce qui concerne les zones forestières, il peut se révéler difficile de faire la distinction entre des surfaces impactées par un événement de forts vents et des coupes rases que le client est susceptible d'avoir effectuées après la catastrophe afin de limiter ses pertes.

Afin de pouvoir mieux répondre à ces défis, le développement d'un nouveau service basé sur l'exploitation de données 3D et couvrant les zones impactées par un événement de forts vents a été imaginé. L'utilisation des données 3D et des Modèles Numériques de Surface (MNS) qui en dérivent doit permettre d'améliorer les méthodes de détection plus classiques, consistant bien souvent en des traitements exploitant la radiométrie des pixels constituant les images. Pour ce nouveau service, le critère radiométrique est plutôt vu comme un possible complément à l'information altimétrique dérivée des données satellitaires.

Pour satisfaire le besoin d'un utilisateur et pouvoir effectuer une cartographie des dégâts engendrés par une tempête (ou tout autre événement tornadique extrême) ainsi qu'une évaluation de l'intensité de la destruction qui en résulte, des images acquises en mode stéréoscopique avant et après la catastrophe sont nécessaires. En combinant ces acquisitions, il est alors possible de faire la différence entre les MNS générés à partir de chaque couple stéréoscopique et de calculer une différence de hauteur entre ces deux MNS, permettant ainsi de surmonter les verrous existants.

Le développement d'un tel service a été proposé conjointement par le SERTIT et Descartes lors d'un appel à idées puis d'un appel à proposition lancés par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) dans le cadre du programme Ambition Aval. Ce programme a pour objectif d'accompagner le développement de services en réponse à un besoin utilisateur (public comme privé) en s'appuyant sur des données de la télédétection spatiale. Le segment de marché potentiel inclut celui de l'assurance forestière, du dommage aux biens, et de plus, pourrait couvrir le domaine militaire car il y a un fort intérêt pour la géographie militaire à avoir un état des lieux des zones détruites suite à un épisode de grand vent. Grâce à son caractère innovant, notamment vis-à-vis de son apport dans la préparation de l'arrivée de la future mission CO3D (Constellation Optique 3D) dont les satellites ont pu être lancés et mis sur orbite en 2025, cette proposition de projet de détection de dégâts de tempête et d'événements tornadiques extrêmes a été retenue par le CNES.

La description des travaux réalisés, des méthodes utilisées et des développements mis en œuvre, ainsi que des résultats obtenus, sont exposés dans les parties suivantes de cet article.

## 2. Cas d'études

La sélection des cas d'études a été réalisée à l'aide des données recensées par Descartes, des activations passées du SERTIT et de la veille réalisée sur les

événements survenant pendant la durée du projet. Une dizaine de cas d'études différents ont été initialement identifiés.

Afin de pouvoir effectuer une sélection parmi ceux-ci, différents critères sont utilisés pour les comparer :

- La disponibilité des couples d'images stéréoscopiques PRE et POST événement, ainsi que l'écart temporel entre ces images et l'événement,
- La disponibilité de données de validation,
- L'intérêt de ce cas en termes d'impact des dégâts observés,
- Le thème que concerne ce cas : dommages au bâti, à la végétation ou à des infrastructures militaires.

Ces critères ont permis d'arriver à la sélection finale de quatre cas différents pour cette étude, tels qu'illustrés sur la Figure 1.



Figure 1. Cas d'études sélectionnés

Le premier cas concerne l'île de Saint-Martin, située dans les Antilles dans la mer des Caraïbes. Celle-ci a été fortement impactée par le passage de l'ouragan Irma le 6 septembre 2017. La totalité de l'île a subi de très importants dégâts, en raison de vents puissants, de fortes pluies et de submersions des côtes par les eaux. Il s'agit d'un des ouragans les plus dévastateurs que le secteur n'ait jamais connu. Les infrastructures ont particulièrement été touchées. Les dégâts causés par l'ouragan Irma, dans la partie française de l'île, ont été cartographiés par le SERTIT, pour les besoins de la Sécurité Civile française et de la Caisse Centrale de Réassurance (CCR). La reconstruction a aussi été suivie par le SERTIT, à partir d'imagerie satellitaire. De plus, la partie néerlandaise de l'île a été cartographiée par le service CEMS RM (Copernicus Emergency Management Service - Rapid Mapping, 2025). Ce cas d'étude est donc bien documenté, aussi bien sur les dégâts observés directement après le passage de l'ouragan, que sur la reconstruction ayant eu lieu après la catastrophe.

Quelques jours après le passage de l'ouragan Irma dans les Caraïbes, l'ouragan Maria a lui aussi causé d'importants dégâts. Notamment, l'île de Porto Rico a été grandement affectée lors de son passage le 20 septembre

2017, Maria étant l'un des ouragans le plus dévastateurs que l'île ait jamais connu. Les vents et pluies ont affecté un grand nombre d'infrastructures. Contrairement au cas de Saint-Martin, les dégâts sur Porto Rico n'ont pas été cartographiés par le SERTIT. Le service CEMS RM a été activé, mais n'a cartographié que l'étendue de l'inondation et pas les dégâts au bâti ni à la végétation. Cependant, de nombreux médias confirment que les infrastructures ont elles aussi été affectées.

Durant le projet, de nombreux événements de forts vents ont affecté plusieurs régions du monde. Notamment, plusieurs tornades générées par l'ouragan Milton ont frappé la Floride au cours du mois d'octobre 2024. En effet, plusieurs tornades enregistrées durant l'ouragan Milton ont causé des dégâts très importants sur certains secteurs localisés sur la côte Est de la Floride. Des données stéréoscopiques Pléiades Neo ont pu être trouvées sur les zones affectées et des programmations de nouvelles acquisitions stéréoscopiques Pléiades Neo ont été effectuées à la suite de l'événement. De plus, l'existence de données additionnelles (trace de la tornade, photos et localisation des dégâts, etc.) mises à disposition par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2025) permet d'apporter des éléments potentiellement utiles pour la validation qui justifie pleinement d'ajouter ce cas dans la liste des cas d'études.

Par ailleurs, la fin d'année 2024 a été notoirement marquée par le phénomène cyclonique Chido qui a dévasté les 2 îles principales de l'archipel de Mayotte. Le cyclone Chido débute sous la forme d'un système dépressionnaire qui est détecté le 5 décembre 2024 à environ 500 km à l'ouest des îles Cocos. Selon une trajectoire principalement orientée de l'est vers l'ouest, le système n'évolue en dépression tropicale que le 9 décembre avant d'être classé en tempête tropicale. Entre le 11 et 12 décembre, le système évolue et se renforce à nouveau jusqu'à être classé comme cyclone tropical de catégorie 5. Chido frappe Mayotte au cours de la journée du 14 décembre, et est alors classé en catégorie 4 sur l'échelle de Saffir-Simpson, produisant des rafales de vent estimées proches de 250 km/h sur la partie nord de l'archipel.

Après le passage de Chido, les bilans humain et matériel sont lourds, les derniers chiffres officiels faisant état d'au moins 39 morts, 4 000 blessés et d'une estimation des coûts pris en charge par les assurances s'élevant jusqu'à 800 millions d'euros. Les territoires au nord de l'archipel, les plus fortement peuplés et concentrant les principales infrastructures, correspondent aux zones les plus exposées et paient ainsi le plus lourd tribut. L'état de catastrophe naturelle est déclaré dans toutes les communes du département. L'existence de nombreuses données - images stéréoscopiques Pléiades-HR (PHR) et Pléiades Neo d'archive, données de validation issues des activations de CEMS RM et de la Charte (Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures, 2025) - et surtout les conséquences considérables engendrées par cet événement, font de cet événement un cas incontournable pour le projet.

Au vu des conséquences notables de ces événements sur les zones affectées, la méthode proposée offrirait une

identification simplifiée des dégâts pour le secteur de l'assurance entre autres.

### 3. Chaîne de traitement

En termes d'outils, la chaîne de traitement illustrée sur la Figure 2 est intégralement basée sur des outils internes au SERTIT ou des outils open-source, parfois encore en phase de développement, permettant de soutenir l'équipe en charge de cette phase et ainsi de participer à l'amélioration continue de ces outils. Cette chaîne de traitement est donc transparente puisque tous les algorithmes la constituant sont connus, et sera sûrement amenée à évoluer avec le développement de nouvelles méthodologies.



Figure 2. Chaîne de traitement

Cette chaîne de traitement a pour but de fournir la cartographie des zones affectées à partir des données satellites stéréoscopiques brutes. Pour ce faire, de nombreuses pistes différentes ont été explorées durant la phase de maquettage.

Afin de masquer les zones en eau, une méthode basée sur des indices radiométriques a été retenue et est décrite plus en détails ultérieurement. De la même manière, la cartographie des nuages est réalisée à l'aide d'une méthode semi-automatique, grâce à un outil développé au SERTIT.

Initialement, la chaîne de traitement devait segmenter tout type de terrain, puisque l'analyse n'est pas la même en fonction du type de terrain ayant subi des dégâts. Cependant, dans le cadre d'une couverture d'assurance, le client est généralement en mesure de fournir l'emprise de ses parcelles dans un format numérique géolocalisé et une indication sur les régions affectées par la tempête. Ainsi, il n'est plus nécessaire de parvenir à segmenter correctement la végétation, bien que, grâce aux nombreux indices existants, la segmentation de la végétation ne constitue pas une étape posant de grandes difficultés.

En revanche, les clients ne seront pas, du moins pas systématiquement, en mesure de fournir l'emprise spécifique du ou des bâtiments assurés. Ainsi, un besoin de segmentation automatique subsiste, mais spécifiquement pour le bâti. Plusieurs pistes ont été explorées pour répondre à ce besoin.

De nombreuses méthodes de segmentation ont été explorées mais aucune d'entre elles n'a permis de répondre efficacement aux besoins, en raison de la complexité à segmenter le bâti automatiquement, avec une

qualité suffisante. Afin de répondre à cette problématique, une autre option envisagée est l'utilisation de données exogènes pour segmenter les résultats. Le premier jeu de données étudié est OSM (OpenStreetMap, 2025), mais celui-ci est largement incomplet sur certaines zones, alors que la chaîne de traitement nécessite une emprise au bâtiment près à l'échelle mondiale. Une autre option étudiée est l'utilisation des données Overture (Overture Maps Foundation, 2025), qui se sont avérées bien plus complètes et à jour sur toutes les zones d'étude. C'est donc cette source de données (présentée ultérieurement dans cet article) qui est retenue.

Enfin, un autre point notable de la chaîne de traitement concerne la cartographie des dégâts. Une approche initiale utilisant des indices radiométriques, basés notamment sur l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI), a finalement été écartée pendant la phase de tests. En effet, l'écart temporel très important entre les images PRE et POST événement n'avait pas nécessairement été pris en compte lors du maquettage de la chaîne de traitement. Ces importants écarts temporels, allant jusqu'à 2 ans pour certains cas d'études, peuvent fausser l'interprétation de l'impact des dégâts liés aux événements de forts vents uniquement. Afin d'éviter d'introduire de potentielles erreurs dans les résultats, les indices radiométriques ont pour l'instant été mis de côté dans cette chaîne de traitement mais pourraient éventuellement être réintroduits ultérieurement si cela permet d'optimiser la chaîne.

#### 3.1. Génération du MNS

La génération du MNS à partir d'imagerie stéréoscopique et tri-stéréoscopique est intégralement réalisée via l'outil CARS, décrit par (Youssefi *et al.*, 2020) et (Michel *et al.*, 2020) du CNES et disponible en open-source.

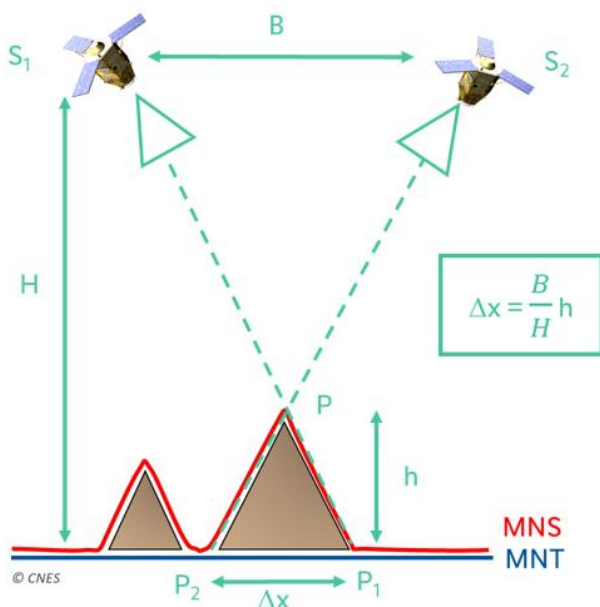
Les données en entrée sont relativement simples. Il suffit d'utiliser les images Pléiades-HR ou Pléiades Neo, stéréoscopiques ou tri-stéréoscopiques, telles quelles. En effet, la reconstruction stéréoscopique nécessite de connaître la géométrie du capteur, information disponible via les métadonnées contenues dans le fichier DIMAP qui accompagne ces données.

Il est important de garder la structure des données telles qu'elles sont fournies, car l'outil CARS a besoin d'accéder au fichier contenant les informations sur le modèle RPC (Rational Polynomial Coefficient). Ce modèle permet de faire le lien entre les coordonnées 2D et 3D, il est donc nécessaire de le conserver pour le calcul des Modèles Numériques de Surface (MNS).

CARS est basé sur la stéréoscopie, c'est-à-dire la méthode de reconstruction d'une scène en trois dimensions à partir de deux images planes acquises dans les mêmes conditions mais selon un point de vue légèrement différent, comme illustré sur les Figure 3 et Figure 4. L'outil est paramétré à l'aide d'un fichier de configuration relativement simple. De nombreux paramètres sont disponibles pour affiner le traitement et obtenir un résultat satisfaisant quel que soit le cas. Il est important de noter que cet outil est toujours en développement dans le cadre de la production de Modèles Numériques d'Élévation (MNE) afin d'y intégrer les images de la constellation CO3D.

Dans certains secteurs, comme par exemple les zones urbaines avec une densité de construction importante, les angles d'acquisition du couple d'images stéréoscopiques doivent être choisis avec soin, afin de garantir que les rues soient visibles et donc puissent être correctement reconstruites sur le MNS. C'est aussi pour cette raison que l'utilisation de données tri-stéréoscopiques pourrait être privilégiée si des données sont disponibles.

Comme cette méthode se base sur des images optiques, le résultat dépend de ce que le satellite est capable de voir au niveau du sol. En cas d'obstruction de la mesure, par la présence de nuages ou d'obstacles, CARS ne sera pas capable d'estimer l'altitude du sol obstrué.



**Figure 3.** Principe de la stéréoscopie, configuration à deux satellites séparés d'une distance B et en orbite à une altitude H : le ratio B/H est classiquement utilisé pour qualifier cette configuration (Youssefi *et al.*, 2024)



**Figure 4.** Couple stéréoscopique d'images Pléiades Neo et MNS résultant de l'outil CARS sur la Floride

### 3.2. Masquage des nuages et de l'eau

Le MNS résultant de CARS est de très bonne qualité et utilise la résolution brute des données Pléiades-HR/Neo. Le MNS a donc la même résolution spatiale que les images d'entrée, à savoir 50 ou 30 cm suivant s'il s'agit respectivement de Pléiades-HR ou Pléiades Neo. En ce qui concerne la précision altimétrique relative, le résultat obtenu sera conditionné aux données d'entrée et à la

méthode, et ne pourra donc pas être inférieure au mètre, ce qui est tout à fait adapté au besoin initial exprimé.

En revanche, le MNS nécessite quelques opérations de post-traitement pour être adapté à cette étude. Des incohérences liées à la présence de nuages ont été observées dans les MNS. Les zones obstruées par les nuages et par leur ombre portée au sol sont à retirer du résultat. En effet, les informations du sol n'étant pas visibles, les valeurs des pixels du MNS sont incohérentes dans ces zones.

Il est important de noter que la position des nuages n'est pas la même sur les deux images en raison de deux phénomènes : l'angle et la position d'acquisition qui ne sont pas les mêmes entre les deux acquisitions, et le fait que les constellations Pléiades-HR et Neo effectuent des acquisitions stéréoscopiques à l'aide d'un seul satellite. Il y a donc un temps durant lequel le satellite doit se repositionner entre les deux acquisitions. Pour CO3D, ce ne sera plus le cas car les satellites sont en orbite par couples pour effectuer des acquisitions stéréoscopiques simultanément.

Par conséquent, il est pertinent de masquer les zones nuageuses afin de retirer les zones incohérentes, au moins pour le calcul du recalage des MNS. Pour ce faire, la première étape de post-traitement des MNS consiste à appliquer une méthodologie développée par le SERTIT pour la détection semi-automatique des nuages sur chacune des images utilisées pour la génération des MNS. Cette méthodologie produit une délimitation des nuages en combinant le masque de nuages issu de la donnée brute et d'un indice de brillance, afin d'extraire des échantillons utilisés ensuite pour l'entraînement d'un modèle de machine learning de type « perceptron multicouche », en anglais « multilayer perceptron » (MLP).

La méthode de reconstruction stéréoscopique ne permet pas non plus de reconstituer avec précision la surface de l'eau, en raison de la difficulté à identifier des points homologues sur des surfaces lisses et mouvantes. Il n'est donc pas possible de déterminer la profondeur d'une zone immergée à partir de cette approche. Par ailleurs, cette information n'étant pas pertinente dans le cadre de cette étude, il a été décidé d'exclure ces zones du traitement.

Pour la détection et l'extraction des surfaces en eau, l'indice NDWI (*Normalized Difference Water Index*), proposé par (McFeeters, 1996) est utilisé :

$$NDWI = \frac{(V - PIR)}{(V + PIR)}$$

Où PIR représente la bande du proche infrarouge et V la bande du vert.

Le NDWI exploite le fait que l'eau a une faible réflectance dans le proche-infrarouge (PIR) et qu'elle a une réflectance relativement plus élevée dans le vert (V). Ainsi, le NDWI maximise le contraste entre les surfaces en eau et les surfaces végétalisées ou bâties, qui présentent des signatures spectrales distinctes avec une forte réflectance dans le PIR (pour la végétation) ou dans le visible (pour les zones bâties).

Les valeurs de l'indice s'expriment entre -1 et 1, avec des valeurs supérieures à 0,5 correspondant généralement aux plans d'eau. La végétation correspond en général à des valeurs bien plus faibles, et les zones bâties à des valeurs comprises entre 0 et 0,2.

Afin d'automatiser cette étape au sein de la chaîne de traitement, le calcul du NDWI est réalisé à l'aide de la librairie EOReader, développée par (Rémi Braun *et al.*, 2025) du SERTIT et déjà intégrée à de nombreux outils comme ExtractEO (Maxant *et al.*, 2022). Celui-ci permet d'intégrer directement l'indice dans le flux opérationnel, garantissant la reproductibilité du processus.

### 3.3. Régularisation des MNS

La sortie de l'outil CARS, bien que de très bonne qualité (hors zones précédemment masquées), nécessite un post-traitement afin d'être exploitable dans le cadre de la cartographie des dégâts provoqués par des phénomènes de vents violents, afin notamment d'obtenir un résultat continu, non troué. Initialement, une étape de tamisage était aussi envisagée, afin de retirer les points incorrects présentant un fort écart avec les valeurs des points voisins (*outliers*). Cependant, cette méthode présenterait trop de difficultés pour identifier les *outliers* de manière robuste, quelle que soit la topographie du lieu étudié.

Heureusement, les nombreuses améliorations apportées à la chaîne de traitement de CARS par l'équipe en charge de son développement ont permis de réduire considérablement la présence de ces *outliers* dans les MNS obtenus, notamment via l'application d'un filtrage statistique plus robuste pour retirer ces points probablement faux.

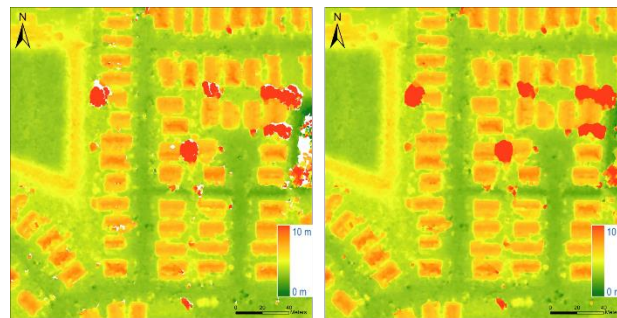
L'opération de post-traitement importante pour pouvoir exploiter les MNS générés consiste à compléter les zones de « NoData » sur la sortie de CARS.

La présence de ces zones est cohérente, notamment sur les côtés des bâtiments en raison de l'angle du satellite qui crée une zone d'ombre, invisible pour le satellite. La reconstruction stéréoscopique ne permet donc pas d'estimer l'altitude de ces zones. Comme CARS corrige la position des toits pour les repositionner à leur position « vraie », c'est-à-dire telle que vue au nadir, le MNS résultant présente des zones dont les valeurs sont inconnues.

Cependant, pour pouvoir comparer les MNS PRE et POST, il est nécessaire d'utiliser un résultat continu. Différentes méthodes sont disponibles pour estimer ces valeurs inconnues. Dans le cadre de cette étude, il a été choisi de préférer une méthode statistique plutôt qu'une interpolation, afin de n'ajouter que des valeurs déjà présentes dans le MNS et surtout de ne pas créer de pentes artificielles le long des bâtiments. La méthode d'interpolation crée une pente artificielle au sein des zones de « NoData », tandis que la méthode des plus proches voisins permet de conserver les altitudes du sol et des toits des bâtiments. Le résultat obtenu avec cette dernière est donc plus proche de la réalité de la surface.

La méthode du plus proche voisin est ainsi retenue, avec une recherche de la valeur médiane de tous les pixels voisins. Cette méthode permet d'estimer au mieux la

transition entre le sol et les toits des bâtiments, dont un exemple est illustré sur la Figure 5.



**Figure 5.** A gauche, sortie brute de CARS, à droite, résultat obtenu en sortie du traitement de remplissage des valeurs de « NoData » avec la méthode des plus proches voisins sur la Floride

Il est cependant important de rappeler que cette méthode est sensible au bruit : si un pixel correspondant à du bruit se retrouve en bordure d'une zone « NoData », c'est ce pixel qui sera utilisé pour estimer les valeurs des pixels avoisinants. Il est donc important de masquer les zones présentant beaucoup de bruit, comme les zones recouvertes d'eau ou les zones couvertes par les nuages.

Il serait aussi possible de laisser les zones de « NoData » telles qu'elles, puisqu'elles représentent des zones pour lesquelles aucune mesure n'est disponible et donc pour lesquelles la reconstruction est obtenue de manière indirecte. Cependant, dans un cadre de production, il est préférable de travailler avec des données raster continues, notamment pour faciliter l'extraction des zones affectées par la catastrophe. C'est pourquoi cette étape de post-traitement est intégrée à la chaîne de traitement.

### 3.4. Comparaison des MNS PRE et POST événement

Une fois que l'étape de régularisation des MNS est effectuée, il est possible de procéder à la comparaison des MNS pré et post-événement afin de pouvoir mettre en évidence les changements entre ces deux MNS. La volonté initiale était d'utiliser l'outil open source (demcompare, 2025) développé par le CNES, mais dans un but de mutualisation des efforts, les fonctionnalités de *demcompare* ont été intégrées à l'outil open-source xDEM (contributeurs, xDEM, 2025). Ce dernier est en fait une librairie Python dédiée à l'analyse des données d'élévation (en particulier les MNS) et est donc développée conjointement par des ingénieurs du CNES et des chercheurs travaillant sur l'analyse de ce genre de données (notamment du domaine de la glaciologie).

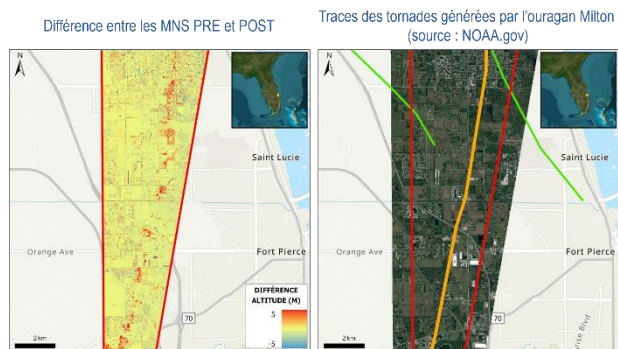
Pour effectuer cette comparaison, une opération de recalage géométrique et altimétrique des deux MNS est nécessaire avant de pouvoir calculer une différence entre ceux-ci. Plusieurs méthodes sont proposées dans xDEM, mais celle qui a été privilégiée correspond à l'approche décrite par (Nuth et Käab, 2011). Cette approche se base sur l'estimation de translations horizontale et verticale calculées de façon itérative en résolvant une équation mettant en jeu la pente, son orientation et les différences d'élévation. Une autre méthode proposée dans xDEM et

basée sur la minimisation des différences d'élévation a aussi été testée mais le résultat a été jugé moins bon dans le cadre de l'étude, principalement du fait de la présence d'effets de bordure de part et d'autre des objets. Cela semble indiquer que cette méthode ne parvient pas à recalculer géométriquement les deux MNS de façon suffisamment performante par rapport aux besoins exprimés.

Afin de limiter la consommation mémoire, le calcul de la transformation à appliquer pour le recalage est basé sur les données sous-échantillonnées, avant d'appliquer cette transformation aux données en pleine résolution.

Grâce à cette opération, les changements observés entre les MNS utilisés pour la comparaison apparaissent, ce qui permet de révéler les dégâts engendrés par les événements de forts vents, comme l'illustre la Figure 6 sur la page suivante.

Sur cette illustration, même si tous les changements ne sont pas liés aux tornades, les zones se trouvant sur leur trajectoire sont assez nettement identifiables, surtout en ce qui concerne la trace de la tornade principale. A partir de ces résultats, il est alors possible d'extraire les dégâts et de les croiser avec des données exogènes. Ces opérations sont décrites plus en détails dans la partie suivante.



**Figure 6.** Dégâts engendrés par les tornades visibles sur la différence entre les MNS pré et post-événement sur la Floride (sud de la zone d'étude) et trace de la tornade sur l'image Pléiades Neo du 18/03/2025 © AIRBUS DS (2025)

### 3.5. Détection des dégâts

Initialement, une méthode de détection par changements radiométriques a été envisagée en complément de la détection par changement de hauteurs, mais a été abandonnée en raison des écarts temporels trop importants entre les images PRE et POST événement. La détection des changements s'effectue donc spécifiquement à l'aide des différences de hauteurs calculées par différence entre les MNS PRE et POST événement.

Cette méthode s'est avérée pertinente aussi bien pour les dégâts au bâti que pour les dégâts à la végétation. Cependant, la façon d'exploiter ces résultats doit être adaptée au type de terrain ayant subi des dégâts.

#### 3.5.1. Application au bâti

Comme cela est évoqué dans la partie concernant la chaîne de traitement, il est nécessaire de segmenter les zones de bâti. Afin de simplifier la chaîne de traitement et de s'assurer du fait qu'elle soit reproductible à l'échelle du globe, il a été choisi d'utiliser des données exogènes représentant l'emprise des bâtiments, en l'occurrence les données (Overture Maps Foundation, 2025).

Overture est une collaboration cartographique open-source dont la mission est de produire plus rapidement des données cartographiques fiables, faciles à utiliser et interopérables, adaptées aux produits de cartographie de nouvelle génération. Lancée en décembre 2022, Overture compte parmi ses membres fondateurs AWS, Meta, Microsoft et TomTom.

Overture se concentre sur la création de thèmes de données unifiées, en combinant les meilleures données ouvertes disponibles provenant de diverses sources. Cela signifie, par exemple, qu'Overture et OSM sont des données complémentaires de l'écosystème des données cartographiques ouvertes. Overture utilise les données d'OSM ainsi que plus de 200 autres sources de données ouvertes. Ces données sont publiées mensuellement dans un schéma ouvert et documenté. Parmi les couches thématiques proposées par Overture, la couche Buildings, comprenant l'emprise de plus de 2 milliards de bâtiments, présente le plus d'intérêt pour ce projet, car elle permet de répondre à la problématique de segmentation du bâti.



**Figure 7.** Comparaison des empreintes de bâtiments issues d'OSM et d'Overture sur deux zones d'étude : Saint-Martin (en haut) et Floride (en bas)

À titre illustratif, la Figure 7 présente une comparaison entre les données d'emprise du bâti issues d'OpenStreetMap (OSM), en marron, et celles d'Overture, en contour jaune, réalisée sur des zones situées à Saint

Martin et en Floride, aux États Unis. Il est possible de constater, dans les deux cas, qu'Overture inclut les emprises d'OSM et offre une couverture plus complète, renforçant ainsi le choix de son utilisation. La qualité du géoréférencement de ces données est vérifiée sur la zone de travail. Si nécessaire, un recalage peut être effectué.

Le résultat de la différence de hauteur est donc coupé à l'emprise des bâtiments. Ensuite, le résultat est seuillé, afin de binariser le résultat comme « Endommagé » et « Non endommagé ».

Comme les bâtiments sont des structures très stables d'une image à l'autre, le seuil de différence de hauteurs minimal choisi peut être relativement faible, afin de pouvoir détecter un maximum de bâtiments endommagés. Il est choisi manuellement, mais il est envisageable d'automatiser la sélection de ce seuil.

### 3.5.2. Application à la végétation

En ce qui concerne les zones de végétation, les emprises des zones couvertes étant en principe disponibles, il suffit de découper le résultat de la différence aux emprises des parcelles fournies par les clients.

Cependant, le seuillage des valeurs de différences de hauteurs demande un regard affiné afin de ne pas cartographier par mégarde des effets simplement liés aux saisons en tant que dégâts liés aux événements de forts vents. Ainsi, le seuil retenu pour les dégâts de zones de végétation sera généralement plus élevé que pour les dégâts au bâti, afin d'éviter toute commission dans la cartographie des dégâts.

## 4. Application sur les cas d'études

Cette partie a pour but de présenter certains des résultats obtenus lors de la phase d'expérimentation. Afin de représenter les dégâts sur les zones urbaines et végétales, deux cas d'études ont été privilégiés : celui sur Porto Rico, où les dégâts sur la végétation ont été obtenus à partir d'images PHR, et celui sur la Floride, où les dégâts au bâti résultent de l'analyse d'images Pléiades Neo.

### 4.1. Dégâts détectés dans les zones de végétation

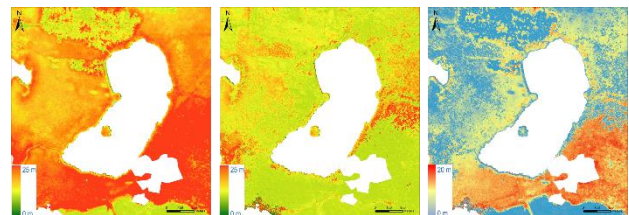
Le premier résultat très intéressant obtenu lors de ce projet concerne les zones de végétation. En effet, on trouve moins d'exemples mettant en œuvre la génération de MNS par stéréorestitution sur les zones couvertes par la végétation et la forêt, par rapport aux zones urbaines. Cela s'explique probablement à cause de résultats plus incertains du fait d'une plus grande complexité pour trouver des points homologues entre deux images stéréoscopiques dans les zones végétales par rapport aux zones urbanisées.

Cependant, l'étude des résultats sur les différents cas d'études, en particulier celui de Porto Rico, a permis de mettre en lumière la pertinence de cette méthode de comparaison pour les zones végétalisées. Afin de l'étudier pour répondre aux besoins des clients, des parcelles forestières ont été simulées. L'étude des dégâts est faite au sein de ces parcelles spécifiquement.



**Figure 8.** De gauche à droite : Parcelles superposées sur l'image PHR PRE événement du 05/01/2016 (à gauche) et sur l'image PHR POST événement du 01/12/2017 (au centre et à droite) sur la zone de porto Rico (images © CNES 2016/2017, Distribution AIRBUS DS) ; les dégâts au sein des parcelles sont également superposés sur l'image de droite

Afin de pouvoir évaluer la qualité des résultats obtenus grâce à la chaîne de traitement mise en place, les dégâts causés par les vents au sein des parcelles ont été extraits par photo-interprétation assistée par ordinateur (PIAO) en comparant les couples d'images PRE et POST événement, comme cela est illustré sur la Figure 8. Il est important de prendre en compte le fait que les images sont espacées de près de deux ans, ce qui explique les différences visibles dans l'état de la végétation, même si la période saisonnière est la même. Pour identifier les dégâts dus aux forts vents, il faut s'intéresser à l'évolution de la densité de la végétation, et non à son état général qui peut être la conséquence d'autres facteurs.



**Figure 9.** De gauche à droite : MNS PRE événement, MNS POST événement, différence des MNS PRE et POST événement après alignement sur la zone de Porto Rico

Les MNS sont générés via la chaîne de traitement présentée précédemment. En comparant uniquement les MNS PRE et POST événement, les différences de hauteurs de végétation apparaissent à l'œil nu. La différence, calculée après alignement des deux MNS, ne fait que confirmer les zones ayant subi des dégâts suite à l'événement (Figure 9).

Une fois la différence obtenue sur toute la zone, il est possible de poursuivre les traitements en se concentrant uniquement sur les parcelles des clients. Pour cela, la différence obtenue sur l'intégralité de la zone est découpée de manière à ne conserver que l'information dans les parcelles des clients, et le résultat est seuillé afin de fournir un résultat binaire contenant les classes « Endommagé » et « Non endommagé ».

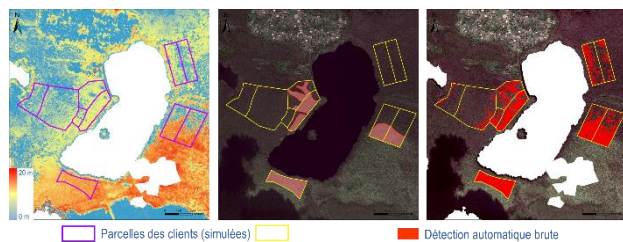
En effet, l'intérêt principal de cette étude est de développer une méthode permettant d'obtenir une cartographie des surfaces affectées afin que Descartes puisse évaluer l'indemnisation pour le client. De plus, il serait théoriquement possible de fournir un ordre d'idée des pertes en termes de volume de bois, en combinant cette valeur de surface affectée avec celle de la différence de hauteur de végétation PRE et POST événement, et des tables d'équations allométriques.

Afin d'obtenir des résultats quantitatifs et d'évaluer la pertinence de la méthode de détection automatique, le résultat binarisé est comparé aux surfaces affectées et non-affectées déterminées par PIAO. Les résultats sont visibles dans le Tableau 1.

Surfaces (ha)	Prédites non-affectées	Prédites affectées
Non-affectées	7,72	4,19
Affectées	1,49	14,09

**Tableau 1.** Matrice de confusion obtenue pour les dégâts à la végétation de la zone de Porto Rico, en hectares

Avec une précision de 0.77, un rappel de 0.90 et un score F1 de 0.83, la méthode semble efficace pour la détection automatique de dégâts à la végétation. Le rappel élevé met en lumière le fait que la méthode omet peu de zones affectées, et la précision, correcte mais plus faible, montre que la méthode automatique détecte des dégâts dans des zones identifiées comme non-affectées par PIAO. Afin d'explorer davantage ces résultats et de déterminer si ces différences sont des commissions ou non, une visualisation de ceux-ci est pertinente.



**Figure 10.** De gauche à droite : Parcelles superposées sur la différence entre les MNS PRE et POST événement (à gauche) et sur l'image PHR POST événement du 01/12/2017 © CNES 2017, Distribution AIRBUS DS (au centre et à droite) sur la zone de Porto Rico ; le résultat brut de la détection des dégâts au sein des parcelles est également superposé sur l'image de droite

Les résultats obtenus via cette étude sont intéressants puisqu'ils permettent de mettre en lumière les différences notables entre les résultats issus de processus de photo-interprétation et de détection automatique, visibles sur la Figure 10. En effet, les résultats annotés manuellement par un opérateur se concentrent sur les zones principales des dégâts, tandis que la méthode par détection automatique est capable de détecter des changements quelle que soit la surface de la zone de végétation affectée. Ainsi cela permet de ne pas omettre les zones affectées de faible surface, susceptibles d'être ignorées en cas de détection par photo-interprétation. Une vérification finale par l'opérateur est toujours nécessaire mais la finesse de la

détection est largement améliorée à l'aide de la nouvelle méthodologie développée. D'un point de vue qualitatif, ces résultats sont donc satisfaisants.

Il est à noter que le seuil des différences de hauteurs a été choisi manuellement avec une valeur importante afin de ne conserver que les dégâts liés aux événements de fort vent, et non les effets des saisons pour ne pas fausser l'analyse. A l'avenir, il pourrait être intéressant d'implémenter une sélection automatique du seuil en fonction des valeurs des images.

#### 4.2. Dégâts détectés sur les infrastructures bâties

Afin d'étudier les dégâts au bâti, la zone d'étude sur la Floride, affectée par une tornade à la suite de l'ouragan Milton, est retenue. Les images Pléiades Neo ont été acquises à un an d'écart mais il est important de noter qu'elles sont chacune écartées d'environ 6 mois de l'événement : il y a donc des bâtiments qui ont eu le temps d'être construits entre l'acquisition des deux images, et l'écart à l'événement explique l'absence totale de débris au sol à proximité des bâtiments détruits ou endommagés. L'analyse des dommages est donc facilitée par cet écart temporel, pourvu que l'événement ait eu un impact suffisant sur la hauteur des bâtiments, et que la structure de ceux-ci après reconstruction ou réparation ne soit pas revenue à ses dimensions initiales.

En comparant les images PRE et POST événement, il est rapide de remarquer les bâtiments ayant été détruits par le passage de la tornade. Les emprises des bâtiments sont tirées de la couche Overture, qui représente l'emprise individuelle de chacun des bâtiments. En effet, dans le cas du bâti, il est peu probable que le client soit capable de fournir l'emprise spécifique du bâtiment à couvrir. La détection des dégâts a été réalisée par PIAO par un opérateur à partir de ces emprises, en indiquant les bâtiments détruits puisque les bâtiments partiellement endommagés ont depuis été réparés. Le résultat de cette détection est visible sur la Figure 11.



**Figure 11.** Image Pléiades Neo PRE événement du 19/03/2024 © AIRBUS DS (2024) (à gauche) et image Pléiades Neo POST événement du 18/03/2025 © AIRBUS DS (2025) (au centre et à droite) sur la zone de Floride ; les emprises des bâtiments et dégâts sont également superposés sur l'image de droite

Encore une fois, les différences sont rapidement visibles en comparant les MNS PRE et POST événement obtenus. Grâce à la résolution de Pléiades Neo de 30 cm pour les images panchromatiques, les bâtiments individuels sont facilement identifiables et les arbres des jardins sont

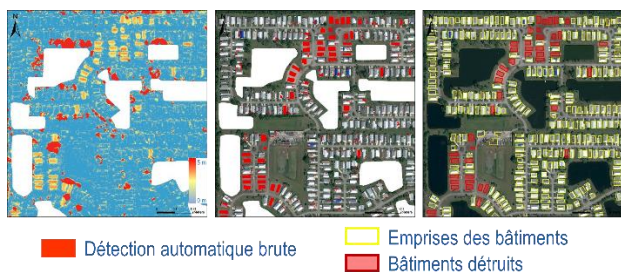
facilement distinguables. La différence après alignement ne fait que confirmer ces observations initiales, comme le présente la Figure 12.



**Figure 12.** De gauche à droite : MNS PRE événement, MNS POST événement, différence des MNS PRE et POST événement après alignement sur la zone de Floride

Dans le cadre des couvertures d'assurance, les clients sont généralement intéressés par la surface totale des dégâts. Il est donc important de seuiller le résultat afin d'obtenir une couche binaire « Endommagé » et « Non endommagé ». La méthode de stéréorestitution, du fait de la résolution spatiale des données utilisées, permet d'obtenir un résultat très précis sur les hauteurs des structures stables dans le temps. Grâce à cette stabilité, un changement, même faible, dans la hauteur de la structure sera détecté avec une grande finesse. Il est donc possible d'utiliser un seuil des différences de hauteurs relativement bas pour la détection des dégâts au bâti.

Pour le bâti, on constate que les dégâts obtenus manuellement par PIAO et le résultat seuillé sont très proches (cf. Figure 13), à quelques exceptions près : la méthode de détection automatique a permis d'identifier des dégâts sur des bâtiments qui n'ont été que partiellement touchés, qui sont passés entre les mailles du filet de l'opérateur.



**Figure 13.** De gauche à droite : différence des MNS PRE et POST événement, image Pléiades Neo POST événement © AIRBUS DS (2025) avec résultat brut de la détection des dégâts au bâti, image Pléiades Neo POST événement © AIRBUS DS (2025) avec empreise des bâtiments et dégâts de la tornade obtenus par PIAO sur la zone de Floride

Afin de quantifier les résultats de la méthode de détection automatique pour les résultats au bâti, les résultats obtenus sous forme surfacique ont été binarisés de la manière suivante : si au moins 50% de la surface totale du bâtiment est affectée, la surface totale étant calculée à partir des emprises des bâtiments provenant d'Overture, le bâtiment est classé comme « Affecté », sinon, il est classé comme « Non-affecté ». Les résultats de la comparaison

de la référence obtenue par PIAO et de cette classification binaire sont visibles dans le Tableau 2.

	Prédits non-affectés	Prédits affectés
Non-affectés	1149	2
Affectés	0	141

**Tableau 2.** Matrice de confusion obtenue pour les dégâts aux bâtiments de la zone de Floride, en nombre de bâtiments

Sur cette zone, d'après la matrice de confusion, la détection est donc quasi-parfaite. Les métriques classiques d'évaluation le confirment : le score F1 obtenu est de 0.993, avec une précision à 0.99 et un rappel de 1. Il est important de noter que ces résultats sont dus à plusieurs facteurs : l'utilisation d'imagerie Pléiades Neo qui permettent une meilleure reconstruction des bâtiments par stéréoscopie, la géométrie et topographie très régulières de la zone qui permettent d'isoler facilement les bâtiments dans les MNS obtenus, l'écart à l'événement qui a permis aux locaux de retirer les débris de la zone et la quasi-absence de dégâts partiels aux bâtiments, facilitant une analyse binaire des bâtiments « Affectés » et « Non-affectés ». Cependant, ces résultats prouvent que dans un cas idéal, cette méthode de détection produit de très bons résultats, avec une intervention minimale de l'opérateur par rapport à une classification effectuée par PIAO.

Ainsi, la méthode de détection automatique permet d'obtenir un résultat plus exhaustif que la méthode manuelle, en particulier dans le cas de dégâts plus difficiles à distinguer à l'œil nu. Ici encore, en plus de la surface affectée, il serait potentiellement possible de fournir au client une estimation du volume de perte. En revanche, il est important de noter que cette méthode n'est pas applicable aux dégâts localisés sur les toits uniquement, puisque le changement en termes de hauteur est trop faible pour être détecté.

## 5. Discussions

Bien que les résultats obtenus et présentés dans cet article démontrent que les données 3D offrent bien un réel apport pour la détection de dégâts causés par des tornades, ouragans ou tout autre phénomène climatique extrême de ce type, et ainsi un réel bénéfice pour le secteur de l'assurance, il est utile de mentionner certains aspects qui pourraient potentiellement représenter un frein quant à l'utilisation de cette méthode.

Un des points importants à garder à l'esprit concernant les outils mis en place est lié aux temps de traitements pour la mise en œuvre de l'ensemble de la chaîne. Cette durée peut bien évidemment varier en fonction des données utilisées en entrée, mais l'ordre de grandeur à retenir est de quelques heures. Parmi les différentes étapes à effectuer, celle qui nécessite le plus de temps est sans conteste l'étape de génération des MNS, réalisée à partir de l'outil CARS. Plusieurs tests ont été effectués sur les images utilisées pour chaque cas d'études et ont montré qu'il pouvait y avoir une importante disparité dans le temps de traitement nécessaire pour obtenir un MNS avec CARS.

Cette disparité s'explique par la diversité des images utilisées en entrée, et principalement leur taille. En effet plus la zone couverte par les images est grande, plus le temps de traitement sera élevé. Il en va de même avec la résolution spatiale des images, tout comme la configuration matérielle des postes informatiques sur lesquels les traitements sont réalisés, qui peuvent également avoir une influence significative. Une fois les MNS générés, les temps de traitements des étapes suivantes de la chaîne sont largement inférieurs, plutôt de l'ordre de quelques minutes pour chacune d'elles.

Quoiqu'il en soit, ces temps de traitements restent cohérents et compatibles avec les contraintes et les délais requis pour les assureurs, qui ont besoin d'informations dans les jours ou semaines qui suivent une catastrophe. D'autre part, ces temps de traitements seront réduits lorsque les données CO3D seront accessibles, puisqu'il sera alors possible d'utiliser directement les MNS issus de cette mission, ce qui permettra de ne plus avoir à effectuer l'étape de génération des MNS et donc de réduire fortement la durée des traitements.

Un autre aspect important qu'il est nécessaire d'avoir en tête concerne la disponibilité des données. En effet, la méthodologie développée est basée sur l'exploitation d'images stéréoscopiques acquises à la fois avant et après un événement de forts vents. Pour les données PRE événement, la difficulté vient du fait qu'il n'existe pas partout des acquisitions effectuées en mode stéréoscopique. Pour les zones où c'est le cas, la date d'acquisition peut aussi se révéler ancienne et ainsi limiter son intérêt.

Concernant les données POST événement, en fonction de la zone considérée et de la saison lors de laquelle l'événement s'est produit, il peut parfois se révéler compliqué d'obtenir une acquisition exploitable en raison des conditions atmosphériques, et notamment de la couverture nuageuse. Ainsi il peut parfois être nécessaire d'attendre plusieurs jours avant de pouvoir obtenir des données intéressantes. Pour autant, la majorité des demandes recueillies par Descartes concerne des régions du monde (Europe, Etats-Unis, Australie) où cette contrainte n'est pas réellement bloquante.

Encore une fois, l'arrivée prochaine des données CO3D permettra pour une large part de pallier ces difficultés, en raison de l'objectif même de cette mission dédiée à la fourniture de MNS à l'échelle globale. Même si cela va prendre un certain temps, lorsque l'ensemble de la planète aura été couverte par CO3D, la méthode développée pourra alors être appliquée sur n'importe quel endroit du globe.

En parallèle de ces contraintes liées aux temps de traitements ou aux sources d'approvisionnement en données, certains éléments peuvent également avoir un impact sur la qualité des résultats obtenus. Parmi ceux-ci, la valeur du ratio B/H, si elle est mal calibrée par rapport au type de paysage considéré, peut poser d'importantes difficultés lors de l'étape de génération des MNS. Par exemple, en zone urbaine dense et comportant des bâtiments de taille importante, ou pour des secteurs où le relief est marqué, une valeur trop élevée du ratio B/H

engendra des erreurs dans le MNS généré, ce qui sera problématique pour la suite des traitements. Pour éviter ce genre d'erreurs, il est donc primordial de veiller à ce que ce ratio soit choisi de manière adéquate. Généralement, un ratio B/H compris entre 0,3 et 0,4 est utilisé, et se révèle adapté dans la plupart des configurations.

Une autre source d'erreur potentielle peut être causée par un manque de cohérence géométrique entre les données. Les travaux réalisés et présentés dans cet article ont permis de se rendre compte de l'excellente qualité des outils CARS et xDEM, en particulier du point de vue géométrique. La cohérence géométrique entre les MNS générés à partir des données stéréoscopiques PRE et POST événement est remarquable pour l'ensemble des cas d'études, et ne semble pas justifier de réel point d'attention quant à une source possible d'erreur. En revanche, cela peut ne pas être systématiquement le cas lorsque les résultats issus de la différence entre ces MNS sont croisés avec les couches de données contenant l'emprise des bâtiments. Bien que la qualité géométrique des données Overture utilisées pour ces travaux se soit révélée très bonne, du fait de l'hétérogénéité des sources desquelles proviennent ces couches, il n'est pas inenvisageable que le niveau de cohérence géométrique ne soit pas uniforme et puisse poser problème à certains endroits. Dans cette situation, plusieurs possibilités existent pour essayer de trouver une solution. Par exemple, si l'incohérence est simplement due à des décalages géométriques, une étape de recalage de ces données peut se révéler suffisante. S'il s'agit par contre d'incohérences plus conséquentes, il sera alors plus simple de procéder à une étape de digitalisation des bâtiments par photo-interprétation afin de constituer une couche de qualité suffisante.

Concernant le cas de dégâts sur la végétation, le risque d'incohérence géométrique est plus limité du fait que les données sont éventuellement fournies par le client. Ainsi il est relativement probable que la qualité de ces données soit suffisamment bonne pour être directement exploitées. Dans le cas contraire, un retour au client pourra être fait afin de lui exposer les difficultés rencontrées, et discuter d'une solution de contournement à mettre en place. Dans l'éventualité où le client ne serait pas en mesure de fournir de version améliorée, il serait là encore nécessaire de effectuer un travail de photo-interprétation afin de constituer une couche à croiser avec le résultat issu de la différence des MNS.

Enfin, une autre source d'erreur envisageable peut provenir des décalages temporels potentiellement importants, mais aussi des différences de saisonnalité entre les données satellitaires acquises avant et après l'événement. Pour ce qui est de la végétation, le critère radiométrique n'a pas été retenu pour extraire les dégâts, précisément parce que ce critère est trop variable et se retrouve largement influencé par cet effet de saisonnalité. C'est pourquoi le critère de hauteur a été privilégié, permettant à la fois de s'affranchir des contraintes de saisonnalité, mais également de ne pas être impacté de manière significative par des écarts temporels importants puisque la croissance des arbres est un phénomène relativement lent. Pour les dégâts sur les bâtiments, le

sujet est plus sensible puisque les évolutions en zone urbaine sont beaucoup plus rapides que ce que l'on peut observer dans les zones de végétation. Il convient donc de rappeler ici de l'importance de disposer à la fois de données stéréoscopiques PRE événement « à jour », et de données POST événement acquises le plus rapidement possible après la catastrophe.

Même s'il demeure difficile de pouvoir garantir que cette méthode puisse être mise en place de façon systématique sur l'ensemble de la planète, l'analyse menée au cours de ces travaux permet cependant d'affirmer, avec un niveau de confiance relativement élevé, que la solution mise en place est suffisamment robuste pour pouvoir être déployée de manière efficace sur les territoires qui représentent un intérêt pour Descartes, et que dans la plupart des cas, le panel de solutions à disposition est suffisant pour faire face aux sources d'erreur potentielles.

## 6. Conclusion

Afin d'améliorer la prise en charge de leurs clients confrontés à des dommages suite au passage d'un phénomène de forts vents (tempête, ouragan, tornade, etc.), le secteur de l'assurance a besoin de pouvoir disposer, le plus rapidement possible, d'informations précises sur l'évaluation des dégâts occasionnés. Pour cela, les images acquises par les plateformes satellitaires ont le grand avantage de pouvoir offrir un état des lieux de la situation et d'être mobilisées très rapidement après une catastrophe, ce qui constitue un atout majeur. Pour autant, il peut demeurer compliqué de réaliser une cartographie des dégâts uniquement à partir des méthodes classiques de traitement. C'est pour cela qu'un service basé sur l'exploitation de MNS dérivés d'images stéréoscopiques acquises avant et après un événement a été développé. De nombreux tests ont été réalisés sur les divers cas d'études identifiés, ayant permis de montrer que des résultats très satisfaisants pouvaient être obtenus, et que les produits développés pouvaient apporter une réelle plus-value, répondant au besoin et surmontant les verrous actuels.

## Remerciements

Les travaux présentés dans cet article ont pu être réalisés grâce au soutien financier du CNES via le projet Ambition Aval « Détection de dégâts de tempêtes et événements tornadiques extrêmes », ainsi que pour l'acquisition et la mise à disposition des images Pléiades-HR et Pléiades Neo. Les auteurs tiennent également à remercier chaleureusement l'équipe du CNES en charge du développement de l'outil CARS, en particulier David Youssefi, pour leur soutien lors de la phase de développement des outils.

## Références

Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures (2025). URL : <https://disasterscharter.org/fr>  
contributors, xDEM (2025). xDEM. Zenodo. Disponible sur : <https://doi.org/10.5281/zenodo.11492983>

Copernicus Emergency Management Service - Rapid Mapping (2025) *Copernicus EMS Mapping*. URL : <http://mapping.emergency.copernicus.eu/>  
demcompare (2025). URL : <https://github.com/CNES/demcompare>  
Maxant, J., Braun, R., Caspard, M. et Clandillon, S. (2022). ExtractEO, a Pipeline for Disaster Extent Mapping in the Context of Emergency Management, *Remote Sensing*, 1420, p. 5253. Disponible sur : <https://doi.org/10.3390/rs14205253>  
McFeeters, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, 177, p. 1425-1432. Disponible sur : <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>  
Michel, J., Sarrazin, E., Youssefi, D., Cournet, M., Buffe, F., Delvit, J.M., Emilien, A., Bosman, J., Melet, O. et L'Helguen, C. (2020). A New Satellite Imagery Stereo Pipeline Designed for Scalability, Robustness and Performance, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-2-2020, p. 171-178. Disponible sur : <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2020-171-2020>  
National Oceanic and Atmospheric Administration (2025). URL : <https://www.noaa.gov/>  
Nuth, C. et Kääb, A. (2011). Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change, *The Cryosphere*, 51, p. 271-290. Disponible sur : <https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011>  
OpenStreetMap (2025) *OpenStreetMap*. URL : <https://www.openstreetmap.org/>  
Overture Maps Foundation (2025) *Overture Maps Foundation*. URL : <https://overturemaps.org/>  
Rémi Braun, Michal Parusinski, Jules Teulade, guillemc23, Bastien, Emmanuel Ferdman, TabeaW, Jayanth Siddamsetty et floriandeboissieu (2025). sertit/eoreader: v0.22.4. Zenodo. Disponible sur : <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5082050>  
Youssefi, D., Lallement, D., Hümmer, C., Sarrazin, E., Dubois, E. et Delvit, J.-M. (2024). Pléiades à Pléiades Neo : Une analyse de l'amélioration de la restitution 3D, *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 226, p. 1-9. Disponible sur : <https://doi.org/10.52638/rfpt.2024.672>  
Youssefi, D., Michel, J., Sarrazin, E., Buffe, F., Cournet, M., Delvit, J.-M., L'Helguen, C., Melet, O., Emilien, A. et Bosman, J. (2020). CARS: A Photogrammetry Pipeline Using Dask Graphs to Construct A Global 3D Model, in *IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, p. 453-456. Disponible sur : <https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9324020>