

Logiciel de simulation pour améliorer la collecte de déchets post ouragan

Simulation software to improve post-hurricane waste collection

Anne Ruas¹, Serge Lhomme², Quy Thy Truong³

¹ Université Gustave Eiffel, Laboratoire IMSE, anne.ruas@univ-eiffel.fr

² Université Paris-Est Créteil, Lab'Urba, serge.lhomme@u-pec.fr

³ Université Gustave Eiffel, Laboratoire IMSE et Oslandia quythy.truong@oslandia.com

RÉSUMÉ. Les ouragans constituent un risque naturel important et une menace réelle pour certaines populations et certains territoires. Dans ce papier nous présentons les principes et résultats d'un logiciel déposé en open source qui permet de simuler des endommagements en se basant sur des statistiques de l'ouragan Irma et de simuler différents scénarios de collecte de déchets. Après l'analyse de la collecte sur l'île de Saint Martin, nous avons reproduit le processus de collecte en deux étapes, puis nous avons enrichi la méthode pour l'appliquer à des territoires plus grands, disposants de nombreux sites de traitement et de stockage tels que la Guadeloupe ou la Martinique. La méthode proposée permet d'estimer les temps de collecte et la distance parcourue en fonction de la gravité de l'évènement, du nombre et de la localisation des aires de stockage temporaires et des sites de traitement et de stockage mais aussi en fonction des moyens (en camions) et de l'organisation de la collecte en bassins de collecte. Le logiciel peut être utilisé en amont pour optimiser les moyens de collecte ou juste après l'évènement à partir du moment où des zones ou des bâtiments endommagés sont identifiés par télédétection, ce qui est de plus en plus souvent le cas. A noter qu'un des enjeux est non seulement de réduire le temps de collecte, mais si possible de mettre en place des tris, au moins des équipements électriques et électroniques DEEE, pour transformer les déchets en ressources dans un contexte d'optimisation des ressources planétaires et de réduction des trajets. Les enquêtes et expérimentations révèlent également que le temps de chargement-déchargement de déchets est très important ce qui pourrait orienter les choix d'équipements au niveau des collectivités pour accélérer le retour à la normale.

ABSTRACT. Hurricanes are a major natural hazard and a real threat to certain populations and territories. In this paper we present the principles and results of an open source software that allows to simulate damage based on statistics from Hurricane Irma (2017) and to simulate different waste collection scenarios. After the analysis of the waste collection on the island of Saint Martin after Irma, we reproduced the collection process in two stages, then we enriched the method to apply it to larger territories, containing more treatment and storage sites such as Guadeloupe or Martinique. The proposed method makes it possible to estimate collection times and the distance traveled according to the severity of the event, the number and location of temporary storage areas and treatment and storage sites, but also according to the means (in trucks) and the organization of waste collection in collection basins.

The software can be used before any event, in anticipation, to optimize the means of collection or just after an event from the moment damaged areas or buildings are identified by remote sensing, which is more and more often the case. It should be noted that one of the challenges is not only to reduce collection time, but if possible to set up sorting, at least for electrical and electronic equipment, to transform waste into resources in a context of resource re-use and transport reduction. Surveys and simulation experiments also reveal that the waste loading-unloading time is very important, which could guide the choice of equipment at community level to speed up the return to normal.

MOTS-CLÉS. collecte de déchets, simulation, déchets post-catastrophe, ouragans, Caraïbes.

KEYWORDS. waste collection, simulation, post-disaster waste, hurricanes, Caribbean.

1. Contexte, objectifs et principes de l'algorithme

Les ouragans constituent un risque naturel important et une menace réelle pour certaines populations. En effet, certains territoires sont à la fois très exposés et très vulnérables à ces aléas et dans un contexte de changements climatiques et d'urbanisation croissante, les dommages induits par ces ouragans devraient augmenter (GIEC, 2018). Durant ces événements, d'importantes quantités de déchets peuvent être générées (Beraud et al., 2019) et ces déchets vont alors perturber l'activité économique locale. La gestion de ces déchets constitue donc un enjeu majeur de la gestion de crise post-ouragan. Dans un premier temps, les déchets dispersés sur le territoire gênent la progression

des services de secours et des services techniques de l'assainissement, de la production et de la distribution d'eau, d'énergie et de communication (Beraud et al., 2019 ; Vinet et al., 2019). Dans un deuxième temps, les quantités hors normes de déchets désorganisent les filières de traitement habituelles et leur mauvaise gestion peut provoquer des dommages sanitaires et environnementaux à court ou moyen terme, des inégalités sociales (rythme et choix de zones à déblayer) et une dégradation de l'image et de l'attractivité des territoires dont une partie importante de l'économie repose sur le tourisme (Beraud et al., 2019 ; Vinet et al., 2019). Ces problématiques sont présentes pour d'autres aléas, comme les inondations ou les tremblements de terre, c'est pourquoi la littérature sur la gestion des déchets post-catastrophe est aujourd'hui conséquente (Lauritzen, 1998 ; Mc Entire, 2006 ; Brown et al., 2011 ; Tabata et al., 2019 ; Zhang et al., 2019).

L'ouragan Irma qui a touché les Caraïbes au début du mois de septembre 2017, avec des vents de près de 290 km/h de moyenne et des rafales atteignant 320km/h (Cangialosi et al., 2018), voire 370km/h selon les sources (Gustin, 2017) a fortement impacté la très touristique île de Saint-Martin. Les dommages ont été causés par la violence du vent, mais également par la montée des eaux qui accompagne les ouragans. Ainsi des véhicules et des toits de maison ont été emportés par le vent, des vitres ont été brisées et l'eau de mer, salée, s'est infiltrée dans les habitations. Les habitations qui ont perdu toits et vitres ont également subi des dégradations de mobiliers et d'appareils électriques dues aux pluies. Selon les données du programme spatial européen Copernicus, 19,7 % des bâtiments à Saint-Martin ont été totalement détruits ou sévèrement endommagés. Le coût total des dommages assurés est estimé à 1,17 milliard d'euros pour ce territoire (<https://www.gouvernement.fr/etat-des-lieux-depuis-irma>). La collecte des déchets générés par cet ouragan a duré plusieurs mois et cette quantité correspondait entre 16 à 24 mois de collecte « normale ».

C'est dans ce contexte que le projet DéPOs (ANR-18-OURA-0003) a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche. Ce projet a pour objectif d'évaluer les quantités et types de déchets en fonction de la force et du lieu de passage d'un ouragan, d'analyser le processus de collecte des déchets en temps normal et lors d'un ouragan, de simuler et de proposer des améliorations pour la gestion des déchets. Au niveau méthodologique le projet a étudié précisément les conséquences de l'ouragan Irma sur le territoire de Saint-Martin au niveau des quantités et collectes des déchets (Popescu et al., 2020). Puis, à partir de ce retour d'expérience, un logiciel de simulation reproduisant la gestion de la collecte des déchets post-ouragan a été développé. Cet article se focalise sur la présentation du logiciel de simulation Simu-DéPOs. Ce logiciel, en plus de reproduire ce qui s'est passé à Saint-Martin durant l'ouragan Irma, permet de simuler d'autres événements pouvant se produire sur d'autres territoires, comme par exemple en Guadeloupe ou en Martinique, deux autres territoires français fortement exposés aux ouragans. L'objectif est de disposer d'un logiciel permettant de calculer le temps de collecte de déchets en fonction du niveau d'endommagement, de sa localisation, des lieux préparés par les collectivités pour recevoir les déchets pendant la collecte (les aires de stockage temporaire) et des moyens mis à disposition pour réaliser cette collecte : nombre et types de véhicules.

Lors du projet DéPOs une grande attention a été apportée pour identifier les paramètres pertinents et les rendre accessibles dans l'interface afin que les utilisateurs puissent facilement les changer et réfléchir en amont à des stratégies de collecte. Les questions liées à la collecte sont multiples : où déposer les déchets temporairement, sur combien de zones, comment segmenter l'espace en bassins de collecte, combien de camions faut-il ou faudrait-il pour collecter un volume de déchets que l'on ne connaît pas a priori. Parmi toutes ces questions, de nombreuses ont des réponses contraintes par les territoires, les ressources, les usages. Les déchets ne se déposent temporairement que sur certains types de terrains (assez grands, plats, accessibles, publics), la flotte de camions est toujours limitée, les collectes sont souvent organisées par les entreprises de collecte de déchets courants qui ont déjà des bassins de collecte. Une part importante du travail de recherche a été d'identifier les données pertinentes en fonction des usages et de permettre leur intégration et paramétrisation dans

l'interface. Le logiciel Simu-DéPOs permet ainsi d'intégrer des connaissances pour coller au mieux à chaque contexte local et apporter des réponses pour l'optimisation des futures collectes pour chaque territoire étudié. Il a été présenté en avril 2021, en distanciel en raison du COVID, auprès de collectivités de Guadeloupe, dont la région Guadeloupe.

Le logiciel Simu-DéPOs permet de simuler la collecte de déchets de leur source jusqu'aux lieux de traitement ou de stockage de ces déchets. La collecte se fait en deux étapes : de la source des déchets (les gisements) à des aires de stockage temporaire et de ces aires de stockage temporaire aux lieux de traitement ou de stockage (les écosites) que nous considérons être le point final de la collecte, les exutoires. Ces aires de stockage temporaire jouent un rôle important parce qu'elles permettent de dégager le plus rapidement possible les déchets des particuliers et entreprises, tout en permettant dans un deuxième de temps aux entreprises de stockage et de traitement de recevoir les déchets sans être submergées par le volume de déchets. Cela va sans dire, mais il faut le rappeler, plus le volume est important, plus la pression sociétale forte, moins il est facile de trier les déchets. Dans l'urgence, la priorité est de dégager l'espace pour retrouver un fonctionnement nominal au plus vite. L'optimisation de la collecte de déchets post-catastrophe est donc non seulement un enjeu de rapidité de retour à la normale mais aussi un enjeu environnemental pour se donner plus de chance de trier cette énorme quantité de déchet – et donc de ressources potentielles - plutôt que de l'enfouir comme c'est souvent le cas. A noter, dans le cas d'Irma les déchets n'ont pas pu être triés. Le logiciel Simu-DéPOS permet de distinguer les flux des déchets en fonction de la nature des déchets ce qui permet de réfléchir à l'impact du tri des déchets sur l'organisation de la collecte.

Au niveau expérimental, nous nous sommes focalisés sur les déchets provenant des bâtiments, comprenant les parties de bâtiments (déchets BTP fenêtres, murs, toits, tôles) mais aussi les meubles et appareils électroménagers pour en déduire une volumétrie globale. Les autres déchets (déchets verts, VHU, etc.) n'ont pas été calculés mais ils sont intégrables dès lors que l'on saurait les localiser ou au moins faire des hypothèses sur leur localisation et volumétrie.

Au niveau algorithmique Simu-DéPOs est de type plus court chemin entre des origines et des destinations : des sources de déchets (les gisements) aux aires de stockage temporaire puis des aires de stockage temporaire aux lieux de traitement ou de stockage de ces déchets (les écosites). Cette décomposition en deux étapes correspond à l'usage constaté sur le terrain.

Avant de calculer la collecte, la première étape consiste à estimer la quantité de déchets à collecter à partir de l'endommagement des bâtiments qui est notre cas d'étude expérimental. Si l'évènement a eu lieu, nous nous appuyons sur les données d'endommagement du bâti, sinon nous simulons les effets d'un ouragan de façon aléatoire sur les bâtiments en utilisant des cartes d'aléas. La deuxième étape consiste à choisir la localisation des lieux de collecte à partir de la localisation des bâtiments endommagés. Enfin la troisième étape consiste à calculer les temps de collecte en fonction des volumes de déchet, de l'organisation du territoire en bassins versants, des moyens de collecte affectés et des éventuelles possibilités de tri.

Afin de présenter notre méthode, nous présentons les principes de chaque partie avant de synthétiser le processus global.

2. Estimation et localisation des volumes de déchets provenant des bâtiments produits par un ouragan réel ou simulé

Pour connaître le volume de déchets produit par un ouragan, on peut avoir recours aux témoignages sur le terrain, aux données produites par les décharges, par les collectivités ou encore à celles issues de la presse. Dans le cadre d'Irma, selon les chiffres diffusés dans la presse, mi-novembre 2017, la quantité de déchets entreposés était estimée à 89.300 m³ d'encombrants et 19.900 m³ de tôles, soit un total de 109.000 m³. Selon le bilan diffusé par la collectivité en juin 2018, les

sites de stockage de déchets avaient reçu de 25.000 à 30.000 tonnes de déchets lorsqu'ils étaient en activité, ce qui est cohérent avec les chiffres diffusés par la presse si l'on prend un ratio classiquement utilisé pour des déchets ordinaires ($1 \text{ m}^3 \approx 0,25\text{t}$) (Nithart & Bonnemains, 2018, p. 30). La quantité totale de déchets post-Irma admis entre le 7 septembre 2017 et le 30 juin 2018 à l'écosite de Grandes Cayes (le seul écosite de Saint-Martin par lequel tous les déchets issus de Irma sont censés passer) est estimée par l'exploitant à 55.889 tonnes soit 16 mois de déchets réceptionnés en temps normal. De son côté, la collectivité évoque un tonnage équivalent à 24 mois correspondant plutôt à 82.560 tonnes de déchets.

Comme souvent, dans les situations d'urgence, les bilans ne sont pas toujours cohérents. De surcroît, dans ces situations, une partie des volumes de déchets peut sortir du circuit officiel pour être abandonnée dans l'environnement (causant ainsi des pollutions pouvant être importantes) ou récupérée par les populations. Enfin, ces données restent très générales et ne permettent pas de savoir précisément où étaient localisés ces volumes importants de déchets avant d'être introduits dans le système de collecte, ce qui est gênant pour reproduire précisément comment la collecte s'est déroulée. Des enquêtes sur le terrain auprès des acteurs et de la population peuvent aider, mais cela reste parcellaire ou demande beaucoup de temps pour qu'elles soient complètes. C'est pourquoi les modélisations sont très intéressantes pour compléter les données de terrain et permettent de faire des simulations.

Dans le cadre du projet DÉPOs, une méthode a donc été produite pour estimer et localiser les volumes de déchets provenant des bâtiments endommagés (Ruas et al., 2021). Elle consiste à estimer le volume de déchets de chaque bâtiment en fonction de sa surface et de son degré d'endommagement. Il a été démontré dans le contexte de Saint-Martin que cette méthode donnait des résultats satisfaisants (Ruas et al., 2021). Il existe déjà de nombreuses méthodes cherchant à quantifier les déchets générés par une catastrophe (Chen et al., 2007 ; Hirayama, 2010 ; FEMA, 2018), des revues de la littérature existent pour les répertorier et les classer (Marchesini et al., 2021). Néanmoins, compte tenu des données et des outils disponibles, des spécificités des territoires et des aléas étudiés, il est dans les faits très souvent difficile de trouver des méthodes existantes parfaitement adaptées au contexte d'analyse (Ruas et al., 2021).

La méthode DÉPOs d'estimation des volumes de déchet repose sur des données d'endommagement des bâtiments qui différencient les bâtiments détruits, fortement endommagés, moyennement endommagés, peu ou pas endommagés (Ruas et al., 2021). Cette classification des endommagements correspond à celle du SERTIT (Service Régional de Traitement d'Image et de Télédétection) qui produit des données d'endommagement des bâtiments dans la semaine suivant une catastrophe naturelle majeure à l'aide de données satellitaires. Le logiciel de simulation Simu-DÉPOs présenté ici implémente la méthode DÉPOs et peut donc être utilisée rapidement à la suite d'un ouragan et dans de différents contextes. L'autre avantage de cette méthode est qu'elle évalue les volumes de déchets à l'échelle de chaque bâtiment, la localisation des déchets est alors très fine permettant ainsi de rejouer très précisément la collecte des déchets.

Lorsque les données d'endommagement sont manquantes, comme par exemple lorsque l'on souhaite travailler en amont d'un événement à venir, le logiciel de simulation propose à l'utilisateur de déterminer des scénarios d'endommagement du bâti. Ces simulations d'endommagement du bâti reposent sur la détermination de ratios de bâtiments détruits, fortement endommagés, moyennement endommagés, peu ou pas endommagés. A partir de ces ratios des tirages aléatoires sont effectués sur les bâtiments pour déterminer leur niveau d'endommagement tout en respectant les ratios paramétrés. Dans ce cadre, il est donc nécessaire de connaître ou de formuler des hypothèses sur les impacts sur le bâti des ouragans futurs, ou de s'appuyer sur des événements passés comme l'ouragan Irma. Lorsque cela est pertinent, ces hypothèses peuvent être différenciées par zone, en fonction par exemple de l'exposition plus ou moins forte de ces zones aux ouragans ou de la vulnérabilité du bâti (on parle alors de simulation multizone). Par exemple, il est très pertinent d'utiliser des cartes d'aléa

existantes comme celles des zones submersibles ainsi que les bords de mer qui sont souvent plus fortement touchés lors des ouragans. La connaissance des matériaux et des années de construction pourrait être utilisée pour mieux différencier les quartiers, mais cette information reste encore très peu disponible.

La figure suivante illustre une simulation de bâtiments détruits et endommagés à Point-à-Pitre en distinguant deux zones : une zone à fort risque en bord de mer et une zone à risque moyen pour le cœur de la ville. Pour ces deux zones, les pourcentages de destruction et d'endommagement sont différenciés. Par défaut le système propose les pourcentages constatés sur Saint-Martin lors du passage d'Irma, évidemment ces pourcentages sont modifiables pour jouer avec les simulations et tester les organisations de collecte et en déduire les temps de collecte et les volumes de déchets pour chaque simulation. Il est ainsi possible d'étudier en amont la pertinence de l'organisation de la collecte en fonction de la gravité de l'évènement.

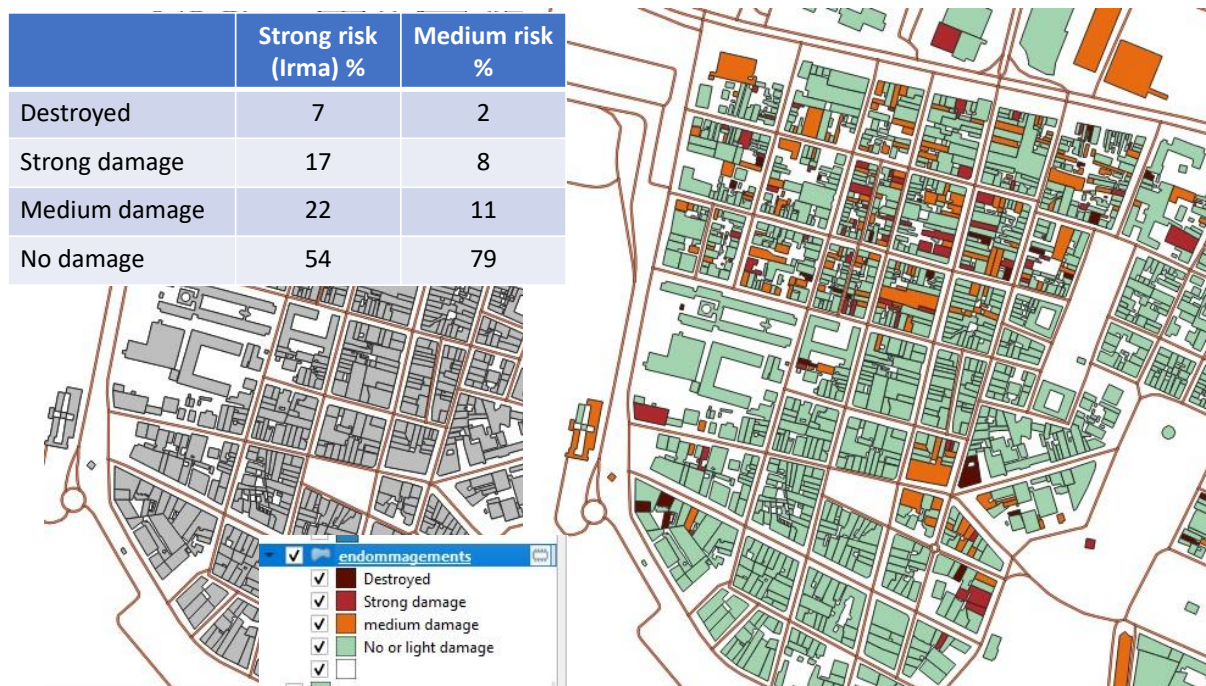


Figure 1. Exemple de tirage aléatoire de bâtiments endommagés dans Pointe-à-Pitre pour un risque moyen

A l'issue de cette étape, on connaît la localisation des bâtiments endommagés et le volume de déchets associés à chaque bâtiment, données nécessaires à la simulation de la collecte.

3. Processus de collecte sans tri et dans un seul bassin versant

3.1. Détermination des aires de dépose

A partir des simulations d'endommagement qui constituent les gisements initiaux de déchets et de données concernant le réseau routier, il est alors possible de simuler la collecte des déchets post-ouragan. En théorie, le point de départ de cette simulation, ce sont les aires de dépose. En effet, d'après (Nithart, Bonnemains, 2018), les aires de dépose sont *“les premiers sites d'entreposage des déchets post-catastrophes. Elles sont implantées au plus près du bâtiment endommagé”*. Les aires de dépose présentent la particularité d'être souvent des zones de dépôt informelles : en effet, pour commencer à nettoyer et réparer leurs logements et lieux de travail endommagés par l'ouragan, les habitants déposent spontanément leurs déchets au bord des routes et bien souvent les gestionnaires et les collectivités n'ont pas pu anticiper la création de ces aires de dépose. Le caractère informel, souvent spontané et éphémère des aires de dépose ne permet donc ni de les dénombrer, ni de les

localiser précisément. Il est important ici de noter que ces aires de dépose peuvent regrouper des volumes de déchets parfois très importants en fonction des caractéristiques du territoire et du comportement des populations. C'est pourquoi le logiciel de simulation propose différentes manières pour localiser ces aires de dépose à partir des bâtiments endommagés de façon à reproduire de manière la plus réaliste possible la disposition de ces aires de dépose.

Précisément, le logiciel propose quatre méthodes de positionnement des aires de dépose : 1/ au centre des bâtiments, 2/ sur les routes au plus proche des bâtiments (sur le réseau routier au plus proche des gisements initiaux), 3/ sur les routes en regroupant les gisements proches, 4/ sur les axes majeurs importants. Le choix de la méthode a un impact sur le nombre de points de collecte et donc sur le temps de collecte (figure 2), puisque l'algorithme ne fait pas de tournée : un camion va à un point de collecte (ici une aire de dépose) et vide tous les déchets de ce point en faisant des aller-retours entre ce point origine et sa destination (une aire de stockage temporaire proche).

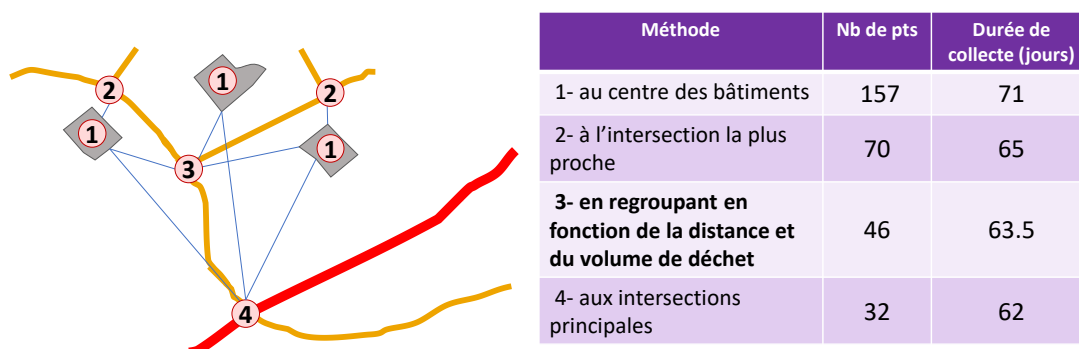


Figure 2. Impact de la méthode de calcul des aires de dépose sur la durée de collecte

Si les quatre méthodes sont disponibles sur le logiciel, nous recommandons d'utiliser la méthode 3 qui est la plus réaliste. En effet, d'après différents retours d'expérience, comme par exemple à Saint-Martin à la suite d'Irma, les habitants ont tendance, quand ils le peuvent, à regrouper leurs déchets sur des petites distances. La réduction du nombre de dépose permet de libérer les routes et de déblayer le territoire au plus vite, ce qui arrange les populations et les gestionnaires. La méthode 3 donc va affecter les gisements initiaux de déchets provenant des bâtiments à l'intersection de rues la plus proche en fonction de deux critères déterminés par l'utilisateur : une distance maximale et un volume maximal. La distance maximale correspond au fait que les populations ne peuvent pas déplacer de trop grandes quantités de déchets sur de trop grandes distances. Le volume maximal correspond au fait qu'il est difficile de trouver des endroits pouvant stocker de grandes quantités de déchets. Une fois que ces projections ont été réalisées des agrégations entre ces gisements provisoires sont effectuées toujours en fonction de critères de distance maximale et de volume maximal. Les critères de distances et de volumes utilisés proviennent obligatoirement d'hypothèses et génèrent des imprécisions dans les simulations (Tableau 1). Dans le tableau suivant, on considère que l'on ne déplacera un volume entre 10 et 50m³ au maximum à 50m, si l'aire de dépose est plus loin alors il n'y aura pas de regroupement. Même si ces valeurs sont sujet à discussion (parce que tous les habitants ne prendront pas les mêmes décisions), l'intérêt du logiciel de simulation sera de pouvoir tester différentes hypothèses et ainsi d'évaluer l'impact de celles-ci sur les résultats.

Volume de déchets V (m ³)	Rayon de déplacement R (m)
$V \leq 10$	70
$10 \leq V \leq 50$	50
$50 \leq V \leq 100$	25
$100 \leq V$	12.5

Tableau 1. Distance maximale de portage en fonction du volume de déchet (paramètres par défaut)

La figure 3 suivante illustre le regroupement en fonction du volume et de la distance (à droite) par rapport au dépôt à l'intersection de la rue (gauche). Ce regroupement minimise le nombre d'aires de dépose.



Figure 3. Nombre et Volumes de déchets aux aires de dépose en fonction de la méthode utilisée. A la plus proche intersection (gauche), par regroupement en fonction de la distance et du volume (droite)

A noter que nous aurions pu projeter les déchets sur la rue la plus proche, mais ça rallonge le temps de calcul sans modifier le temps de collecte. Par ailleurs le temps le plus long de la collecte n'est pas le déplacement entre les aires de collecte et les aires de stockage temporaire mais le temps de chargement- déchargement, estimé par retour d'expertise terrain à 1h30 à chaque chargement et chaque déchargement. Nous avons constaté que ce temps pouvait atteindre 97% du temps dans les expérimentations que nous avons faites sur Saint Martin. La minimisation des aires de dépose et l'optimisation des temps de chargement/déchargement sont des leviers d'optimisation.

A l'issue de cette étape, on connaît la localisation des déchets à collecter et leur volume. Ces déchets devront être transportés à leur destination.

3.2. Des aires de dépose aux Aires de stockage temporaire

Les gisements de déchets, une fois localisés, vont alors être envoyés vers des installations de stockage temporaire avant d'être envoyés vers les exutoires finaux, les écosites. Le logiciel de simulation propose alors trois solutions : il est possible de n'étudier qu'un circuit de collecte - des aires de dépose aux installations de stockage temporaire ou des installations de stockage temporaire vers les exutoires - ou de simuler les deux circuits directement afin de reconstituer l'ensemble de la collecte dans une seule simulation. Pour réaliser ces simulations, il faudra définir les caractéristiques des camions qui vont effectuer la collecte : le nombre de camions et leur capacité maximale moyenne, c'est-à-dire le volume qu'ils peuvent transporter. D'autres modalités de collecte doivent être définies comme les temps de chargement et de déchargement des volumes de déchets. Ces temps peuvent être constants ou proportionnels au volume, voire réduits dans certaines zones équipées de véhicules spéciaux. A ces temps viendront s'ajouter les temps de trajet entre les sources de déchets et leur destination. Pour cela, il est possible d'utiliser des données qui répertorient ces temps de parcours ou de les calculer en utilisant les données du réseau routier. Ces données du réseau routier devront préciser les vitesses de déplacement des camions sur les tronçons du réseau. Les trajets sont alors calculés en suivant les plus courts chemins selon l'algorithme de Dijkstra.

Pour ces simulations, nous considérons que les véhicules travaillent sans interagir entre eux et sans interactions avec les autres véhicules. Ainsi la simulation revient à estimer dans un premier temps la durée de collecte faite par un seul véhicule sur la zone d'étude, avant de diviser ce temps par le nombre total de véhicules en service. Sur une aire de dépose ou une installation de stockage

temporaire, qui selon le circuit peuvent être définies comme des points de départ des trajets, le véhicule va charger autant de déchets que lui permet sa capacité maximale, et tant que la source de déchets n'est pas vidée, le véhicule fera autant d'aller-retours que nécessaire pour le vider. Si le véhicule n'est pas entièrement rempli, il ne cherchera pas à aller vers une autre source de déchets. C'est pourquoi il est aussi conseillé de regrouper les déchets des gisements initiaux pour éviter d'avoir des sources de déchets avec des petits volumes qui viendraient générer des erreurs sur le résultat final. Dans la pratique, ce choix est réaliste parce que le volume de déchets provenant d'un bâtiment est souvent largement supérieur à la capacité d'un camion et que les déchets ont été regroupés (voir méthode 3 présentée en 3.1). Le calcul suit le schéma suivant :

Pour chaque aire de dépose ad_i à vider (origine), un camion charge des déchets en fonction de sa capacité (volume-camion), rejoint l'aire de stockage la plus proche (destination), décharge et retourne à l'aire de dépose ad_i jusqu'à ce que le volume de déchets restant à ad_i soit nul.

$$Nb_i = \text{Nombre-de-trajets}^{ad_i} = \text{MOD} (\text{volume-déchet}^{ad_i} / \text{volume-camion}) + 1$$

$$\text{Distance}_i = Nb_i * 2 * \text{distance-route} (ad_i, \text{aire de stockage la plus proche})$$

$$\text{Durée}_i = Nb_i * (\text{temps-de-chargement} + \text{temps-de-déchargement} + 2 * \text{durée-trajet-route} (ad_i, \text{aire de stockage la plus proche}))$$

$$\text{Distance-totale} = \text{Som}_i (\text{distance}_i)$$

$$\text{Durée-totale} = \text{Som}_i (\text{durée}_i) / \text{nombre-de-camions}$$

L'information résultante est stockée et peut être consultée pour une post analyse. Ainsi en figure 4 on peut voir le volume reçu à une aire de transit (13651 m³ reçus à La savane) et le temps nécessaire pour vider un bassin de collecte complet (61 jours pour vider le bassin avec 3 camions de 32m³ chacun).

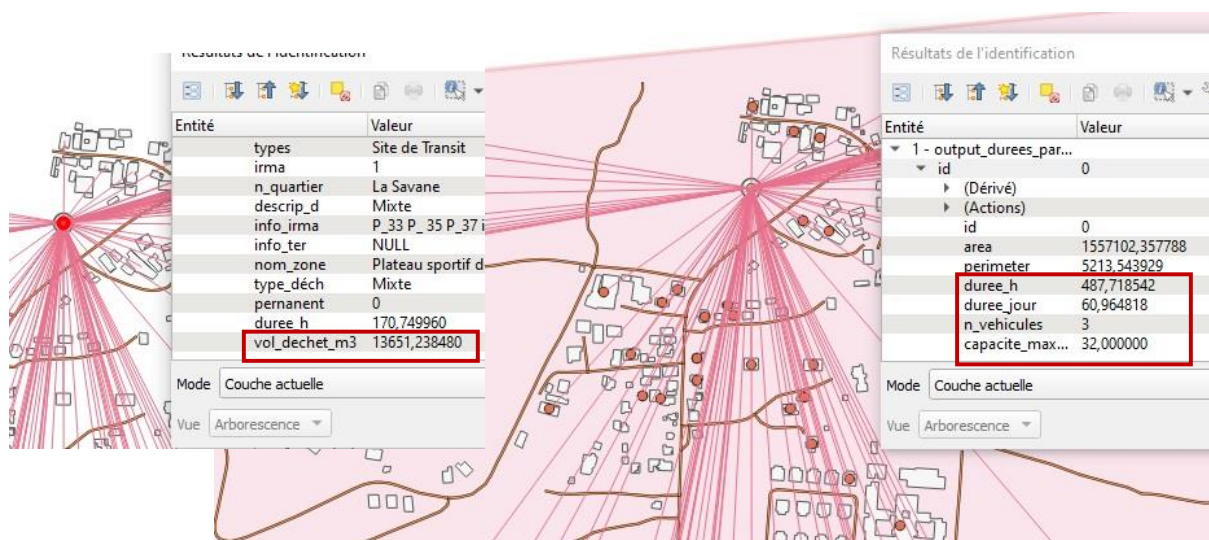


Figure 4. Les volumes de déchets reçus à l'aire de stockage temporaire La Savane et la durée pour vider le bassin avec 3 camions de 32 m³

4. Prise de plusieurs bassins et du tri

En réalité la collecte de déchet est un peu plus complexe pour des grands territoires pour plusieurs raisons. La première raison est que la collecte est généralement organisée en bassins de collecte. Chaque bassin de collecte est géré par une entreprise et un bassin peut contenir plusieurs aires de stockage temporaire. Ainsi le logiciel simu-DéPOs permet de gérer plusieurs bassins, plusieurs aires de stockage temporaire par bassin et un nombre et volume de camions propre à

chaque bassin. Cela permet de mieux se caler à la réalité terrain et de permettre au gestionnaire de réfléchir à l'impact du découpage en bassins, du nombre d'aires de stockage temporaire et aux moyens mis dans chaque bassin. La figure 5 illustre plusieurs bassins à Saint Martin et plusieurs aires de stockage temporaire. En particulier, ces aires de stockage ne sont pas choisies au hasard. Elles doivent être plates, assez grandes pour recevoir des déchets pendant plusieurs semaines et si possible équipées pour éviter de polluer les sols suite aux dépôts des déchets.



Figure 5. Prise en compte de plusieurs bassins de collecte et plusieurs aires de stockage par bassin

Cette étape permet de comparer les moyens de collecte alloués par bassin en fonction de l'endommagement de chaque bassin. Dans le cas de Saint Martin, nous avons saisi les bassins de collecte usuels (en situation de collecte standard) et la localisation des aires de stockage temporaire utilisés après Irma que nous avons pu obtenir. A noter par exemple que la zone 1 (S1) à l'Ouest a sa zone de collecte en zone 2 (le stade Albéric Richard), ce qui pour le cas de Saint Martin est logique puisque l'unique éco-site étant à l'Est de l'île (en zone 5) il était surement plus intéressant d'apporter les déchets dans la bonne direction (vers l'Est) à l'issue de la première étape de collecte (des aires de dépose aux aires de stockage temporaire).

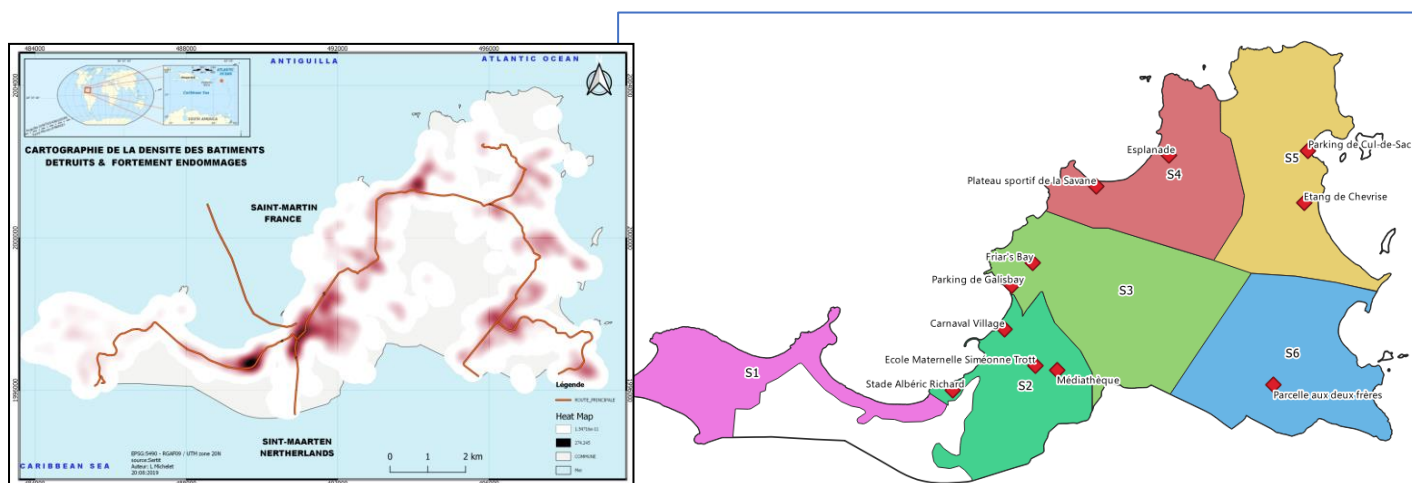


Figure 6. Densité de l'endommagement du bâti après Irma (gauche) et bassins de collecte et localisation des aires de stockage temporaire (droite). (source : Projet DéPOs, 2019)

Le logiciel permet ainsi de calculer le temps qu’il faudrait pour collecter les déchets par bassin avec les mêmes moyens (ici 3 camions de 32m³) (tableau 2). Disposer de ces informations quelques jours après l’évènement permettrait d’ajuster les moyens de collecte au mieux. Ce n’est pas irréaliste dans la mesure où la campagne de collecte prend plusieurs semaines et que les campagnes d’identification des destructions par télédétection sont de plus en plus rapides et systématiques comme ce fut le cas pour Irma à Saint Martin.

Secteur de déblayage réel	Nombre de bâtiments endommagés	Superficie (km²)	Densité de bâtiment (bâtiment/km²)	Volume total de déchets (m3)	Distance totale parcourue (km)	Volume transporté au km (m3/km)	Durée de la collecte (jours)
S1 (Stade Albéric Richard)	316	5,4	58,52	30906	7239	4,27	151
S3 (Parking de Galisbay, Friar's Bay)	145	10,5	13,81	11063	1130	9,79	55
S4 (L'Esplanade, Plateau Sportif)	242	7,1	34,08	24833	1355	18,33	115
S5 (Parking de Cul-de-Sac, Etang de Chevrise)	197	9,1	21,65	30778	4018	7,66	137
S6 (Parcelle aux deux frères)	399	9,1	43,85	26078	2961	8,81	130

Tableau 2. Comparaison du temps de collecte par bassin par simulation

Par ailleurs en faisant différentes simulations avant qu’un ouragan se produise, l’utilisation de ce logiciel permettrait de réfléchir au nombre et à la délimitation des bassins de collecte et aux moyens à prévoir selon les scénarios.

De même Simu-DéPOs permet de simuler une collecte avec tri de déchets. Malheureusement dans l’urgence de la crise les déchets post-ouragan sont peu triés et finissent souvent mélangés puis enfouis à la décharge au lieu d’être réutilisés comme nouvelle ressource. Or plus les déchets sont triés en amont plus le tri est facile à faire. Dans le cas de territoires de grande taille comme en Guadeloupe, de nombreuses entreprises de tri existent, notamment à Pointe-à-Pitre. L’idéal lors d’une collecte de déchets post-ouragan serait d’apporter les déchets triés directement des aires de dépose aux entreprises de tri sans passer par les aires de stockage temporaire mais cela nécessite d’être pensé et organisé en amont avec les acteurs de terrain. Simu-DéPOs permet de typer les déchets afin de différencier les trajets en fonction de leur type et des caractéristiques des lieux recevant les déchets. Pour pouvoir utiliser cette option, il faut différencier les déchets par type puis saisir la localisation des entreprises de traitement de déchets par type. Dans l’exemple fictif et très simplifié suivant (figure 7) les 4,23 m³ de déchets électroniques (DEEE) du bâtiment fortement endommagé numéro 347 sont envoyés au point 2 qui accepte les déchets DEEE alors que le reste des déchets de ce bâtiment (8,46m3) sera envoyé au point 1 qui prend les autres déchets mélangés.

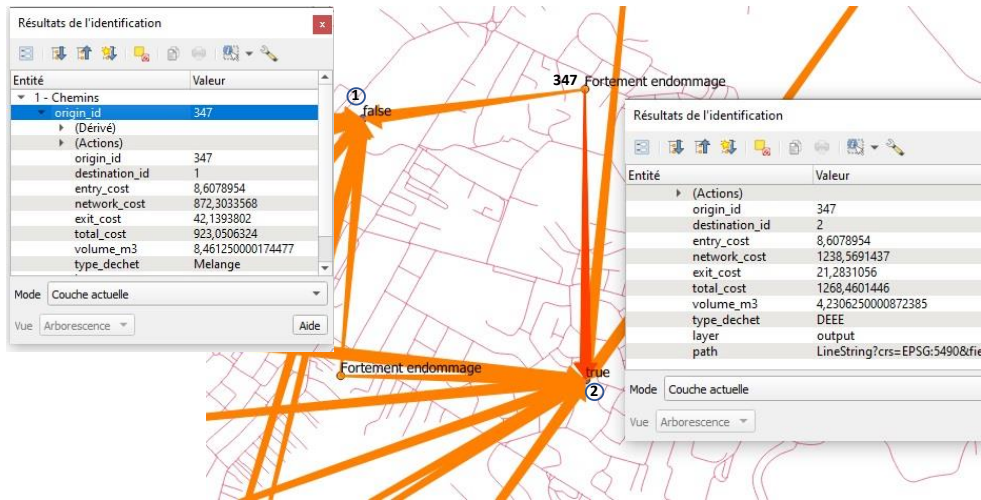


Figure 7. Différenciation des trajets de collecte en fonction de la nature des déchets.

Le module propose de typer les déchets selon les normes en cours : DEEE, déchets de meubles mous ou durs, déchets du BTP, Déchets verts, Véhicule (VHU), Bateaux de plaisance (BPHU) et déchets mélangés. Cela demande un paramétrage plus précis (figure 8) mais surtout de disposer de

l'information. A l'image du projet MECaDePI (CEPRI, 2013), des quantités types pourraient surement être estimées pour les appareils électroniques pour chaque bâtiment endommagé et des photo aériennes pourraient être utilisées pour également estimer la localisation et la volumétrie les déchets verts. Cela reste quoiqu'il en soit un sujet à investiguer.

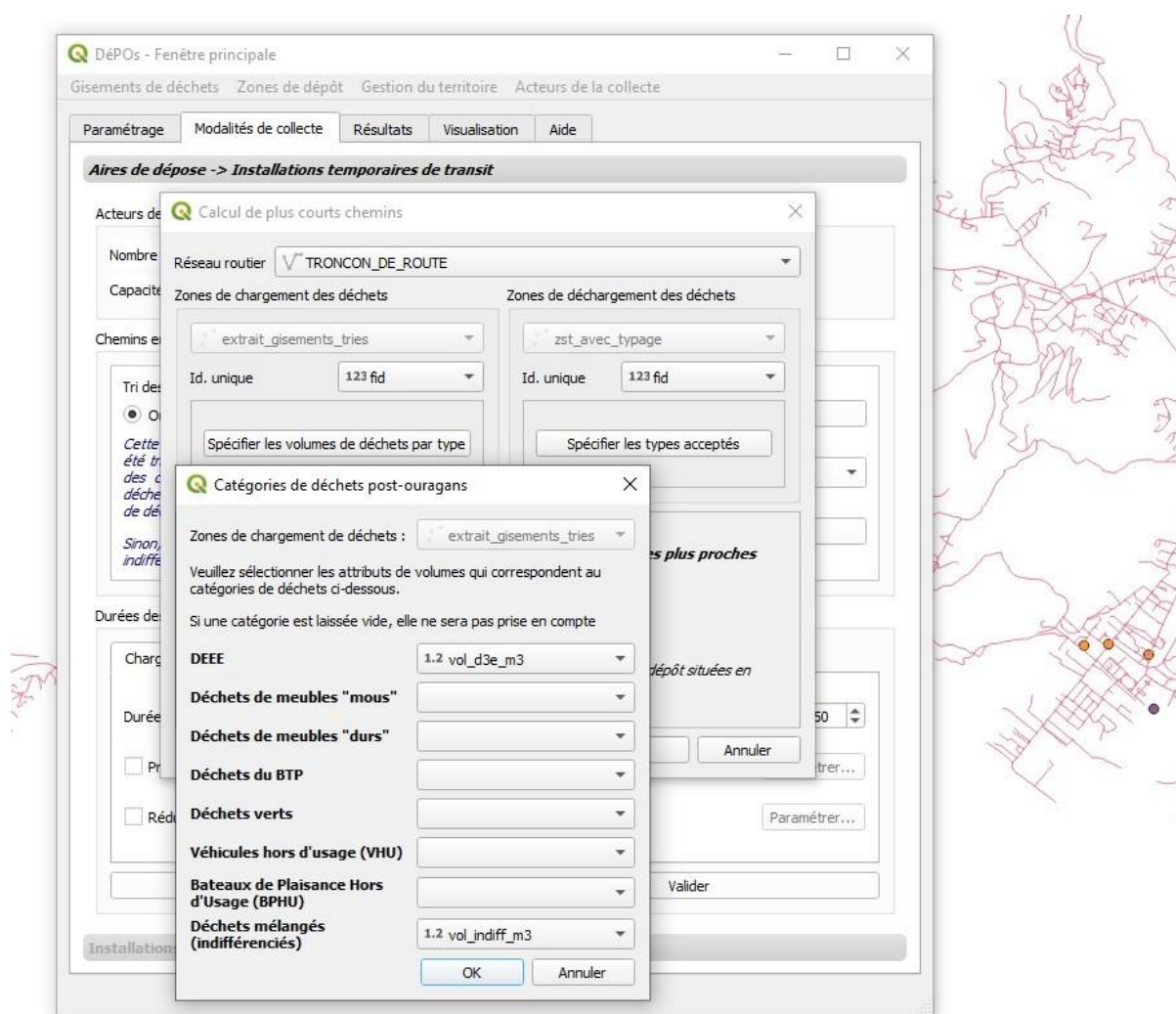


Figure 8. Paramétrage des correspondances entre attributs des déchets aux aires de dépose (gisements) et type de déchets acceptés aux aires de stockage ou de tri.

5. Un processus global disponible sur QGIS

Le processus global décrit dans ce papier a été codé sur QGIS à partir de bibliothèques de QGIS et de PostGIS dans le cadre du financement de l'ANR DéPOS. Il a été conçu par Truong, Lhomme et Ruas, développé par Truong et déposé sur GITHUB pour pouvoir être utilisé par des tiers et en particulier des collectivités (Truong, 2020). Le choix a été fait de n'utiliser que des logiciels libres, que des données publiques et d'écrire l'interface en français pour faciliter son utilisation dans les Antilles françaises. Des tutoriels en français ont été déposés pour l'installation et pour son utilisation didactique avec des petits lots de données tests. Des bibliothèques QGIS sont à charger ainsi que les deux modules sous la forme d'API symbolisées par un bâtiment soumis à des vents, et un camion (voir figure 9).

Le logiciel comporte donc :

- un module pour simuler des endommagements de bâtiments suite à un ouragan, en utilisant comme valeurs par défaut le taux de d'endommagement lors de l'Ouragan Irma à Saint Martin. Des cartes d'aléas peuvent être prises en compte pour plus de vraisemblance lors des simulations,

– un module pour simuler la collecte comprenant le choix de la localisation des aires de dépose, puis la collecte en elle-même. Ce module permet de calculer le temps de collecte en jours ouvré, le volume de déchets apporté en chaque destination (aire de stockage temporaire ou écosite) et la distance totale parcourue en fonction des moyens alloués.

Pour fonctionner le logiciel nécessite également des données géographiques pour calculer les endommagements, les déplacements sur les réseaux, les lieux de collecte et les volumes de déchets en fonction des endommagements. Nous avons choisi d'utiliser les données de la BDTopo de l'IGN parce qu'elles sont disponibles sur tout le territoire français et disposent de toutes les informations nécessaires au calcul des différentes étapes. Les aires de stockage temporaire, les entreprises de traitement et de stockage (écosites) doivent par contre être saisies par les utilisateurs ainsi que les bassins de collecte et les zones d'aléas mais ce sont des informations locales que les collectivités peuvent facilement saisir. A noter qu'il faut un profil de géomaticien pour être à l'aise avec les différentes étapes, que ce soit le chargement du logiciel sur PC la première fois ou l'utilisation, dont en particulier le chargement des données géographiques et la saisie des données locales telles que les aires de stockage temporaire, la localisation des écosites ou encore la délimitation ou le chargement des zones d'aléas. La figure 9 suivante résume les étapes et données associées au processus.

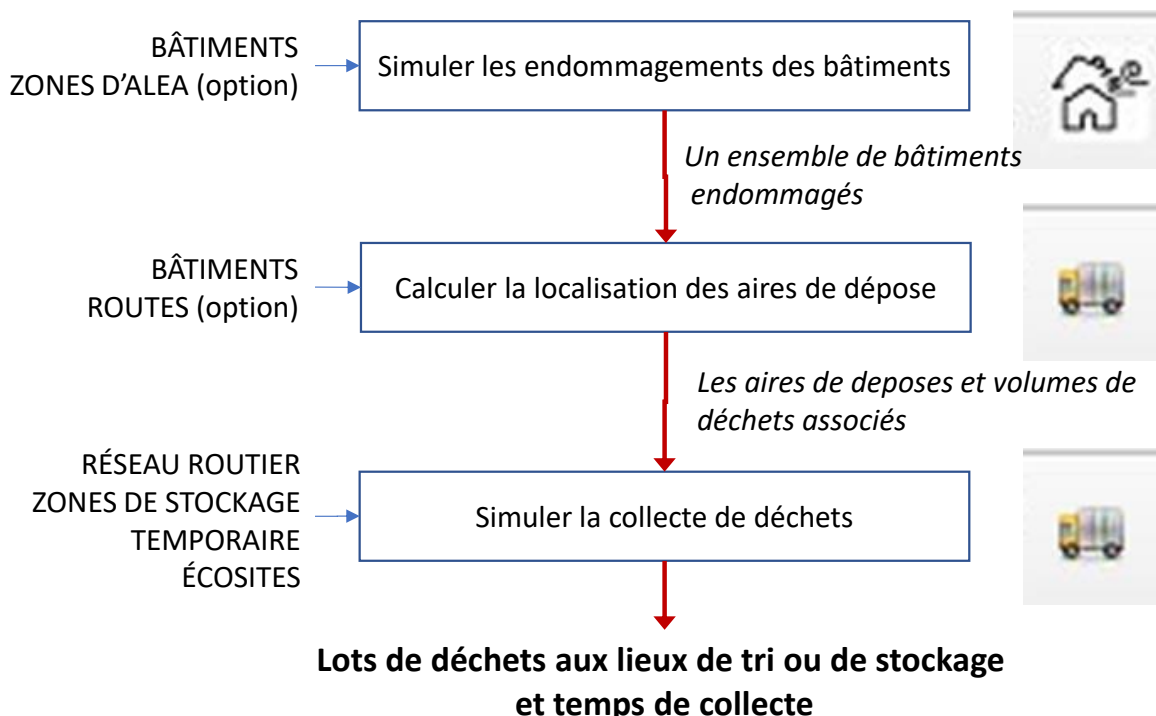


Figure 9. Etapes et données pour simuler la collecte des déchets.

Un effort particulier a été fourni pour externaliser les variables et pouvoir s'adapter aux situations réelles (exemple figure 8). Par ailleurs les résultats de chaque simulation sont stockés et exportables afin de pouvoir comparer des simulations d'ouragans ou de stratégies de collecte en jouant sur le nombre et la position des aires de stockage temporaire, le nombre de camions par bassin de collecte ainsi que les stratégies de tri en fonction des entreprises présentes sur le terrain (figure 10).

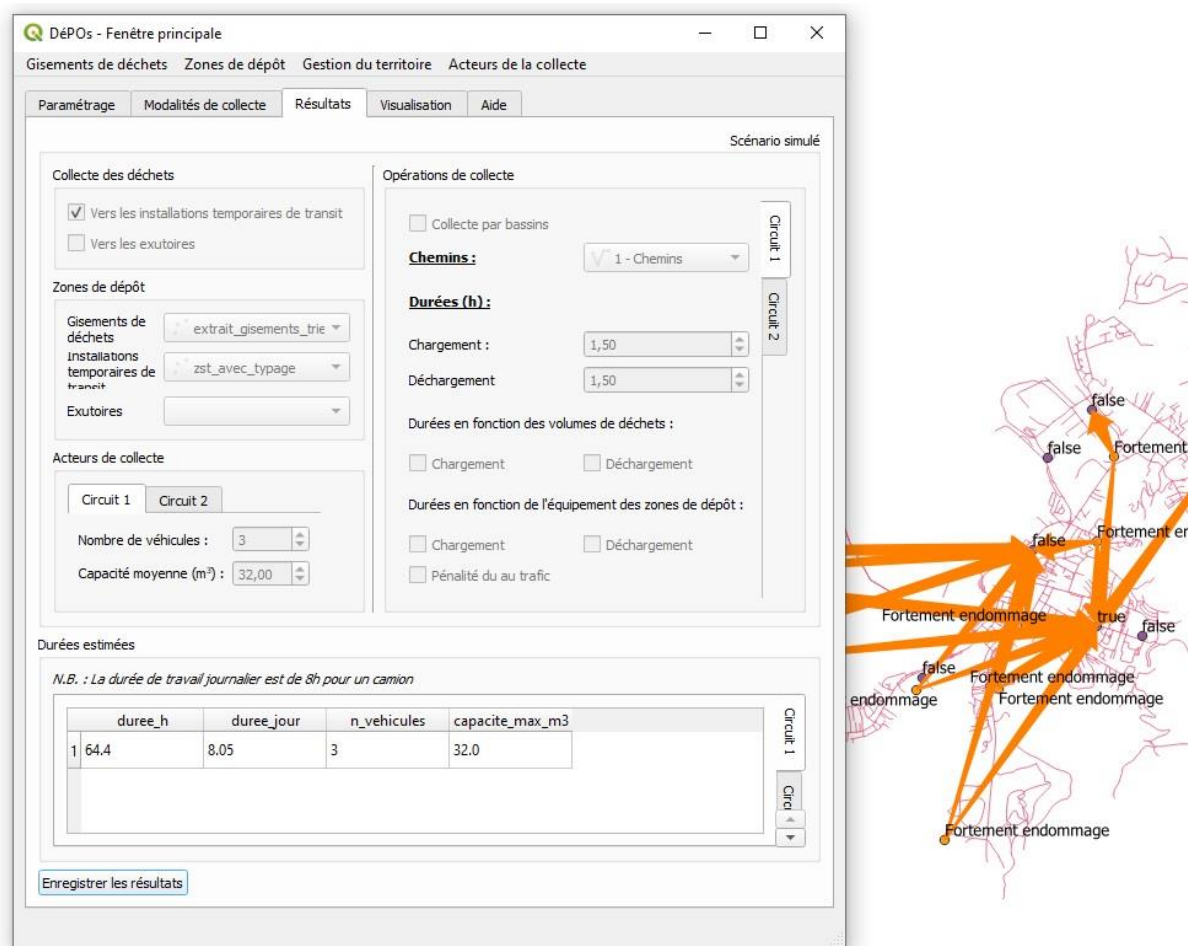


Figure 10. Interface de présentation des résultats.

Le logiciel Simu-DéPOs devait être présenté en présentiel en Guadeloupe auprès de collectivités mais la crise du COVID ne nous a pas permis de réaliser les démonstrations sur place comme prévu. Des présentations distancielles ont été faites, mais sont loin de l'échange permettant l'analyse critique souhaitée. Des tutoriels ont été écrits et déposés pour l'installation et la prise en main du logiciel. Une prise en main par des collectivités de Guadeloupe permettrait la conception d'une version consolidée.

6. Conclusions

Les rapports du GIEC sur le changement climatique soulignent qu'une augmentation de l'intensité de l'activité cyclonique tropicale est probable « En se fondant sur les modèles, il est très probable que les futurs cyclones tropicaux (typhons et ouragans) deviendront plus intenses, avec des vents maximums plus forts et des précipitations plus fortes liées à l'accroissement en cours de la température à la surface des mers tropicales » (GIEC, 2018).

En plus de créer des traumatismes humains, les ouragans ont un coût économique et environnemental non négligeable. Dans cette recherche nous avons analysé le processus de collecte de déchets post ouragans. Les destructions engendrées par les ouragans traumatisent les populations, ralentissent l'activité économique (dont le tourisme) et fragilisent des territoires. La collecte de déchets post ouragans est un enjeu majeur pour revenir à la normal aussi vite que possible, mais aussi pour apprendre à mieux gérer les déchets en les transformant en ressources (Barles, 2017 ; Popescu et al., 2015). Nous proposons dans cette recherche un logiciel open source permettant de rejouer une collecte de déchets à partir de bâtiments endommagés ou de simuler des endommagements puis une collecte. La finalité est déjà de se rendre compte de la quantité de déchets qu'il faudrait collecter et du temps de collecte en fonction de ressources existantes sur un

territoire dans le cas d'ouragans de forte intensité tel qu'Irma. Ensuite, ce logiciel peut permettre d'étudier l'utilité de moyens de collecte plus importants ou plus performants, ainsi que le nombre et la localisation d'aires de stockage temporaire pour réduire les délais de collecte. Disposant de la possibilité d'intégrer la nature des déchets et la diversité des lieux de traitement, le logiciel pourrait être utilisé pour envisager un tri le plus tôt possible dans le processus de collecte et en étudier les conséquences en matière d'organisation, de moyens et de délais.

Références

- Barles, S. 2017 « Écologie territoriale et métabolisme urbain : quelques enjeux de la transition socioécologique », *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, vol. , no. 5, 2017, pp. 819-836.
- Beraud H, Charlotte Nithart, Mathieu Durand, 2019, « Le difficile suivi des déchets post-catastrophe : le cas de l'Ouragan Irma à Saint-Martin » *Risques urbains*, ISTE Ltd., p24
- Brown C, Milke M, & Seville E. ,2011. « Disaster management: A review article. » *Waste Management*, vol. 31, Iss. 6, 1085-1098.
- Cangialosi John P., Latta Andrew S., and Berg Robbie, 2018, Hurricane Irma, National Hurricane Center 30 June 2018 https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL112017_Irma.pdf
- CEPRI, 2013, « Méthode d'évaluation et de caractérisation des déchets post-inondation : MECaDePI » 48 p. https://www.cepri.net/tl_files/pdf/reglementation_digues/MECADEPI.pdf
- Chen J.R., Tsai H.Y., Hsu P.C., Shen C.C., 2007, « Estimation of waste generation from floods », *Waste Management*, Vol. 27, pp. 1717-1724.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2018, Hazus Earthquake Model User Guidance.
- GIEC, 2018, Résumé à l'intention des décideurs, <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4-wg1-spm-fr.pdf>
- Gustin P, 2017, Repenser les Iles du Nord pour une reconstruction durable, rapport interministeriel.
- Hirayama N., Shimaoka T., Fujiwara T., Okayama T., Kawata Y., 2010, « Establishment of disaster debris management based on quantitative estimation using natural hazard maps », *WIT Trans. Ecol. Environ.*, Vol. 140, pp. 167-178
- Lauritzen E.K., 1998, « Emergency construction waste management », *Safety Science*, 30, pp. 45-53
- Marchesini G, Beraud H, Barroca B, 2021, « Quantification of disaster waste: Review of the available methods » *.International Journal of Disaster Risk Reduction*, Elsevier, 2021, 53, (10.1016/j.ijdr.2020.101996). (hal-03154258)
- McEntire D.A., 2006, « Managing debris successfully after disaster: considerations and recommendations for Emergency Managers », *Journal of Emergency Management*, Vol. 4, pp. 23-8.
- Nithart C., J. Bonnemains, 2018, Les déchets de l'ouragan Irma, Rapport ANR projet DéPOs, Octobre 2018
- Popescu R., H. Beraud, B. Barroca, 2020, « The Impact of Hurricane Irma on the Metabolism of St. Martin's Island » August 2020 Sustainability 12(17):6731 DOI: 10.3390/su12176731
- Popescu R., M. Durand, R. D'Ercole « La gestion des déchets post-catastrophe à Port-au-Prince : entre réléation et proximité » *EchoGéo* [en ligne] 30|2014 DOI <http://doi.org/10.4000/echogeo.14070>
- Ruas A., S. Lhomme, M. Lamour, 2021, « Localisation et estimation des volumes de déchets suite à l'ouragan Irma à Saint Martin », *Risques Urbains*, N°1, V 5, DOI : 10.21494
- Tabata T., Onishi A., Saeki T., Tsai P., 2019, « Earthquake disaster waste management reviews: prediction, treatment, recycling, and prevention », *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 36, pp. 101-119
- Truong, 2020, Code en ligne : https://github.com/quythytruong/depos_ouils_simu
- Vinet F., Peroche M., Palany P., Leone F., Gherardi M., Grancher D., Moatty A., Defossez S., 2019, « Collecte et gestion des débris post-cycloniques à Saint-Martin (Antilles françaises) après le passage du cyclone Irma (sept. 2017) », *Cybergeo : European Journal of Geography*.
- Zhang F., Cao C., Li C., Liu Y., Huisingh D., « A systematic review of recent developments in disaster waste management », *Journal of Cleaner Production*, 235, pp. 822-840.

Remerciement

Les auteurs remercient l'ANR pour le financement du projet de recherche DéPOs.