



---

**PO FEDER 2014-2020 – APPEL À PROJETS (AAP)**

**RECHERCHE, DÉVELOPPEMENT ET INNOVATION 2015 – 1**

# **Projet RenovRisk – TRANSFERTS**

## **Recherche intégrée et Innovante sur les risques naturels**

### **Aléas cycloniques sur la zone atelier « Massif du Maïdo – Littoral – Lagon »**

---

**ACTION : 1.04 Amélioration des compétences au service de l'économie  
de la connaissance**

## **Porteur de projet**

**Nom de l'organisme porteur de projet :** Observatoire des Sciences de l'Univers (OSU-R), Université de La Réunion

**Forme juridique :** Etablissement Public d'Enseignement Supérieur

**Représentant à contacter pour le projet :** Cammas Jean-Pierre

**Fonction du représentant :** Directeur de l'OSU-R

**Téléphone du représentant :** 0262938218

**Email du représentant :** [jean-pierre.cammas@univ-reunion.fr](mailto:jean-pierre.cammas@univ-reunion.fr)

## **Organisme de tutelle**

**Nom de l'organisme :** Université de La Réunion

**Numéro SIRET :** 1997447800016

**Adresse (siège) :** Université de La Réunion, 15 avenue René Cassin, CS 92003 97744 Saint Denis Cedex 9

**Adresse de la représentation locale :** OSU-R, bâtiment S4B, 15 avenue René Cassin, CS 92003 97744 Saint Denis Cedex 9

## Contenu

Le projet RenovRisk-GLOBAL.....	4
Le projet RenovRisk-TRANSFERTS .....	28
ACTION 1: Aléas Atmosphériques .....	31
Contexte .....	31
Objectifs et plans de travail.....	32
Livrables.....	36
ACTION 2: Aléas Hydrologiques.....	37
Contexte .....	37
Objectifs et plans de travail.....	39
Livrables.....	41
ACTION 3: Aléas Littoraux .....	43
Contexte .....	43
Objectifs et plans de travail.....	44
Livrables.....	55
ACTION 4: Capitalisation & Communication .....	57
Contexte .....	58
Objectifs et plans de travail.....	58
Livrables.....	59
Budget .....	60
Récapitulatif des livrables du projet.....	62
Bénéfices et retombées pour le territoire.....	64
RenovRisk-TRANSFERTS et la S3 .....	64
RenovRisk-TRANSFERTS et les défis territoriaux .....	64
RenovRisk-TRANSFERTS et la création d'emploi .....	65
RenovRisk-TRANSFERTS et la création d'entreprises .....	65
RenovRisk-TRANSFERTS et les retombées industrielles et économiques .....	65
RenovRisk-TRANSFERTS et la génération de projets économiques innovants à La Réunion.....	66
RenovRisk-TRANSFERTS : caractère reproductible et perspectives d'essaiage .....	66
RenovRisk-TRANSFERTS : développement d'un savoir-faire local susceptible de s'exporter notamment dans la bande inter-tropicale ou sur des territoires insulaires ?.....	67
RenovRisk-TRANSFERTS : Mise à disposition publique des données selon Open Data ou des résultats (Open Access).....	67
Indicateurs d'évaluation.....	67

# Le projet RenovRisk-GLOBAL

## 1 – Contexte général

### Les cyclones actuels et futurs sur l'océan Indien

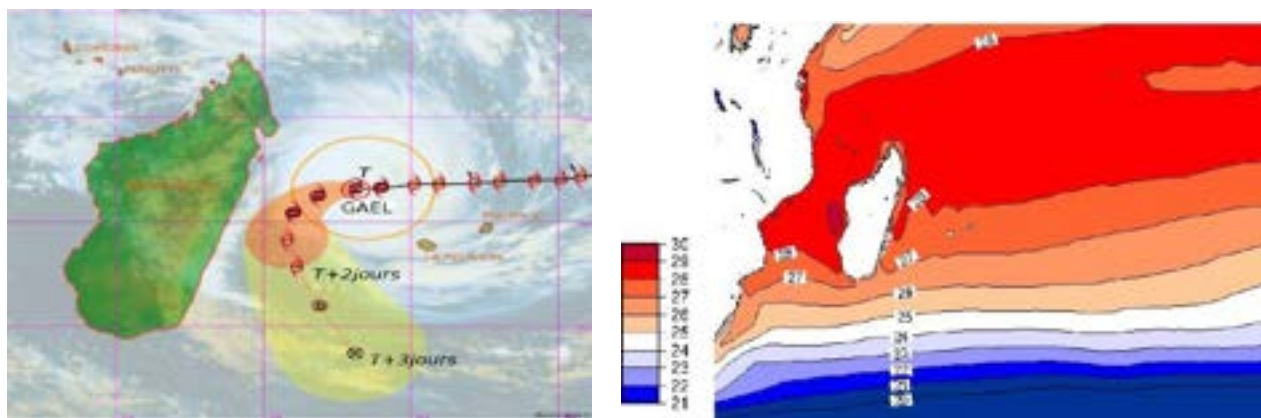
Comme la plupart des îles tropicales, La Réunion a été sévèrement marquée par les cyclones tropicaux. Son relief volcanique escarpé présente de profondes ravines et remparts qui témoignent de la virulence historique des crues et des érosions qui ont largement conditionné une topographie, une climatologie et une biodiversité extraordinaire. Une spécificité unique qui a été reconnue par l'UNESCO en 2009 au titre du patrimoine naturel mondial.

Si la spécificité de l'île de La Réunion est une richesse géologique, écologique et touristique, elle est aussi un facteur de vulnérabilité important du territoire.

La position géographique assez sud de l'île (20° en latitude) a un effet sensible sur l'intensité actuelle des cyclones qui atterrissent sur La Réunion ou sur l'île Maurice (Figure 1). En condition normale, la température de l'océan diminue en latitude et offre moins d'énergie disponible au cyclone. En 2010, la position de La Réunion présente des températures moyennes de l'océan sur la période Janvier à Mars autour de 27,5°C (Figure 1), soit 0,5°C supérieur au minimum de température pour la formation et le développement de cyclones tropicaux. On constate aussi que ces températures de surface de la mer sur la zone ouest de l'océan Indien sont globalement bien corrélées aux régions de forte intensification cyclonique dans la zone tropicale au nord de La Réunion et sur le canal du Mozambique (température entre 28 et 29 °C).

Cette situation de protection relative risque d'évoluer dans les prochaines décennies. Plusieurs facteurs alarmants semblent indiquer une sensibilité accrue de La Réunion au risque cyclonique dans le contexte du changement climatique. Très récemment, Solomon et al. (2014) ont mis en évidence l'élargissement de la ceinture tropicale. Une autre étude récente parue dans la revue Nature (Kossin et al., 2014) montre une tendance sur les dernières décennies à la migration en direction des pôles des maxima d'intensité cyclonique. La Réunion devrait donc être impactée par cette tendance.

Parallèlement, les dernières projections de température de mer issues des scénarios GIEC de Météo-France (CNRM-CM5) indiquent des augmentations importantes de la température de la mer sur l'ouest de l'océan Indien (Figure 2). Dans une projection optimiste issue d'une politique efficace de réduction des émissions de gaz à effet de serre, la température de la mer au voisinage de La Réunion et de l'île Maurice approche les 28°C dès la période 2020 et 28.5°C en 2060. Dans le scénario pessimiste de poursuite de l'augmentation exponentielle actuelle des concentrations de gaz à effet de serre, la température de la mer au voisinage de La Réunion et de l'île Maurice approche les 28°C en 2020, 28.5°C en 2040 et les 29°C en 2060. Notons aussi que dans les deux scénarios la température prévue de la mer sur le canal du Mozambique à proximité des côtes ouest de Madagascar dépasse en moyenne les 31°C.

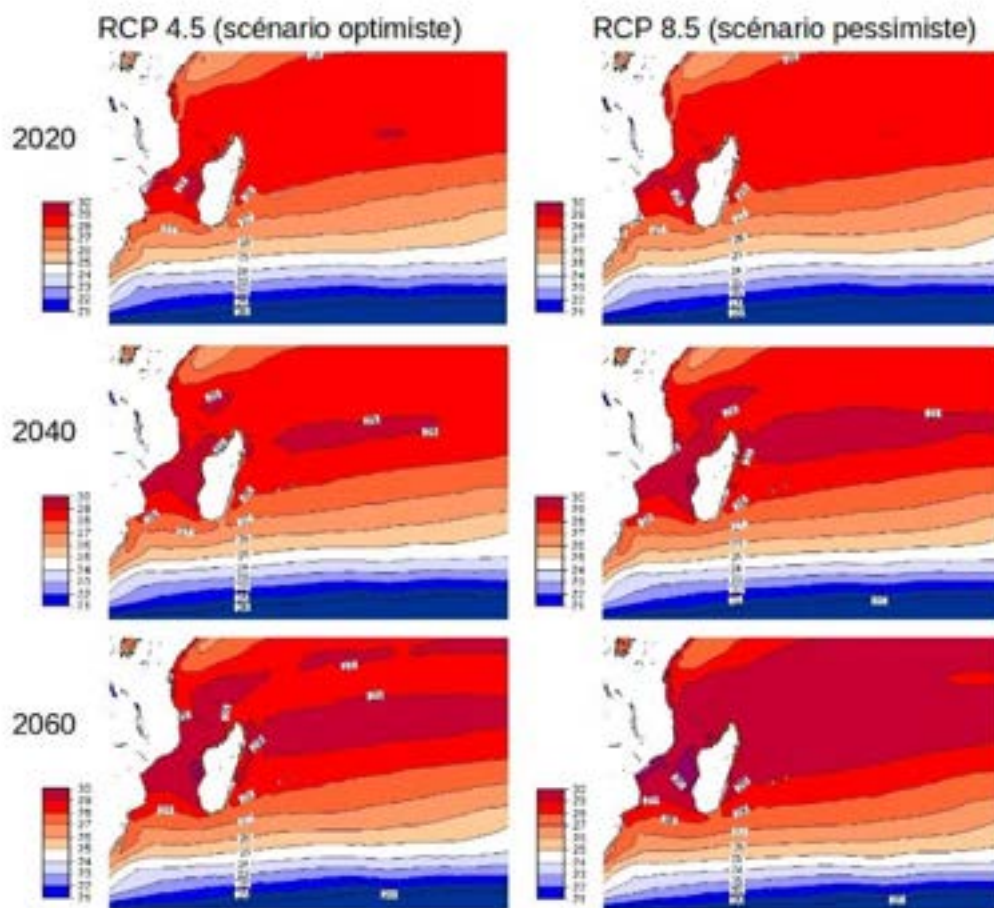


**Figure 1** : A gauche : illustration du cône d'incertitude autour de la prévision du cyclone Gael et de diminution de son intensité lors de sa migration vers le sud, jusqu'à 3 jours d'échéance. La taille du cône est proportionnelle à la dispersion de la prévision d'ensemble du CEPMMT. Produit opérationnel développés par le LACy et le CMRS (DIRRE Météo-France). A droite : température de surface de la mer sur la zone océan Indien sud-ouest lissée sur 20 ans centrée sur l'année 2010 pour les mois de janvier, février et mars.

Cette élévation de la température de la mer corrélée à un réservoir thermique océanique plus important devrait augmenter significativement l'énergie convective disponible pour les cyclones. Sans étude spécifique exploitant des modélisations couplées océan-atmosphère à haute résolution, il est complexe d'extrapoler précisément car la température de l'air augmente simultanément et le fonctionnement des flux océaniques dans des conditions élevées de température et de vent de surface est mal connu. L'intensification exceptionnelle du cyclone très intense Helen en 2014 sur le canal du Mozambique avec un centre dépressionnaire estimé passant de 985 hPa à 925 hPa en moins de 24h (record régional), comme les récents records de vents enregistrés pour le cyclone Olivia (408 km/h en rafale) et Haiyan (330 km/h sur une minute) interpelle clairement les considérations scientifiques actuelles. Au regard de l'ensemble de ces éléments, la communauté scientifique reste très prudente et a tendance à considérer que l'occurrence des cyclones devraient être proche de celle observée actuellement, mais que leur intensité devrait augmenter (volume 4 du rapport ONERC du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, 2014).

Une grande question actuelle est de pouvoir prévoir l'intensité des cyclones futurs sur l'ouest de l'océan Indien avec la meilleure fiabilité possible afin de traduire ses impacts sur les populations, les infrastructures, l'économie et l'écologie lors des atterrissages sur les zones sensibles. Une autre question vise la capacité des cyclones (principal moteur de recharge en eau) d'équilibrer le bilan hydrique annuel sur l'île de La Réunion et plus généralement de l'océan Indien dans un contexte d'évolution climatique plus favorable aux sécheresses. C'est l'un des enjeux principaux du présent programme qui vise à étudier les cyclones et leurs impacts sur La Réunion, sur Mayotte et l'île Maurice dans un environnement en évolution démographique et climatique.

**Figure 2 :** Evolution de la température de surface de la mer sur la zone océan Indien sud-ouest basée sur les projections climatiques du GIEC (modèle CM5). Valeurs lissées sur 20 ans autour des années indiquées à gauche et moyennées sur les mois de janvier, février et mars. Scénario RCP 4.5 : la courbe des émissions de gaz à effet de serre s'infléchit au cours du 21ème siècle et on a presque une stabilisation des concentrations en 2100. Scénario RCP 8.5 : la courbe des concentrations en gaz à effet de serre conserve au cours du 21ème



siècle la forme exponentielle qu'elle avait au 20ème siècle.

### La vulnérabilité du territoire

Ces trente dernières années, et sans avoir été frappé par des cyclones de catégorie élevée, les dégâts économiques enregistrés ont été importants au regard du PIB de l'île et en augmentation. Si on se réfère au registre des assurances, les coûts directs (infrastructures, habitations) des cyclones intenses comme Dina en 2002 ou Gamède en 2007 ont été évalués autour de 100 M€. Ces éléments sont à mettre en comparaison avec les 190 M€ de dégâts directs du cyclone Dean qui a frappé la Guadeloupe en 2007 lorsqu'il était en catégorie 3 et les 153 000 M\$ de coût global du cyclone Katrina de catégorie 5 qui a frappé le sud-est des USA en 2005. Les coûts indirects des cyclones sur la biodiversité, le tourisme, le trait de côte, l'activité économique sont plus complexes à mettre en évidence mais sont très probablement plusieurs fois supérieurs aux coûts directs (Changnon, 2003). En effet, aux coûts à court terme des dommages engendré par les cyclones, il faut ajouter les impacts à moyen terme sur l'ensemble de l'économie à travers les effets intersectoriels. Ces effets peuvent se révéler d'autant plus important pour un territoire comme La Réunion

qui est caractérisé par un fort Indice de Vulnérabilité Economique (IVE) du fait des caractéristiques structurelles intrinsèquement fragiles et vulnérables des petites économie insulaire comme l'éloignement, l'étroitesse du territoire, la part de l'agriculture, forte vulnérabilité aux chocs naturels (Guillaumont, 2009). Or, les institutions décisionnelles cherchent aujourd'hui à mieux prendre en compte ce risque à travers des politiques d'aménagement adaptées. L'évaluation monétaire des différents cyclones à venir aux vues de différentes politiques d'aménagement du territoire peuvent mettre en lumière l'ampleur des dommages évités et ainsi constituer un outil d'aide à la décision.

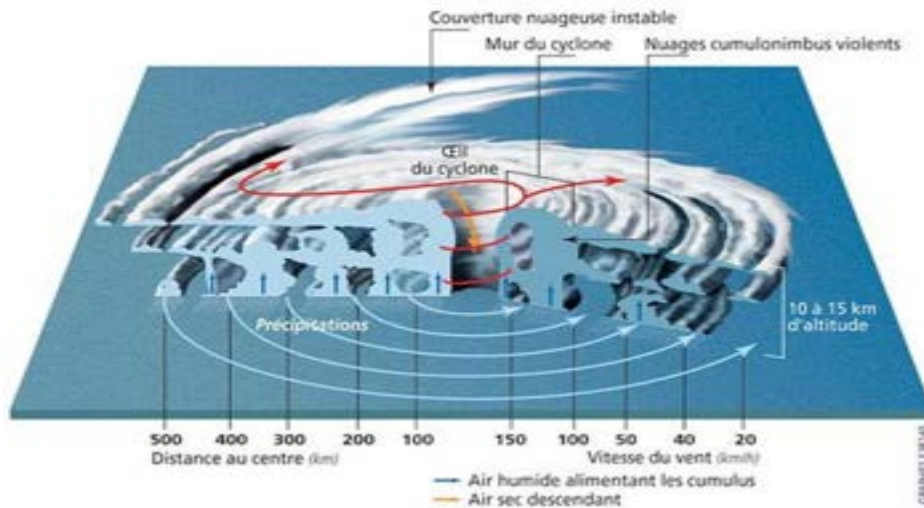
Ces différents éléments sont clairement identifiés dans plusieurs rapports et publications qui mettent en lumière les impacts cycloniques dans les départements d'outre-mer, comme le rapport de l'inspection générale de l'environnement en 2002 pour le cyclone Dina (<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/034000505/0000.pdf>), le rapport annuel 2011 de la cour des comptes sur la Gestion des Risques naturels dans les département d'outre mer ou dans les rapports issus du CMRS (Centre Météorologique Régional Spécialisé) géré par Météo-France pour l'ouest de l'océan Indien (rapport annuel « Saison Cyclonique »).

Sur La Réunion comme sur les îles présentant un relief accidenté, les impacts locaux des cyclones sont renforcés par les effets orographiques accentuant localement les vents (effet venturi) et en renforçant la convection et les précipitations associées. Les records mondiaux détenus par La Réunion en terme de précipitations relevées entre 12h et 15 jours témoignent du renforcement marqué de la convection cyclonique sur le territoire. La Réunion est donc un territoire particulièrement vulnérable, conséquence directe de son relief volcanique unique.

Les conséquences en chaîne des cyclones à l'échelle d'un territoire insulaire sont extrêmement variées et vont largement être conditionnées par leurs intensités et leurs positions par rapport aux côtes. Lorsque l'œil du cyclone frappe les côtes de La Réunion, les vents, la houle et la surcote sont particulièrement importants (cas de Dina ou Béjisa). Lorsque le cyclone est plus éloigné, l'île peut être sous l'influence des bandes précipitantes intenses ; les effets locaux étant caractérisés par des risques de crues et de glissement de terrain importants. Les pluies records (1740 mm sur 24 h, 2489 en 48h, 3930 en 72h et 4936 en 93 h) détenus par le cyclone tropical Gamède, dont le centre est passé à un peu moins de 230 km au nord nord-ouest des côtes de La Réunion, ont provoqué de nombreuses crues et glissements de terrain sur l'ensemble de l'île. La hauteur de la surcote et de la houle sont en lien étroit avec le centre dépressionnaire et la force des vents dans l'environnement du cyclone, donc en fort lien avec l'intensité et l'extension horizontale du phénomène.

Autour de ces phénomènes directs cycloniques, c'est l'association et la mise en résonance de certains processus locaux qui provoquent des dégâts impactant les systèmes économiques, les infrastructures et les populations. Citons en particulier, l'intensité et le renforcement local du vent et des pluies par le relief, la canalisation des précipitations dans les bassins versants, précurseur des crues, inondations, éboulements, et le déferlement des vagues provoquant la détérioration du littoral. L'interdépendance de ces phénomènes est évidente.





**Figure 3** : Schéma illustratif d'un cyclone tropical de l'hémisphère nord

## Stratégie

Avancer dans la compréhension et la mise en place d'outils innovants de prévision, de gestion de crise et d'analyse de vulnérabilité du territoire requiert une démarche intégrée et innovante regroupée autour d'un vaste consortium de compétences scientifiques et techniques.

Ce programme de recherche s'insère dans la stratégie régionale 2014-2020 (*Préparation des programmes européens 2014-2020 à La Réunion – Profil Environnemental*). Dans le contexte de changement climatique, l'aggravation du risque cyclonique à La Réunion est à prendre en compte. Pour mieux s'adapter aux effets du changement climatique en réduisant la vulnérabilité des populations et des territoires, il est indispensable de mieux comprendre le phénomène cyclone et ses aléas associés afin de mieux prévoir et anticiper les risques qui y sont liés (*Objectif n°5 – Promouvoir l'adaptation au changement climatique et la prévention des risques*).

Ce programme s'insère dans le cadre de la fiche CPER 2015-2020 ReNovRisk (Recherche Innovantes sur les risques Naturels).

Ce programme répond aux recommandations émises par le groupe de travail II du GIEC « Incidences, adaptations et vulnérabilités, résumé à l'intention des décideurs » (édition 2014) pour les pays sous la menace du risque cyclonique, lequel préconise :

- la réduction de la vulnérabilité des infrastructures et services essentiels (eau, énergie, gestion des déchets, aliments, biomasse, mobilité, écosystèmes locaux, télécommunications, etc).
- la construction de systèmes de surveillance et d'alerte précoce, mesures d'identification des zones exposées, aide aux régions et ménages vulnérables et diversification des moyens de subsistance.

## 2 – Les verrous actuels et le contexte pour la gestion intégrée des risques à La Réunion



## La prévision de l'intensité et des précipitations cycloniques

L'enjeu face à la menace cyclonique est de prévoir à la fois la trajectoire, l'intensité et les principales conséquences associées au passage d'un cyclone sur ou à proximité des terres (vent violent, pluies torrentielles, houle, marée de tempête ; Figure 1). La difficulté de la prévision de ces différents éléments réside dans la multitude des processus physiques impliqués, mais aussi dans la variété d'échelles en jeu. Actuellement, les erreurs de prévision des cyclones sont principalement dues (i) au faible nombre d'observations disponibles sur les océans tropicaux, (ii) à la limitation des modèles numériques (résolution, paramétrisations physiques), et (iii) au manque de compréhension des processus physiques en jeu et de leurs interactions.

La prévision d'intensité et de structure des cyclones est une tâche difficile, en partie tributaire de notre capacité à représenter correctement le système à l'instant initial (analyse) dans le modèle numérique. A cause de la faible densité d'observations conventionnelles au-dessus des océans, et de la difficulté d'assimiler des observations satellitaires en conditions pluvieuses jusqu'à récemment, le système est généralement mal localisé et a une intensité trop faible dans les analyses; la partie la plus active (œil, mur) est parfois absente, entraînant des erreurs notables de prévision de trajectoire, de structure et *a fortiori* d'intensité. Un palliatif actuel est l'ajout d'observations artificielles (« bogus ») dans l'analyse, déduites de profils empiriques de vent adaptés à la structure du cyclone considéré. Or l'estimation par observation satellitaire de ces paramètres de structure (pression centrale, vent maximal, extension) est très imprécise. Il a été démontré que la structure initiale du cyclone jouerait un rôle crucial dans la formation du mur de l'œil principal d'une tempête en phase d'intensification, et donc dans la prévision d'intensité associée. Une spécification affinée de la structure initiale du vortex permettrait aussi de mieux appréhender l'évolution du cyclone au sein de son environnement, notamment l'effet beta, et donc l'évolution de sa trajectoire. Ceci fait ressortir un besoin majeur pour la prévision cyclonique : assimiler des observations contraignant la position, la structure et l'intensité du système dépressionnaire à l'instant initial (radiances satellitaires, données radar) et s'affranchir des méthodes de bogus qui s'avèrent clairement insuffisantes pour contraindre la structure et les bandes précipitantes des cyclones.

Jusqu'à récemment, les études numériques sur les cyclones tropicaux ont surtout porté sur leur structure dynamique et sur les impacts des facteurs de grande échelle. Ceci a eu pour conséquence d'améliorer la prévision de la trajectoire des cyclones et donc de leur arrivée potentielle sur les îles et continents. Cependant, la prévision de leur intensité, et des aléas associés, qui nécessite des modèles à haute résolution spatiale et temporelle, n'a pas connu une telle évolution et reste un enjeu scientifique majeur pour la communauté internationale.

Des facteurs à différentes échelles peuvent influencer l'intensité des cyclones tropicaux. La chaleur contenue dans les couches supérieures de l'océan constitue la principale source d'énergie des cyclones tropicaux matures. En conséquence, l'évolution de leur intensité est contrainte par le contenu thermique superficiel de l'océan qui évolue fortement au cours du passage d'un cyclone. De manière générale, des courants intenses se forment dans la couche de mélange océanique et la température de surface diminue fortement. Cette modification rapide du contenu thermique de l'océan peut engendrer d'importantes modifications de l'intensité du cyclone en le privant de l'énergie nécessaire à son maintien. La réponse océanique dépendant principalement des caractéristiques du forçage atmosphérique (vitesse maximale des vents, vitesse de déplacement, structure du champ de vent...) et des caractéristiques de l'océan (stratification, contenu thermique, courants...), l'utilisation de modèles couplés océan-atmosphère est nécessaire pour mieux apprécier le contrôle et la réponse de ces deux milieux à l'activité cyclonique.

D'autre part, les processus de moyenne échelle et à l'échelle du nuage jouent un rôle primordial à la fois sur la dynamique du système et sur la génération des précipitations. Parmi les facteurs internes ayant un impact potentiel sur les variations d'intensité des cyclones, le rôle fondamental de la microphysique nuageuse a été récemment mis en évidence. En contrôlant la distribution de la chaleur latente, la structure microphysique conditionne la dynamique du système, et par rétroaction sa structure et son comportement à grande échelle.

## **La houle cyclonique et australe**

Localisée en zone tropicale, l'île de La Réunion est soumise aux aléas liés à l'activité de la houle, qu'elle soit régionale et induite par les alizés ou plus lointaine d'origine australe ou encore cyclonique. A la Réunion, la houle cyclonique touche le plus souvent les côtes nord et est de l'île, de la pointe des Galets à la pointe de la Table et survient pendant l'été austral. A l'inverse des houles cycloniques, les houles australes frappent le plus souvent les côtes sud et ouest de l'île durant l'hiver austral.

Le suivi continu de la houle et la reconstitution des épisodes de vagues extrêmes est essentielle, car les fortes houles sont des phénomènes pouvant avoir d'importantes répercussions sociales, pour l'ingénierie côtière (destruction de routes, constructions d'ouvrages d'art côtiers), l'érosion de la côte, la submersion côtière, la ressource en énergie renouvelable et le comportement de l'interface eau douce - eau salée dans les aquifères côtiers. De fortes houles ont par exemple frappé La Réunion et les îles voisines en mai 2007 et plus récemment en Août 2011, causant des destructions de routes, de bâtiments, de structures portuaires et des récifs coralliens, générant une forte érosion des plages, et faisant plusieurs blessés.

A travers ce projet, nous proposons donc de quantifier l'activité de la houle et ses impacts environnementaux, en particulier l'érosion et la submersion côtière. Ceci passe tout d'abord par l'amélioration des modèles numériques de houle et donc en grande partie par la prise en compte des couplages océan-atmosphères dans les modèles cycloniques, et ensuite par les observations directes ou indirectes de la houle pour en tirer ses caractéristiques (amplitude, période, direction) dans les différents sites choisis et à différentes échelles (bassin, île, commune, plage). Nous proposons ainsi de combiner des observations en mer (capteurs de pression, courantomètres, houlographe), à terre (radar, stations sismologiques) et spatiales (imagerie radar) qui représentent des expertises existant à La Réunion et que nous proposons de fédérer dans ce projet et qui permettront de valider les modèles numériques.

## **La submersion marine et l'impact sur le trait de côte**

Du fait de leur forte attractivité et de la croissance démographique et économique qui s'y développe, les zones littorales font partie des zones les plus exposées aux risques.

D'un point de vue physique et géomorphologique, la bande littorale connaît une place bien particulière au regard de l'exposition aux événements extrêmes cycloniques et aux changements climatiques annoncés pour le siècle à venir. D'une part les zones côtières sont en effet directement exposées aux forçages marins qui peuvent prendre des formes très énergétiques, d'autre part les modifications à attendre sur le milieu marin, et en premier lieu l'élévation du niveau moyen des mers, vont probablement modifier en grande partie les équilibres géomorphologiques actuels et fortement augmenter à l'avenir l'exposition de ces zones littorales aux événements cycloniques extrêmes.

Le cyclone Gamède à La Réunion et la tempête Xynthia en métropole sont venus rappeler la vulnérabilité du littoral national face aux épisodes extrêmes météo-marins, en particulier lorsque les enjeux sont implantés dans des zones « basses » et proches de la mer. A la suite de ces événements, la politique de prévention des risques côtiers engagée par l'Etat a été renforcée avec la volonté d'approuver 303 Plans de Prévention des Risques Naturels Littoraux (déclaration du Président de la République à la Roche-sur-Yon en mars 2010). A la Réunion, le processus d'élaboration des PPRL est actuellement en cours d'avancement sur

les communes littorales. Ces études vont prochainement apporter des informations nouvelles et contraindre l'urbanisme des zones littorales afin de diminuer l'exposition des enjeux aux deux aléas littoraux que sont la submersion marine et le recul du trait de côte. La méthodologie nationale, élaborée dans le cadre d'un large comité scientifique et de sous l'égide de la DGPR, ambitionne de tenir compte des aléas littoraux dans leur configuration actuelle, mais également au travers du prisme des changements climatiques qui vont modifier dans le futur l'intensité des événements.

Les rapports du GIEC et plus récemment les programmes CECILE et ACCLIMATE permettent aujourd'hui d'appréhender les ordres de grandeurs et les incertitudes liées aux prédictions d'élévation du niveau marin : le dernier rapport du GIEC (Assessment report n°5 à paraître en 2013) avance une élévation comprise entre 0.5 et 1m pour 2100.

Ces ordres de grandeurs relativement importants nous incitent à penser que les bouleversements géomorphologiques que ces paramètres vont entraîner sur les zones côtières, ainsi que leurs conséquences sur les problématiques d'aménagement du territoire. Pour autant, il n'existe aujourd'hui que peu d'éléments permettant de traduire ces informations en termes d'impact sur l'érosion côtière et le recul du trait de côte. Pendant les 50 dernières années, la loi de Bruun (1962) a constitué la principale méthode d'analyse. Aujourd'hui, cependant, l'ensemble de la communauté scientifique s'accorde à dire qu'elle ne peut être utilisée que pour l'obtention d'un premier ordre de grandeur, lorsque les évolutions des stocks sédimentaires et les vitesses de recul ne sont pas trop fortes, ce qui restreint très fortement son champ d'application (Rollason, 2010). Si des études sur les interactions entre mobilité du trait de côte et récif frangeant ont été menées dans certaines régions, par exemple à Hawaï, (Storlazzi et al, 2011) ou en polynésie française (Yates et al 2013), ce type d'approche n'a jamais été envisagé dans l'Océan indien.

Face à cette carence et à ce besoin identifié de faire avancer notre compréhension des processus, la bonne démarche consiste à mettre en place ou à renforcer les réseaux d'observation existants, et à les dimensionner de sorte qu'ils puissent servir à avancer sur ces questions. Un premier axe de travail du projet consistera à évaluer les bilans sédimentaires et la quantification des flux sédimentaires associés aux différents processus régissant les équilibres actuels : les apports de matériaux dans les estuaires, la reprise de ces matériaux tantôt sous l'action des houles cycloniques, tantôt sous l'action des houles australes. Ces travaux devront s'inscrire dans la continuité des études déjà existantes sur les dynamiques, mais apporteront pour la première fois une mesure directe des volumes en jeu grâce au développement et à la densification des réseaux d'observation, à l'investissement dans des équipements modernes (drone hyperspectral, sondeur multifaisceaux), à la mutualisation et la coordination des réseaux existants (OBSCOT, SOERE nouvellement SNO, réseaux de suivi de l'université), ainsi que par l'exploitation des nouvelles données disponibles au travers de la station SEAS-OI.

A la Réunion, comme dans un grand nombre d'îles de l'océan indien, on peut constater une forte concentration d'enjeux sur les littoraux protégés par des récifs coralliens. Quelles qu'en soient les raisons initiales, l'occupation de ces territoires par l'homme a été rendue possible à un moment grâce aux différentes fonctions et services éco-systémiques proposés par la barrière récifale. Milieu vivant et dynamique, la barrière récifale a façonné géomorphologiquement les littoraux en produisant le sable coralligène constitutif des cordons littoraux et en protégeant ces derniers de l'action des forçages maritimes : houles, courants, marées...

Cette fonction de protection du littoral est intuitivement compréhensible mais a rarement fait l'objet d'une quantification précise à la Réunion: quel est le rôle exact des barrières récifales dans cette fonctionnalité globale de protection du littoral ? Par ailleurs, la vitalité des milieux coralliens étant fortement liée aux

activités anthropiques et aux bouleversements climatiques qui s'opèrent, avec la montée du niveau marin et les modifications des forçages de houle, si on considère les barrières récifales comme des objets de protection physique du littoral face aux aléas marins, on peut comprendre que la réponse morphologique de ces récifs face à ces pressions sera déterminante pour comprendre dans quelle mesure ce service de protection risque d'évoluer dans les décades à venir.

Sur l'île de la Réunion, les précipitations intenses des principaux épisodes cycloniques sont à l'origine d'aléa hydrologiques et de mouvements de terrain de toutes tailles. Sur Salazie, Belle P. et al. (2013) montrent le déplacement continu du plateau de Grand Ilet et son accélération brutale au-delà d'un certain seuil pluviométrique. Pour l'aléa hydrologique, affectant les ravines pérennes ou temporaires du massif volcanique, la genèse des crues est directement dépendante de l'intensité et de la durée des averses dont La Réunion détient plusieurs records mondiaux. Ces pluies intenses associées à des régimes torrentiels d'écoulement peuvent engendrer des crues éclairées particulièrement redoutables pour lesquelles, les tentatives d'endiguement ont montré leur limites au regard de la gestion du risque (Lorion 2006). Enfin crues et mouvements de terrain peuvent se combiner et générer des coulées boueuses ou lahars résultant de ruptures d'embâcles issus de glissements de terrain ayant obstrué provisoirement le lit du cours d'eau. Dans un espace insulaire restreint, les risques induits par ces aléas sont clairement exacerbés par l'intensification de l'urbanisation et la modification de l'occupation du sol. L'augmentation des surfaces imperméabilisées induit ainsi une intensification des fréquences d'apparition des crues et de leurs intensités au même titre que l'intensification des phénomènes d'érosion des sols.

Pour l'analyse et la prise en compte de ces aléas, le contexte réunionnais s'inscrit dans un domaine extrême au regard des principaux facteurs contributifs des phénomènes étudiés. L'extrapolation des fonctions de transfert expérimentées sous d'autres latitudes et d'autres milieux n'est pas triviale dans un tel environnement extrême. De fait, les principaux enjeux techniques et scientifiques permettant d'améliorer nos moyens de gestion de ces risques nécessitent un retour vers l'analyse phénoménologique des processus dans le contexte géologique, géographique et climatique de la Réunion. Cette approche passe nécessairement par une instrumentation adaptée du milieu naturel et par l'acquisition de données physiques visant à requalifier le paramétrage des modèles numériques de simulation.

### **Le risque inondation à La Réunion** (source DDRM)

Qu'ils soient d'origine cyclonique, orageuse ou autre, les épisodes de fortes pluies peuvent prendre à la Réunion une ampleur tout à fait exceptionnelle, essentiellement en raison des effets liés à l'important relief de l'île.

Si la plupart de ces épisodes sont associés au passage sur l'île, ou à proximité de celle-ci, de dépressions ou cyclones tropicaux, des lames d'eau très importantes peuvent être provoquées également par le passage ou le blocage sur l'île de systèmes beaucoup moins organisés et d'échelle inférieure (amas orageux, lignes de convergence,...). A l'échelle la plus petite, un simple orage pourra, durant quelques heures et sur quelques dizaines de kilomètres carrés, provoquer des précipitations très intenses susceptibles d'occasionner localement des perturbations significatives (cas des crues « éclair » sur des bassins de baignade de l'Est de La Réunion).

A l'évidence, la durée des précipitations aura, au même titre que leur intensité, une influence directe sur les conséquences observées sur le terrain. Si les crues sont le résultat classique de toutes fortes pluies, les inondations de grande ampleur supposent généralement des épisodes pluvieux intenses et durables.

On distingue différents types d'inondations à la Réunion :

- Le débordement direct d'un cours d'eau par submersion de berges ou par contournement d'un système d'endiguements limités. Il concerne surtout les ravines non encaissées sur les flancs du volcan et les plaines côtières.
- Le débordement indirect d'un cours d'eau par remontée de l'eau dans les réseaux d'assainissement ou d'eaux pluviales, par remontée de nappes alluviales (ex : La Saline), par la rupture d'un système d'endiguement ou d'autres ouvrages de protection.
- La stagnation d'eaux pluviales liée à une capacité insuffisante d'infiltration, d'évacuation des sols ou du réseau d'eaux pluviales, lors de pluies anormales.
- Le ruissellement pluvial notamment en secteur urbain (ex. : *Saint-Benoît*) : des orages intenses (*plusieurs dizaines de mm de pluie par heure*) peuvent occasionner un très fort ruissellement qui va saturer les capacités du réseau d'évacuation des eaux pluviales et conduire à des inondations concernant tout ou partie d'une agglomération et pouvant être localisées aux points bas des villes.
- La submersion de zones littorales ou lacustres (ex. : *Saint-Paul, Sainte-Suzanne*) du fait de la présence de facteurs anormaux liés à l'océan (*fortes houles, marées de tempête, tsunami*). Outre l'action propre de l'océan, ces phénomènes peuvent provoquer le débordement des cours d'eau qui débouchent à l'océan.

La submersion de zones littorales ou lacustres (ex. : *Saint-Paul, Sainte-Suzanne*) du fait de la présence de facteurs anormaux liés à l'océan (*fortes houles, marées de tempête, tsunami*). Outre l'action propre de l'océan, ces phénomènes peuvent provoquer le débordement des cours d'eau qui débouchent à l'océan.

Plusieurs expériences d'études hydrologiques ont été menées par l'IRSTEA à La Réunion dans le cadre du TR ARCEAU « Aléas et risques liés au cycle de l'eau ». On citera par exemple :

- l'application de scénarios de changements climatiques et la quantification de leurs impacts sur les débits par modélisation hydrologique, dans le cadre du projet Explore2070 (pilotage MEDDE) (Irstea Antony – Lyon – Aix) ;
- l'application de la méthode SHYREG pour la prédétermination des pluies et des crues, avec distinction entre saisons cycloniques et non cycloniques (Irstea Aix) ;
- le projet PREMHYCE de comparaison de modèles de prévision des étiages, avec deux bassins test à la Réunion (pilotage ONEMA) (Irstea Antony) ;
- l'analyse de seuils d'étiage sur des bassins versants présentant des enjeux d'alimentation en eau (pilotage DEAL Réunion et OiEau Réunion) (Irstea Antony).

#### *Exemples marquants d'inondation*

Mars 2006 – La tempête tropicale Diwa entraîne de fortes précipitations, la crue de la rivière des Pluies détruit alors plusieurs habitations.

Janvier 1980 – Lors du passage de Hyacinthe, partout sur l'île les inondations sont conséquentes

### **Les phénomènes gravitaires et érosifs à l'échelle des bassins versants**

Le cirque de Salazie et la partie aval de son bassin versant sont exposés tout au long de l'année à différents risques naturels : glissement de terrain de grande ampleur affectant des secteurs habités, chute de blocs sur les itinéraires routiers, phénomènes d'érosion de berges, effondrement catastrophique de rempart... Cette exposition est, par ailleurs exacerbée en saison cyclonique. Au-delà des infrastructures régulièrement affectées par ces phénomènes, les enjeux humains sont significatifs dans la mesure où plus de 8000 habitants vivent dans ce cirque. Plus précisément, près d'un millier de

personnes vivent sur des secteurs qui glissent continuellement.

La plupart des phénomènes gravitaires et érosifs interagissent entre eux et doivent être étudiés au sein d'une démarche intégrée visant à réduire les incertitudes sur la quantification unitaire de chacun des phénomènes. Au-delà du cirque de Salazie, le bassin versant de la Rivière des Pluies est un observatoire de l'ÉROsion à la RéUNion (site ERORUN – SOERE Bassins Versants) qui permet de suivre les phénomènes d'érosion et de transport solide. L'analyse comparative de l'un et l'autre bassin versant permettra de renforcer les hypothèses qui pourront être formulées. Pour mémoire, la quantification temporelle et spatiale de la charge solide d'un cours d'eau est un réel verrou scientifique qui, actuellement, réduit les perspectives de qualification des risques dans les parties aval des bassins versants. Plus concrètement, la charge solide transportée par une rivière en crue lors d'un événement pluvieux intense peut modifier significativement la dynamique d'un cours d'eau (eg : débordement de la Ravine Patate à Durand lors de Clotilda en 1987 et de Cécilia en 1993).

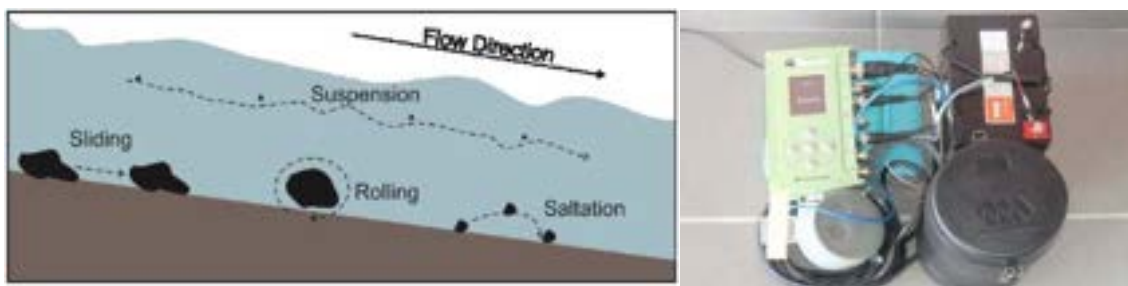
### Le risque « mouvement de terrain » à la Réunion (source DDRM)

Les facteurs de prédisposition naturelle aux mouvements de terrain sont de trois types :

- un relief accidenté et chahuté,
- une diversité géologique,
- un contexte climatique d'exception.

A la Réunion, les mouvements de terrain se produisent essentiellement au niveau des escarpements (*remparts, falaises, abrupts, berges,...*), à l'intérieur des cirques et des ravines et, dans une moindre proportion, sur les planèzes (*plateaux de basalte limités par des vallées convergentes; typique des régions volcaniques, ils forment les pentes de l'île autour des cirques*). Les mouvements de terrain se manifestent le plus souvent par le biais de chutes de pierres, blocs et éboulements dans les falaises et les remparts, de glissements, d'érosions de berges, de coulées de boue et laves torrentielles, d'effondrements de tunnels de lave et enfin d'érosion des sols.

La Réunion est également marquée par la présence de mouvements de terrain de grande ampleur habités, tels que ceux observés et suivis depuis 2004 situés dans le cirque de Salazie. Il a récemment été démontré que la circulation des eaux souterraines contrôlait la dynamique des mouvements de terrain de grande ampleur. En conséquence, les phases d'accélération de déplacement étaient postérieures aux événements pluvieux intenses et pouvaient perdurer pendant plusieurs mois, en relation avec le tarissement des aquifères de ces glissements de terrain. L'exposition aux risques naturels a pu être précisée dans différents secteurs du cirque de Salazie, en distinguant les enjeux humains et les enjeux de type infrastructures.



**Figure 4** : A gauche : différents modes de transport de la matière solide à l'intérieur d'un cours d'eau (Burtin, 2009): translation, roulement et saltation. A droite : exemple de sismomètre de type large bande (dont est équipé le LGSR) pouvant réaliser un suivi de la charge de fond.

## Les incertitudes sur le maintien fonctionnel de la barrière récifale

Dans la perspective de l'élévation du niveau de la mer et de l'exacerbation des cyclones, l'évaluation des capacités de maintien et/ou de croissance de la barrière récifale est fondamentale pour prévoir l'évolution de sa fonction de protection vis-à-vis des zones littorales.

Depuis les années 70, le bilan des carbonates en milieu récifal, ou calcification (somme des processus antagonistes que sont la précipitation et la dissolution du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ ), est calculé sur la base de mesures chimiques dans l'eau au contact des communautés biologiques. L'estimation des quantités de  $\text{CaCO}_3$  déposées par les organismes bio-constructeurs varie d'un ordre de grandeur selon les récifs ou les habitats étudiés (de 22 à 331  $\text{mmol CaCO}_3 \text{ m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ ), reflétant principalement des différences dans la structure des communautés benthiques.

Un certain nombre d'études ont aussi récemment révélé une relation entre la calcification des communautés et les conditions environnementales, en particulier une influence du taux de saturation en aragonite ( $\Omega_{\text{Arag}}$ ), dont la valeur décroît lorsque l'état d'acidification du milieu augmente en réponse aux émissions de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère. De même, on sait que la calcification corallienne décline rapidement au-delà d'un certain optimum de température, qui correspond au pic estival normal, ou lui est légèrement inférieur, tandis que les anomalies positives de température induites par les émissions de gaz à effet de serre provoquent dans certains cas des pertes de recouvrement corallien considérables, comme par exemple lors de l'épisode ENSO 1997-1998 dans l'Océan Indien.

Ainsi, certains modèles prévoient d'ores et déjà que les récifs coralliens au niveau mondial pourraient présenter d'ici la fin du siècle une dissolution nette de carbonates. Cependant, l'influence de la température et de l'acidification sur la calcification a été principalement abordée à l'échelle de l'organisme, et pour l'essentiel en milieu contrôlé. Le travail *in situ* est nécessaire pour valider les observations issues des travaux de laboratoire et prendre en compte les spécificités locales. Bien que la plupart des études aient montré une diminution des taux de calcification avec la diminution de  $\Omega_{\text{Arag}}$ , la pente et l'ordonnée à l'origine des relations linéaires observées diffèrent radicalement selon les sites étudiés. Les facteurs de stress locaux pourraient aussi rendre les récifs coralliens beaucoup plus vulnérables au changement climatique. Par exemple, l'hypersédimentation et les apports terrigènes de nitrates diminuent le seuil de température au dessus duquel se produit le blanchissement corallien. De manière générale, l'affaiblissement de l'état de santé des écosystèmes dans leur ensemble constitue un facteur d'accentuation à la fois des risques et de leurs conséquences. L'impact du changement global sur la capacité de maintien et/ou de croissance de la barrière récifale est donc toujours difficile à modéliser au regard des différents scénarios envisagés pour le XXI<sup>ème</sup> siècle.

## L'analyse économique du risque

Les cyclones tropicaux provoquent des répercussions majeures sur les conditions de vie, les performances économiques et les biens et services environnementaux de la Région. Les effets négatifs se font aussi bien sentir à court terme qu'à long terme. Ils peuvent avoir des conséquences irréversibles sur la structure économique et sur l'environnement, et les coûts engendrés par ces conséquences sont considérables. L'exemple récent de Bejisa en janvier 2014, donne un aperçu significatif avec une perte dans la filière horticole de 100% de la production et de 80% pour les arbres fruitiers qui représentent une perte directe pour les seuls agriculteurs réunionnais, d'une valeur de 62 millions d'euros soit près de 18% de la production agricole totale de l'exercice 2013, auquel il faut encore ajouter les effets sectoriels.



La réduction de ces effets négatifs suppose une meilleure prévision des événements cycloniques et des politiques d'aménagement adaptées aux risques des territoires. Dans la perspective d'apporter des éclairages aux instances décisionnelles, il est nécessaire de mener des analyses coûts/bénéfices des différents schémas d'aménagement du territoire. Pour cela, nous devons quantifier en termes monétaire les bénéfices (les dommages évités) liés aux différentes mesures de protection et d'aménagement qui seront mises en œuvre. Cela nécessite de comparer le coût des dommages de différents scénarios cycloniques en l'état actuel et les coûts des dommages de ces mêmes scénarios avec l'instauration de différentes mesures de protection.

Pour ce faire, grâce à une approche géomatique, nous devons tout d'abord procéder à une évaluation de la valeur économique de chaque parcelle de la zone impactée par le cyclone. Or, l'attribution d'une valeur monétaire aux composantes environnementales est fondamentale mais complexe. Des méthodes d'évaluation directe au prix du marché seront mobilisées mais également des méthodes reposant sur le consentement à payer des individus qui nécessitent une collecte importante de données.

Or si certains impacts sont directement quantifiables monétairement, d'autres aspects comme les services de protection du littoral rendus par le récif corallien par exemple, sont plus difficilement monétisables. Des efforts d'évaluation tout particuliers devront donc être menés sur ces points.

De plus, il est important de montrer que les événements cycloniques auront également un effet indirect sur les performances économiques de la région (emploi, tourisme). L'objectif est de mettre en œuvre une évaluation quantitative précise de tous les effets et de leurs impacts croisés sur l'ensemble des secteurs de l'économie réunionnaise. Sur le plan méthodologique, il faudra recourir à des modèles macroéconomiques appliqués à la problématique cyclonique à La Réunion. Cela nécessite un travail conséquent de développement de nos modèles existants.

### **3 – Les nouveaux moyens disponibles**

Pour faire face à ces nouveaux défis sociétaux La Réunion possède de solides atouts. Depuis une vingtaine d'années, plusieurs laboratoires de recherches, établissement scientifique et technique et bureau d'études se sont développés à La Réunion en intégrant la problématique du risque naturel. Ces structures ont par ailleurs, développé des collaborations étroites avec des partenaires scientifiques et opérationnels de métropole comme l'IRSTEA, Météo-France, l'IPGP, le BRGM.

Des nouvelles plate-forme d'observation et de recherche scientifique financées par La Région Réunion, l'Europe et l'état dans le cadre des programmes FEDER et CPER 2007-2013 tels que l'observatoire du Maïdo, la station SEAS-OI et le radar polarimétrique de Piton Villers. Chacune de ces infra-structures d'un coût d'une dizaine de millions d'euros trouve une valorisation importante dans le programme.

Ces nouvelles plate-formes d'observation viennent s'ajouter aux stations d'observation de l'OSU-R et de Météo-France incluant deux radars météorologiques et le réseau de pluviomètres le plus dense de France, la station d'observation côtière ou encore la station d'observation du bassin versant de la rivière des pluies ERORUN ou encore l'observatoire OBSCOT.

Les différents partenaires du projet ont noués des partenariats solides de collaboration avec des établissements scientifiques de métropole autour de quatre SOERE ; ORAURE et ROSEA sur les aérosols et l'eau atmosphérique (OPAR, observatoire du Maïdo) , Bassin Versant (station ERORUN de la rivière des pluies) et trait de côte (région lagon).

L'accès très largement ouvert au LACy et à la DIRRE sur le mesocentre Clément Ader de Toulouse pour la modélisation numérique disposant d'un supercalculateur BULL d'une puissance crête de 2.8 Pétaflops ( $10^{15}$  opérations par seconde, classé dans les tous premiers supercalculateurs mondiaux). Ce nouveau calculateur va permettre de mettre au point pour La Réunion et l'ouest de l'océan Indien une nouvelle génération de modèle couplés océan-atmosphère à très haute résolution.

Parallèlement, depuis 2003, le BRGM dispose de moyens de calcul mutualisés. Le serveur de calcul du BRGM est composé de 64 cœurs des noeuds graphiques d'une puissance crête de 13 Teraflops ( $10^{12}$  opérations par seconde) et 2.3 To de mémoire disponibles. Ce serveur sera mis à disposition du projet et permettra notamment d'exploiter les modèles numériques de submersion marine qui sont extrêmement consommateurs en temps de calcul.

Pour les aspects observationnels de la houle côtière, les équipes proposent de mettre en place des réseaux d'observations innovants combinant en mer des bouées houlographiques et des capteurs de fond de mer, à terre des observations sismologiques et radar et depuis l'espace des observations satellites radar, le tout venant compléter et valider les modélisations numériques.

Pour quantifier les impacts terrestres d'un cyclone, les équipes réunies sur cette problématique visent quatre types d'action: (i) L'instrumentation des eaux de surfaces et de subsurfaces par capteurs immergés pour le jaugeage différentiel des composantes de l'écoulement entre l'amont et l'aval (LGSR/BRGM). (ii) L'instrumentation des sites de transferts d'eau et de sédiments par capteurs d'images et suivi vidéo. (LGSR-UBO). (iii) L'instrumentation sismologique pour la quantification de la charge solide des rivières et le suivi des glissements de terrain. (iv) La simulation numérique multi-échelle (IRSTEA-LGSR-BRGM).

## **Le consortium**

**L'OSU-Réunion** a pour vocation de jouer le rôle de Fédération de recherche entre ses différents laboratoires, équipes et stations d'observation. Il inclut donc, à ce titre, l'une des trois fédérations de recherche de l'Université de la Réunion qui est la Fédération OMNCG (Observatoire des Milieux Naturels et des Changements Globaux).

Sa deuxième mission est d'assurer le fonctionnement des stations d'observations. Il assure notamment le fonctionnement de l'OPAR à travers l'UMS 3365 qui intègre l'observatoire du Maïdo, et il participe au fonctionnement des stations forestières tropicales, marine récifale, et du bassin versant de La Rivière des Pluies.

Sa troisième mission est de servir de support aux services d'observation labellisés par l'INSU comme le Service d'Observation NDACC à l'OPAR et plus récemment aux SOERE «Systèmes d'Observation et d'Expérimentation, sur le long terme, pour la Recherche en Environnement». Il s'agit des SOERE ROSEA, «Réseau de Stations d'Observations Atmosphériques», des SOERE «Bassin versants» et "Trait de côte" et plus particulièrement de leur composante réunionnaise (ERORUN pour l'hydrologie), et enfin du SOERE ORAURE sur l'étude des aérosols atmosphériques. L'OSUR regroupe les laboratoires LACy, LGSR, l'UMR Esp. Dev, ENTROPIE, PVBMT, LE2P, LIM et PIMENT.

Le **LACy** (Laboratoire de l'Atmosphère et des cyclones, UMR 8105) est unité de recherche tri-partite Université de La Réunion, CNRS et Météo-France. Elle se décompose en trois équipes; l'équipe « stratosphère » qui travaille sur la physico-chimie et les tendances de l'ozone, de la vapeur d'eau et des aérosols stratosphériques, l'équipe « troposphère » qui développe des thématiques autour des échanges troposphère-stratosphère, des transports de polluants sur l'Océan Indien et l'étude des panaches

volcaniques, et l'équipe « cyclones » qui étudie l'intensité, la trajectoire et les précipitations associés aux cyclones et à la convection tropicale. Il est à ce titre le seul laboratoire scientifique Européen spécialisé sur l'étude des cyclones tropicaux.

Le LACy est membre de l'OSU-R (Observatoire des Sciences de l'Univers de La Réunion). Ces deux structures sont mandatés par l'Université de La Réunion et le CNRS pour soutenir et développer l'observation et la valorisation scientifique des observations l'OPAR (Observatoire de Physique de l'Atmosphère de la Réunion) qui regroupe l'observatoire du Maïdo et les stations d'observations de Gillot et du Moufia. l'OPAR est pleinement intégré dans les plus importants réseaux d'observations atmosphériques mondiaux tels que le NDACC, GAW, SHADOZ, AERONET, ICOS et intégré comme l'un des trois super-sites d'observation atmosphérique Français dans le programme H2020 ACTRIS.

La deuxième mission importante est l'étude et le développement des outils numériques de prévision qui peuvent ensuite être exploités en opérationnel par Météo-France sur La Réunion et Mayotte et le CMRS sur l'Océan Indien. Le LACy a porté le développement du modèle ALADIN-Réunion exploité opérationnellement par Météo-France pour la prévision du temps et développe actuellement l'adaptation locale de son successeur AROME avec une mise en service prévue par Météo-France à l'horizon 2017. Le LACy joue le rôle de levier scientifique dans les outils de prévision atmosphérique et climatologique qui seront déployés en opérationnel par Météo-France à La Réunion et à Mayotte dans le cadre de ses missions de service public.

La **DIROI** (Direction Inter-Régionale de L'Océan Indien) de Météo-France. Elle coordonne les activités de Météo-France à La Réunion autour de la prévision atmosphérique et d'étude du climat dans le cadre de ses missions de service public. Elle dirige le **CMRS** (Centre Météorologique Régional Spécialisé cyclones de La Réunion) et a été missionné par l'Organisation Mondiale de la Météorologie pour l'étude et le suivi opérationnel (analyse et prévisions) de tous les systèmes dépressionnaires tropicaux amenés à évoluer sur son domaine de responsabilité (de 30 degrés Est à 90 degrés Est, entre l'équateur et 40 degrés Sud). Elle dirige la surveillance permanente de l'activité cyclonique tropicale et la fourniture de ces données aux 15 pays membres de la zone (Afrique du Sud, Botswana, Comores, France, Kenya, Lesotho, Madagascar, Malawi, Maurice, Mozambique, Namibie, Seychelles, Swaziland, Tanzanie, Zimbabwe), le CMRS a également un rôle de formation et de recherche.

**Le BRGM**, Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial est chargé d'une mission de recherche. Il est l'établissement public de référence dans les applications des sciences de la terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol. Il poursuit deux (2) objectifs :

- Comprendre les phénomènes géologiques et les risques associés, développer des méthodologies et des techniques nouvelles, produire et diffuser des données de qualité, favoriser l'innovation, la valorisation et le transfert vers les activités économiques.
- Développer et mettre à disposition les outils nécessaires à la gestion du sol, du sous-sol et des ressources, à la prévention des risques naturels et des pollutions, aux politiques de réponse au changement climatique.

Dans le cadre de l'accord signé entre le BRGM et La Région Réunion en 2014, il est prévu de poursuivre les études sur la prévention des risques géologiques et l'aménagement en cohérence avec les actions menées dans le cadre de l'Observatoire des risques naturels avec notamment la réduction des vulnérabilités, l'évaluation et la gestion des risques d'inondation, la caractérisation d'un aléa multirisque en zones montagneuses, littorales, l'impact du changement climatique et adaptation. Les efforts doivent être poursuivis dans l'acquisition des connaissances sur le fonctionnement des mouvements de terrain, dans le développement d'outils de surveillance et de gestion des risques et enfin dans la communication de la culture du risque à tous les échelons des structures sociales réunionnaises.

**Le LGSR** (Laboratoire GéoSciences Réunion) est membre de l'OSU-R. Ses membres sont également intégrés à l'équipe Géologie des Systèmes Volcaniques de l'UMR 7154 de l'Institut de Physique du Globe de Paris. La recherche au sein de ce laboratoire s'articule autour de six thématiques qui ont pour finalité de renforcer notre compréhension globale des systèmes volcaniques et en particulier celui de la Réunion, depuis la dynamique profonde du manteau sous le Piton de La Fournaise jusqu'à sa dynamique éruptive, sa structure, sa construction et sa destruction, mais également tous les phénomènes hydrothermaux jusqu'aux ressources en eau de l'île. Le laboratoire est partenaire du Réseau de Bassins Versants labellisé par l'Allenvi via le site expérimental de la Rivière des Pluies. L'insertion du LGSR dans le projet cyclone se fait à travers son expertise en sismologie environnementale qui permet de quantifier indirectement la houle et le transport de matière dans les rivières par l'analyse du bruit microsismique, mais également par son implication dans le monitoring des bassins versants de la Rivière des Pluies et son expertise dans la connaissance des structures géologiques et des mouvements de terrain.

**L'IRSTEA** (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture, anciennement cemagref) est un Etablissement public à caractère scientifique et technologique (EPST). Irstea emploie environ 1 600 personnes, réparties dans neuf centres régionaux et sur douze thèmes de recherche. Le budget annuel d'Irstea est d'environ 115 M€. Le plan stratégique d'Irstea vise à répondre aux principaux enjeux socio-économiques concernant : (i) la gestion de la durabilité des territoires, notamment agricoles et périurbains, leurs ressources (en particulier eau), leurs productions (alimentaire et énergétique), mais aussi les flux humains, économiques et financiers ; (ii) la prévision et la prévention des risques naturels (crues, inondations, avalanches) et environnementaux (chimiques, biologiques...) ; (iii) la préservation de la biodiversité et sa participation à la production de ressources (biomasse forestière).

Au sein d'Irstea, le thème de recherche « Aléas et risques liés au cycle de l'eau » (TR ARCEAU) rassemble neuf équipes réparties sur les centres d'Aix-en-Provence, Antony et Lyon, avec un effectif global de personnels permanents d'environ 45 ETP, auxquels s'ajoutent des stagiaires, doctorants, post-doctorants et personnels contractuels. Ces équipes mènent des travaux de recherche concernant le fonctionnement hydrologique des bassins versants, incluant les transferts d'eau, de sédiments et de polluants, dans les bassins versants et dans le réseau hydrographique. Ces travaux de recherche s'appuient sur l'observation de terrain et l'expérimentation à différentes échelles de temps et d'espace, la modélisation hydrologique et hydraulique, l'analyse statistique, la régionalisation et la cartographie hydrologique. Les applications de la recherche concernent plus particulièrement la prévision hydrométéorologique, la prédétermination des événements extrêmes, l'anticipation des changements globaux (incluant l'adaptation), la gestion des ressources en eau, la restauration des hydrosystèmes, le soutien aux politiques publiques.

L'UMR **ESPACE-DEV** (IRD,UM2,UAG,UR) est une unité mixte de recherche à 4 tutelles qui développe et met en œuvre des méthodologies innovantes de spatialisation des connaissances en environnement pour le développement durable des territoires, depuis l'acquisition des données jusqu'au processus décisionnel. La finalité est de contribuer à l'émergence de réseaux d'observatoires de l'environnement. L'unité se place dans une perspective de développement durable des territoires en général et plus particulièrement en milieu tropical. Il s'agit d'une UMR multidisciplinaire dans le domaine de la spatialisation de la connaissance. Elle propose des méthodologies de spatialisation des dynamiques de l'environnement pour permettre l'adaptation des sociétés du Sud aux changements globaux.

Le laboratoire se compose de 25 personnels IRD (CR,DR,IR,IE) et 30 (EC) et compte 44 doctorants sur 6 implantations : Montpellier, Perpignan, La Guyane, le Brésil, La Nouvelle Calédonie et la Martinique). Elle se structure en trois équipes de recherche :

- Observation spatiale de l'environnement (OSE) : Traitement, analyse et exploitation de flux de données  
RenovRisk-TRANSFERTS

30/09/2015

; Indicateurs spatialisés bio-géophysiques; Modélisation d'objets/processus.

- Approche intégrée des milieux et des sociétés (AIMS) : Paysage et observatoire pour la gestion environnementale ; Environnement et santé ; Gestion intégrée des territoires insulaires et littoraux.

- Modélisation, Ingénierie des Connaissances et Analyse des Données spatiales (MICADO) : Acquisition, gestion, représentation et partage et intégration de données et connaissances ; Modélisation de dynamiques spatio-temporelles ; Visualisation, cartographie sémantique, diffusion et aide à la décision.

Le **CEMOI** (Centre d'Economie et de Management de l'Océan Indien) comprends des chercheurs en sciences économiques et en sciences de gestion de l'université de La Réunion. Les principaux axes de recherche sont: Région, croissance et développement ; Management et gestion des risques ; Monnaie, banque, finance et Décisions et stratégie. Les objectifs du CEMOI concernent à la fois la recherche académique et des travaux plus appliqués pour (et avec) des partenaires locaux, nationaux ou internationaux, en privilégiant les problématiques liées à l'île de La Réunion et à l'océan Indien. L'unité a deux composantes de rattachement : la Faculté de Droit et d'Economie (FDE) et l'Institut d'Administration des Entreprises (IAE).

Le CEMOI a fait le choix récemment de s'inscrire pleinement dans les axes priorités de développement du territoire Réunion en conduisant notamment des projets de recherches dans les domaines du tourisme durable, de l'énergie et de l'environnement. Il s'est également constitué partie prenante dans des réseaux de recherches à dimension régionale (ArchNet piloté le CIRAD, et le Cluster Green piloté le Syndicat de l'Importation et du Commerce de La Réunion).

**ENTROPIE** (Laboratoire d'Ecologie Marine de l'Université de la Réunion) mène des recherches dans les domaines de l'écologie marine tropicale, de l'écologie fonctionnelle, de la biologie de la conservation, des pêcheries durables, de la biodiversité et de la systématique. C'est une formation de recherche en évolution du CNRS (FRE3560). Il fait partie du LabEx CORAIL, et est laboratoire associé de l'OSU-Réunion.

Au regard des objectifs du programme, ENTROPIE développe des programmes de recherche fondamentale sur les flux de nutriments et le cycle du carbone et des carbonates en milieu corallien, dans le cadre général de systèmes anthropisés et, plus récemment, dans le cadre des interactions entre anthropisation et changement global. Dans le cadre de l'OSU-Réunion, il contribue à la mise en place d'une station d'observation côtière et récifale des impacts anthropiques et du changement climatique dans le secteur de l'Hermitage, en partenariat avec l'UMR ESPACE-DEV et le LGSR. Il s'implique également depuis de nombreuses années dans le développement des programmes de surveillance de la qualité des eaux du milieu marin à la Réunion (étude pilote RNO 2002-2005, actuellement mise en place de la DCE), dans le cadre d'un partenariat avec IFREMER et l'ARVAM.

La station de réception satellite **SEAS-OI**, Surveillance de l'Environnement Assistée par Satellite, permet d'acquérir en temps réel des images optique et radar. Un pôle de recherche et formation en télédétection animé par l'UMR ESPACE DEV (IR, UR, UAG, UM2) est adossé à cette infrastructure. La présence d'une station de réception permet d'obtenir les données en temps réel, ce qui est un atout pour la gestion de crise. Il faut ensuite en extraire l'information cherchée. La complémentarité des images optique et radar, sensibles à des paramètres environnementaux différents, renforce l'intérêt du dispositif. En particulier la capacité de l'onde radar de traverser la couche nuageuse permet d'obtenir l'information quelque soient les conditions météorologiques, point particulièrement important durant les événements cycloniques. Les acquisitions d'images effectuées lors d'évènements majeurs dans le cadre de la Charte Internationale « Espace et catastrophes majeures » par une multitude de satellites sont dédiées aux organismes en charge de la gestion de crise et de la protection des personnes (Sécurité civile en France). En complément les données SEAS-OI s'intéresseront aux aspects environnementaux associés aux évènements : suivi des espaces forestiers et agricoles et impacts sur les espaces naturels et le trait de côte en particulier. Les techniques d'interférométrie radar permettent d'estimer quand à elle les volumes érodés ainsi que les quantités de matières transportées de l'amont vers l'aval. Concernant les paramètres océaniques et atmosphériques, le radar s'avère très pertinent pour produire des cartes de champs de vent et de houle.

L'**AGORAH** (Association Réunionnaise pour l'Observation, l'Aménagement et l'Habitat) a été créée sous la forme d'une association régie par la loi du 1er Juillet 1901. Elle se différencie des autres agences d'urbanisme en ce sens que ces dernières sont dans leur ensemble des agences d'agglomération alors que l'Agorah a un caractère régional.

L'agence d'urbanisme a pour vocation :

- D'être un espace de rencontre, de réflexion, de concertation et de mémoire pour les différents partenaires concourant au développement économique, social et urbain du territoire de la Réunion
- De proposer, par la permanence de ses observations et analyses, une perspective d'ensemble à ses membres.
- De réaliser les réflexions d'aménagement et d'urbanisme dans l'intérêt commun de ses membres en articulant les domaines de l'habitat, de l'économie, des déplacements et de l'environnement.
- De mettre en oeuvre les mesures propres à assurer l'information de la population (publications, réunions d'information, expositions, colloques, ...) et à animer le milieu local des professionnels de l'aménagement et de l'urbanisme.

Dans ce cadre l'AGORAH héberge l'observatoire des risques naturels de La Réunion (ORN) qui est un outil **partenarial d'évaluation et d'aide à la décision** en matière de prise en compte des risques naturels au sein des politiques publiques d'aménagement durable à La Réunion. **Les missions générales de l'ORN s'organise autour de deux dimensions : un centre de ressource (collecter; centraliser; mettre en cohérence) et un centre d'expertise (évaluer; accompagner; proposer; sensibiliser).**

## Les modèles numériques

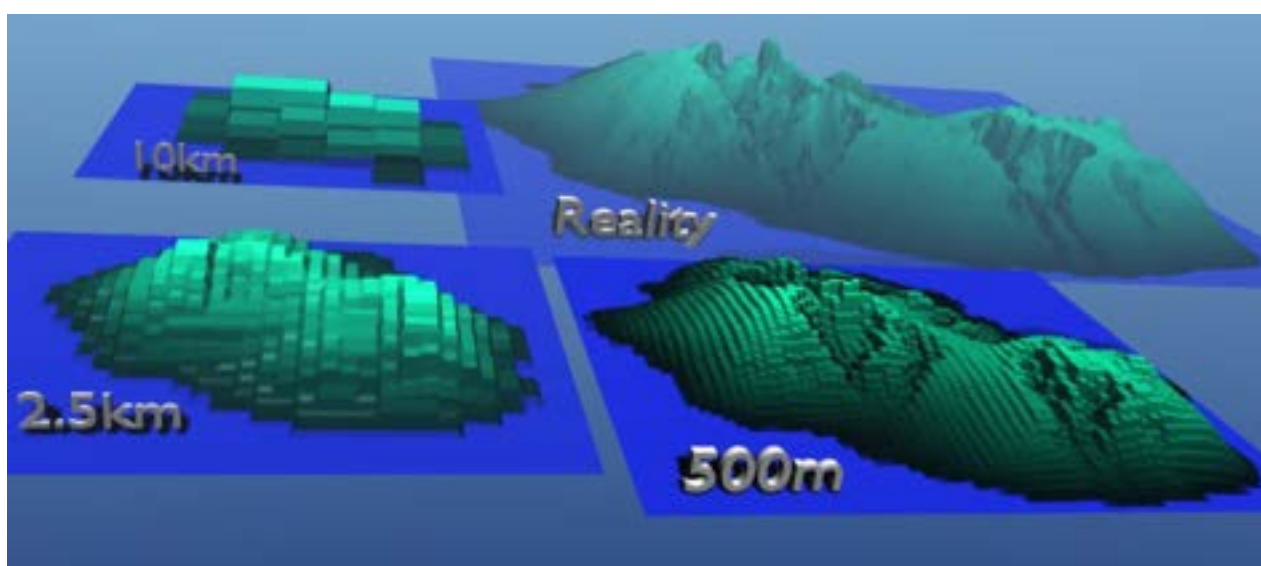
Un volet crucial à la réussite du programme est liée à la capacité d'innovation de nouveaux moyens numériques en phase pré-opérationnelle. Ces nouveaux moyens doivent en fin de programme être aptes à intégrer une configuration d'exploitation opérationnelle par les organismes habilités pour la gestion de crise et servir les politiques publiques de gestion et d'aménagement du territoire (communes, région, EDF, ...).

Une condition nécessaire d'entrée au programme est notre capacité à développer un outil numérique apte à prévoir les vents, les pluies et la houle de façon réaliste à l'échelle du territoire de La Réunion. Jusqu'à aujourd'hui les capacités numériques disponibles ne permettaient pas d'atteindre cet objectif pour deux raisons majeures. La première est liée au découplage des modèles de prévision océaniques et atmosphériques. La nouvelle génération de modèles développés par Météo-France et le Centre Européen de Prévision (CEPMMT) seront couplés océan-atmosphère. Le LACy est pleinement engagé dans cette démarche nationale et internationale pour le milieu océanique tropical. Une raison importante est il convient de développer au sein de ce programme l'adaptation des flux énergétiques issus de l'océan par vent fort en conditions cycloniques. La deuxième raison vient d'une résolution horizontale actuellement peu adaptée à la topographie de La Réunion. La Figure 5 explicite bien cette problématique avec un outil opérationnel actuel (Aladin-Réunion, 8 km de résolution) incapable de représenter les circulations locales associées à la topographie complexe de La Réunion. Cette situation va évoluer favorablement en 2017 avec la mise en service sur La Réunion du modèle opérationnel AROME à 2.5 km de résolution qui fonctionne actuellement en métropole. Néanmoins, les études menées au LACy, dans le cadre du projet PRECYP financé par la Fondation MAIF, ont montré que bien que présentant des améliorations significatives cette

RenovRisk-TRANSFERTS

résolution était encore trop basse. Pour atteindre les objectifs fixés dans le programme pour une bonne prévision des vents et des précipitations, il est nécessaire d'atteindre une résolution horizontale de l'ordre de 500 m. Cette résolution peut-être atteinte par le modèle de recherche Meso-NH. Parallèlement, une attention particulière doit être portée au schéma microphysique des modèles à haute résolution, qui permet de générer les nuages et les précipitations et qui nécessite d'être adapté au milieu tropical océanique pour mieux contraindre (i) le refroidissement radiatif au sommet des cyclones, critère contraignant de son intensité, (ii) la distribution verticale de chaleur latente, source d'énergie du cyclone, et (iii) la distribution et l'intensité des précipitations.

Ce pré-requis est fondamental pour alimenter en cascade la modélisation des crues associés aux fortes précipitations.



**Figure 5 :** Représentation du relief de La Réunion vue par les modèles de prévision atmosphérique en fonction de leur résolution horizontale. En haut à gauche, le modèle ALADIN-Réunion utilisé en opérationnel par Météo-France. En bas à gauche, le modèle AROME en cours de développement avec une mise en service prévue en 2017 (résolution 2.5 km). En bas à droite la résolution du modèle de recherche MesoNH avec une visée opérationnelle AROME à cette échelle vers 2020 sous condition de réussite du financement des actions de développement du programme et de l'accord de Météo-France.

Au sein de l'IRSTEA, le thème de recherche « Aléas et risques liés au cycle de l'eau » (TR ARCEAU) rassemble neuf équipes réparties sur les centres d'Aix-en-Provence, Antony et Lyon, avec un effectif global de personnels permanents d'environ 45 ETP, auxquels s'ajoutent des stagiaires, doctorants, post-doctorants et personnels contractuels. Ces équipes mènent des travaux de recherche concernant le fonctionnement hydrologique des bassins versants, incluant les transferts d'eau, de sédiments et de polluants, dans les bassins versants et dans le réseau hydrographique. Ces travaux de recherche s'appuient sur l'observation de terrain et l'expérimentation à différentes échelles de temps et d'espace, la modélisation hydrologique et hydraulique, l'analyse statistique, la régionalisation et la cartographie hydrologique. Le TR produit notamment des méthodes, des outils de modélisation et de simulation, qui permettent de répondre aux RenovRisk-TRANSFERTS



besoins scientifiques d'amélioration des connaissances et aux besoins opérationnels et d'expertise. Les applications de la recherche concernent plus particulièrement la prévision hydrométéorologique, la prédétermination des événements extrêmes, l'anticipation des changements globaux (incluant l'adaptation), la gestion des ressources en eau, la restauration des hydrosystèmes, le soutien aux politiques publiques.

Parmi les outils produits par le TR ARCEAU, on peut citer :

- SAMPO : modèle de simulation méso-échelle des champs de précipitation ;
- AÏGA : outil d'alerte aux crues sur bassins versants non jaugés, avec une qualification des niveaux de crue en fonction de leur période de retour (développement en partenariat avec Météo-France) ;
- SHYPRE/SHYREG : méthodes de prédétermination des pluies et crues extrêmes sur site jaugé ou non jaugé ;
- Modèles hydrologiques GR de simulation, permettant de représenter en continu la transformation pluie-débit à différents pas de temps, par des approches globales ou distribuées ;
- GRP : modèle de prévision des crues temps réel (utilisé en contexte opérationnel par les services de prévision des crues).

*Ces outils sont en particulier produits par les équipes des unités de recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés (UR HBAN) d'Antony, Ouvrages hydrauliques et hydrologie (UR OHAX) d'Aix-en-Provence et Hydrologie-Hydraulique (UR HHLY) de Lyon.*

## **Les moyens d'observations**

L'OPAR (Observatoire de Physique de l'Atmosphère de la Réunion) a été créé officiellement en février 2003, bien que les mesures atmosphériques par lidar, radiosondages, et spectromètres aient débuté en 1992-1993. Cette observatoire a pour vocation première la surveillance dans la durée des paramètres critiques de l'atmosphère et du climat comme un des points de référence mondial pour l'hémisphère Sud tropical. C'est dans le contexte que l'OPAR participe à plusieurs réseaux internationaux d'observations comme le NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Changes) et GAW (Global Atmospheric Watching). L'OPAR possède ainsi aujourd'hui 3 sites de mesures distincts à la Réunion : le site historique sur le campus de Moufia, l'aéroport de Gillot pour les radiosondages et le radar UHF et enfin la nouvelle station d'observation du Maïdo.

**L'Observatoire atmosphérique du Maïdo** (2200 m d'altitude) a été construit dans l'ouest de l'île. La construction de ce bâtiment a été programmée dans le cadre du Contrat de Projet État Région 2007-2013, et a été financé par la Région Réunion, l'État et l'Union Européenne (fonds FEDER). La Région Réunion est le maître d'ouvrage de ce projet. Pour gérer cette nouvelle infrastructure, l'Université de la Réunion a mis en place, conjointement avec l'INSU-CNRS, un Observatoire des Sciences de l'Univers (OSU-Réunion) qui est une nouvelle composante de l'Université. Cette structure a également vocation à fédérer les recherches dans le domaine des sciences de l'univers, au-delà des seuls aspects atmosphériques.

Conjointement aux mesures atmosphériques de l'OPAR, Météo-France met à sa disposition ses deux radars météorologiques (Colorado et Piton Villers), un réseau très dense de pluviomètres et de stations météorologiques dispersés sur l'ensemble du territoire et ses radio-sondages journaliers.

Opérationnelle depuis juillet 2012, la station **SEAS-OI** est à la fois une station de réception d'imagerie satellite et un pôle d'excellence en télédétection, développant une expertise dans les domaines de la

biodiversité, les milieux agroforestiers, l'environnement marin et côtier, l'urbanisme, la santé et les risques naturels.

Dans un rayon de 2500 km autour de La Réunion, SEAS-OI reçoit des images satellites optiques (SPOT 5) et RADAR (RADARSAT-2) haute résolution. Au sein de SEAS-OI, l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), l'Université de La Réunion, et la Région Réunion mettent en œuvre des projets de coopération scientifique et opérationnelle dans le domaine de la télédétection. Dans cet optique, les données acquises par SEAS-OI sont disponibles gratuitement pour les institutions publiques et les laboratoires de recherche du sud-ouest de l'océan indien. SEAS-OI est un programme financé par la Région Réunion, l'État, l'IRD, l'Université de La Réunion, et soutenu pour l'Europe.

Les moyens d'observation hydro-géologiques seront déployés sur plusieurs sites et à plusieurs échelles spatiales et temporelles. Dans ce cadre l'OSU Réunion s'appuiera sur les deux bassins versants expérimentaux intégrés dans le réseau des bassins versants pilotes : le bassin versant ERORUN sur la Rivière des Pluies et le bassin versant de la station côtière à l'Ermitage.

A l'échelle régionale, ces deux sites seront complétés par le cirque de Salazie qui bénéficie d'un réseau de mesure installé dans le cadre du programme MVTerre 1 et 2.

Concernant les mouvements de terrain, les installations existantes seront complétées dans le cadre de ce programme et le suivi de l'équipement installé sera de fait pérennisé sur 3 années supplémentaires. A l'échelle locale, le Grand éboulis situé au cœur du bassin versant ERORUN fera l'objet d'un nouvel équipement

Une **station d'observation côtière et récifale** a été mise en place en 2011 avec le soutien de l'OSU-R. Elle développe des outils et indicateurs permettant l'observation, le suivi et la modélisation des impacts du changement climatique dans la zone côtière récifale, et de la synergie éventuelle avec les pressions anthropiques locales. Les mesures effectuées comportent (1) le suivi des pressions anthropiques, globales et locales (acidification océanique, flux d'eaux douces souterraines, fréquentation des plages), et (2) le suivi d'indicateurs de perte de résistance et/ou de résilience (reproduction et recrutement des coraux scléactiniaires et des millépores, bilan des carbonates), ainsi que la cartographie des trajectoires des communautés benthiques en réponse aux perturbations. Elles complètent d'autres activités déjà labellisées au niveau national ou international (SNO Trait de côte ; Directive Cadre sur l'Eau, Office de l'eau ; Global Coral Reef Monitoring Network, Réserve Naturelle Marine de La Réunion).

## 4 – L'organisation du programme

### La coordination

La coordination scientifique du programme est confiée à P. Tulet, S. Bès de Berc et N. Villeneuve

**P. Tulet** est directeur de recherche au CNRS, HDR, directeur du LACy et membre de l'équipe de direction de l'OSU-R. Auteur de plus de 45 publications internationales de rang A (impact factor H 20), il est spécialisé dans la modélisation numérique et la physico-chimie atmosphérique.

**S. Bès de Berc** est directrice du BRGM Réunion et Océan Indien. Titulaire d'un doctorat en géologie et géomorphologie réalisé avec l'IRD en Amérique du Sud, elle est spécialisée dans les risques naturels au travers des différentes étapes de la chaîne du risques, depuis l'évaluation de l'aléa, en passant par la réalisation de scénarios de risque et jusqu'à l'aide à la gestion de crise, notamment en domaine tropical (Antilles, Polynésie, Océan Indien).

Les coordinateurs ont pour mission le bon fonctionnement, la cohérence d'ensemble du programme veillant à la fourniture des livrables, notamment transverses. Ils ont un rôle de médiateur entre les différents porteurs des programmes ReNovRisk. Ils organisent le comité technique et le comité de pilotage.

Le comité de pilotage (**COPIL**) a pour mission le pilotage et la supervision du programme. Le comité de pilotage est composé de la Région Réunion, du directeur de l'OSU-R représentant l'université de La Réunion, du directeur de la DIRRE, du directeur du BRGM réunion, du directeur du PIROI et du directeur du PMZ-PCOI. Sont invités les coordinateurs du programme et les responsables scientifiques des WP. La présidence du comité de pilotage est donné à La Région Réunion.

Le comité technique (**CT**) est composé de l'ensemble des coordinateurs et acteurs scientifiques des WP. Réuni une fois à deux fois par an, le CT a pour mission d'assurer le bon fonctionnement global du projet et la fourniture des livrables entre WP. Des comptes rendus de réunion techniques seront envoyé à l'ensemble des participants au programme. Il prépare les états d'avancement des livrables des WP qui seront exposés au comité de pilotage.

## **L'articulation scientifique**

Le programme s'organise autour de cinq programmes interconnectés nommés **ReNovRisk-Cyclones, Volcans, Erosion, Transferts et Impacts**.

**ReNovRisk-Cyclones** intitulé « impact météorologique et océanographique des cyclones tropicaux sur les îles du sud-ouest de l'océan Indien » vise le développement de produits innovants adaptés à l'alimentation en cascade des outils d'analyses du risque qui seront déployés à l'échelle du territoire par les autres programmes ReNovRisk. Il se décline principalement autour de 4 actions : l'amélioration et l'adaptation des modèles numériques sur l'océan indien, la mise en synergie de systèmes d'observations des cyclones et des houles basés sur des radiosondages atmosphériques, des mesures sismiques et des observations RADAR-SAT et SENTINEL. Ces actions visent l'amélioration et d'adaptation au contexte insulaire et tropical des outils de prévision cyclonique et asseoir une organisation de coopération territoriale sur l'ouest de l'océan indien. Les principaux livrables transverses aux autres programmes ReNovRisk visent à produire cartes de vents, pluies et houle à haute résolution sur l'île de La Réunion, sur Maurice et Mayotte. Des actions de valorisation, communication et coopération régionale et internationale intégrant des actions de formation et de développement seront également menés. Un volet important de ce programme concerne une représentation numérique des cyclones futurs sur l'OI dans le contexte du changement climatique. Ces projections permettront de fournir aux autres WP des estimations de pluies, vent et houle à l'horizon 2010, 2040 et 2060, mais aussi d'estimer la ressource en eau disponible par la recharge cyclonique dans un contexte de sécheresse territoriale plus marqué. Ce programme peut s'inscrire autour d'une démarche de financement par le programme opérationnel de coopération territoriale INTER-REG (anciennement POCT), en intégrant notamment le Mauritius Meteorological Services, le Mauritius Oceanography Institute, l'université de Madagascar et Météo-France Mayotte.

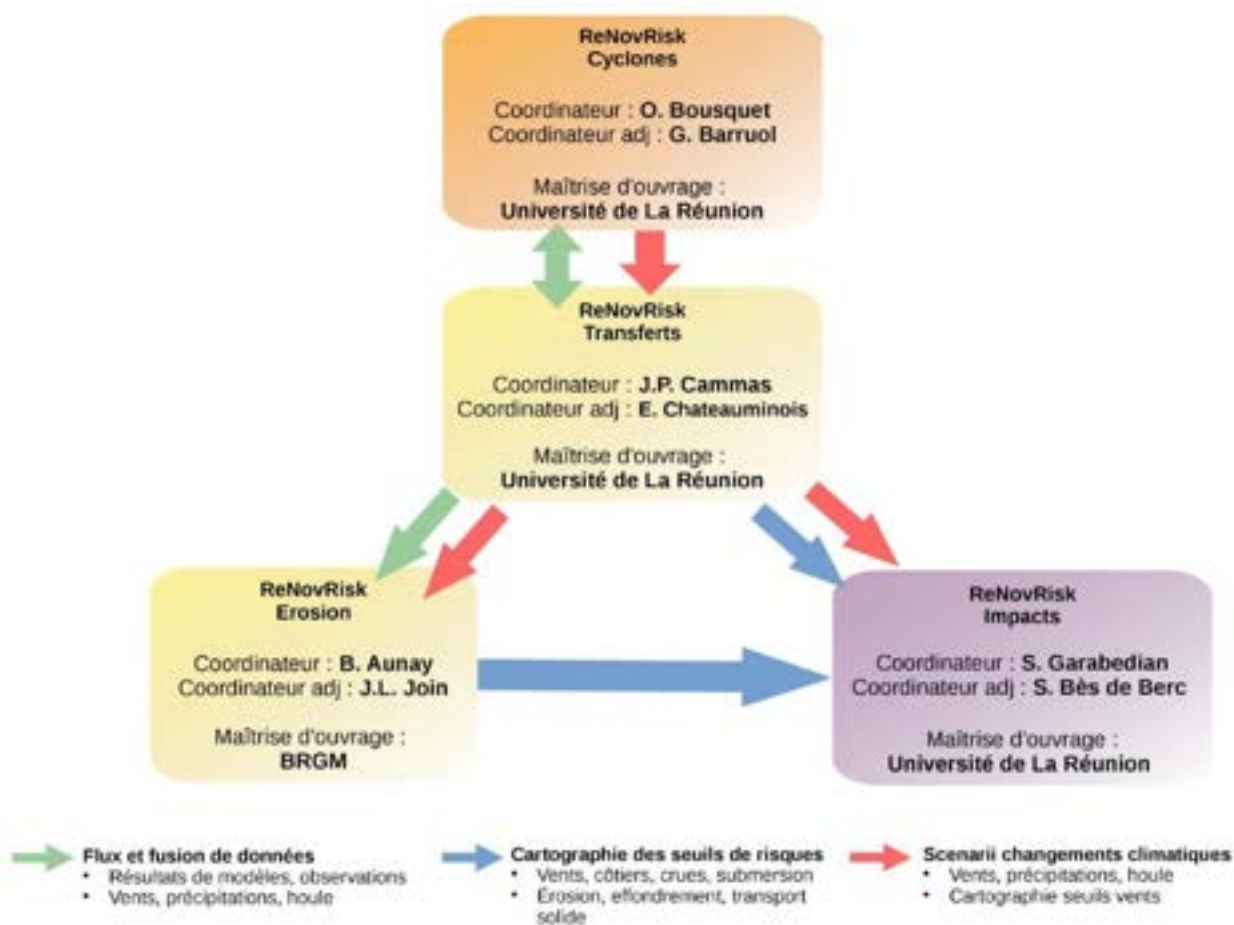
**ReNovRisk-Transferts** intitulé « aléas sur le système bassin versant Maïdo-lagon d'arrière récif » s'inscrit autour de trois actions intégrées. La première vise l'exploitation de l'observatoire du Maïdo pour contraindre et valider les produits de simulation du programme ReNovRisk-Cyclones sur La Réunion. Elle permettra via une approche de fusion de données la calibration à l'échelle des bassins versants des lames

d'eaux pour les modèles hydrologiques mis en place par l'IRSTEA. La cartographie de vents sera seuillés par une relation intensité/dommage pour être traduite économiquement par ReNovRisk-Impacts. La deuxième action vise à observer et modéliser les écoulements et infiltrations hydriques dans les ravines sèches et urbanisés de St-Paul et St-Gilles. Cette action sera menée via les outils développés par l'IRSTEA et les moyens d'observation des seuils remis en service dans le cadre de ce programme par le LGSR. La troisième action s'intéresse à l'évolution du trait de cote et la réponse morphologique des récifs vis à vis des aléas cycloniques littoraux et à la submersion littorale. La combinaison de ces actions permettront d'affiner les plans d'urbanismes en réponses aux risques inondations et d'apporter des éléments concrets pour l'interprétation économique du risque cyclonique.

**ReNovRisk-Erosion** s'organise autour des bassins versant du cirque de Salazie et de la rivière des pluies. Le champ scientifique vise à étudier les glissements de terrains, les infrastructures soumises au risque d'érosion par les crues et les transports solides. La première action étudiera les déstabilisations gravitaires et le stock sédimentaire. Des méthodes innovantes seront également mises en œuvre (écoute sismique pour les effondrements de rempart, méthode optique...). Une analyse rétrospective sera également menée à l'échelle des temps géologique afin d'estimer l'occurrence de phénomènes anciens et potentiellement dévastateurs. La deuxième action s'organisera autour de la modélisation des crues. A partir des inputs des programmes ReNovRisk-Cyclones et Transferts (intégration spatiale et temporelle des pluies à l'échelle des bassins versants) et la participation de l'IRSTEA, les tâches suivants pourront être envisagées : l'estimation et adaptation des temps de concentration, évolution des courbes intensité-durée-fréquence sur le long terme (changement climatique) et calcul des crues de projet (débit liquide). La troisième action sera consacrée à l'analyse du transport solide. Dans ce cadre il est proposé de développer une sismologie "environnementale" à La Réunion pour quantifier le transport des sédiments dans les rivières. Il s'agira de déployer temporairement 5 sismomètres larges bandes le long de la Rivière des Pluies et la Rivière du Mât pour analyser en continu les variations spatiales et temporelles du bruit sismique associé à ces rivières et quantifier leur charge de fond durant les événements extrêmes. La dernière action étudiera l'impact sur les infrastructures et adaptation de l'aménagement du territoire. Sur la base d'une analyse fine des déstabilisations et du transport solide affectant l'intégralité du bassin versant, les désordres enregistrés seront listés et replacés dans un contexte global de phénoménologie afin que les expériences passées puissent être valorisées dans le cadre d'une adaptation de l'aménagement du territoire. Dans les parties distales des cours d'eau, les phénomènes d'érosion de berges sur les lits majeurs et mineurs seront également étudiés par des approches spatiales (SEAS-OI) et des scénarios d'évolution pourront être précisés au regard (i) de l'ampleur et de l'occurrence des phénomènes et (ii) du changement climatique. Enfin, une évaluation de la cohérence des différents documents de référence (PPRI, PGRI) pourra être effectuées au regard des nouveaux résultats.

**ReNovRisk-Impacts** vise à capitaliser les retombées des études du programme ReNovRisk pour le territoire. Il est organisé autour de 4 actions. La première vise l'évaluation économique des biens marchands et non marchands exposés aux aléas du cyclone à l'échelle de l'île. Il s'agira de développer des études sur la vulnérabilité et de les croiser avec les principaux aléas. Les actions 2 et 3 s'organisent autour d'exercices d'évaluation économique des effets d'un cyclone en s'appuyant sur les effet direct et indirect (action 2) et les effets macro-économiques (action 3). La méthodologie s'appuiera sur des cartographies d'impacts des cyclones, d'enquête auprès des entreprises et des populations et la construction d'un modèle d'équilibre général calculable permettant d'évaluer les effets intersectoriels. La dernière action vise à étudier les impacts des cyclones futurs dans un contexte de changement climatique et démographique selon plusieurs scénarios d'aléas cycloniques et de politique publique d'aménagement du territoire. Ces

projections s'appuieront directement sur les scénarios proposés par ReNovRisk-Cyclones et les produits de modélisation ou de fusion des données développés dans ReNovRisk-Erosion, et Transferts.



## Le projet RenovRisk-TRANSFERTS

Le projet TRANSFERTS se focalise sur les risques naturels associés aux cyclones qui atterrissent sur le territoire Réunionnais et plus spécifiquement encore sur la micro-Région Ouest en prenant comme zone-atelier de travail le massif du Maïdo, la bande littorale entre St Paul et St Leu, le lagon d'arrière-récif et l'océan ouvert selon la position sur la côte. Son objectif général est d'analyser comment s'opèrent les transferts des aléas cycloniques entre les milieux naturels que constituent l'atmosphère, l'hydrosphère, le milieu du littoral (défini comme incluant le littoral lui-même, le trait de côte, le lagon et sa barrière récifale), et l'océan ouvert. Le transfert des aléas s'opère dans deux directions privilégiées, d'abord de l'atmosphère vers l'hydrosphère et le littoral, ensuite de l'océan ouvert vers le littoral.

Pour ce qui concerne la première direction de transferts, les aléas atmosphériques sont les rafales du vent et les précipitations associés aux événements cycloniques. Pendant ces événements ils dépendent de nombreux facteurs intrinsèques au cyclone (sa trajectoire, son régime et son intensité) et d'autres facteurs par rapport à la zone d'atterrissage (position du cyclone par rapport à l'île et hauteurs des reliefs impactés). Les vents cycloniques sont par nature les plus intenses dans la bande d'altitude des hauts de La Réunion et ces zones vont particulièrement être impactées par les rafales du vent. Les précipitations cycloniques sont généralement les plus intenses sur les hauts de l'île. Elles alimentent les ravines temporaires sur le massif du Maïdo dont on ne connaît encore que trop peu le comportement hydrologique qui peut conduire à des risques extrêmes telles que les crues éclairs et les inondations sur la bande côtière. Dans la deuxième direction, le projet s'intéresse aux transferts des forçages de l'océan ouvert (houle et surcote cyclonique<sup>1</sup>) vers le littoral. Les risques associés sont la détérioration de la barrière récifale et du trait de côte, la submersion sur le littoral, la rupture des équilibres entre barrière récifale, lagon et trait de côte, et des équilibres entre eaux salées et eaux douces dans les aquifères côtiers.

Les secteurs impactés par les risques cycloniques sont spécifiques à cette micro-région de La Réunion qui est caractérisée par i) une forte dynamique en terme d'occupation des sols, d'aménagement, et d'urbanisme, ii) une forte anthropisation du littoral avec de forts enjeux économiques (dont le tourisme, et l'hôtellerie, ...), iii) de forts enjeux économiques et culturels liés à la conservation du littoral et à la préservation de la biodiversité.

En général, les verrous scientifiques associés à ces thématiques se situent aux interfaces des milieux naturels. Entre l'atmosphère et l'hydrosphère, le verrou est sur la qualité des données de précipitations qui sont livrées aux hydrologues pour initialiser les modèles de prévision de crue. Que ce soient les observations de pluviométrie pour les lames d'eau ou les prévisions de ces quantités par les modèles numériques, les difficultés se situent dans la validation de la qualité des données. Des problèmes de représentativité spatiale se posent sur les observations de pluviométrie, surtout dans le contexte topographique de La Réunion. Les schémas numériques de représentation des nuages tropicaux et des précipitations demandent à être validés par des observations spécifiques qui sortent du parc instrumental météorologique classique. Dans l'**Action 1 des Aléas Atmosphériques**, ces verrous seront attaqués par la mise en place et l'opération de nouveaux instruments installés à l'OPAR (Observatoire de Physique de l'Atmosphère à La Réunion) et à l'aide de nouvelles méthodologies de fusion de données. Entre l'hydrosphère et le littoral, le verrou scientifique se situe sur les méconnaissances du comportement des ravines temporaires du massif du Maïdo, en particulier leurs déconnexions par rapport aux réservoirs

---

<sup>1</sup> La surcote cyclonique est l'élévation moyenne du niveau de la mer sous le cyclone du fait de la dépression atmosphérique associée. Suivant les cyclones, elle varie entre quelques dizaines de cm et quelques mètres.

souterrains et leurs très importantes capacités d'infiltration en début de saison des pluies. Les séries historiques de mesure de débit sur ces ravines sont très peu nombreuses et le plus souvent dé-corrélées de la disponibilité simultanée de bonnes séries pluviométriques. Dans l'**Action 2 des Aléas Hydrologiques**, ces verrous seront attaqués par la mise en place d'une instrumentation hydrologique sur une des ravines et par l'utilisation de modèles hydrologiques à pas de temps horaires plus adaptés au comportement non-linéaire de ce type de ravines. De l'océan ouvert vers le littoral les verrous scientifiques pour caractériser la fonction de protection de la barrière récifale face aux forçages cycloniques sont dans la quantification des apports énergétiques et solides et dans la capacité de résilience du milieu naturel. Il s'agira donc dans l'**Action 3 Aléas Littoraux** de renforcer le réseau d'observations pour caractériser la transmission de la houle, les apports sédimentaires par submersion ou inondations, la bathymétrie à échelle fine du lagon d'arrière récif et le bilan des carbonates par les récifs coralliens.

Dans le domaine de l'observation des milieux impactés par les risques naturels, le consortium qui s'est constitué dans le projet RenovRisk pour attaquer les verrous scientifiques qui subsistent pour une meilleure évaluation des risques cycloniques est unique. L'OSU-R (Observatoire des Sciences de l'Univers à La Réunion, Université et CNRS-INSU) est le creuset de collaborations multidisciplinaires soutenues par la Fédération de Recherches OMNCG (Observations des Milieux Naturels et des Changements Globaux). Les laboratoires fédérés sous l'OSU-R (LACy, LGSR, ENTROPIE, Espace-DEV, PVBMT, ...) bénéficient de plateformes technologiques majeures qui ont été construites selon la stratégie de spécialisation intelligente du territoire. La micro-région de l'Ouest Réunionnais concentre les infrastructures de recherche sur les milieux naturels : Observatoire de l'Atmosphère au Maïdo, station SEAS-OI, station littorale, côtière et marine. Au niveau national, leur fonctionnement est soutenu par plusieurs tutelles (Université, CNRS, IRD, Région) à travers des outils comme les SNO (Services Nationaux d'Observations, INSU-CNRS), et les SOERE de l'Alliance Allenvi (Systèmes d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement, MEDDE). Ces stations appartiennent à plusieurs réseaux internationaux dont les labels d'appartenance sont des gages de qualité des observations qui y sont produites. On peut citer le NDACC (Network for Detection of Atmospheric Composition Changes), AERONET (Aerosols Robotic Network), ICOS (Integrated Carbon Observation System) et GAW/WMO (Global Atmospheric Watching / World Meteorological Organisation). Dans le cadre de l'OSU-R et du programme européen ENVRIplus (Environmental Research Infrastructures Providing Shared Solutions for Science and Society, H2020 Research Infrastructures, <http://www.envriplus.eu/>) ces stations bénéficient d'une mesure d'aide à l'accès transnational pour promouvoir des programmes de recherches multidisciplinaires sur les milieux naturels.

La capitalisation des résultats produits dans le programme RenovRisk-TRANSFERTS et leur diffusion vers les acteurs de la société civile, économique et industrielle se fera dans l'**Action 4 Capitalisation & Communication** (Figure 6). Un des objectifs de cette action sera de banqueriser les données produites par le projet, et de donner les outils pour les moissonner en respectant les standards d'interopérabilité (OPEN DATA). Plusieurs mesures de communication et de vulgarisation des résultats obtenus seront prises dans cette action pour donner un maximum de rayonnement au projet.



## ReNovRisk – TRANSFERTS

Risques cycloniques sur la micro-région de l'ouest réunionnais  
Massif du Mado, littoral, trait de côte, lagon, barrière récifale et océan ouvert

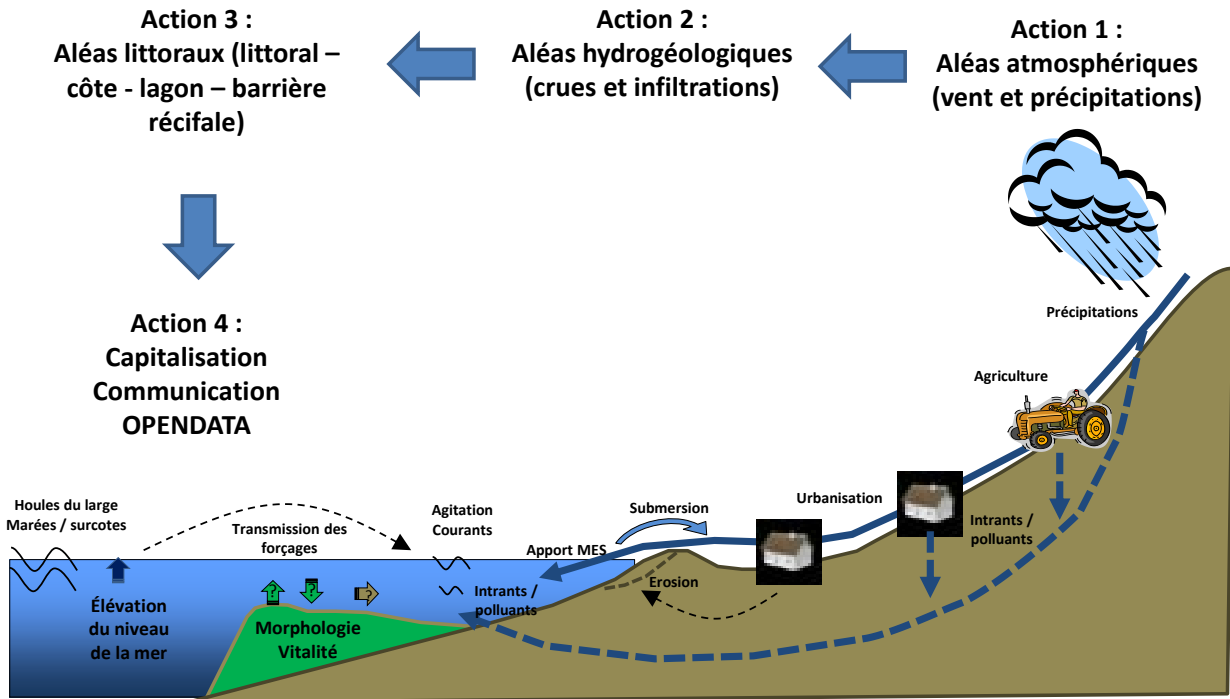


Figure 6 : Actions développées dans le programme ReNovRisk-TRANSFERTS

## ACTION 1: Aléas Atmosphériques

### Participants:

Coordinateur de l'action	LACy (Université de La Réunion)
Partenaires de l'action	LACy, UMS 3365 (OSU-R)
Prestations externes	DIROI Météo-France

### Moyens mis en oeuvre:

Personnel Permanent		
Nom	Fonction	Organisme de rattachement
Cammas Jean-Pierre	Directeur de Recherches CNRS	OSU-R
Tulet Pierre	Directeur de Recherches CNRS	LACy
Bousquet Olivier	Chargé de Recherche du développement durable	LACy

Personnel Contractuel		
Nom	Fonction	Organisme de rattachement
Recrutement à venir	Action 1 Aléas Atmosphériques: algorithmie des méthodes de fusion de données	LACy

### Contexte

L'infrastructure d'observation du Maïdo est un supersite unique d'observation de la microphysique des nuages à la fois par son implantation originale sur l'ouest de l'Océan Indien et son vaste parc instrumental largement consacré à l'eau et aux aérosols atmosphérique. Les programmes de recherches du LACy et de l'OSU-R, s'inscrivent dans cette démarche scientifique via l'exploitation large de profils (Radiosondages, lidars), d'observations in-situ et de données satellites, visant à améliorer les paramétrisations numériques de représentation du cycle de l'eau et des nuages dans les modèles de prévision et les modèles climatiques. Dans le projet RenoRisk-TRANSFERTS, l'observatoire du Maïdo servira d'outil d'analyse et de calibration des paramétrisations microphysiques aérosols-nuages issus des prévisions météorologiques de ReNovRisk-Cyclone.

Dans le cadre de l'OSU-R et du programme européen ACTRIS2 (Aerosols, Clouds, and Trace gases Research InfraStructure, Horizon 2020 Research and Innovation Framework Programme, H2020-INFRAIA-2014-2015, 1 May 2015 to 30 April 2019, <http://www.actris.eu/Home.aspx>), l'observatoire du Maïdo bénéficie d'une mesure d'aide à l'accès transnational pour promouvoir des programmes de recherches avec des équipes de recherche européennes. Deux actions d'accueil ont déjà eu lieu en Mai et Octobre 2015 pour accueillir des chercheurs du DWD (Deutsche Wetter Dienst, Lindenberg, Allemagne) et des chercheurs de l'IASB (Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique) sur l'étude des de la vapeur d'eau, des nuages, et de la composition atmosphérique.

En option supplémentaire à la synergie possible entre le projet RenovRisk-TRANSFERTS et le projet européen précédent ACTRIS2, nous étudions actuellement la possibilité de s'intégrer dans un autre projet européen, COMPLETE (Cloud-MicroPhysics-Turbulence-Telemetry: An inter-multidisciplinary training network for enhancing the understanding and modeling of atmospheric clouds, MARIE Skłodowska-CURIE ACTIONS Innovative Training Networks (ITN) Call: H2020-MSCA-ITN-2015). Dans ce projet COMPLETE, encore plus centré sur les questions d'incertitude de l'impact des nuages sur le changement climatique, nous espérons pouvoir valoriser la valeur ajoutée de l'observatoire du Maïdo et la participation du LACy et de l'OSU-R. En particulier des efforts importants sont mis en œuvre pour mieux caractériser les interactions aérosols-nuages (phase chaude et froide) et le cycle de vie des nuages tropicaux fortement précipitant (cyclones, mousson) dans une atmosphère océanique et tropicale. Le programme COMPLETE cadre ainsi parfaitement avec les orientations stratégiques de l'OSU-R et du LACy. Il apparaît donc très important que l'université de La Réunion puisse y participer à la fois pour soutenir ses actions de recherche, son infrastructure d'observation du Maïdo et plus généralement pour apparaître dans un autre programme d'excellence scientifique au niveau Européen.

## Objectifs et plans de travail

### **O1.1 Exploiter l'infrastructure du Maïdo pour évaluer et contraindre les modèles numériques lors de l'atterrissage des cyclones**

Quelle que soit la qualité et la représentativité des simulations numériques des cyclones tropicaux sur l'Océan Indien, les processus mis en jeu lors d'atterrissages nécessitent une analyse particulière au territoire. Ainsi, la nature des précipitations va être impactée par les propriétés des aérosols, les effets orographiques et le renforcement local de la convection et des vents. En particulier, la taille des gouttes va être modulée par la nature de la phase glace en altitude (aérosols, convection) et les processus d'activation et de coalescence qui sont modulés par la turbulence et l'inertie des gouttes de pluies.

Ainsi il apparaît important afin de mieux caractériser les impacts au sol des précipitations, c'est à dire la déstabilisation gravitaire (ReNovRisk-Erosion), les infiltrations et les crues (action 2 de ReNovRisk-Transfert et ReNovRisk-Erosion), de pronostiquer l'intensité et le spectre en taille des gouttes de pluies au sol.

C'est donc par une approche modèle-observation et une interaction et une mutualisation des compétences entre scientifiques de l'OPAR, de l'équipe cyclones du LACy et des ingénieurs de Météo-France que nous allons pouvoir:

- mieux caractériser les propriétés d'activation des aérosols en gouttelettes ou en cristaux de glace ;
- mieux contraindre les paramétrisations microphysiques de croissance des gouttes et de les adapter à l'environnement de La Réunion ;
- cartographier à l'échelle des bassins versants et à haute fréquence temporelle, les lames d'eau en spécifiant l'intensité et les spectres dimensionnels des précipitations.

Les moyens mis en œuvre à l'observatoire du Maïdo permettront de:

- mesurer les spectres en taille des gouttes grâce à l'acquisition d'un 2DVD (CPER 2015), d'une mesure du spectre en taille des aérosols (SCANOTRON) et du nombre de noyaux de condensation (CCNC et CPC à acquérir) ;
- caractériser les profils verticaux des propriétés optiques des aérosols (LIDAR ALS) et de la distribution des gouttes et des cristaux (radar BASTA).

Cette analyse experte observation/modélisation est une condition nécessaire à l'amélioration de la représentativité des simulations de précipitation sur la planète du Maïdo et à l'extrapolation à l'échelle du territoire de ces produits numériques (sous-action 1.2).

## O1.2 Fusion de données et cartographie des pluies à l'échelle du territoire

Suite aux épisodes de fortes pluies entraînant des dégâts sur La Réunion (Figure 7), il est important d'estimer le caractère exceptionnel d'un événement. Historiquement, cette expertise s'appuyait uniquement sur les données pluviométriques relevées sur les postes de mesures. Or, la variabilité spatiale des pluies à La Réunion est telle que la densité du réseau de mesure ne permet pas nécessairement de capter l'ensemble de l'information. En particulier, la plupart des communes de La Réunion s'étendent du littoral jusqu'à des niveaux d'altitudes dépassant les 2000m où il est parfois compliqué d'installer et de maintenir des pluviomètres dans de bonnes conditions et où les intensités pluvieuses sont bien souvent très supérieures à celles relevées le long du littoral.

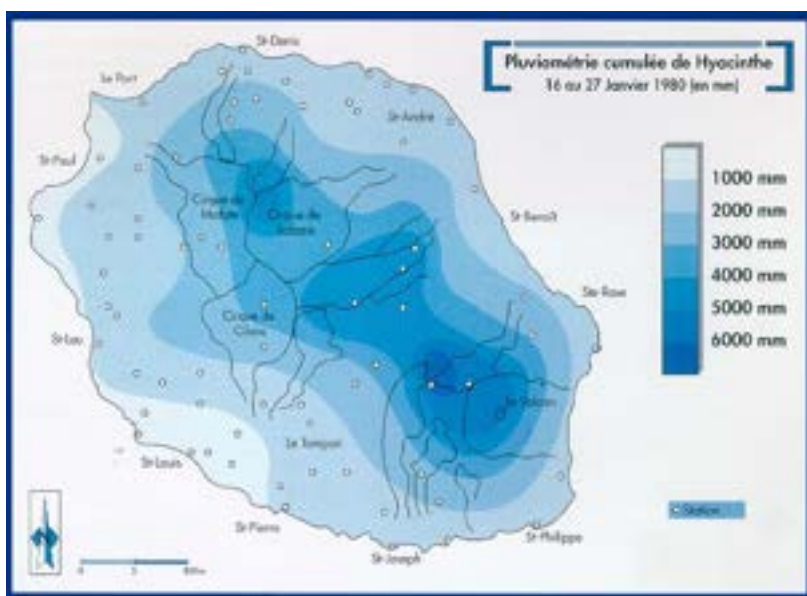


Figure 7 : Carte des précipitations associées au passage du cyclone Hyacinthe. Source : Météo-France

L'information sur les accumulations de pluies, issue des mesures réalisées par les deux radars météorologiques de La Réunion, offre l'avantage d'une information spatialisée associée à une couverture continue et uniforme du territoire. D'un point de vue quantitatif, ces informations sont

néanmoins entachées d'une incertitude importante en fonction des endroits considérés. Ces erreurs, par nature très variables, résultent des problèmes de masquage du faisceau radar par le relief de La Réunion et des approximations réalisées lors de la transformation d'une mesure radar, appelée réflectivité, en un taux de précipitation à la surface.

Dans cette optique, une méthode innovante permet de fusionner les données de lames d'eau (radar, modèle) et de pluviomètres. Elle est basée sur les techniques d'assimilation utilisées dans les modèles numériques de prévision du temps. Elle sera exploitée pour améliorer l'estimation de la distribution spatio-temporelle des précipitations lors des épisodes de pluies intenses à La Réunion. Le croisement de l'information spatiale issue de ce nouveau produit avec la base de données SHYREG de La Réunion, permettra notamment d'estimer la possibilité d'un dépassement du seuil décennal pour chaque commune de manière spatialisée, ce qui représente un bond important dans l'optique de préciser, et éventuellement conforter, le climatologue dans son appréciation des épisodes cycloniques. En particulier, l'information sur l'extension spatiale d'un phénomène peut, dans certains cas, expliquer l'étendue des dégâts observés sur le terrain à la suite d'un épisode fortement précipitant. Cette analyse pourra notamment être activée sur demande pour appuyer climatologues et experts de la commission CATNAT dans leur travail d'expertise post-événementiel.

Dans le cadre de ce projet on évaluera plus particulièrement la possibilité de fusionner les données radar et pluviométriques avec les champs de précipitations issus des simulations numériques à haute résolution spatiale de ReNovRisk-Cyclones. Un focus plus particulier sera mis sur les bassins versant de la rivière des pluies, du cirque de Salazie et de la planèze du Maido où les données pluviométriques pourront être croisées avec les données de vent modélisées pour obtenir une cartographie des aléas cycloniques pluie et vent à la résolution infra kilométrique.

Ces cartographies serviront à alimenter les modèles hydrologiques de l'IRSTEA de l'ACTION 2 et du programme ReNovRisk-Erosion. Des cartographies événementielles des lames d'eau obtenues par fusion de données seront mises à disposition (OPEN DATA) des acteurs territoriaux sur le site de l'Observatoire Régional des Risques Naturels (Agorah).

### **O1.3 Cartographie objective des risques associés aux vents**

La disponibilité des simulations issues de ReNovRisk-Cyclone et du réseau d'observation de Météo-France permettent d'accéder à une cartographie à haute résolution spatiale et temporelle des régimes de vents sur le territoire de La Réunion en situation de crise cyclonique (Figure 8).



Figure 8 : Observations des rafales de vent pendant le cyclone Bėjisa (1-3 Janvier 2014). \*\* Le vent au Piton Maído (à 2195 m d'altitude), est mesuré à une hauteur non standard (5 m). \* Gros Piton Ste-Rose (181 m d'altitude) est un point de mesure non représentatif de la zone pour le vent car situé sur un piton. Dans le rectangle grisé de la carte ci-dessus, la valeur estimée du poste de Colimaçons Cirad. Source : Météo-France

Pielke et Landsea (1998), en estimant des coûts normalisés de dégâts provoqués par les cyclones sur le sud-est des USA, ont montré que les coûts n'augmentent pas linéairement avec la vitesse du vent. Au contraire, les dommages augmentent de façon exponentielle avec les vents. C'est aussi pour cette raison que l'augmentation de 10 à 20 % de l'intensité de cyclones tropicaux prévus par le GIEC devrait occasionner une échelle de dégâts associés beaucoup plus importante. Par ailleurs, la traduction de cette augmentation d'intensité sur le territoire est complexe à déterminer du fait de l'orographie marquée de l'île de La Réunion (action de ReNovRisk-Cyclone).

La transformation de ces données de vent en carte de risques associés est une étape très importante pour rendre possible l'analyse coût-bénéfice que va mener le programme ReNovRisk-Impact. Elle représente une aide à la décision pour le dimensionnement des infrastructures sensibles ou pour l'optimisation de l'aménagement du territoire.

Chaque écosystème ou infrastructure du territoire va ainsi être impacté avec des seuils de résistance au vent différents. Les formulations existantes de risques associés aux vents forts sont basées sur des études nord-américaines qu'il convient de traduire localement. Une formulation originale de traduction des niveaux de vent en risques écologiques ou économiques pour le territoire de La Réunion devra ainsi être trouvée.

Dans cet esprit, l'OSU-R et sa fédération de recherche OMNCG est particulièrement bien adapté pour répondre sur les seuils écologiques qu'ils soient forestiers ou côtiers. Le laboratoire PVBMT possède par exemple une connaissance historique des seuils de dégâts occasionnés sur les différents types d'arbres ou de cultures. Le programme de recherche piloté par le laboratoire Espace-Dev s'appuyant sur la station d'observation SEAS-OI se base sur la maîtrise des outils permettant de cartographier les dégâts occasionnés par les passages des cyclones sur les habitations ou les écosystèmes. Notons aussi que la charte internationale « Espace et Catastrophes majeures » pour lequel participe l'état Français via le CNES permet d'optimiser la position des capteurs satellites en situation de crise et d'accéder à de l'imagerie visible (type SPOT) à haute résolution gratuitement. Cette procédure sera activée automatiquement sur la Réunion pendant la période d'étude de ReNovRisk.

L'objectif de cette action est donc de déterminer une formulation adaptée au territoire de La Réunion de seuils de dégâts écologiques et économiques en croisant les dégâts historiques observés lors des cyclones récents ou pendant la période du programme avec des cartes de vents simulés. Ces formulations seront ensuite utilisées sur des scénarios de cyclones futurs en lien avec le changement climatique (extension possible du projet RenovRisk-TRANSFERTS à partir de 2018).

## **Livrables**

**L1.1 Rapport sur l'intercomparaison des profils de nuages et d'extinction des aérosols observés dans RenovRisk-TRANSFERTS avec les simulations de cyclones tropicaux.**

**L1.2 Cartographie horaire et à 500m de résolution des lames d'eau sur La Réunion**

**L1.3.1 Formulation originale de traduction des niveaux de vent en risques écologiques ou économiques pour le territoire de La Réunion**

**L1.3.2 Cartographies des risques liés au vent. Données d'entrées pour le programme RenovRisk-IMPACT : analyse des coûts des dommages**

## **Références :**

Pielke, R. A., Jr., and Landsea, C. W. "Normalized hurricane damages in the United States: 1925–1995." *Weather Forecast.*, **133**,621–631, 1998.



## ACTION 2: Aléas Hydrologiques

### Participants:

Coordinateur de l'action	LGSR (Université de La Réunion)
Partenaires de l'action	LGSR, IRSTEA, UMS 3365 (OSU-R)
Prestations externes	Aménagement d'un seuil hydrologique

### Moyens mis en oeuvre:

Personnel Permanent		
Nom	Fonction	Organisme de rattachement
Join Jean-Lambert	Professeur	LGSR
Perrin Charles	Ingénieur-chercheur	IRSTEA
Furusho-Percot Carina	Ingénieur de Recherche	IRSTEA
Andréassian Vazken	Ingénieur en Chef des Ponts, des Eaux et des Forêts	IRSTEA

Personnel Contractuel		
Nom	Fonction	Organisme de rattachement
Recrutement à venir	Action 2 Aléas Hydrologiques: IGE BAP C pour l'opération et la maintenance du parc instrumental (atmosphère/hydrologie)	OSU-R
Recrutement à venir	Action 2 Aléas hydrologiques; IGE BAP E pour modélisation hydrologique des ravines	IRSTEA

### Contexte

Pour répondre aux enjeux de l'aléa hydrologique dans le contexte des ravines temporaires de la planèze du Maido, les équipes réunies sur cette problématique visent les actions suivantes:

1. L'instrumentation des eaux de surfaces et de subsurfaces par capteurs immergés pour le jaugeage différentiel des composantes de l'écoulement entre l'amont et l'aval
2. L'instrumentation des sites de transferts d'eau et de sédiments par capteurs d'images et suivi vidéo
3. La simulation numérique multi-échelle.

Raunet (1991) puis Barcelo (1996) ont montré le comportement particulier des ravines non permanentes des principales planèzes de l'île cf. (figures 9 et 10), à savoir :

- un débit de base nul ;
- une déconnexion totale aux réservoirs souterrains (due à une zone vadose très épaisse) ;
- une capacité d'infiltration importante, telle que le débit dans une ravine décroît en allant vers l'aval

- des profils d'érosion qui développent une succession de bassins et cascades propres à stocker une partie du ruissellement et à favoriser son infiltration.

Pour quantifier ces processus, l'OSU-R s'appuiera sur des moyens d'observation qui seront déployés sur la planèze du Maïdo, sur plusieurs sites et à plusieurs échelles spatiales et temporelles. La mise en œuvre d'observations et de mesures hydrologiques dans le contexte particulier des ravines de la planèze sera développée en s'appuyant sur des techniques novatrices élaborées en partie sur le site pilote de la Rivière des Pluies et de Salazie ( cf. projet RenovRisk-EROSION, WP2, participants UBO et BRGM).

Compte tenu du contexte, l'action entreprise sur le Maïdo s'intéressera particulièrement à documenter par des mesures de terrain, les mécanismes d'amortissement des crues qui semblent caractériser le fonctionnement hydrologique des ravines sèches de l'île de la Réunion (Barcelo, 1996)



Figure 9 : Mesures de débits sur seuils naturels dans les ravines temporaires du bassin versant du Maïdo

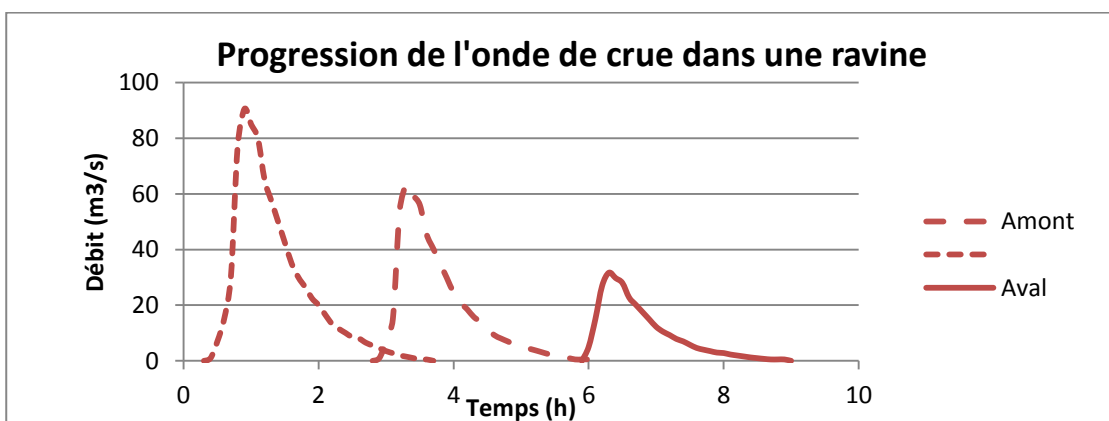


Figure 10 : Représentation schématique de l'évolution d'une onde crue dans une ravine du bassin versant du Maïdo

## Objectifs et plans de travail

### O2.1 Caractérisation des crues sur ravines temporaires de la planèze du Maïdo

Cette action vise à quantifier la capacité naturelle d'une ravine sèche à amortir les crues éclairs au niveau des bassins naturels.

L'aspect novateur consistera à mesurer à une haute résolution spatiale et temporelle, les conditions de stockage et d'infiltration dans le lit des ravines sèches. Une collaboration avec des agriculteurs installés dans les hauts de l'ouest, est envisagée pour l'initiation d'une approche expérimentale à l'échelle de la parcelle. Dans ce cadre, des mesures opérationnelles de réduction du ruissellement mis en œuvre par les exploitants pour réduire l'érosion pourront être évalués en termes de bénéfice sur la réduction du risque hydrologique.

Le couplage de ces observations à une simulation prédictive des crues de projets dans le cadre du changement climatique doit permettre de proposer des actions concrètes de mitigation.

#### Plan de travail :

##### *1) Equipement différentiel pour l'observation du ruissellement sur deux ravines de la planèze du Maïdo*

L'instrumentation de la ravine Saint Gilles à plusieurs niveaux d'altitude dans le bassin versant aura pour objectif de renseigner les coefficients de ruissellement et les temps de concentration dans différents tronçons du réseau hydrographique en amont des zones de résurgences situées en aval (bassins de Saint Gilles). Le dispositif installé sera conçu pour participer à terme au réseau d'observation pérenne intégré à la station côtière littorale de l'OSUR. Ces stations seront installées sans modifier l'écoulement naturel de la ravine.

Les mesures effectuées visent d'abord à estimer les temps de concentration et les maxima d'écoulement des épisodes de crue, les débits seront seulement estimés par la mise en œuvre de formules d'écoulement.

L'infiltration profonde sera évaluée par un suivi du niveau de la nappe effectué dans la zone de la station côtière.

##### *2) Analyse des mécanismes d'amortissement des crues*

Le travail de pré-analyse des données obtenues visera à préciser les conditions d'infiltration des eaux de ruissellement dans les bassins temporaires des ravines. Dans ce cadre, la mise en œuvre de simulations d'écoulement utilisant les outils de type HMS (Hydrological Modelling System) sera conduite pour tester les hypothèses d'infiltration au regard de la réponse hydrologique à des événements pluviométriques observés.

##### *3) Analyse des mécanismes de transport en suspension et des suspensions*

Le suivi de la qualité des eaux de ruissellement (mesures chimiques et isotopiques) en début et en fin de crue est un aspect de l'estimation du risque de dégradation de la qualité des eaux d'infiltration et des eaux de ruissellements pour le milieu récepteur. L'évolution de la qualité des eaux d'infiltration au cours d'un événement hydrologique sera évaluée par un suivi de la conductivité électrique des eaux souterraines dans un piézomètre de la nappe de base.

## O2.2 Développement de modèles de simulation hydrologique à fine échelle spatio-temporelle

Sur la base des approches de modélisation conceptuelle GR développées à IRSTEA (Perrin et al., 2003 ; Pushpalatha et al., 2011 ; Lobligeois, 2014 ; Ficchi, 2014), l'objectif de cette action sera de mieux comprendre la dynamique hydrologique des bassins versants étudiés. Pour cela, on mettra en place une modélisation hydrologique semi-distribuée à fine résolution spatiale (maille de l'ordre du km<sup>2</sup>) et temporelle (typiquement horaire ou 6 minutes) des bassins étudiés. Cette fine échelle permettra notamment de tenir compte au mieux de l'hétérogénéité spatiale des précipitations (éventuellement obtenue par l'information de radars météorologiques) et des caractéristiques physiques très hétérogènes des bassins, ainsi que de valoriser les sorties à échelle fine qui seront produites par les modélisations atmosphériques. Si des bassins versants non jaugés d'intérêt sont ciblés, des approches de transposition pour le paramétrage des modèles seront appliquées (voir par ex. Oudin et al., 2008).

Des analyses de sensibilité seront faites en termes de paramétrage du modèle pour les périodes cycloniques et hors cyclones (ou encore basses eaux/hautes eaux). Cela permettra notamment de prendre en compte la dominance de processus différents suivant les types de conditions météorologiques.

### *Développement de la modélisation*

Diverses options de modélisation hydrologique seront testées et comparées sur des séries passées, en utilisant des critères numériques et graphiques adaptés au contexte hydroclimatologique étudié. Les qualités de robustesse des modèles (capacités à bien simuler des conditions non rencontrées au calage) seront particulièrement analysées. L'analyse sera faite à la fois sur les principaux événements cycloniques et sur les crues communes.

### *Analyse de la sensibilité des résultats au niveau de discrétisation spatio-temporelle, en faisant varier les pas d'agrégation dans l'espace et le temps et en regardant les évolutions des performances du modèle*

Le contexte particulier de l'île de la Réunion devrait donner lieu à des besoins spécifiques en termes de résolutions spatiale et temporelle des modélisations hydrologiques mises en place. On analysera cela en faisant varier les résolutions des modèles et en quantifiant l'évolution des performances (voir par ex. Lobligeois et al., 2014 ; Ficchi et al., 2014). Des résolutions optimales par bassin seront identifiées relativement aux objectifs de gestion des crues ciblés.

### *Analyse de la sensibilité des résultats au type d'information pluviométrique disponible*

Différents capteurs (radars, pluviographes, etc.) étant disponibles, on évaluera la sensibilité des résultats des modèles hydrologiques au choix de ces différentes sources ou à leur combinaison, en lien avec les travaux de l'action 1 Aléas Atmosphériques ;

### *Analyse de la sensibilité des résultats aux conditions cycloniques, en quantifiant notamment les impacts sur le paramétrage des modèles hydrologiques.*

On mettra en place une procédure multi-calage telle que celle proposée par Coron et al. (2012) pour évaluer la robustesse du calage du modèle, et en particulier l'influence de la présence d'événements

cyclonique sur les périodes de calage. Cela pourrait conduire à proposer une approche avec différents jeux de paramètres adaptés à différentes conditions météorologiques.

## **O2.3 Travaux exploratoires sur l'anticipation en temps réel des crues extrêmes**

L'objectif de cette action sera de mettre en place des outils pré-opérationnels d'anticipation des crues. Dans un premier temps, on évaluera sur des séries passées les performances et la robustesse des approches de prévision de crue temps réel développées à Irstea (notamment modélisation GRP ou GR semi-distribué), adaptées à une échelle temporelle fine (travaux en cours de Ficchi, 2014). L'exploitation des données radar sera particulièrement visée. On quantifiera les incertitudes associées aux prévisions par des approches statistiques dédiées permettant de générer des intervalles de confiance sur les débits, pour diverses échéances de prévision. L'intérêt d'approches de post-traitement sera également exploré. On exploitera aussi, si elles sont disponibles, les prévisions probabilistes de pluie pour mieux quantifier les incertitudes liées aux pluies futures, qui seront fortes. Ces travaux pourront être menés à l'échelle de plusieurs bassins versants d'intérêt, présentant des caractéristiques contrastées, sous réserve de disponibilité suffisante des données.

Si les performances le justifient, une analyse de faisabilité de la mise en place d'outils de prévision opérationnels sera réalisée.

### *Evaluation des outils sur les bases de données existantes*

Les modèles robustes de prévision des crues développées à Irstea (Berthet, 2010 ; Furusho et al., 2013) seront évalués sur les séries passées. On quantifiera les capacités d'anticipation, à la fois en termes de délais et de précision sur les pics et volumes de crues associées. Si nécessaire, des améliorations seront recherchées, en particulier en lien avec les résultats obtenus dans l'action A2.2 du WP3 en simulation (paramétrage, résolution spatio-temporelle).

### *Quantification des incertitudes associées et intérêt des approches de post-traitement*

La quantification des incertitudes associées aux prévisions sera réalisée sur la base des incertitudes prédictives constatées en phase de « hindcasting », en suivant l'approche proposée par Bourgin (2014). La quantification des incertitudes associées aux prévisions de pluie sera également réalisée si les historiques de prévision disponibles sont suffisants. On testera enfin l'intérêt de méthodes de post-traitement.

### *Faisabilité de la mise en place d'un système opérationnel de prévision des crues*

La mise en place d'un système opérationnel de prévision des crues requérant un ensemble de conditions, nous évaluerons l'intérêt et la faisabilité du passage en opérationnel du modèle mis au point. L'analyse permettra de dégager les actions prioritaires à mettre en œuvre pour une telle implémentation.

## **Livrables**

### **L2.1 Rapport synthétique présentant l'implantation des stations, le bilan des mesures effectuées et l'analyse des résultats**

## **L2.2 Rapport sur la mise au point des modèles et l'analyse de leur sensibilité à différents aspects et modèles hydrologiques calés sur les bassins versants cibles**

### **L2.3.1 Rapport d'analyse des performances des outils de prévision**

### **L2.3.2 Rapport de faisabilité de mise en place d'un outil opérationnels de prévision des crues en temps réel**

#### **Références :**

- BARCELO A., Analyse des mécanismes hydrologiques en domaine volcanique insulaire tropical à relief Jeune. Apports à la connaissance du bilan hydrique. Massif du Piton de la Fournaise (île de La Reunion), 1996.
- Berthet, L. (2010). Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), AgroParisTech (Paris), 603 p.
- Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M. & Hendrickx, F. 2012. Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. *Water Resour. Res.*, 48, W05552.
- Bourgin, F. (2014). Comment quantifier l'incertitude prédictive en modélisation hydrologique ? Travail exploratoire sur un grand échantillon de bassins versants Thèse de Doctorat, AgroParisTech (Paris), Irstea (Antony), en cours p.
- Ficchi (2014). Temporal scaling in hydrological modelling. Thèse en cours, Irstea.
- Ficchi (2014). Temporal scaling in hydrological modelling. Thèse en cours, Irstea.
- Furusho, C., D. Lilas, C. Perrin, V. Andréassian, L. Coron, J. Peschard, L. Berthet, P. Ansart and C. Loumagne (2013). Prévision des crues par modélisation hydrologique. L'observation long terme en environnement. Exemple du bassin versant de l'Orgeval. Versailles, Quae Editions: 63-73.
- Lobligeois, F., V. Andréassian, C. Perrin, P. Tabary and C. Loumagne (2014). When does higher spatial resolution rainfall information improve streamflow simulation? An evaluation using 3620 flood events. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18(2): 575-594.
- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C. & Le Moine, N. 2008. Spatial proximity, physical similarity and ungaged catchments: confrontation on 913 French catchments. *Water Resour. Res.*, 44, W03413, doi:10.1029/2007WR006240.
- Perrin, C., C. Michel and V. Andréassian (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279(1-4): 275-289, DOI: 10.1016/S0022-1694(1003)00225-00227.
- Pushpalatha, R., C. Perrin, N. Le Moine, T. Mathevet and V. Andréassian (2011). A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation. *Journal of Hydrology* 411(1-2): 66-76, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.1009.1034.

## ACTION 3: Aléas Littoraux

### Participants:

Coordinateur de l'action	BRGM
Partenaires de l'action	BRGM, Espace-Dev, ENTROPIE, UMS 3365 (OSU-R), IUEM (UBO/LDO)
Prestations externes	Analyse des données de la caméra hyperspectrale

### Moyens mis en oeuvre:

Personnel Permanent		
Nom	Fonction	Organisme de rattachement
Chateauminois Eric	Ingénieur	BRGM
Pedreras Rodrigo	Ingénieur	BRGM
Buttarazzi Ilaria	Technicien	BRGM
Le Cozannet Gonéri	Chercheur	BRGM
Pennober Gwenaëlle	Professeur	ESPACE-Dev
Cuet Pascale	Maître de Conférence	ENTROPIE
Delacourt Christophe	Professeur	IUEM (Université de Bretagne Occidentale, Laboratoire des Domaines Océaniques)
Cordier Emmanuel	Ingénieur d'Etudes	OSU-R

Personnel Contractuel		
Nom	Fonction	Organisme de rattachement
Recrutement à venir	Action 3 Aléas Littoraux: IGE BAP E ou BAP C pour acquisition, traitement et analyse des données	ESPACE-Dev
Recrutement à venir	Action 3 Aléas Littoraux: IGE BAP A pour acquisition et traitement de données	ENTROPIE
Recrutement à venir	Action 3 Aléas Littoraux: Ingénieur pour acquisition et traitement des images hyperspectrales	IUEM

### Contexte

Les objectifs généraux de cette Action 3 sont :

- 1) Améliorer la connaissance des variations locales du niveau marin et des scénarios probabilisés d'évolution future

- 2) Améliorer la compréhension des effets cycloniques et du changement climatique sur les aléas littoraux
- 3) Analyser et intégrer la fonctionnalité des barrières récifales dans la prise en compte des aléas
- 4) Evaluer et diminuer la vulnérabilité des enjeux sur la bande littorale (adaptation)

La première action concernera une analyse des scénarios probabilisés d'élévation du niveau de la mer à l'échelle de la Réunion. Les objectifs suivants se déclineront sur deux zones « atelier de travail » : la baie de Saint Paul en mer ouverte, et le littoral d'arrière-récif (Saint Gilles et l'Ermitage).

## Objectifs et plans de travail

### O3.1 Scénarios d'élévation du niveau de la mer à la Réunion

Le niveau de la mer ne s'élève pas de manière uniforme. Il varie régionalement du fait du réchauffement inhomogène des eaux de surface de l'océan et de déformations de la terre solide, liées en particulier à la fonte des glaces actuelles et depuis la dernière glaciation (Meyssignac et Cazenave, 2010). A ces processus peuvent se superposer des mouvements verticaux du sol à la côte : si le sol s'affaisse (subsidence), le niveau marin monte plus rapidement, alors qu'en cas de soulèvement (surrection), l'élévation du niveau marin relativement à la côte est plus modérée.

Une première analyse de données de nivellement à La Réunion a montré que l'île était sujette à ce type de mouvements verticaux. Dans certains cas (ex. Sainte Suzanne, figure 11), l'élévation du niveau de la mer s'élèvera probablement plus rapidement. Au contraire, l'élévation du niveau de la mer pourrait être partiellement compensée par les surrections du sud-est de l'île. Il est donc important d'étudier et de prendre en compte ces processus de mouvement du sol pour construire des scénarios d'élévation du niveau marin réalistes, relativement à la côte.

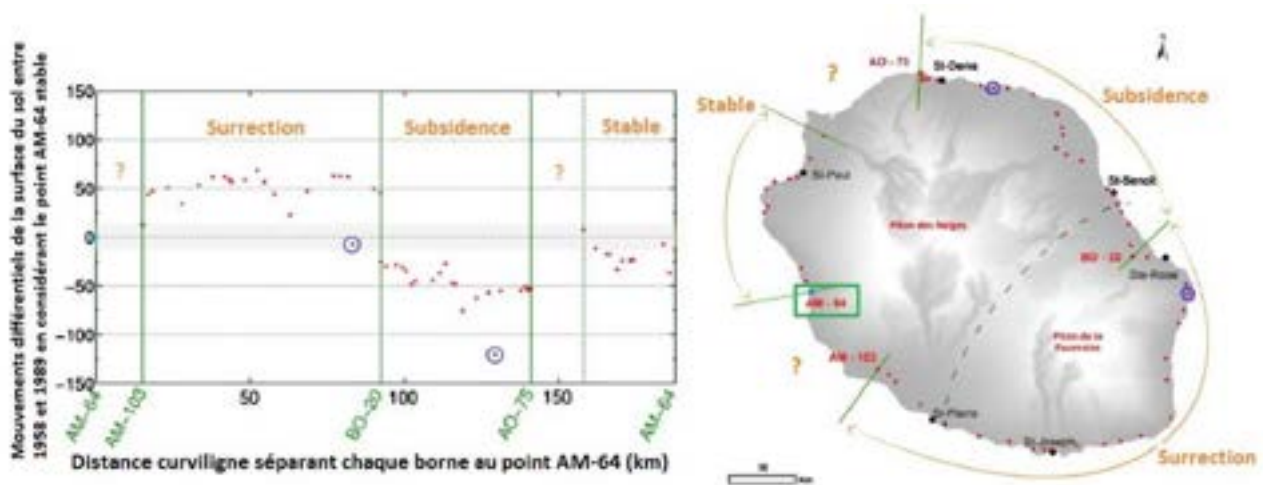


Figure 11 : Évaluation régionale des mouvements verticaux de la surface du sol à La Réunion, réalisée en comparant deux campagnes de nivellement menées par l'IGN en 1958 et 1989. Sont mises en évidence des zones en subsidence, où le niveau de la mer s'élève plus rapidement au Nord-Est, et des zones en surrection au sud-est, où il s'élève moins rapidement. Ces dernières zones correspondent au massif actif du Piton de la Fournaise, ce qui suggère un mouvement du sol d'origine volcanique. Sur la même période, le niveau de la mer s'est élevé d'environ 1 mm/an à La Réunion (Palanisamy et al., 2014). Ainsi, le niveau de la mer est resté stable sur la partie sud-est, alors qu'il s'est élevé de 2 mm/an au Nord-Est. Des observations



*complémentaires sont nécessaires pour savoir si ces mouvements du sol sont linéaires dans le temps ou non. Si c'est le cas, ces mouvements devront être pris en compte pour évaluer l'élévation du niveau marin future locale à La Réunion. Source : Planton et al., 2015, d'après Bulteau et al. (2015), données BRGM/IGN.*

Par ailleurs, des scénarios régionalisés de l'élévation du niveau de la mer commencent à être publiés (GIEC, 2013 ; Slangen et al, 2014). Ces scénarios donnent une estimation moyenne de ce que pourrait être l'élévation du niveau de la mer à La Réunion. Pour estimer la durée nécessaire afin que le niveau de la mer dépasse certains seuils critiques, cette valeur moyenne doit être complétée de manière probabiliste. Ceci est rendu possible par des travaux récents (Kopp et al., 2014 ; GIEC, 2013). En utilisant l'ensemble de ces méthodes et données sur le site de La Réunion, il deviendra possible de répondre à des questions telles que : pour quelles périodes de temps a-t-on plus de 30% de chances que le niveau de la mer ne dépasse pas 1m sur le site de Sainte Suzanne ou de Saint Paul ? Quelles sont les incertitudes associées ? L'enjeu de la tâche 3.1 est de répondre à ce type de questions sur tout le littoral de La Réunion et pour tout le XXIème siècle.

### **Objectif :**

L'objectif de cette tâche est de fournir, pour la première fois, des scénarios d'élévation du niveau de la mer le long de la côte de La Réunion. Cette tâche permettra de répondre aux questions suivantes : comment évoluera l'élévation du niveau de la mer le long des côtes de la Réunion ? Quelles sont les incertitudes associées ? A partir de quelles dates estime-t-on que l'élévation du niveau de la mer dépassera certains seuils (exemple : 50cm, 1m), pour différents sites critiques le long de la côte ?

### **Moyens**

Dans un premier temps, les observations de mouvements verticaux du sol obtenus par nivellement seront revisités. Pour cela, nous utiliserons le réseau de GPS permanents installé à La Réunion. Ces données géodésiques complémentaires permettront d'examiner la linéarité des mouvements identifiés par l'analyse des données de nivellement. Elles permettront également d'examiner si des mouvements plus locaux doivent être pris en compte. Dans un second temps, ces niveaux critiques seront identifiés sur le terrain pour des sites emblématiques. Par la suite, des scénarios d'élévation du niveau de la mer régionalisés seront développés. Ces scénarios seront développés en utilisant les scénarios du GIEC et en appliquant les méthodes les plus récentes, développées dans le cadre du groupe de travail « Sea-Level rise » du World Climate Research Programme, auquel le BRGM participe. Ce groupe de travail, piloté par l'Université de Hambourg et auquel le BRGM contribue, développe des méthodes pour réaliser des scénarios d'élévation du niveau marin régionalisés et probabilisés pour le XXIème siècle. Ces scénarios permettront d'identifier les périodes de temps critiques (2050 2070, 2100...) à partir desquelles des mesures d'adaptation (relocalisation, protection) devront être mise en œuvre pour les sites d'intérêt considérés à La Réunion. Cette première approche, mise en œuvre à l'échelle régionale, sera complétée par des scénarios plus précis (modélisant finement les processus hydrodynamiques côtiers) dans la tâche 3.2.2.

## O3.2 Les littoraux ouverts : étude des flux et mouvements sédimentaires de grande ampleur



Figure 12 : Grande rade de Saint Paul en mer ouverte

### O3.2.1 Apports solide événementiels et turbidité de surface

Lors des passages des cyclones DUMILE en janvier 2013 et de BEJISA en janvier 2014, la station SEAS-OI a été mobilisée sur le territoire de La Réunion par :

- L'UMR Espace-Dev pour produire une information qualitative normalisée dans le cadre du suivi des turbidités des eaux de surface dans le cadre du programme CHARC (Caractérisation de l'Habitat ...)
- le BRGM qui a expérimenté l'utilisation des données d'imagerie spatiale dans le cadre d'un RETEX cyclonique (Bejisa) réalisé pour le compte des services de l'état.

Ces études ont permis d'explorer le potentiel de l'imagerie Optique Haute résolution produites à SEAS-OI pour caractériser l'impact à la côte d'un cyclone sur la modification du trait de côte et produire une information sur les panaches de turbidité associés. L'analyse diachronique d'images encadrant un événement météorologique dans un intervalle de temps court (1 à 3 semaines) a permis la caractérisation de certains impacts :

- l'analyse a montré des modifications événementielles du trait de côte de grande ampleur sur certains secteurs, et notamment au niveau de l'embouchure de la rivière des galets (progradation de 80m vers la mer) et au niveau de la pointe des galets (recul du cordon littoral de 50m).
- De même la permanence des panaches de turbidités de plusieurs kilomètres a pu être observée.

Bien que l'intensité du cyclone BEJISA ne soit pas si exceptionnelle, ces constatations montrent l'existence de mouvements de matériaux de grande ampleur sur les littoraux exposés aux houles du large. Ces apports de matériaux en provenance des bassins versants contribuent à alimenter les stocks littoraux. Ces stocks sont ensuite repris par les houles australes et cycloniques pour alimenter le transit littoral vers le littoral du Port et vers le Sud dans la baie de Saint Paul.

Compte tenu du contexte délicat d'exposition des enjeux de la ville du Port (zones SEVEZO, problématiques de dragage portuaires...) et de la commune de Saint Paul (zone urbaine dense exposée à l'érosion côtière), la connaissance de ce terme source d'approvisionnement en matériaux des zone littorales apparait comme un élément de connaissance important pour appréhender et suivre l'évolution de ces problématiques d'érosion littorale dans le temps.

**Objectif :** l'objectif de cette action est de qualifier et quantifier les apports solides évènementiels dans le milieu marin au droit des estuaires. Ce travail permettra par ailleurs d'initier la calibration d'un indicateur de suivi des apports solides par approche satellite

**Méthode / Moyens :**

Deux études vont être réalisées :

- 1) Caractérisation des panaches de turbidités associées à l'estuaire de la rivière des galets par imagerie optique haute résolution (Sentinel 2) et SPOT5 sur les données historiques. A l'aide d'un spectromètre de terrain les données de réflectance seront calibrées. L'objectif est de finaliser la chaîne de traitement initiée dans le cadre du programme CHARC pour produire une information quantitative sur la turbidité de surface associée aux estuaires.
  
- 2) Mise en place d'un suivi quantitatif et volumétrique des apports de matériaux au niveau de l'estuaire de la rivière des galets lors des événements énergétiques importants couvrant la période du projet. L'objectif sera de quantifier
  - Les volumes transportés vers le littoral lors des crues et déposés sur les parties sous-marines du cône alluvial
  - Les volumes repris et transportés par les houles australes et cycloniques pour alimenter le transit littoral

Les volumes et mouvements de matériaux sur la partie sous-marine seront mesurés à l'aide d'un sondeur multifaisceaux. Les levés seront réalisés après les événements morphogènes (crue importante/cyclone/houle australe) qui interviendront en cours de projet, avec un maximum de 3 campagnes SMF prévues sur les deux ans. L'analyse des données contribuera à déterminer la profondeur de fermeture du dépôt alluvial. Un travail d'analyse diachronique des images en provenance de la station SeasOI sera également mené afin de mettre en corrélation les déplacements du trait de côte et les volumes d'apport de matériaux.

### **O3.2.2 Etude des phénomènes érosifs et des dynamiques sédimentaires littorales : flux/bilan**

Les équilibres morfo-sédimentaires des littoraux exposés aux houles du large sont fortement contraints par les événements énergétiques qui transportent des volumes importants de matériaux entre les parties émergées et immergées des cordons littoraux. Pour la baie de Saint Paul, les houles australes ont un effet de rechargement des plages, les houles cycloniques ont un effet au contraire érosif.

La baie de Saint Paul est très fortement exposée à ces problématiques. Les projections centennales de la position du trait de côte sur le littoral montre que l'urbanisation arrière littorale pourrait être fortement impactée dans les décades à venir du fait de ces problématiques d'érosion côtière.

De nombreuses études ont déjà été réalisées sur la baie de Saint Paul et permettent d'appréhender les phénomènes et processus qui s'y déroulent. Ces études posent un socle intéressant de connaissance du milieu, mais n'apportent pas d'éléments quantitatifs sur les mouvements de sédiment de grande ampleur dont la baie fait l'objet lors des événements énergétiques majeurs. Cette information de quantification des flux apparaît comme un élément important pour avancer sur la compréhension des processus littoraux, et

permettrait d'ouvrir de nouvelles perspectives dans les méthodes descriptives d'évolution des littoraux à long terme : passer d'une description linéaire d'évolution du trait de côte, à une description de l'évolution des stocks sédimentaires et de leurs équilibres actuels et futurs.

Par ailleurs, une meilleure connaissance de ces mouvements sédimentaires permettra d'appréhender le volet adaptation développé dans le WP4 au travers de l'identification des gisements potentiels de sables éventuellement exploitables dans le cadre des solutions de rechargement massif des plages littorales.

**Objectifs :** Quantification des flux sédimentaires en mer ouverte (sources, puits, flux) dans différentes configurations de forçage (cycloniques/houles australes). Etude de la dynamique des barres d'avant côte. . Renforcement du réseau d'observation côtière de la Réunion.

**Méthode / Moyens :**

Cette action propose d'étendre le suivi des mouvements sédimentaires initié dans l'action A3.1.1 dans la baie de Saint-Paul. L'objectif sera de caractériser les déplacements de matériaux lors de deux types d'évènements :

- Les houles cycloniques qui ont tendance à générer une érosion des cordons littoraux et des plages émergées
- Les houles australes qui ont tendance à reconstituer les cordons émergés

Il est proposé de mettre en place un suivi quantitatif des déplacements sédimentaires et des dynamiques des barres d'avant côte littorales. Le suivi de la partie sous-marine sera réalisé à l'aide de campagnes mono faisceau : 6 campagnes programmées sur 2 ans.

Le financement du projet permettra par ailleurs d'investir dans des équipements permettant d'améliorer la précision des campagnes d'acquisition réalisées au sondeur mono-faisceau (centrale inertielle et logiciel d'acquisition et de traitement des données). Ces investissements seront par la suite valorisés dans le cadre de l'observatoire OBSCOT à la Réunion.

Le suivi des plages émergées sera réalisé à l'aide de levés terrestres DGPS traditionnel. Une méthode de levé du MNT par stéréophotographie depuis un drone sera expérimentée et éventuellement généralisée pour couvrir une surface plus importante à coût constant. Ces investigations permettront de produire des MNT de la plage dans ces compartiments sous-marins et aérien et de couvrir de grandes zones, ce qui permettra d'identifier et quantifier les échanges entre les différents compartiments du cordon littoral et de mieux appréhender la dynamique des barres d'avant côte sur le site.

Les levés seront réalisés après chaque évènement morphogène (cyclone/houle australe), dans la limite de 5 campagnes sur les deux ans. Les zones d'arrachement et de dépôt dans la baie seront identifiées, localisées et quantifiées.

### O3.3 Littoraux coralliens : bilan des carbonates et budgets sédimentaires

Les plages biodétritiques de type plages coralliennes, de par l'origine des sédiments (coquillages, débris coralliens) qui les forment, sont celles qui présentent la plus grande sensibilité aux changements climatiques. Outre l'augmentation attendue des hauteurs d'eau et de l'intensité des événements paroxysmaux, qui vont affecter l'ensemble des plages, ces dernières risquent une altération de leur budget sédimentaire en raison de l'acidification des océans et de l'augmentation de la température de l'eau de mer. L'acidification altérera le potentiel de calcification des organismes bio-constructeurs (coraux principalement, mais aussi algues calcaires) et l'augmentation de la température aura des conséquences sur le taux de recouvrement corallien dont dépend le budget sédimentaire. La diminution de la croissance et du taux de recouvrement coralliens se traduira par une baisse de l'altitude de la barrière corallienne et donc de sa fonction de protection des côtes. En outre, à La Réunion, l'augmentation des forçages liés au changement climatique se conjugue à une anthropisation croissante et à une augmentation des enjeux socio-économiques dans les zones d'arrière-récif (plage, dune, arrière-dune).



Figure 13 : Littoral récifal de l'Ermitage (Saint Gilles)

#### O3.3.1 Cartographie des habitats par analyse hyperspectrale

#### O3.3.2 Bilan des carbonates

Cette partie du projet porte sur l'amélioration des connaissances concernant le bilan des carbonates (calcification *nette*, i.e. précipitation de  $\text{CaCO}_3$  par les organismes bio-constructeurs diminuée des quantités de  $\text{CaCO}_3$  dissoutes par différents mécanismes) et les budgets sédimentaires actuels, en relation avec la quantification du rôle dissipatif des récifs. Dans le cadre d'une approche pluridisciplinaire innovante, l'objectif est d'évaluer le niveau de corrélation de ces différents paramètres dans la perspective d'une évaluation de l'impact de la modification des forçages en contexte de CC.

Depuis les années 70, le bilan des carbonates en milieu récifal est calculé sur la base de mesures chimiques dans l'eau au contact des communautés biologiques. L'estimation des quantités de  $\text{CaCO}_3$  déposées varie d'un ordre de grandeur selon les récifs étudiés (de 22 à  $331 \text{ mmol CaCO}_3 \text{ m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ ), reflétant principalement des différences dans la structure des communautés benthiques (Falter et al. 2013). Dans l'hypothèse d'un état d'équilibre entre facteurs de construction et de destruction de la barrière récifale, le bilan des

carbonates constitue une estimation des quantités de  $\text{CaCO}_3$  potentiellement mobilisables pour alimenter le compartiment sédimentaire, soit sous l'action mécanique des vagues (principalement durant tempêtes et cyclones), soit du fait de l'activité érosive de certains organismes (éponges, oursins, certaines espèces de poissons). Pour mieux appréhender le budget sédimentaire (engraissement des plages vs. pertes sédimentaires à l'échelle annuelle et/ou lors d'évènements extrêmes), il est donc en premier lieu nécessaire d'analyser le potentiel de production de carbonates par le système récifal, et en particulier d'améliorer notre connaissance de sa variabilité spatiale, fonction de la nature des principaux habitats (platier récifal, zone sédimentaire d'arrière-récif) ainsi que de l'état de santé du milieu (dominance corallienne vs. dominance algale sur le platier par exemple). S'il existe des données relativement récentes sur le transport sédimentaire à La Réunion (Cordier 2007), les données concernant le bilan des carbonates sont anciennes (Mioche et Cuet 1999 ; 2002) ou limitées dans le temps et l'espace (Chauvin 2013).

**Objectif :** évaluer la quantité totale de  $\text{CaCO}_3$  produite annuellement par l'écosystème récifal sur le site pilote de l'Hermitage-La Saline.

### **Méthodologie / Moyens :**

Une méthode Eulérienne de mesure de l'activité métabolique des communautés récifales sera utilisée sur le platier récifal. La méthode est basée sur l'utilisation d'instruments de mesure ou d'échantillonnage autonomes implantés sur deux stations positionnées en amont (sur la pente externe) et en aval (à la limite de la zone d'arrière-récif) du courant dominant. L'acquisition des données (lumière, vitesse et direction des courants, température, salinité, paramètres du système des carbonates) est réalisée à haute fréquence sur le cycle nyctéméral (au minimum toutes les 30 minutes) pour permettre une description de la variabilité journalière. La variabilité intra-saisonnière (principalement fonction des conditions d'éclairement) et saisonnière (fonction des conditions d'éclairement et de température, ainsi que des variations dans la structure des communautés, plus particulièrement algales) sera appréhendée dans le secteur du Trou d'Eau (La Saline) en réalisant les mesures sur une quinzaine de cycles nyctéméraux complets. D'autres secteurs du récif caractérisés par des structures de communautés contrastées seront étudiés sur des périodes de temps plus courtes (24 à 48 heures). Des mesures en enceintes benthiques ou dans des chambres d'incubation placées sur le terrain permettront d'évaluer la contribution de compartiments spécifiques de l'écosystème (sédiments, substrats durs non coralliens), avec une comparaison de sites plus ou moins anthropisés.

Pour évaluer la quantité totale de  $\text{CaCO}_3$  produite annuellement par l'écosystème récifal sur le site pilote de l'Hermitage-La Saline, les données seront ensuite combinées à une cartographie des habitats par imagerie hyper-spectrale. Au cours des dernières années, l'imagerie hyper-spectrale a démontré son potentiel pour la caractérisation des environnements récifaux (dominance corallienne, dominance algale, sédiments). Plusieurs programmes menés à la Réunion ont permis à la fois d'acquérir des jeux de données hyper-spectraux aériens multi-temporels, des mesures *in situ* associées et des codes de traitement spécifiquement adaptés au contexte Réunionnais. Ces projets : Litto3D, Hypercoral, HYScores, ont largement impliqué différents acteurs de La Réunion, plusieurs laboratoires de l'OSUR (Espace-Dev, Géosciences, ENTROPIE), SEAS-OI, IFREMER, la DEAL, et l'Office de l'eau. Le potentiel de l'imagerie hyper-spectrale concerne à la fois la restitution de données bathymétriques précises et de la turbidité, et la cartographie fine des fonds marins ainsi que son évolution temporelle. Un des points bloquants de cette technique est le coût d'acquisition. Cependant, dans le cadre de l'Equipex Critex un drone hyper-spectral a été développé conjointement par l'université de Brest et de Lyon. Ce drone sera utilisé dans le cadre de ce projet. Cependant, aucun type d'imagerie optique ne permet aujourd'hui de différencier les substrats d'Algues molles et d'algues calcaires, ce qui impose la nécessité de déployer un protocole spécifique.. Ainsi,

deux campagnes de mesure seront planifiées, l'une en saison chaude et l'autre en saison fraîche, pour améliorer la discrimination de ces deux types de peuplements, grâce à la mise en évidence d'une variabilité saisonnière (pic de production de biomasse des algues molles en saison chaude). Les données acquises par drone hyper-spectral permettront également de restituer l'évolution de la turbidité et de la bathymétrie des zones.

### **O3.3.3 Budgets sédimentaires**

La morphologie des plages récifale de l'ouest de La Réunion fait depuis 2012 dans le cadre de l'OSU-Réunion un suivi labellisé dans le cadre du SOERE trait de côte (réseau d'observatoire labellisé par l'Allenvi) et du SNO (Service National d'observation) Dynalit (sites ateliers labellisés par l'INSU). L'objectif de ce premier site atelier en Outre-Mer est de poursuivre l'acquisition de séries temporelles historiques engagés par le LGSR depuis 1994, en l'inscrivant dans une perspective de long terme, de mettre en œuvre des moyens de mesures modernes pour une observation intégrée à la fois de l'évolution de l'objet «trait de côte » et des paramètres dynamiques fondamentaux de forçage. Les données de topographie littorale, profils de plages et Modèles Numériques de Terrain (MNT), constituent des informations de base pour l'élaboration de modélisations numériques ou même physiques afin d'engager des recherches prospectives orientées vers le devenir des systèmes littoraux et les risques associés en contexte de changement climatique.

Les opérations conduites à La Réunion lors de ce projet comportent à ce jour des campagnes acquises par GPS différentiel ou par TLS (Terrestrial Laser Scann). Le site atelier et la façade ouest de l'île bénéficie en outre des données altimétriques issues des campagnes du programme « Litto3D© ». Elles sont en cours de bancarisation sur le site WEB du SNO Dynalit<sup>2</sup>.

Ces suivis permettent d'approcher la cinématique côtière saisonnière et interannuelle et de mesurer l'impact à la côte d'un cyclone.

**Objectif :** L'objectif de cette action est à présent de s'intéresser à la cinématique côtière versus budget sédimentaire par une analyse granulométrique et de la nature des sédiments présents sur la plage. L'analyse des paramètres granulométriques et de nature des sédiments renseigne sur la provenance, les déplacements et les conditions de dépôt des particules sédimentaires (Friedman, 1979, Bui et al., 1990). Si le tamisage est classiquement utilisé pour caractériser les différentes familles de sédiments (Weydert, 1971 ; Rivière, 1977, Wentworth (1922) combiné à une caractérisation de la forme des grains de sable par microscopie électronique, ces approches sont peut adaptées à la morphologie des sables oblongues et fortement digités qu'ont souvent les sables coralliens et aboutissent souvent à une surestimation ou sous-estimation du grain moyen (MZ) (Berthois et Aubert, 1951) et donc de l'énergie cinétique à la côte, et ne renseigne pas sur l'âge des stocks en présence. Des approches par traitement d'image permettraient une meilleure approche de la spécificité de ce matériel biodétritique et de produire une information sur le tri de l'échantillon, le grain moyen et de rechercher des indicateurs de l'âge du stock par l'étude des formes des grains. Le matériel identifié comme récent sera à mis en relation avec le potentiel de calcification observé.

**Méthodologie / Moyens :**

---

<sup>2</sup> <http://dynamit.indigeo.fr/geocms/maps/dynamit-jtnvimml>

3 phases de traitement sont envisagées :

- Séparation de l'échantillon par famille granulométrique,
- Acquisition d'image à l'aide d'une caméra de microscopie électronique (LGSR/entropie) à différents zoom ;
- Traitement d'image sous le logiciel Ecognition (Espace-dev) pour l'extraction d'informations sur la nature des grains de sable (signature spectrale) ; de la taille (dérivée de la surface), de la forme (rapport largeur, longueur), du caractère digité de la forme (longueur du contour/taille). Cette dernière information devrait permettre d'approcher l'âge du stock par le caractère plus ou moins érodé des grains en présence. Les échantillons seront prélevés le long des 4 profils topographiques de référence sur le site Saline Ermitage.

### **O3.4 Submersion et érosion événementielle: fonctionnalité des platiers récifaux, vulnérabilité et adaptation**

A la Réunion, compte tenu de l'intensité des phénomènes naturels et de la géomorphologie côtière, les phénomènes d'aléas submersion marine et d'érosion côtière sont fortement liés et interdépendants.

Sur les zones récifales, les platiers jouent un rôle important en dissipant l'énergie des houles du large avant que celles-ci ne pénètrent dans la DAR et viennent déferler sur les plages.

Les processus de submersion marine sont généralement causés par le franchissement des vagues au-dessus des cordons littoraux, envoyant ainsi de grandes quantités d'eau en arrière et inondant les zones habitées. Avant de franchir ces cordons, l'impact du déferlement des houles sur le littoral peut entraîner des phénomènes d'érosion important sur le cordon littoral. La conjonction de ce phénomène, associé au swash des plus fortes vagues, peut alors entraîner la destruction ou la détérioration des ouvrages situés en haut ou en arrière plage.

La gestion de ces ouvrages est une préoccupation récurrente pour les riverains. En effet, les premiers ouvrages impactés ont généralement une fonction de délimitation ou clôture des parcelles privatives et sont donc situés en front de mer. Les riverains prêtent ainsi parfois à leurs ouvrages une fonction de protection contre la submersion marine et l'érosion, en oubliant souvent de considérer l'impact aggravant que ces ouvrages peuvent entraîner sur ces phénomènes de submersion ou sur les problématiques d'érosion du trait de côte et de transit sédimentaire.

Ce type de problématique se rencontre notamment au niveau de la baie de Saint-Paul et dans l'Ouest, au niveau des plages récifales, où la dégradation d'ouvrages côtiers est régulièrement constaté (nombreux dégâts sur le front de mer de la baie de Saint Paul lors du cyclone Gamède en 2007, effondrement de l'esplanade des Roches noires lors de Felleng en 2013...)

Compte tenu des projections actuelles sur l'élévation du niveau de la mer et sur les dynamiques de recul du trait de côte, on peut considérer que ce type d'évènements sera dans l'avenir de plus en plus fréquent. Aujourd'hui déjà, lorsqu'un ouvrage est détérioré, la question de sa reconstruction se pose : faut-il reconstruire à l'identique ? Quelles solutions alternatives existe-t-il ? Quelle en serait l'efficacité ?

Cette action se propose d'explorer les questions liées à la problématique de l'érosion événementielle des cordons littoraux lors des événements extrêmes, et celles liées à la vulnérabilité des ouvrages littoraux vis-à-vis de cette problématique. L'analyse intégrera les résultats de l'action liée aux projections probabilisées d'élévation du niveau marin liés aux changements climatiques. Les outils développés devront permettre



d'explorer différentes solutions de reconfiguration des espaces de haut de plage (reconstitution dunaire, nouveaux types d'ouvrages, configuration des espaces verts...) afin d'évaluer leur efficacité et leur niveau de résilience par rapport à des ouvrages traditionnels.

### **Objectifs :**

- Affiner la compréhension de l'impact du changement climatique sur les aléas submersion et érosion.
- Analyse de la vulnérabilité des ouvrages littoraux. Evaluation de mesures d'adaptation, réduction de la vulnérabilité des ouvrages et des zones littorales.

### **Méthode / Moyens :**

Un modèle numérique hydro/morphodynamique (Swash ou Xbeach) sera mis en place sur deux sites pilotes : un site en mer ouverte en baie de Saint Paul et un site en milieu récifal (Ermitage ou Trou d'eau douce). Ce type de modèle permet la modélisation simultanée des processus hydrodynamiques (propagation des houles jusqu'à la côte) et morphodynamiques (réponse morphologique des cordons littoraux). Ils sont donc capables de modéliser les processus d'érosion des cordons littoraux lors des événements extrêmes, et d'évaluer leurs conséquences du point de vue hydrodynamique. Ces modèles seront calibrés sur des événements historiques ayant entraînés des dégâts sur le littoral (Dina, Gamède ou les événements de houles australes de 2007 par exemple) et par rapport à des dégâts réellement observés.

Sur les zones récifales, le modèle sera paramétré en intégrant les données de répartition spatiale et les caractéristiques propres des récifs coralliens actuellement présents sur la barrière (données issues des images hyper spectrales). Chaque typologie de corail sera caractérisée par une rugosité hydrodynamique propre. Le modèle intégrera également les données bathymétriques issues des analyses hyperspectrales.

Sur les zones récifales, les modèles seront calibrés à partir de données hydrodynamiques acquises par une caméra vidéo (pour la partie lagonaire). L'usage de caméra est une méthode peu coûteuse et facile à mettre en œuvre par rapport aux méthodes classiques de déploiement de capteurs in situ (Almar, 2009 ; Almar et al., 2012). Le dispositif qui sera déployé au second semestre 2014 sur l'Ermitage consiste dans l'utilisation d'une caméra vidéo fixée en hauteur (fixé sur un bâtiment ou sur un mât par exemple) et orientée vers le plan d'eau. La caméra aura pour objectif de collecter des images sur l'état de mer et le contact terre/mer. Une collaboration entre l'OMP Toulouse et le Laboratoire Domaine Océanique (UMR CNRS 6538- Université Bretagne Occidentale) permettra d'adapter les codes opérationnels sur des plages métropolitaines au contexte Réunionnais. Il sera possible de déduire des paramètres de plan d'eau tel que la hauteur et la période des vagues, la courantologie et la bathymétrie des fonds.

Une fois calibrés, ces modèles seront exploités sur deux échelles de temps différentes :

- **Sur l'état actuel :**

L'objectif sera de qualifier le niveau de vulnérabilité de différents types d'ouvrages actuellement existants sur le littoral Réunionnais. Le projet IMOCOR (2015) a permis un recensement des ouvrages présents sur le cordon littoral sur le littoral Ouest de la Réunion. Cette base de données sera exploitée pour déterminer les configurations d'aménagement représentatives des deux sites pilotes :

- Nature des ouvrages, implantation, distance du trait de côte, altitude d'implantation...
- Profils topo/bathy sur lesquels ces ouvrages sont implantés
- Aménagements et configurations de l'arrière côte : présence ou non d'un enjeu (habitation), distance...

Ces configurations type seront ensuite exploitées par le modèle hydro/morphodynamique pour évaluer leur niveau de vulnérabilité et déterminer à partir de quels niveaux de forçage ces ouvrages risquent de subir différents niveaux d'aléas (détérioration, franchissement, destruction complète..). Sur cette base, les différentes configurations d'aménagement seront hiérarchisées sur la base de différents critères de vulnérabilité qui seront définis en cours d'étude. Ce travail permettra d'identifier les configurations les moins vulnérables.

Suite à cette analyse de vulnérabilité, des propositions concrètes seront proposées pour tenter de diminuer la vulnérabilité des structures et des enjeux aux aléas, à l'échelle des parcelles, des ouvrages et des bâtiments. Ces propositions pourront être d'ordre structurelle (modification de la nature et/ou de l'implantation des ouvrages) ou sur l'organisation des espaces situés entre les ouvrages et les premiers enjeux à proximité (habitations).

Ces différentes proposition d'adaptation seront analysées et comparées aux configurations existantes afin d'évaluer leur efficacité du point de vue de la protection des enjeux en arrière. Cette partie exploratoire, permettra d'aborder la problématique sur le volet de l'adaptation.

- **Sur une projection future d'élévation du niveau de la mer**

Ces configurations type d'aménagement seront ensuite exploitées par le modèle numérique hydro/morphodynamique en les exposants à des conditions de forçages probabilisés (action 3.0) tenant compte d'hypothèses d'élévation du niveau de la mer liées au changement climatique, et ceci à différentes échéances.

L'objectif sera de déterminer, pour chaque configuration type d'aménagement, une occurrence (fréquence de retour probabiliste) liée à différents types de phénomènes : début d'affouillement des ouvrages, franchissement des ouvrages, exposition des enjeux en arrière à des aléas... Cette analyse permettra d'apporter un éclairage spécifique sur les notions de durée de vie des ouvrages littoraux, et sur l'évolution future de la vulnérabilité des enjeux littoraux vis-à-vis des changements climatiques.

## Livrables

**L3.1 Rapport : Scénarios régionalisés et probabilisés d'élévation du niveau de la mer le long du littoral de La Réunion, de 2015 à 2100. (BRGM)**

**L3.2.1-A Caractérisation des apports solides dans les cônes alluvionnaires lors des crues morphogènes. Initiation de la calibration d'un indicateur de suivi des apports solides dans le milieu marin. (BRGM)**

**L3.2.1-B Cartographie des panaches de turbidité (turbidité de surface) à partir des données de SEAS-OI programmation d'images encadrant les cyclones (ESPACE-DEV)**

**L3.2.2-A Quantification de l'impact des événements énergétiques sur les phénomènes érosifs de grande ampleur. Analyse de la dynamique des barres d'avant côte. (BRGM)**

**L3.2.2-B Investissement dans du matériel d'observation côtière – valorisation pour l'observatoire OBSCOT (BRGM)**

**L3.3.1 Cartographie des habitats par analyse hyperspectrale (dominance corallienne, dominance algale, sédiments). Différenciation des substrats sans signature spectrale spécifique (algues molles vs. calcaires) par analyse spatiale. (IUEM, Espace-Dev)**

**L3.3.2-A Données issues de l'acquisition (bilan des carbonates) : 1) bilan des carbonates sur le platier récifal : 1 bilan en saison chaude, 1 bilan en saison fraîche sur 4 radiales. 2) bilan des carbonates pour le compartiment sédimentaire et les substrats durs non coralliens : 1 bilan en saison chaude, 1 bilan en saison fraîche sur 2 sites plus ou moins anthropisés. (ENTROPIE)**

**L3.3.2-B Variabilité spatiale et temporelle du bilan des carbonates à l'échelle du site pilote de l'Hermitage/La Saline. (IUEM, Espace-Dev, ENTROPIE)**

**L3.3.3-A Protocole d'acquisition de données sédimentologiques par traitement d'image. (Espace-Dev)**

**L3.3.3-B : Données issues de l'acquisition (budget sédimentaire) : 1) sédimentologie sur les 4 radiales de références 1 fois par an. 2) topographie (mesure des volumes) 2 fois par an et après cyclone. (Espace-Dev)**

**L3.3.3-C Mise en relation des paramètres : bilan des carbonates, forçages météo-marins et budget sédimentaire. (IUEM, Espace-Dev, ENTROPIE)**

**L3.4.1 Mesure des états de mer par suivi vidéo dans le lagon (ESPACE-DEV- IUEM/LDO)**

**L3.4.2 Amélioration de la caractérisation des aléas littoraux par une approche couplée submersion/érosion (BRGM)**

**L3.4.3 Caractérisation de la vulnérabilité des zones littorales sur deux sites pilotes : configuration actuelle et changement climatique (BRGM)**

**L3.4.4 Proposition et évaluation de solutions d'adaptation permettant la diminution de la vulnérabilité des enjeux littoraux (BRGM)**

## **Références :**

Barbalata JC (1996) Analyse diachronique de la dynamique des milieux naturels.

[www.isprs.org/proceedings/XXXI/congress/part7/53\\_XXXI-part7.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXI/congress/part7/53_XXXI-part7.pdf)

Berthois L. et Aubert M., 1951. Les effets de broyage sur les sables à éléments organogènes calcaires au cours des tamisages mécaniques. Annales de la Société Géologique Française, tome 71, p. 172-186

Bui E. N., Mazullo J. et Wilding L. P., 1990. Using quartz grain size and shape analysis to distinguish between aeolian and fluvial deposits in the Dallol Bosso of Niger (West Africa). Earth Surface Processes and Landforms 14:157-166

Chauvin A., 2013. Photosynthèse et calcification sur les récifs coralliens face au changement global et aux impacts anthropiques : du corail hermatypique *Acropora muricata* à l'écosystème. Thèse Université de La Réunion.

Cordier E., 2007. Dynamique hydrosédimentaire du récif frangeant de l'Hermitage: processus physiques et flux sédimentaires. Thèse Université de La Réunion.

Falter J. L., Lowe R. J., Zhang Z. et McCulloch, M., 2013. Physical and biological controls on the carbonate chemistry of coral reef waters: effects of metabolism, wave forcing, sea level, and geomorphology. PLoS one, 8(1), e53303.

Friedman G. M., 1979. Differences in size distributions of populations of particles among sands of various origins. Sedimentology 26:3-32

Lira C. et Pina P., 2007. Sedimentological Analysis of Sands in Pattern Recognition and Image Analysis Volume 4478 of the series Lecture Notes in Computer Science pp 388-395

Mioche D. et Cuet P., 1999. Métabolisme du carbone, des carbonates et des sels nutritifs en saison chaude, sur un récif frangeant soumis à une pression anthropique (île de la Réunion, océan Indien). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science, 329(1), 53-59.

Mioche D. et Cuet P., 2002. Community metabolism on reef flats at La Reunion Island (Indian Ocean): natural versus anthropogenic disturbance. Proc. 9th Int. Coral Reef Symp., Bali, Indonesia (2000), 431-436.

Rivière A., 1977. Méthodes granulométriques, techniques et interprétations. Masson, 167 pp

Wentworth C. K., 1922. A scale of grade and class terms for clastics sediments. Journal of Geology 30:377-392

Weydert P., 1971. Etude sédimentologique et hydrodynamique d'une coupe de la partie médiane du grand récif de Tuléar (S.W. de Madagascar). In: d'Endoume S. M. (ed) Téthys, supplément 1, pp 237-280

## ACTION 4: Capitalisation & Communication

### Participants:

Coordinateur de l'action	UMS 3365 (OSU-R, Université de La Réunion)
Partenaires de l'action	UMS 3365 (OSU-R, Université de la Réunion), Agorah, Sciences Réunion
Prestations externes	

### Moyens mis en oeuvre:

Personnel Permanent		
Nom	Fonction	Organisme de rattachement
Decoupes Rémy	Ingénieur de Recherche	OSU-R
Gabarrot Franck	Ingénieur d'études	OSU-R
Poinen Joyce	Assistant-Ingénieur	OSU-R
Cammas Jean-Pierre	Directeur de Recherche	OSU-R

Personnel Contractuel		
Nom	Fonction	Organisme de rattachement
Recrutement à venir	Action 4 Capitalisation & Communication: ingénieur pour la bancarisation et l'interopérabilité des données (OPEN DATA)	OSU-R
Recrutement à venir	Action 4 Capitalisation & Communication: ingénieur pour la gestion du projet RenovRisk-TRANSFERTS (liens entre Région, Université, laboratoires, ...)	OSU-R

### Prestations de service:

Nom du prestataire	Nature de la prestation	Personne à contacter
Agorah	Bancarisation des données du projet Création et maintenance d'un site web du projet	Delphine De Déa (directrice) Maxime Leclerq (ingénieur)
Sciences Réunion	Vulgarisation & communication sur les résultats du projet Analyse de cas d'étude pour la visite scientifique des infrastructures de recherche du projet	James Caratini (directeur)

## Contexte

En tant que coordinateur, l'OSU-R souhaite dans la mise en oeuvre du projet l'association de l'AGORAH pour la mission de bancarisation des données, au regard des compétences de l'Agence dans les Systèmes d'Informations Géographiques, des données dont l'AGORAH dispose à travers ses différentes bases de données, et de sa mission d'opérer et de gérer le site internet de l'Observatoire Régional des Risques Naturels qui est la plateforme naturelle pour optimiser la diffusion des données et des résultats des projets. Une autre raison est que les compétences urbanistiques de l'Agence font aussi d'elle l'opérateur naturel et cohérent pour la capitalisation des données du projet RenovRisk-IMPACT.

Il est clair que les retombées du programme RenovRisk sur la transformation agile du territoire face aux risques cycloniques et à leurs évolutions futures seront d'autant plus probables et pertinentes que les données et les résultats produits par le projet seront accessibles au plus grand nombre (sphères de la recherche, des acteurs de la société économique et industrielle de l'île, et du grand public en général). La politique de la donnée ouverte (OPEN DATA) est donc celle à mettre en oeuvre, de même que celle du libre accès (OPEN ACCESS) aux rapports et publications scientifiques qui seront produits par le projet.

La diffusion de la culture scientifique associée au projet, l'information sur les métiers et les savoir-faire des techniciens, ingénieurs et chercheurs participants au projet, la prise de connaissance et de conscience de la haute technicité des infrastructures de recherche et de l'instrumentation en place dans le projet sont autant de vecteurs de la culture scientifique et technique qu'il est intéressant de mettre en place à l'échelle du territoire. L'OSU-R souhaite sur ce thème monter une collaboration avec une association pour atteindre cet objectif.

## Objectifs et plans de travail

Pour ce qui concerne la bancarisation des données, la mission sera confiée sous forme d'une prestation de service à l'agence Agorah qui collectera dans ce but toutes les données produites par le projet, créera et gèrera le site web du projet adossé à celui de l'Observatoire Régional des Risques Naturels. Sa mission pour l'extension aux dimensions urbanistiques, d'aménagement du territoire, d'outil d'aide à la quantification des dégâts cycloniques et d'analyse coût/bénéfice aura lieu au sein du programme RenovRisk-IMPACT sur la base de qui aura été construit dans ce projet. La contribution du Service Informatique de l'OSU-R sera de mettre en oeuvre la conformité des jeux de données aux standards européens d'interopérabilité pour en assurer le moissonnage (OPEN DATA), le catalogage, la visualisation et le téléchargement. L'accès libre aux publications scientifiques (OpenAccess) se fera via un référencement au système HAL.

Pour ce qui concerne la diffusion de la culture scientifique, l'objectif sera de définir et de mettre en oeuvre les meilleurs supports et manières opératoires pour diffuser cette culture scientifique. Il peut s'agir de distribution de dépliants, de tenues de stands pendant des événements comme la Fête de La Science, etc L'organisation de quelques visites des infrastructures de recherche pour des publics ciblés (collégiens ou lycéens pendant les phases d'orientation scolaire, acteurs socio-économiques, etc ) pourrait servir de cas d'études pour mettre en place un cadre d'accès de ce public aux infrastructures de recherche. La prestation de service pourrait être confiée à une association comme Sciences Réunion.

## Livrables

### Références :

**L4.1 Bancarisation de toutes les données et résultats produits par le projet. Création et gestion d'un site web hébergeant des données ouvertes (OPEN DATA) et interopérables, et des rapports et publications à accès libre (OPEN ACCESS). (OSU-R et Agorah).**

**L4.2 Fabrication de supports de la diffusion de la culture scientifique associée au projet. Rapport sur la manière opératoire de mettre en place un cadre de visite des infrastructures de recherche par un public ciblé.**

## Budget

Le budget total du projet RenovRisk s'élève à 730 k€. Les détails sont donnés dans le plan de financement rempli à partir de l'application web de l'appel à projet (fichier séparé). Les tableaux ci-dessous donnent la même information mais avec une ventilation en rubriques par actions et partenaires. Une grande partie de l'instrumentation utilisée pour le projet est déjà opérationnelle (parc instrumental de l'observatoire du Maïdo, instruments des stations d'observations soutenues par l'OSU-R). D'autres instruments nécessaires au projet ont pu être financés sur de la contre-partie nationale levée par les remontées des fiches du CPER vers des organismes comme le CNRS qui soutiennent le projet RenovRisk. Le budget présenté ci-dessous ne fait donc pas apparaître de demandes d'équipement, à l'exception d'un seul instrument pour le BRGM.

Budget général du projet RenovRisk-TRANSFERTS (k€)											
		Université / OSU-R					Autres partenaires			Total	TOTAL
		UMS	LACy	LGSR	Espace-Dev	ENTROPIE	BRGM	IRSTEA	IUEM		
Action 1: Aléas Atmosphériques	CDD	20	50							70	80
	Fonc.		10							10	
Action 2: Aléas Hydrologiques	CDD	50						50		100	150
	Fonc.			40				10		50	
Action 3: Aléas Littoraux	CDD				50	50	97		50	247	369
	Fonc.				10	10	91		10	121	
	EQUIP						9				
Action 4: Capitalisation & Communication	CDD	75								75	122
	Fonc.	47								47	
Total		192	60	40	60	60	198	60	60		
TOTAL		412					318				730

### RESSOURCES HUMAINES (CDD)

	CDD	Université / OSU-R					Autres partenaires			Total	TOTAL
		UMS	LACy	LGSR	Espace-Dev	ENTROPIE	BRGM	IRSTEA	IUEM		
ATMOSPHERE	CDD 1		50							50	50
HYDROLOGIE	CDD 2	50								50	100
	CDD 3							50		50	
COTIER	CDD 4				50					50	247
	CDD 5					50				50	
	CDD 6								50	50	
	RH 1						97			97	
	CDD 7	25								25	
CAPITALISATION & COMMUNICATION	CDD 8	50								50	75
Total		125	50	0	50	50	97	50	50	472	472
TOTAL		275					197				472

CDD 1: IGE BAP E, 1 an, algorithmes de fusion de données (radar, pluvio-disdro, modèles), livrables pour l'hydrologie et IMPACTS  
CDD 2: IGE BAP C, 2 ans à mi-temps, maintenance du parc instrumental stations hydro+côtier  
CDD 3: IGE BAP E, 1 an, modélisation hydrologique (collaboration avec le LGSR)  
CDD 4: IGE BAP E, 1 an, acquisition et analyse de données (sédimentologie, topographie)  
CDD 5: IGE BAP C, 1 an, acquisition de données pour le bilan actuel des carbonates  
CDD 6: IGE BAP C, 1 an, traitement d'images hyperspectrales  
RH 1: BRGM (chef de projet % ETPT + ingénieur % ETPT)  
CDD 7: Gestion du projet TRANSFERTS de janvier à juillet 2016, pris en charge ensuite par les projets RenoRisk-CYCLONES et -IMPACTS  
CDD 8: IGE BAP E, 1 an, interface OSU-R et Agorah, interopérabilité et moissonnage des bases de données (OPEN DATA + OPEN ACCESS)

### EQUIPEMENT

	Equipement	Université / OSU-R					Autres partenaires			TOTAL
		UMS	LACy	LGSR	Espace-Dev	ENTROPIE	BRGM	IRSTEA	IUEM	
ATMOSPHERE	EQ 1		57							0
	EQ 2		40							
HYDROLOGIE	EQ 3			25						0
COTIER	EQ 4				19					9
	EQ 5					25				
	EQ 6					30				
	EQ 7						8,796			
WEB & BDD										
COMMUNICATION										
SERVICE TECHNIQUE & GESTION										0
TOTAL			0	0	0	0	9	0		9

EQ 1: Disdromètre 2D vidéo  
EQ 2: CPC (Condensation Particle Counter)  
EQ 3: Capteurs pression/débit pour équiper une ravine  
EQ 4: Spectromètre de terrain  
EQ 5: sonde PH  
EQ 6: échantillonneur  
EQ 7: BRGM: Centrale inertielle + logiciel de traitement des données

Equipement financé CPN Etat 2015: 76  
Equipement à financer CPN Etat 2016: 120



**FONCTIONNEMENT (Attention: -26k€ = 4% de gestion par l'Université)**

Fonctionnement		Université / OSU-R					Autres partenaires			Total	TOTAL
		UMS	LACy	LGSR	Espace-Dev	ENTROPIE	BRGM	IRSTEA	IUEM		
ATMOSPHERE	F1, F2	20	10							30	30
HYDROLOGIE	F3			40						40	50
	F4							10		10	
LITTORAL	F5				10					10	45
	F6								10	10	
	F7					10				10	
	F8						15			15	
	F9						8,4				
	F10						42				
	F11						1,5				
WEB & BDD	F9	20								20	20
COMMUNICATION	F10	10								10	10
SERVICE TECHNIQUE & GESTION	F11	17								17	17
Total		67	10	40	10	10	91	10	10	172	172
TOTAL				137				111			248

F1: Fonctionnement

F2: Fonctionnement

F3: Fonctionnement, frais de terrain, génie civil pour équipement d'une ravine (prestation externe)

F4: Fonctionnement

F5: Fonctionnement, frais de terrain, sous-traitance acquisition images par drones

F6: Fonctionnement, frais de terrain, sous-traitance acquisition images par drones

F7: Fonctionnement, frais de terrain

F8: Prestation de service, frais topographiques

F9: Prestation de service, frais nautiques

F10: Prestation de service, bathymétrie sondeur multi-faisceaux

F11: missions, déplacements

F12: Charges de structure

F13: Prestation de service externe pour bancarisation des données et site web Observatoire Régional des Risques Naturels (Agorah)

F14: Prestation de service externe pour communication et vulgarisation des résultats du projets (Sciences Réunion)

F15: Fonctionnement, frais de terrain

## Récapitulatif des livrables du projet

ACTION	TITRE	PARTENAIRES
1	L1.1 Rapport sur l'intercomparaison des profils de nuages et d'extinction des aérosols observés dans RenovRisk-TRANSFERTS avec les simulations de cyclones tropicaux.	LACy
	L1.2 Cartographie horaire et à 500m de résolution des lames d'eau sur La Réunion	
	L1.3.1 Formulation originale de traduction des niveaux de vent en risques écologiques ou économiques pour le territoire de La Réunion	
	L1.3.2 Cartographies des risques liés au vent. Données d'entrées pour le programme RenovRisk-IMPACT : analyse des coûts des dommages	
2	L2.1 Rapport synthétique présentant l'implantation des stations, le bilan des mesures effectuées et l'analyse des résultats	LGSR
	L2.2 Rapport sur la mise au point des modèles et l'analyse de leur sensibilité à différents aspects et modèles hydrologiques calés sur les bassins versants cibles	IRSTEA
	L2.3.1 Rapport d'analyse des performances des outils de prévision	
	L2.3.2 Rapport de faisabilité de mise en place d'un outil opérationnels de prévision des crues en temps réel	
3	L3.1 Rapport : Scénarios régionalisés et probabilisés d'élévation du niveau de la mer le long du littoral de La Réunion, de 2015 à 2100.	BRGM
	L3.2.1-A Caractérisation des apports solides dans les cônes alluvionnaires lors des crues morphogènes. Initiation de la calibration d'un indicateur de suivi des apports solides dans le milieu marin.	
3	L3.2.1-B Cartographie des panaches de turbidité (turbidité de surface) à partir des données de SEAS-OI programmation d'images encadrant les cyclones	ESPACE-DEV
3	L3.2.2-A Quantification de l'impact des événements énergétiques sur les phénomènes érosifs de grande ampleur. Analyse de la dynamique des barres d'avant côte.	BRGM
	L3.2.2-B Investissement dans du matériel d'observation côtière – valorisation pour l'observatoire OBSCOT	
3	L3.3.1 Cartographie des habitats par analyse hyperspectrale (dominance corallienne, dominance algale, sédiments). Différenciation des substrats sans signature spectrale spécifique (algues molles vs. calcaires) par analyse spatiale.	IUEM, Espace-Dev

3	L3.3.2-A Données issues de l'acquisition (bilan des carbonates) : 1) bilan des carbonates sur le platier récifal : 1 bilan en saison chaude, 1 bilan en saison fraîche sur 4 radiales. 2) bilan des carbonates pour le compartiment sédimentaire et les substrats durs non coralliens : 1 bilan en saison chaude, 1 bilan en saison fraîche sur 2 sites plus ou moins anthropisés.	ENTROPIE
3	L3.3.2-B Variabilité spatiale et temporelle du bilan des carbonates à l'échelle du site pilote de l'Hermitage/La Saline.	IUEM, Espace-Dev, ENTROPIE
3	L3.3.3-A Protocole d'acquisition de données sédimentologiques par traitement d'image.	Espace-Dev
	L3.3.3-B : Données issues de l'acquisition (budget sédimentaire) : 1) sédimentologie sur les 4 radiales de références 1 fois par an. 2) topographie (mesure des volumes) 2 fois par an et après cyclone.	
3	L3.3.3-C Mise en relation des paramètres : bilan des carbonates, forçages météorologiques et budget sédimentaire.	IUEM, Espace-Dev, ENTROPIE
3	L3.4.1 Mesure des états de mer par suivi vidéo dans le lagon	ESPACE-DEV- IUEM/LDO
3	L3.4.2 Amélioration de la caractérisation des aléas littoraux par une approche couplée submersion/érosion	BRGM
	L3.4.3 Caractérisation de la vulnérabilité des zones littorales sur deux sites pilotes : configuration actuelle et changement climatique	
	L3.4.4 Proposition et évaluation de solutions d'adaptation permettant la diminution de la vulnérabilité des enjeux littoraux	
4	L4.1 Bancarisation de toutes les données et résultats produits par le projet. Création et gestion d'un site web hébergeant des données ouvertes (OPEN DATA) et interopérables, et des rapports et publications à accès libre (OPEN ACCESS).	OSU-R et Agorah
	L4.2 Fabrication de supports de la diffusion de la culture scientifique associée au projet. Rapport sur la manière opératoire de mettre en place un cadre de visite des infrastructures de recherche par un public ciblé.	OSU-R et Sciences Réunion

## Bénéfices et retombées pour le territoire

### RenovRisk-TRANSFERTS et la S3

La Réunion est une région très exposée aux risques cycloniques (vents, crues et inondations, glissements de terrain, submersion, érosion littorale et récifale). Les incertitudes et les lacunes des connaissances sur les aléas cycloniques et sur leurs impacts sont des freins limitant les investissements et les prises de risque par les acteurs du développement du territoire. L'économie de la connaissance implique donc une cartographie et un inventaire objectif des risques naturels associés aux cyclones pour optimiser les développements industriels, économiques et touristiques du territoire réunionnais.

Dans le domaine de l'observation des milieux impactés par les risques naturels, le territoire bénéficie de ressources multiples pour les recherches scientifiques. Plusieurs laboratoires fédérés sous l'OSU-R à l'Université de La Réunion (LACy, LGSR, ENTROPIE, Espace-DEV, PVBMT, ...) bénéficient de plateformes technologiques majeures (Observatoire de l'Atmosphère au Maïdo, station SEAS-OI, station marine, station forestière). Le consortium qui s'est constitué dans le projet RenovRisk-TRANSFERTS est unique et il attaque les verrous scientifiques qui subsistent pour une meilleure évaluation des risques cycloniques.

Les 3 premières actions développées dans le projet sur les aléas cycloniques sont conformes à la S3 et contribuent à la FICHE-ACTION n°1 (Développement des compétences individuelles et collectives : L'enjeu de l'innovation sociale) de la priorité n°3 (La Réunion, plateforme agile de transformation vers une économie de la connaissance, numérique et décarbonée). Dans le domaine S3 de l'économie numérique et digitale, l'Agorah pilote la 4<sup>ème</sup> action du projet qui consiste à bancariser les données du projet en mode OPEN DATA pour les acteurs socio-économiques et à alimenter l'Observatoire Régional des Risques Naturels.

### RenovRisk-TRANSFERTS et les défis territoriaux

Un des défis territoriaux est de confirmer La Réunion en tant que plate-forme européenne structurée de prévention et de gestion des risques naturels au service de la zone océan Indien. C'est exactement un des objectifs majeurs du projet global RenovRisk et ses 4 modules (CYCLONES, TRANSFERTS, EROSION et IMPACTS) focalisés sur les risques naturels liés aux cyclones tropicaux. RenovRisk-TRANSFERTS s'emploie à mettre les grandes infrastructures de recherches construites sur le territoire pour l'observation des milieux naturels (Observatoire de Physique de l'Atmosphère au Maïdo, station de télédétection SEAS-OI, stations d'observation soutenues par l'OSU-R) au service de l'étude des risques cycloniques. La capitalisation des efforts du projet RenovRisk par la bancarisation des observations et des résultats du projet par l'Agorah et l'OSU-R permettra leur diffusion en mode OPEN DATA via l'Observatoire Régional des Risques Naturels de La Réunion. L'usage et la transformation des données collectées par les acteurs socio-économiques concourent à développer des applications à forte valeur ajoutée au bénéfice du territoire: adaptation au changement climatique, aménagement du territoire (urbanisation, gestion du foncier, gestion intégrée des zones côtières, agriculture), recherche-innovation.

## **RenovRisk-TRANSFERTS et la création d'emploi**

De façon directe, le projet recrutera des agents en CDD à hauteur de 7,5 ETPT sur un an. A l'Université de La Réunion, les résultats développés par le projet RenovRisk-TRANSFERTS permettront d'alimenter la réflexion sur le montage de projets de recherche sur les risques naturels. Les prospectives des laboratoires de recherche permettront d'argumenter des demandes de postes d'enseignants-chercheurs et de BIATSS, par redéploiement ou par création, aux prochaines campagnes de l'emploi de l'Université.

De façon indirecte, les retombées du projet RenovRisk global permettront de diminuer les incertitudes sur le risque cyclonique actuel et futur alors même que ces incertitudes constituent un frein au développement économique, industriel et touristique. En meilleure connaissance de cause les acteurs socio-économiques et les décideurs industriels pourront définir une politique de création d'emploi conforme à une stratégie d'adaptation aux futurs risques cycloniques.

## **RenovRisk-TRANSFERTS et la création d'entreprises**

Aujourd'hui les acteurs industriels ont le cruel besoin de mieux caractériser les risques cycloniques au niveau du territoire. Dans le domaine du mix énergétique, la tendance est d'exploiter de plus en plus un grand potentiel en énergie renouvelable par le développement de parcs éoliens, de fermes solaires, ainsi que d'autres projets expérimentaux. L'implantation industrielle des ouvrages d'art associés passe par l'optimisation de leur dimensionnement face aux risques cycloniques (rafales du vent, crues et inondations, houle et submersion). Les retombées du projet global RenovRisk et la possibilité pour ces acteurs d'accéder et d'utiliser directement les données du projet (stratégie OPEN DATA) leur permettront de procéder à de meilleures études de faisabilité et de quantification des prises de risques pour s'implanter et se développer sur le territoire.

## **RenovRisk-TRANSFERTS et les retombées industrielles et économiques**

Comme développé plus haut, l'amélioration des compétences au service de l'économie de la connaissance par la valorisation des résultats développés par le projet sur les risques cycloniques peut permettre aux industriels d'investir sur le territoire en meilleure connaissance de cause, développant ainsi des retombées industrielles.

L'amélioration des compétences au service de l'économie de la connaissance par la valorisation des résultats développés par le projet sur les risques cycloniques peut avoir de fortes retombées économiques: l'amélioration des prévisions des cyclones et des crues dans les ravines permet d'optimiser l'activité économique et sociale en fonction des aléas, d'éviter les fausses alertes rouges qui stoppent l'économie du territoire.

La quantification et la cartographie des risques cycloniques actuels et futurs permet (i) de maîtriser l'aléa cyclonique en dimensionnant géographiquement les infrastructures et les mises en sécurité des services et outils de production, (ii) de fournir des solutions adaptés d'urbanisme de développement du territoire. Ce livrable en mode OPEN DATA va notamment fournir aux groupes industriels souhaitant investir sur le territoire Réunionnais des éléments objectifs d'appréciation et de dimensionnement du risque cyclone leur permettant d'optimiser leur développement sur le territoire.

La planète du Maïdo est une zone sensible écologiquement. Elle représente cependant une des plus fortes valeurs ajoutées du territoire par la croissance de son urbanisme de son activité touristique et de loisir. Il est important que les responsables économiques et politiques puissent avoir accès à une synthèse pluridisciplinaire et exhaustive des risques actuels et futurs sur l'intensité des vents, les crues, les inondations, la houle, l'érosion côtière et la barrière récifale afin d'optimiser leurs investissements en l'adaptant aux nouvelles réalités environnementales.

## **RenovRisk-TRANSFERTS et la génération de projets économiques innovants à La Réunion**

La gestion du risque météorologique en entreprise, c'est-à-dire l'évaluation de la perte potentielle de chiffre d'affaires ou de profit due aux variations des conditions météorologiques, est un fait avéré dans les grandes nations développées. Les liens entre l'économie globale d'une Région et l'ajustement de son activité par la mise à disposition de bonnes prévisions météorologiques ont été quantifiés. Météo-France estime ainsi qu'un euro investi dans la recherche météorologique peut rapporter à terme trois euros sur les secteurs économique, industriel et touristique.

Le statut actuel sur l'île de La Réunion montre que trop peu d'entreprises présentes sur le territoire gèrent de façon optimale les risques naturels liés aux cyclones en tentant de limiter ou de transférer la perte potentielle d'exploitation due aux passages des cyclones à l'aide d'un produit de couverture financière. Il y a donc ici un domaine où des projets économiques innovants pourraient naître compte tenu de l'amélioration en cours de la fiabilité générale des prévisions météorologiques en saison cyclonique et compte tenu des contraintes nouvelles que pourra amener le changement climatique.

De plus, au-delà des conséquences directes que peut avoir l'utilisation des prévisions météorologiques elles-mêmes sur la gestion de l'activité économique perturbée par le temps sensible, le champ des économies qui pourraient être faites par le biais d'une meilleure gestion des dégâts associés aux risques naturels associés aux cyclones n'a pas encore été suffisamment investigué. Ce sont plutôt les assurances qui sont présentes sur le domaine et qui gèrent les flux financiers associés face à cette absence d'investissement des sociétés. Il y aurait donc ici aussi de la place pour que de nouvelles entreprises innovent avec des projets basés sur une meilleure économie de la connaissance dans le domaine.

### **RenovRisk-TRANSFERTS : caractère reproductible et perspectives d'essaimage**

D'un point de vue scientifique et technique, le caractère reproductible du projet et l'intérêt de son essaimage sont indéniables. L'intérêt majeur est de prolonger par la collaboration les savoir-faire qui vont être développés dans le projet vers d'autres communautés qui partagent les mêmes besoins. On peut citer :

- la maîtrise de technologies innovantes comme le radar à nuages BASTA et le disdromètre optique 2DVD (spectres dimensionnels des gouttes d'eau) et leurs simulateurs virtuels dans les modèles de prévision météorologique pour calibrer ces modèles selon les besoins d'autres communautés utilisatrices,
- l'expérience de l'utilisation d'un modèle de prévisions hydrologiques à pas de temps de quelques dizaines de minutes qui a été adapté au comportement des ravines de l'ouest réunionnais et qui préfigure des outils qui pourront ensuite être repris par un organisme étatique (DREAL, DEAL Réunion) pour une utilisation dans un cadre plus opérationnel,

- la maîtrise d'une caméra hyperspectrale montée sur un drone pour cartographier la bathymétrie des lagons d'arrière-récif et constituer un jeu de données essentiel à l'initialisation de modèle de fine échelle pour la submersion et pour l'érosion du trait de côte.

## **RenovRisk-TRANSFERTS : développement d'un savoir-faire local susceptible de s'exporter notamment dans la bande inter-tropicale ou sur des territoires insulaires ?**

La possibilité de développer un savoir-faire local dans le domaine des risques naturels associés aux cyclones est unique et historique à La Réunion et elle s'est construite sur 3 piliers. Le premier pilier est constitué par les infrastructures de recherche disponibles pour l'observation des milieux naturels. La stratégie S3 à La Réunion a permis de se doter de telles infrastructures (Observatoire du Maïdo, station SEAS-OI) qui sont maintenant exploitées et gérées par les acteurs locaux de la recherche. Le deuxième pilier est le consortium d'acteurs de la recherche et d'organisations liées au développement et à l'aménagement du territoire qui a réussi à se monter localement pour faire émerger le projet RenovRisk. Le troisième pilier correspond à un des défis territoriaux qui est justement de confirmer La Réunion en tant que plate-forme européenne structurée de prévention et de gestion des risques naturels au service de la zone océan Indien. RenovRisk instrumentalise ce savoir-faire local et va pouvoir l'exporter dans la bande inter-tropicale ou sur des territoires insulaires.

En effet, le caractère insulaire, tropical, et topographique (hauts reliefs escarpés) de la Réunion est un vecteur de reproduction directe et d'essaimage du projet RenovRisk et de ses méthodologies vers de nombreuses autres îles tropicales dont celles de la France d'outre-mer. Par exemple, les Antilles qui ne bénéficient pas d'autant d'infrastructures de recherches pour l'observation des milieux naturels que La Réunion, et qui dépendent des Etats-Unis pour la gestion des crises cycloniques, pourraient prendre directement avantage du projet RenovRisk pour opérer à un transfert de connaissances et de savoir-faire leur permettant d'améliorer leurs programmes de gestion des risques naturels.

## **RenovRisk-TRANSFERTS : Mise à disposition publique des données selon Open Data ou des résultats (Open Access)**

La mise à disposition publique des données se fera sur le site web de l'Agorah (Observatoire Régional des Risques Naturels). Mise en œuvre avec l'OSU-R pour la conformité aux standards européens d'interopérabilité, le site inclura observations et simulations d'aléas cycloniques. Les outils de moissonnage de données (OpenData) permettront le catalogage, la visualisation et le téléchargement. L'accès libre aux publications scientifiques (OpenAccess) se fera via un référencement au système HAL.

## **Indicateurs d'évaluation**

- Nombre de chercheurs travaillant dans des structures de recherche améliorée
  - Unité de mesure : Nombre de chercheurs travaillant dans des structures de recherche améliorée
  - Valeur prévisionnelle : 100
  - Commentaire : Les risques naturels s'étendent par essence à travers les interfaces de milieux naturels (atmosphère, hydrosphère, lithosphère, océans côtier et ouvert). Ils brassent donc un grand ensemble des champs de la physique, de la chimie, des sciences du vivant, et des sciences humaines et sociales.

- Nombre de stagiaires accueillis
  - Unité de mesure : Nombre de stagiaires accueillis
  - Valeur prévisionnelle : 20
  - Commentaire : idem que pour le nombre de chercheurs
  
- Nombre d'entreprises collaborant sur le sujet
  - Unité de mesure : Nombre d'entreprises
  - Valeur prévisionnelle : 5
  - Commentaire : DCNS, ReuniWatt, Temergie , EDF, Veolia