Pacific Community
Communauté du Pacifique

RESCCUE

ETUDE DE FAISABILITE POUR LA MISE EN PLACE D'UN DISPOSITIF DE SUIVI DE L'EROSION ADAPTE ET OPERATIONNALISATION

AGENCE FRANÇAISE DÉVELOPPEMENT

PROVINCE NORD

FONDS FRANÇAIS POUR L'ENVIRONNEMENT MONDIAL

L'Opérateur RESCCUE en province Nord de Nouvelle-Calédonie consiste en un groupement de 4 entreprises partenaires :

Asconit Consultants (leader)
Eric Baye, Directeur du groupement
eric.baye@asconit.com
Gaëlle Grattard
gaelle.grattard@asconit.com

Bioeko Consultants
Yannick Dominique, Coordinateur technique
ydominique@bioeko.nc

Vertigo Lab
Thomas Binet
Thomas.binet@vertigolab.eu

ONFI
Quentin Delvienne
quentin.delvienne@onfinternational.org

Version	Date d'envoi	Rédacteur Principal/Contributeur (s)
Version 1 envoyée à la CPS et PN	25/07/2016	Quentin Delvienne, Etienne Ebrard, Yann Queffelean, Gaëlle Grattard
Version 1 commentée par la PN et CPS	11/08/2016	Raphael Billé
Version 2 envoyée à la CPS et PN	29/08/2016	Quentin Delvienne, Gaëlle Grattard
Version 2 commentée par la PN et CPS		
Version finale	31/08/2016	Validée par PN et CPS

Photo de couverture : Quentin Delvienne, 09/02/2016 – 7h23

Rappel des objectifs et composantes du projet

Le projet RESCCUE (Résilience des Ecosystèmes et des Sociétés face au Changement Climatique) vise à contribuer à accroître la résilience des pays et territoires insulaires du Pacifique face aux changements globaux par la mise en œuvre de la gestion intégrée des zones côtières (GIZC). Il prévoit notamment de développer des mécanismes de financement innovants pour assurer la pérennité économique et financière des activités entreprises. Ce projet régional opère sur un à deux sites pilotes dans chacun des pays et territoires suivants : Fidji, Nouvelle-Calédonie, Polynésie française et Vanuatu.

RESCCUE est financé principalement par l'Agence française de développement (AFD) et le Fonds français pour l'environnement mondial (FFEM), pour une durée de cinq ans (01/01/2014 - 31/12/2018). Le montant global du projet est estimé à 13 millions d'Euros. La CPS bénéficie d'un financement total de 6,5 millions d'euros : une subvention de l'AFD octroyée en deux tranches (2013 et 2016 à hauteur de 2 et 2,5 millions d'Euros respectivement), et une subvention du FFEM de 2 millions d'Euros. Le projet RESCCUE fait en complément l'objet de cofinancements. Sa maîtrise d'ouvrage est assurée par la CPS, assistée par les gouvernements et administrations des pays et territoires concernés.

Le site pilote de la « Zone Côtière Nord Est » est un des deux sites pilotes retenus pour ce projet en Nouvelle-Calédonie. Le montant global du budget qui sera dédié à la déclinaison locale du projet sur ce site est de 443 k€ soit 52,8639 millions de F CFP. La maitrise d'ouvrage est assurée par la CPS, assistée de la Province Nord. La maitrise d'œuvre est quant à elle assurée par le consortium ASCONIT Consultants, Bio eKo Consultants, Vertigo Lab et ONF international.

RESCCUE est structuré en cinq composantes :

Composante 1 - Gestion intégrée des zones côtières : Il s'agit de soutenir la mise en œuvre de la GIZC « de la crête au tombant » à travers l'élaboration de plans de GIZC, la mise en place de comités ad hoc, le déploiement d'activités concrètes de terrain tant dans les domaines terrestres que marins, le renforcement des capacités et le développement d'activités alternatives génératrices de revenus.

Composante 2 - Analyses économiques : Cette composante soutient l'utilisation d'une large variété d'analyses économiques visant d'une part à quantifier les coûts et bénéfices économiques liés aux activités de GIZC, d'autre part à appuyer diverses mesures de gestion, politiques publiques et mises en place de mécanismes économiques et financiers.

Composante 3 - Mécanismes économiques et financiers : Il s'agit de soutenir la mise en place de mécanismes économiques et financiers pérennes et additionnels pour la mise en œuvre de la GIZC : identification des options possibles (paiements pour services écosystémiques, redevances, taxes, fonds fiduciaires, marchés de quotas, compensation, certification…) ; études de faisabilité ; mise en place ; suivi.

Composante 4 - Communication, capitalisation et dissémination des résultats du projet dans le Pacifique : Cette composante permet de dépasser le cadre des sites pilotes pour avoir des impacts aux niveaux national et régional, en favorisant les échanges d'expérience entre sites du projet, les expertises transversales, la dissémination des résultats en particulier au cours d'événements à destination des décideurs régionaux, etc.

Composante 5 - Gestion du projet : Cette composante fournit les moyens d'assurer la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre du projet, l'organisation des réunions des comités de pilotage, des évaluations et audits, etc.

Table des matières

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES 1

CHAPITRE 1 : RESUME EXECUTIF 2

CHAPITRE 2 : CONTEXTE DU LIVRABLE ET JUSTIFICATION 4

CHAPITRE 3 : RAPPEL DE L'OBJECTIF POURSUIVI 4

CHAPITRE 4 : RAPPEL DU CONTEXTE HYDROLOGIQUE, METEOROLOGIQUE ET DE L'EROSION DU BASSIN VERSANT DE LA THIEM ET DE SES SOUS BASSINS 5

CHAPITRE 5 : RAPPEL DE L'ETAT DE L'ART SUR LES DISPOSITIFS DE QUALIFICATION ET DE QUANTIFICATION DE L'EROSION 6

1 QUALIFICATION DE L'EROSION 6

1.1 INDICATEURS VISUELS 6

1.2 INDICATEURS DE COUVERTURE DU BASSIN VERSANT 6

2 QUANTIFICATION DE L'EROSION 6

2.1 LA MESURE DIRECTE 6

2.2 LA MESURE PAR INTEGRATION 7

2.3 LA MESURE PAR PHOTOGRAMMETRIE RAPPROCHEE 13

CHAPITRE 6 : DISPOSITIF RESCCUE ADAPTE 14

1 COMPOSITION GENERALE 14

2 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES PARCELLES HYDRO-SEDIMENTAIRES 15

2.1 DESIGN GENERAL DES PARCELLES 15

2.1.1 Quantification de la lame d'eau précipitée et instrumentation 15

2.1.2 Quantification de la lame d'eau ruisselée et instrumentation 15

2.2 DEFINITION LA PARCELLE TYPE, PLANS ET INSTRUMENTS SELECTIONNES 27

2.2.1 Analyse des options 27

2.2.2 Détails de l'option choisie 31

3 BUDGET D'INVESTISSEMENT NECESSAIRE A LA MISE EN PLACE 35

3.1 BUDGET ESTIMATIF NECESSAIRE A L'IMPLANTATION D'UNE PLACETTE TYPE 35

3.2 CONTENU ARRETE DU NOUVEAU DISPOSITIF 36

3.3 SITES D'IMPLANTATION DES PARCELLES 37

CHAPITRE 7 : OPERATIONNALISATION DU DISPOSITIF 40

1 PHASE 1: MISE EN PLACE DES PARCELLES 42

2 PHASE 2 : TEST ET ADAPTATIONS DU DISPOSITIF 43

3 PHASE 3 : COLLECTE DES DONNEES ET VALORISATION 44

4 PHASE 4: FONCTIONNEMENT ET EXPANSION DU DISPOSITIF (OPTIONNEL ET FONCTION DU BILAN DE LA PHASE 3) 44

CHAPITRE 8 : CONCLUSION 45

BIBLIOGRAPHIE 46

ANNEXES 48

1 TABLEAU COMPARATIF DES SITES POTENTIELS D'IMPLANTATION DE PARCELLES 49

2 PRISE DE VUES DES SITES POTENTIELS D'IMPLANTATION DE PARCELLES 51

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Parcelle pour la mesure de l'effet de l'enherbement – Afrique du sud (dans Hudson, 1993) 10
Figure 2 : Exemples de partiteurs de flux (dans Hudson, 1993) 10
Figure 3 : Schéma d'un seuil triangulaire à mince paroi (pour plus de détails voir annexe 8 du L1.5) 10
Figure 4 : Seuil de type HS (image USDA Agricultural Research Service) 10
Figure 5 : Carte des classes d'érosion (t/ha/an) et couverture des savanes pour le BV d'Haccinem 12
Figure 6 : Etat du sous-couvert forestier sur les versants nord de Haccinem 14
Figure 7 : Calcul du temps de ruissellement à l'aide de l'outil ONF RTM 18
Figure 8 : Simulation des plages de mesures des différents canaux jaugeurs par rapport à la plage souhaitée 23
Figure 9 : Etat de la goulotte avant et après nettoyage à Poro amont (source rapport de synthèse 2009-2012 DAVAR Convention Hydromine) 25
Figure 10 : Démontage de la goulotte à Poro aval (source rapport de synthèse 2009-2012 DAVAR Convention Hydromine) 25
Figure 11 : Schéma du canal de mesure et de son puit 25
Figure 12 : image d'une sonde Delta-T 26
Figure 13 : Synoptique 1 de parcelle et organisation des mesures 28
Figure 14 : Synoptique 2 de parcelle et organisation des mesures 29
Figure 15 : Synoptique 3 de parcelle et organisation des mesures 29
Figure 16 : Synoptique 4 de parcelle et organisation des mesures 31
Figure 17 : Vue d'ensemble de la parcelle et du dispositif 32
Figure 18 : Détail du dispositif de mesure 34
Figure 19 : Affleurement de serpentinite sur la parcelle forestière de 1ha de TIWAE de l' IAC/CIRAD 37
Figure 20 : Situation des sites potentiels d'implantation de parcelles 38
Figure 21 : Cartographie du dispositif 2016 de parcelles et pluviomètres 39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Phases d'opérationnalisation du dispositif de suivi provincial 3
Tableau 2 : Options d'instrumentation des parcelles de ruissellement (HUDSON, 1993, NOUVELLOT, 1993 et ROOSE, 1988 et Ypsilantis W.G., 2011) 10
Tableau 3 : Résumé des avantages et inconvénients des parcelles de ruissellement 12
Tableau 4 : Perte en sol annuelle estimée par RUSLE (IRD, 2013) sur le bassin versant d'Haccinem 12
Tableau 5 : Lignes directrices pour évaluer les classes de risque d'érosion du sol (WALL et al., 2002) 13
Tableau 6 : Débits estimés des épisodes de pluie plus fréquents 19
Tableau 7 : Comparatif des différents appareils envisageables pour la mesure du débit et figures diverses de canaux jaugeurs 21
Tableau 8 : Tableau comparatif des capteurs de hauteur d'eau 24
Tableau 9 : Tableau du budget estimé d'une parcelle type et d'un dispositif 3 parcelles 35
Tableau 10 : Parcelles du dispositif et réalisation 36
Tableau 11 : Analyse comparative pour le choix d'un couple de parcelles dégradées/peu dégradées en FDH 38
Tableau 12 : Phases d'opérationnalisation du dispositif de suivi provincial 40
Tableau 13 : Planification des phases de mise en œuvre du dispositif de suivi 41
Tableau 14 : Budget estimé de la phase 3 44

Liste des abréviations et acronymes

AEP	Alimentation en Eau Potable
AEP	Alimentation en Eau Potable
AFD	Agence Française de Développement
BV	Bassin Versant
CIFRE	Conventions Industrielles de Formation par la REcherche
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
COPIL	Comité de Pilotage
CPS	Communauté du Pacifique
DDEE	Direction du Développement Economique et de l'Environnement de la PN
EE	Espèces envahissantes
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FDH	Forêt Dense Humide
FFEM	Fonds Français pour l'Environnement Mondial
GR	Chemin de Grande Randonnée
IAC	Institut Agronomique néo-Calédonien
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
IRSTEA	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
MES	Matière En Suspension
NC	Nouvelle-Calédonie
ONFI	Office National des Forêts Internationale
ORSTOM	Office de la recherche scientifique et technique outre-mer devenu IRD
PN	Province Nord
SIEC	Service Impact Environnemental et Conservation
SMRT	Service des Milieux et Ressources Terrestres
UMR - ETNA	Érosion torrentielle, neige et avalanches (IRSTEA)
UNC	Université de Nouvelle Calédonie

Chapitre 1 : Résumé exécutif

Le projet RESCCUE en PN avait au cours de son premier semestre d'exécution (mai à novembre 2015) étudié en profondeur la faisabilité d'un dispositif de suivi hydrologique, météorologique et de l'érosion. Cette étude technique avait proposé l'instrumentation de petits bassins versants d'une vingtaine d'hectares présentant des types d'occupation des sols différents. Suite à des restrictions budgétaires importantes pour la réalisation des travaux requis, il a été demandé à l'opérateur de RESCCUE en PN de réétudier la faisabilité de la mise en place d'un dispositif à moindre coût pouvant contribuer à améliorer les connaissances actuelles sur les phénomènes d'érosion. Le présent livrable intègre une analyse comparative des options potentielles et propose une solution technique détaillée et son opérationnalisation.

Le budget « travaux » indicatif évoqué lors du COPIL du 22 mars 2016 ne permettant pas d'investir dans la mise en place de plusieurs seuils bétonnés, la décision a été prise d'orienter la réflexion vers la mise en place de parcelles standardisées de suivi de l'érosion. L'objectif de quantification des phénomènes pour différents états et usages des sols peut être envisagé à travers l'instrumentation à moindre coût de parcelles de suivi de l'érosion.

En matière de suivi, soit on procède à une qualification (indicateurs visuels d'érosion ou de couverture végétale d'un bassin versant) soit on procède à une quantification des phénomènes (mesures directes ou par intégration). Bien que les mesures visuelles ou directes aient un intérêt certain pour les gestionnaires, ce sont les mesures par intégration qui sont généralement les plus pertinentes pour contribuer à la compréhension des phénomènes (quantification du flux hydro-sédimentaire et bilan hydrique).

Les parcelles de suivi de l'érosion également nommées parcelles de ruissellement offrent un panel important d'options d'instrumentation (pour la mesure des flux ruisselés, d'un simple bac récolteur à un canal jaugeur instrumenté (sonde pression) mesurant en continu les hauteurs de charge). Ces parcelles ont été testées et valorisées à travers le monde particulièrement par Wischmeier et Smith (USDA[1]) qui sont les pères du modèle universel de perte en sol[2] construit sur la base d'un réseau important de parcelles et de petits bassins instrumentés et Eric Roose, directeur de recherche à l'ORSTOM, qui contribua à adapter les protocoles d'expérimentation des parcelles hydro-sédimentaires type « Wischmeier » pour l'Afrique et Madagascar.

Ce qui est particulièrement important pour Hudson qui fit en 1993 une revue critique internationale de ce type de dispositif pour la FAO, c'est de s'assurer qu'il y a une question précise dont la réponse peut être apportée par la mise en place d'un dispositif de parcelles et que des moyens suffisants à la construction, l'instrumentation, le fonctionnement et l'analyse des données sont bel et bien disponibles et sécurisés sur le long terme. Les questions d'intérêt pour le gestionnaire peuvent être les suivantes : « Les espaces de forêts denses humides dégradées par les EE tels que le cerf et le cochon féral peuvent-ils être plus contributeurs en matériaux érodés qu'une savane herbacée à Niaouli ? » et « Qu'en est-il lorsque la forêt est peu dégradée et qu'en est-il si le feu passe annuellement dans la savane? ». Des questions d'intérêt existent bel et bien ; des moyens provinciaux devraient permettre d'assurer la pérennité du dispositif créé sur le moyen/long terme.

Une solution technique d'instrumentation de parcelle standard est détaillée dans le présent livrable après une analyse comparative des options, elle est basée sur la mesure des flux avec un canal jaugeur de type HS (étalonné en usine et présentant donc une très haute fiabilité) qui permet de mesurer non seulement de faibles débits mais également des débits plus importants qui pourront être rencontrés lors d'épisodes de pluie exceptionnels (débit décennal et centennal). La mesure de pression se fera dans un puit de tranquillisation spécialement conçu à cet effet pour ne pas fausser la mesure. Un turbidimètre sera également associé à cette instrumentation. Dans le cadre de la future relation partenariale avec l'IRD sur ce projet, un échantillonneur pourra être mis à disposition et permettre d'affiner la mesure de turbidité. Afin de procéder à une mesure de vérification et de donner un

[1] USDA = United States Departement of Agriculture. En français: Département d'Agriculture des Etats Unis d'Amérique

[2] USLE = Universal Soil Loss Equation. En français : équation universelle de perte en sol.

aspect démonstratif au dispositif, un bac diviseur suivi d'un bac récolteur final seront également mis en place en aval du canal jaugeur et de sa chute. Des sondes d'humidité sont également prévues avec une installation en milieu de parcelles à des profondeurs différentes afin d'établir des bilans hydriques complets sur ces parcelles.

Des plans précis ont été développés et serviront directement à la réalisation des travaux de terrain. Au regard du budget disponible, l'installation de trois parcelles est initialement envisagée. Les occupations des sols ciblées sont la forêt dense humide peu dégradée, la forêt dense humide dégradée et la savane herbacée à Niaouli dans le bassin versant de la Thiem tel qu'initialement souhaité. La mesure de pluviométrie se fera avec des pluviomètres à augets qui seront installés en savane à proximité des parcelles étant donné qu'une installation en forêt est exclue. Les phases d'opérationnalisation du dispositif de suivi provincial sont détaillées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Phases d'opérationnalisation du dispositif de suivi provincial

Phases	Résultats attendus	Temporalité
Phase 1: Mise en place des parcelles	Un dispositif composé de parcelles est matérialisé sur le terrain et un cadre de gestion est précisé.	Août 2016 – Décembre 2016
Phase 2 : Test et adaptations du dispositif	Un dispositif composé de parcelles est fonctionnel sur le terrain, génère de la donnée de qualité et le traitement local des échantillons peut être réalisé	Janvier 2017 – Août 2017
Phase 3 : Collecte des données et valorisation	Le dispositif génère de la donnée en flux continu, donnée qui est archivée, sécurisée, traitée et valorisée	Septembre 2017 – Août 2020
Phase 4: Fonctionnement et extension du dispositif (Optionnel et fonction du bilan de la phase 3)	La phase 3 permet la mise en valeur du dispositif, son développement et son fonctionnement à plus long terme	Septembre 2020 - 2030

La bonne mise en œuvre des phases 1 et 2 requiert l'intervention de prestataires (fournitures et installation des matériels notamment) et la phase 3 s'appuiera sur un thésard « CIFRE » guidé conjointement par l'ONFI/ONF RTM et l'IRD. L'opérateur s'attèlera à développer ce projet de CIFRE lors des phases 1 et 2. La phase 4 est optionnelle ; son développement éventuel devra se faire sur la base des résultats obtenus et de l'analyse de la pertinence d'une extension de fonctionnement.

La province, à travers la validation finale du présent livrable, s'engage sur l'exécution des phases un à trois et leur financement tel que présenté dans ce document.

Chapitre 2 : Contexte du livrable et justification

Le premier semestre du projet RESCCUE (Juin 2015 à fin novembre 2015) avait été consacré, entre autres, à étudier la faisabilité d'un dispositif de suivi hydrologique, météorologique et de l'érosion prévu par les termes de référence dans le cadre de la composante 1 et à retenir une option technique avec la Direction du Développement Economique et de l'Environnement (DDEE) (L1.5) qui devait ensuite être traduite concrètement et faire l'objet d'une opérationnalisation (L2.1 initial). L'opérateur en octobre-novembre 2015 avait détaillé les cahiers des charges pour l'exécution de l'option retenue et une consultation restreinte de bureaux d'études désignés par la PN avait été réalisée sur cette base.

En décembre 2015, la DDEE a notifié au projet RESCCUE que les budgets initialement prévus pour la mise en œuvre du dispositif et imputables sur le budget 2015 avec un report de l'exécution en 2016 n'étaient plus mobilisables pour des raisons comptables. Au cours du premier trimestre 2016, du fait d'un budget provincial en constante mutation, aucun engagement n'a pu être pris par le SIEC pour la mise en œuvre du dispositif. Le comité de pilotage de RESCCUE du 22 mars 2016 a permis de donner un nouveau niveau budgétaire au projet de dispositif dont le montant exact a été précisé par le SIEC en fin avril 2016.

Le comité de pilotage de RESCCUE a constaté que le budget 2016 mobilisé était insuffisant pour la réalisation de seuils de mesures hydrologiques sur quelques petits bassins versants instrumentés tels qu'initialement prévus (L 1.5). Il a été demandé à l'opérateur de revoir le contenu du dispositif et décidé que celui-ci pourrait se concentrer notamment sur la mise en place de parcelles de suivi de l'érosion et d'une instrumentation météorologique à proximité.

Le COPIL a acté que le livrable RESCCUE L2.1 devra non seulement proposer une programmation de mise en œuvre (opérationnalisation) mais également et avant tout, élaborer un nouveau design de dispositif au regard du budget effectivement disponible. Afin de donner l'amplitude à l'opérateur pour réétudier le design du dispositif, la coordination régionale du projet RESCCUE a consenti à alléger le projet d'un livrable non-indispensable et la DDEE à travers le SIEC a mis un budget à disposition pour mobiliser l'expertise nécessaire d'un hydrologue des services RTM de l'ONFI (Etienne Ebrard) pendant quelques jours. Cette dernière contribution a particulièrement porté sur la définition d'une instrumentation des parcelles adaptée au regard du contexte environnemental et économique.

Chapitre 3 : Rappel de l'objectif poursuivi

Les termes de références du projet RESCCUE PN ont défini l'objectif premier du dispositif de suivi hydrologique, météorologique et de l'érosion qui est d'aller vers une quantification des phénomènes et de comparer les effets de différents états et usages des sols. Lors de l'exécution de la première faisabilité (L1.5), le contenu du dispositif souhaité avait été précisé par la PN : « développer une instrumentation pour quantifier les flux solides et liquides produits par une sélection de sous-bassins versants de *la Thiem* (en lien avec la problématique de la qualité d'eau potable et des eaux troubles dans le lagon) présentant des occupations du sol différentes ». Le budget total disponible en 2016 est équivalent au coût de la mise en place d'un seul seuil et de son instrumentation pour un bassin versant de petite surface. Comparer l'effet de l'occupation des sols sur l'hydrologie et l'érosion à partir de l'instrumentation de petits bassins versants n'est donc plus envisageable.

L'objectif de quantification des phénomènes et de comparaison des effets de différents états et usages des sols peut être envisagé à travers l'instrumentation à moindre coût de parcelles de suivi de l'érosion. Les autres recommandations faites quant à l'objectif du dispositif restent valables :

- prendre en compte les contraintes de site (accessibilité, récurrence des feux et vandalisme) ;
- mettre l'accent sur la mise en place de mesures démonstratives pour les populations locales ;
- adapter l'instrumentation pour qu'elle permette de générer des données en lien avec les pressions majeures sur les milieux (espèces envahissantes -cerfs et cochons- et feux) avec comme vision l'amélioration continue des mesures de gestion ;

- la mise en œuvre du dispositif sur le bassin versant de la Thiem, ainsi que son entretien et sa surveillance, doivent faire participer les habitants des tribus de Poyes et Tiwaé;
- le dispositif doit être autant que possible automatisé (pour réduire les coûts d'entretien) et modulable (pour intégrer d'autres capteurs par la suite).

Chapitre 4 : Rappel du contexte hydrologique, météorologique et de l'érosion du Bassin Versant de la Thiem et de ses sous bassins

Le livrable L1.5[3] a décrit en détail les caractéristiques du bassin versant de la Thiem et propose des cartes thématiques. Le livrable 2.2[4] de RESCCUE a affiné l'analyse des phénomènes d'érosion sur le bassin versant de Haccinem et proposé des actions opérationnelles en vue de limiter ceux-ci. Nous rappelons ici les éléments d'importance pour la suite de ce livrable :

- Le bassin de *la Thiem*, de forme assez ramassée[5], possède une superficie de 64 km^2 et culmine à plus de 1 000 mètres d'altitude. Son orientation générale Nord-Nord-Est ouverte sur les alizés, associée à la présence de la crête des Lèvres formant une barrière orographique, lui confère une prédisposition aux forts épisodes de crue ;
- Le bassin versant de *la Thiem* se décompose en deux sous-bassins versants principaux et chacun d'eux accueille un captage AEP de la commune (bassin de captage d'HACCINEM (6 KM²) dans le bassin de la *Dihèn Tipwöi*) et bassin de captage de TIPWOÏ (12km²) dans le bassin de la *Dihèn Timwâpaé*)[6] ;
- La majeure partie du bassin versant de la Thiem occupe des formations de schistes silto-gréseux (près de 75 %) et schistes gréseux (15%) (roches volcano-sédimentaires), notons également la présence de filons de serpentinite (roches ultramafiques serpentinisées[7]) dans et à proximité du bassin de captage de Haccinem ;
- Les éléments fins (argiles – environ 75 % de la granulométrie des sols) transportés par les précédentes crues n'ont pas été retrouvés, ni dans les creeks, ni dans la partie aval du bassin. Les volumes de matériaux fins arrachés aux versants seraient alors rejetés en quasi-intégralité au lagon. Les éléments plus grossiers (sables, graviers et blocs) se retrouvent généralement dans les lits des rivières principales à faible pente sous la forme d'atterrissements ;
- Les principales formations végétales sont deux types : savanes arborées à Niaouli (*Melaleuca quinquenervia*) et forêt dense humide. Les forêts denses humides présentent des états de dégradation différents en fonction du niveau de fréquentation des espèces envahissantes (cerf et cochons féraux). La contribution des phénomènes d'érosion des forêts denses humides dégradées sur le bilan sédimentaire au droit du captage serait assez significatif, voire supérieur, comparé à l'apport en sédiments produits par les savanes[8] ;
- Après un passage de feu en savane avec une strate herbacée, on a constaté une reconstitution assez rapide de cette strate couvrante en condition climatique assez sèche (3 mois);
- Le chemin de Grande Randonnée (GR) de la PN traverse le bassin versant de la Thiem : sa fréquentation est en constante augmentation.

---

[3] http://www.spc.int/images/climate-change/RESCCUE/publications/north-province/Dispositif-suivi-Bassin-Thiem.pdf

[4] http://www.spc.int/images/climate-change/RESCCUE/publications/north-province/Operations-protections-et-restaurations-Bassin-Haccinem.pdf

[5] Contrairement à un bassin versant de forme allongée dont la réponse hydrologique est plus lente.

[6] On prendra garde à bien remarquer que d'après la toponymie DITTT, le captage AEP de Tipwöi ne se trouve pas dans le bassin de la Dihèn Tipwöi.

[7] Altération des roches par un processus d'hydratation et de transformation métamorphique

[8] Qui pour la plupart disposent d'une couverture herbacée conséquente hors passage du feu ;

Chapitre 5 : Rappel de l'état de l'art sur les dispositifs de qualification et de quantification de l'érosion

Un état de l'art succinct de la mise en place des dispositifs de suivi hydrologique, météorologique et de l'érosion a été présenté dans le cadre du livrable L1.5[9] de RESCCUE. Nous affinerons dans ce chapitre les éléments relatifs au suivi de l'érosion, phénomène qui nous intéresse particulièrement au vu de l'objectif fixé, des analyses faites dans le cadre de la mise en œuvre de RESCCUE et au regard du fait qu'il n'est pas budgétairement possible de mettre en place des seuils pour effectuer des mesures hydrométriques de précision sur des petits bassins versants.

Les éléments techniques concernant le suivi météorologique restent valables et le design de ce nouveau dispositif en aura besoin. La mesure de pluie pourra être faite au pluviomètre totaliseur (lecture journalière) ou au pluviomètre automatique à augets basculeurs (période de mesure infra-journalière), instrument opportun pour la compréhension des évènements brefs.

Les réflexions engagées sur les seuils de mesure des débits (synthèse des solutions techniques envisageables pour réaliser une section de contrôle – voir le tableau synthétique pages 14 à 16 du L1.5) restent d'intérêt et pourraient être utilisées dans ce nouveau design au cas où des mesures hydrométriques de précision seraient nécessaires.

1 QUALIFICATION DE L'EROSION

1.1 INDICATEURS VISUELS

Le niveau d'érosion relatif peut être estimé en observant certains signes visuels comme la présence de rigoles, la couverture et/ou les mouvements de litière, la présence de lignes de flux, les dépôts ou encore le ravinement. Les indicateurs visuels donnent une évaluation qualitative des phénomènes d'érosion à travers l'utilisation de séries temporelles d'observation.

Les avantages de l'approche par indicateurs visuels est qu'il s'agit d'un processus rapide, que beaucoup d'observations peuvent être faites en un temps réduit et que cela peut permettre d'identifier des sites où des problèmes d'érosion se posent. Cette méthode reste subjective, des différences notables peuvent être faites entre opérateurs (notamment sans formation préalable). Il est recommandé de ne pas utiliser cette technique pour donner des tendances (Ypsilantis W.G., 2011).

1.2 INDICATEURS DE COUVERTURE DU BASSIN VERSANT

Une évaluation de la couverture du sol par la végétation et ses différentes strates peut être réalisée soit par inventaire sur le terrain ou par télédétection. Il s'agit d'un indicateur indirect de l'érosion. Les fluctuations interannuelles de couverture (canopée et foliaire) de la végétation sont d'autant de facteurs qui rendent l'interprétation particulièrement peu aisée.

On retiendra des observations faites sur le bassin de la Thiem, que la litière joue un rôle important en matière de protection du sol et que la visibilité de son état par des techniques de télédétection n'est pas encore au point.

2 QUANTIFICATION DE L'EROSION

2.1 LA MESURE DIRECTE

Cette méthode mesure des changements d'élévation de la surface du sol, c'est-à-dire la perte d'épaisseur du sol pendant une pluie intense ou une période donnée. A partir de ces valeurs, on peut estimer des taux d'ablation de sol.

Il est notamment possible d'utiliser les méthodes suivantes :

[9] http://www.spc.int/images/climate-change/RESCCUE/publications/north-province/Dispositif-suivi-Bassin-Thiem.pdf

1. mise en place de clous implantés sur le versant et sur lesquels on mesure la hauteur et la vitesse de "dégagement". Il s'agit d'une méthode rustique et relativement peu précise ;
2. utilisation d'un pont topographique pour la mesure de hauteur de dégagement en plusieurs points par rapport à un niveau de référence (pont constructible à partir d'un niveau de maçon et dans lequel on crée 10 points de mesure par clous très fins coulissants) –précision au millimètre (Ypsilantis W.G., 2011) ;
3. réaliser des mesures de variation de la topographie avec un topomètre laser ou un Lidar terrestre. Cette méthode nécessite une grande précision de mesure, avec des outils de mesure spécifiques. Elle reste également très coûteuse.

Ces techniques sont intéressantes dans le sens où elles permettent de facilement donner un taux d'érosion et d'estimer un volume de matériaux érodé annuellement sur un site donné.

En ce qui concerne la deuxième méthode présentée, les avantages sont le coût restreint de mise en œuvre, la rapidité de déploiement et l'absence de biais lors d'un échantillonnage aléatoire (Ypsilantis W.G., 2011).

2.2 LA MESURE PAR INTEGRATION

Cette méthode est qualifiée « par intégration » car la quantification de l'érosion est basée sur le volume des matériaux entrainés par les écoulements qui se concentre en un point de mesure (au droit de la section de contrôle). Elle peut être mise en place au droit d'une station hydrométrique ou au droit d'un collecteur de parcelle de suivi de l'érosion.

Nous nous intéresserons ici plus particulièrement aux parcelles normalisées étant entendu que le budget du dispositif ne permet pas d'envisager la réalisation de seuils bétonnés adaptés aux petits bassins versants et à leurs débits caractéristiques.

Des chercheurs de renom se sont investis dans la mise en place de parcelles hydro-sédimentaire depuis les années 1920. Citons notamment Wischmeier et Smith (USDA[10]) qui sont les pères du modèle universel de perte en sol[11] construit sur la base d'un réseau important de parcelles et de petits bassins instrumentés et Eric Roose, directeur de recherche à l'ORSTOM, qui contribua à adapter les protocoles d'expérimentation des parcelles hydro-sédimentaires type « Wischmeier » pour l'Afrique et Madagascar.

Hudson en 1993, dans l'ouvrage de la FAO intitulé « Field measurement of soil erosion and runoff »[12] fait une revue critique des investissements passés en la matière. Il met en évidence les points suivants en ce qui concerne les expérimentations faites à partir des parcelles de ruissellement :

1. Les parcelles de ruissellement sont chères et la plupart du temps ineffectives, la majorité des parcelles ont produit peu de données utiles ou pas du tout. Il explique notamment cela du fait que i) les leçons apprises des expériences antécédentes ont été peu ou partiellement capitalisées et utilisées, ii) le design des dispositifs n'anticipe pas assez le traitement des données et envisage pourtant parfois une contribution à l'adaptation locale de l'équation de perte en sol (USLE) même lorsque celle-ci n'est pas applicable : iii) le manque de capacité de design statistique des designers ;
2. Investir dans la mise en place de parcelles de ruissellement n'a de sens que si i) il y a une question précise dont la réponse peut être apportée par la mise en place d'un dispositif de parcelles et que si ii) il y a les moyens disponibles nécessaires à la construction, l'instrumentation, le fonctionnement[13] et l'analyse des données ;

[10] USDA = United States Departement of Agriculure. En français: Département d'Agriculture des Etats Unis d'Amérique

[11] USLE = Universal Soil Loss Equation. En français : équation universelle de perte en sol.

[12] En français : Mesure de l'érosion et du ruissellement sur le terrain

[13] Pour leur fonctionnement et maintenance, les placettes nécessitent non seulement du temps de manœuvre mais également du temps de supervision. La plupart des efforts de formation des manœuvres pour la réalisation des mesures s'est avéré non-satisfaisant même après un effort de renforcement des capacités adéquat. La fiabilité des données ne peut être atteinte que lorsque du personnel professionnel peut se rendre rapidement sur site (pendant un cyclone, une nuit de samedi à dimanche, etc.) et corriger les éventuels problèmes pour ne pas perdre les mesures liés à l'évènement.

Il rappelle également qu'une quantité restreinte de données fiables valent bien mieux qu'un nombre élevé de données peu fiables et inutilisables.

Là où la mise en place de parcelles est particulièrement intéressante, c'est lorsque l'on souhaite répondre à un objectif démonstratif (par exemple démontrer par l'expérience qu'un sol couvert par de la végétation basse est moins sensible à l'érosion qu'un sol nu). Il n'est dans ce cas pas nécessaire de répliquer les parcelles et l'instrumentation peut consister uniquement en un bac récolteur situé en aval de la parcelle. D'autres cas sont également intéressants à petite échelle, on pense notamment au cas où c'est une comparaison entre des traitements ou des couvertures de sols différentes qui est recherchée (HUDSON, 1993).

En revanche, lorsqu'il s'agit de construire ou de valider un modèle de perte en sol (vulnérabilité à l'érosion), le nombre de répétition nécessaire devient grand et l'échelle de temps d'expérimentation assez longue. Par exemple, l'équation de perte en sol (USLE citée plus haut) est basée sur environ 10 000 parcelles ans. Il est donc impensable de proposer des adaptations locales à ces modèles sur base d'une poignée de parcelles observées durant une durée très courte (1 à 3 ans) (HUDSON, 1993).

En terme de fiabilité statistique, contrairement aux essais agronomiques (application d'un traitement phytosanitaire biologique à une culture de choux de chine par exemple) où deux réplications peuvent suffirent, le nombre de parcelles répliquées doit au moins être de 3 car les sources d'erreurs se cumulent : d'une part celles liées aux parcelles et d'autres part celles liées aux instruments et à leur bon fonctionnement (Hudson, 1993). Ypsilantis, quant à lui, recommande la mise en place d'au moins deux placettes de chaque type si l'on souhaite déterminer des probabilités et des intervalles de confiance (Ypsilantis W.G., 2011).

Les parcelles peuvent être soumises à des pluies naturelles ou simulées. Les pluies simulées nécessitent l'utilisation d'un matériel adapté et coûteux. Les simulateurs de pluies sont donc habituellement réservés à des parcelles de petites surfaces qui reproduisent rarement les conditions réelles de ruissellement. Pour mener à bien ce type d'expérimentation, il est, de plus, nécessaire de disposer d'une source d'eau à proximité facilement mobilisable (source d'énergie pour pomper l'eau jusqu'au site « parcelle »).

Les parcelles de surfaces moyennes avoisinent généralement les 100m². La taille originale des parcelles était de 6 pieds de large et 72,6 pieds de long mais rien ne justifie que ces dimensions soient utilisées lorsque l'on travaille en unité métrique. Un dimensionnement raisonnable en unité métrique serait de 5 m de large et 20 mètres de long (HUDSON, 1993, NOUVELLOT, 1993 et ROOSE, 1988).

Les biais majeurs sur les mesures effectuées au niveau de parcelles sont dus au fait que i) à l'aval de la parcelle, il y a une décharge qui n'est pas naturelle et que seuls les mouvements au sein de la parcelle sont mesurés (les phases de flux et dépôt venant de l'amont ne sont pas prises en compte), ii) les bordures peuvent réduire la force des phénomènes d'érosion. Ces deux facteurs peuvent contribuer à une surestimation ou une sous-estimation de l'érosion, une évaluation plus fiable ne peut être réalisée qu'à partir de l'instrumentation d'un exutoire de bassin versant (option qui avait été proposée dans le cadre du L1.5). (HUDSON, 1993 et Ypsilantis W.G., 2011)

Dans le cadre de cette dernière pour les bassins versants présentant des types d'occupation des sols différents, il devient beaucoup plus difficile d'identifier d'où viennent exactement les matériaux, voire même impossible de quantifier les proportions des différentes provenances ce qui peut être rendu possible à travers la mise en place de parcelles. L'accès facile des éléments du dispositif de placettes est important mais les conditions recherchées ne peuvent parfois être trouvées que dans des conditions reculées.

Pour éviter les biais à l'installation de la parcelle et des bordures, il est recommandé ce qui suit (Hudson, 1993) :

1. Mettre en place un drain en tête de parcelle permettant de dévier les flux qui viennent de l'amont ;
2. Les parcelles doivent de préférence ne pas partager une même bordure afin d'éviter qu'une faiblesse se répercute sur un ensemble de parcelles (un espace tampon devrait être préférentiellement mis en place) ;
3. Les bordures doivent être installées avec soin, suffisamment profondément, et être assez grandes (notamment pour éviter la surverse par l'amont) ; les éléments de bordures (bois ou acier) doivent s'enchevêtrer pour éviter les pertes ou échanges avec l'extérieur ;

4. Une fine bordure de terre contre la bordure à l'extérieur de la placette favorise la résistance de l'installation, il faut par contre veiller à ne pas créer une ouverture du sol à proximité lors de la mise en place (rigole) qui pourrait engendrer une érosion importante à proximité de la parcelle et déstabiliser les bordures elles-mêmes;
5. La mise en place du collecteur[14] doit veiller à impacter le moins possible le sol, être implanté au même niveau que le sol (à défaut, possibilité d'observer de l'érosion régressive), celui-ci doit être couvert afin que la pluie incidente n'entre pas dans le bilan hydrologique.

Les variables que l'on peut chercher à mesurer ou estimer sur ce type de parcelles sont :

- L'humidité des strates du sol de la parcelle (à mettre au regard de l'infiltration des eaux et du taux de ruissellement (il y a donc nécessité de bien maitriser la pluviométrie[15])) ;
- Le débit hydrique (partie ruisselée), qui est estimable à partir d'une hauteur d'eau en sortie de parcelle ;
- La quantité et le poids des matières érodées et transportées ;
- Le flux des éléments chimiques du sol, etc.

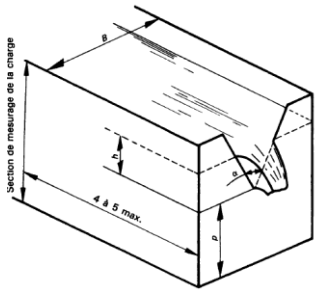
Pour pouvoir effectuer les mesures nécessaires aux variables exposées ci-dessus, les options suivantes d'instrumentation[16] sont possibles en fonction des objectifs assignés au dispositif de parcelles, aux budgets disponibles qu'ils soient d'investissement ou de fonctionnement.

[14] 1er élément qui canalise le flux du ruissellement lorsqu'il arrive au pied de la placette. Il peut prendre la forme d'un canal protégé ou non d'un caillebotis (. Le collecteur oriente le flux ruisselé vers un réservoir, un partiteur ou un canal jaugeur.

[15] Sous couvert forestier, d'un point de vue scientifique, il serait souhaitable de mesurer la pluie incidente (au-dessus de la canopée), de mesurer la fraction de pluie traversant le couvert et la fraction de la pluie qui s'écoule le long des troncs.

[16] Ensemble des éléments qui permettent de mesurer ou contribuer à mesurer sur le terrain une variable environnementale.

Tableau 2 : Options d'instrumentation des parcelles de ruissellement (HUDSON, 1993, NOUVELLOT, 1993 et ROOSE, 1988 et Ypsilantis W.G., 2011)

	Eléments d'importance à considérer	Illustrations
Option 1 : Construction d'une grande cuve citerne en béton, on mesure tous les écoulements avec précision.	Coût à la construction important (surtout sous des pluviométries importantes – volume de cuve nécessaire) ; Risques de fissure sur le terrain ; Lenteur de la vidange ; Difficile d'estimer la charge solide (imprécision de la mesure) ; Suivi possible à l'évènement mais pas de détail durant un évènement.	 **Figure 1 : Parcelle pour la mesure de l'effet de l'enherbement – Afrique du sud (dans Hudson, 1993)**
Option 2 : Construction de cuves successives avec partiteurs[17]	Nécessité de poser les partiteurs de niveau - tarer les partiteurs pour s'assurer de la bonne connaissance de la répartition pour les pluies les plus fortes ; Présence de terrain très régulière – vérification des orifices des partiteurs	 **Figure 2 : Exemples de partiteurs de flux (dans Hudson, 1993)**
Option 3 : Construction d'une grande cuve, d'un seuil triangulaire à mince paroi et pose d'un limnigraphe	Mesure possible de l'intensité du ruissellement en cours d'épisode ; Imprécision sur les charges solides (nécessité d'être présent en cours d'averse pour prélever des échantillons pour la mesure en laboratoire des charges solides). Sédimentation partielle en amont du seuil – obstruction possible par des flottants (bois morts etc.)	 **Figure 3 : Schéma d'un seuil triangulaire à mince paroi (pour plus de détails voir annexe 8 du L1.5)**
Option 4 : Pose d'un canal jaugeur avant ou après un piège à sédiment, mesure de la charge (limnigraphe) et échantillonneur automanique	Relativement automatisé ; Lourdeur de l'échantillonnage et du traitement des échantillons ; Initialement peu adapté aux faibles débits, une gamme de canaux de type HS permet la mesure de débits de faible intensité (0.0045 à 22.74 l/s[18])	 **Figure 4 : Seuil de type HS (image USDA Agricultural Research Service)**

[17] Elément permettant une division du flux ruisselée et collecté en un nombre théorique égal de flux de même intensité.

[18] http://www.openchannelflow.com/products/flumes/h-type

Ces types de canaux sont utilisés par les services agricoles des Etats Unis d'Amérique pour les mesures de faible débit des parcelles agricoles.

La division des flux par des partiteurs peut entraîner des biais importants dans l'estimation des bilans hydrosédimentaires, une mesure totale sera toujours préférable. Pour obtenir la meilleure fiabilité possible lorsque que l'on fait le design et l'on met en place des canaux jaugeurs (mesure de la totalité du flux), il est particulièrement important d'observer les points suivants :

- Un canal d'approche doit être réalisé de longueur suffisante afin de mesurer un écoulement laminaire ;
- La surface du canal doit être libre de sédiments déposés du fait que cela affecterait la mesure ;
- La décharge en aval du canal doit être libre ;
- Le ratio de submersion h2/h1 (rapport entre la hauteur d'eau dans le chenal aval (h2) et dans le chenal amont (h1)) ne doit pas excéder la valeur de 0,25 pour s'assurer d'obtenir des mesures pertinentes ;
- Pour éviter l'instabilité de la surface d'eau mesurée, le nombre de Froude[19] ne doit pas excéder 0,5.

Afin d'alléger le fonctionnement d'un dispositif de type 4, il est tout à fait envisageable de mener des campagnes d'échantillonnage en intermittence tout en continuant à mesurer en continu le débit ruisselé (Hudson, 1993).

Le design du canal jaugeur en aval de placette se reportera toujours au débit maximal potentiellement observable. En effet, particulièrement dans des conditions tropicales, un orage peut être responsable des ¾ d'une perte en sol annuelle. Le système doit donc être conçu pour prendre en compte quelques évènements rares.

[19] Nombre sans dimension qui caractérise dans un fluide l'importance relative de l'énergie cinétique de ses particules par rapport à son énergie potentielle gravitationnelle. Il s'exprime donc par un rapport entre la vitesse et la force de pesanteur qui s'exerce sur celle-ci.

Tableau 3 : Résumé des avantages et inconvénients des parcelles de ruissellement

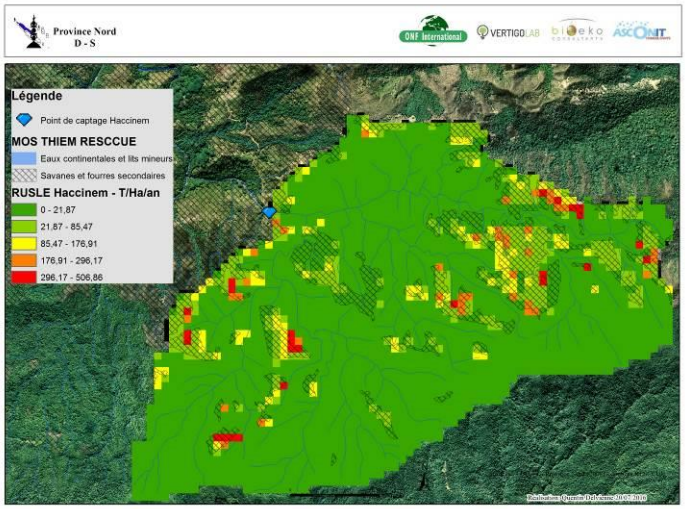
Avantages	Inconvénients
1. Ruissellement et taux d'érosion mesuré sur du long terme ; 2. Taille adaptée au standard des placettes utilisées pour déterminer les paramètres des équations « perte de sol » ; 3. Bonne précision des mesures si pas de débordement de la parcelle (en amont ou en aval) ; 4. Possibilité d'insérer facilement des réplications de parcelles dans un dispositif et des parcelles témoins; 5. Possibilité de faire de l'analyse statistique à partir des données récoltées.	1. Mesures reposant sur un équipement pas toujours fiable, une délimitation pouvant parfois entraîner des pertes (surverse), vandalisme – destruction du matériel par les animaux ; 2. Grande difficulté du choix du site et installation de la placette ; 3. Difficulté d'identifier des conditions pour installer des parcelles de réplication ; 4. Coût d'installation et de maintenance ; 5. L'effet de bord et de seuil des parcelles sur les processus d'érosion.

D'un point de vue opérationnel, les gestionnaires des territoires trouveront un intérêt particulier en ce qui concerne les parcelles de ruissellement. Celles-ci pourront non seulement être démonstratives mais également estimer les apports respectifs en sédiments des sols de mêmes caractéristiques géologiques mais de couverture végétale différente.

Elles peuvent également revêtir un intérêt certain dans le cas où des modèles de pertes en sol existent mais pour lesquels les résultats ne semblent pas correspondre à la perception des facteurs d'érosion identifiés par les experts. A ce titre, la Nouvelle-Calédonie a fait l'objet d'une cartographie basée sur l'équation révisée de perte en sol (RUSLE) par l'IRD en 2013. On peut, à partir de cette modélisation et d'un traitement cartographique, mettre en évidence les moyennes de perte en sol annuelles modélisées pour un espace donné.

Tableau 4 : Perte en sol annuelle estimée par RUSLE (IRD, 2013) sur le bassin versant d'Haccinem

Etendue considérée	Moyenne (t/ha/an)	Maximum (t/ha/an)	Ecart type (t/ha/an)
Bassin de captage d'Haccinem	18,09	506,9	53,3
Savanes et fourrés secondaires de Haccinem	58,88	506,9	80,2
Forêts denses humides et ripisilves de Haccinem	9,5	468,9	39,8



Les valeurs rendues par le modèle donnent l'occupation du sol « Savanes et fourrés secondaires » comme proportionnellement plus contributeur à l'érosion que l'occupation de type « forêts denses humides et de ripisylves ». Notre analyse « à dire d'expert » nous fait penser que ce n'est pas systématique pour de même conditions topographiques du fait du niveau de dégradation des formations végétales forestières par les espèces envahissantes.

Figure 5 : Carte des classes d'érosion (t/ha/an) et couverture des savanes pour le BV d'Haccinem

La réduction d'un millimètre de sol correspond à une perte en sol de l'ordre de 5 tonnes par demi-hectare (Ypsilantis W.G., 2011). Une perte en sol de 50 tonnes/ha/an correspondrait donc plus ou moins à une perte en sol de 5 mm par an, le modèle RUSLE pour la Calédonie semble renvoyer de manière générale des valeurs très élevées.

Le manuel de l'évaluation des pertes en sol canadien (RUSLE-CAN) propose une évaluation du risque selon 5 classes.

Tableau 5 : Lignes directrices pour évaluer les classes de risque d'érosion du sol (WALL et al., 2002)

Érosion des sols	Perte en sol possible	
	tonnes/hectare/année	tonnes/acre/année
1 Très faible (c.-à-d. tolérable)	< 6	< 3
2 Faible	6 - 11	3 - 5
3 Modérée	11 - 22	5 -10
4 Élevée	22 - 33	10 - 5
5 Grave	> 33	> 15

Pour se donner une idée et sans faire de comparaison directe[20], le dispositif Hydromine de Pöröö (Poro) situé sur un sol minier ultramafique sans couverture végétale avait mis en évidence un flux moyen de sédiment, à l'exutoire de petits bassins versants, de 2,34 t/ha/an sans la prise en compte d'un évènement majeur et de 6,45 t/ha/an avec la prise en compte de cet évènement pour une période de suivi de 4 années (Hydromine, 2014).

Le travail de master 2 de Gisèle Amo encadrée par Martin Brinkert (SMRT) fera le point sur les modélisations existantes et l'amélioration de la prise en compte du facteur de couverture végétale des sols au regard des perturbations causées par les espèces envahissantes. Ce travail est réalisé en collaboration avec le projet RESCCUE et l'aire d'expérimentation porte sur le bassin d'Haccinem. Le test de confection et d'utilisation d'un pont d'érosion, mesure visuelle, pourrait être réalisé dans le cadre du dit travail et être mis en place sur le dispositif RESCCUE et le bassin d'Haccinem.

2.3 LA MESURE PAR PHOTOGRAMMETRIE RAPPROCHEE

La photogrammétrie rapprochée permet de capturer une information détaillée de l'érosion sur des parcelles variant de 1m² à un versant. Un logiciel adapté permet la création d'un modèle numérique de terrain avec une précision millimétrique et la détection de changement en dessous du millimètre pour des très petites parcelles. Cette méthodologie est particulièrement adaptée et pertinente pour le suivi de l'érosion sur des sols dénués de végétation, notamment les routes et les sites en construction (Ypsilantis W.G., 2011).

[20] *Les valeurs observées sur Pöröö (Poro) sont des flux de sédiments et ne peuvent être comparés directement avec une quantité de sol potentiellement érodée sur un versant (perte en sol possible).*

Chapitre 6 : Dispositif RESCCUE adapté

Etant donné que la conjoncture nous oriente vers la mise en place de parcelles d'érosion, nous commencerons ce chapitre par vérifier que les deux préceptes cités par Hudson en 1993 (voir chapitre précédent) sont bien remplis, à savoir qu'investir dans la mise en place de parcelles d'érosion n'a d'intérêt que si :

- il y a une question précise dont la réponse peut être apportée par la mise en place d'un dispositif de parcelles,
- il est mis en place les moyens suffisants à la construction, l'instrumentation, le fonctionnement et l'analyse des données.

En ce qui concerne le premier précepte, les questions d'intérêt qui peuvent être portées par le gestionnaire sont les suivantes :

- Les espaces de forêts denses humides dégradées par les EE tels que le cerf et le cochon féral peuvent-ils être plus contributeurs en matériaux érodés qu'une savane herbacée à Niaouli ?
- Qu'en est-il lorsque la forêt est peu dégradée et qu'en est-il si le feu passe annuellement dans la savane?

Figure 6 : Etat du sous-couvert forestier sur les versants nord de Haccinem

La réponse à ces questions pourra être donnée (oui, cela a été ici observé ou non, cela n'a pas été ici observé) mais il ne sera peut-être pas possible d'extrapoler et de généraliser (exemple : toutes les forêts dégradées ruissellent plus et génèrent plus de matériaux en telle ou telle quantité). En effet, l'extrapolation et la généralisation ne peut se faire qu'à travers une réplication des expériences (au moins 3 par type de couverture/état de celle-ci) et nécessite un budget adéquat.

Concernant le deuxième précepte, un budget d'investissement a été inscrit sur les lignes budgétaires du SIEC pour la mise en place d'un dispositif adapté. Ce budget couvrira la mise en place du dispositif et son instrumentation sur l'année 2016. La question de la provision d'un budget de fonctionnement est nécessaire à la collecte des mesures, l'analyse des échantillons, le traitement des données et la valorisation des résultats. Il doit être pris en compte par la DDEE pour les années à venir et, à minima être garanti pour la période allant de début 2018 à fin 2020. Ce point d'opérationnalisation est précisé au chapitre 7 et son importance est encore rappelée dans la conclusion.

1 COMPOSITION GENERALE

Afin de pouvoir répondre aux questions posées ci-avant, la mise en place de parcelles de suivi de l'érosion est une orientation pertinente. L'implantation d'une placette d'érosion par type de couvert à caractériser est un minimum. La multiplication de plusieurs parcelles caractérisant un même type de couvert serait une grande valeur ajoutée d'un point de vue statistique (représentativité) mais sera fortement conditionnée par le budget disponible.

Les couvertures végétales recherchées sont les suivantes :

- **Forêt dense humide (FDH) <u>dégradée</u>** sur roche volcano-sédimentaire ;
- **Forêt dense humide <u>non-dégradée</u>** sur roche volcano-sédimentaire ;
- **Savane herbacée** sur roche volcano-sédimentaire **<u>où le feu ne passe pas</u>** ;
- **Savane herbacée** sur roche volcano-sédimentaire **<u>où le feu passe 1 à plusieurs fois par an</u>** ;

Chaque placette aura **un objectif scientifique avec une quantification précise des flux ruisselés et des matériaux érodés** durant un épisode de pluie, et également **un objectif démonstratif avec la mise en place d'un bac récolteur qui permettra au public cible de se rendre compte visuellement des taux d'érosion** à moyen et long terme.

La surface des placettes sera celle préconisée par les références scientifiques et mentionnée au chapitre précédent, soit des parcelles de **100 m²** (20 m de long dans la pente et 5 m de large).

Le paragraphe suivant précise les choix techniques envisageables pour la réalisation des parcelles, puis détaille le type de parcelle préconisé dans le cadre du projet RESCCUE.

2 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES PARCELLES HYDRO-SEDIMENTAIRES

2.1 DESIGN GENERAL DES PARCELLES

La prédétermination des flux est un préalable indispensable à la définition du dispositif, aussi bien en ce qui concerne le dimensionnement des équipements (volumes des collecteurs, forme des canaux, organisation des différents modules de mesure et de représentation « démonstrative » de l'érosion), qu'en ce qui concerne le choix de la plage de mesure des différents capteurs.

Dans le cas précis des parcelles d'érosion, les quantifications concernent :

- la lame d'eau précipitée (hauteur et intensité de la pluie) ;
- la lame d'eau ruisselée (débit et volume des écoulements liquides) ;
- la concentration et le volume des MES ;
- le volume des matériaux grossiers (sables et graviers).

2.1.1 Quantification de la lame d'eau précipitée et instrumentation

Compte tenu que les quantifications doivent porter sur un maximum d'épisodes de pluie, il est préférable de procéder à une mesure de la pluie à pas de temps variable. De cette manière, les épisodes, qu'ils soient longs (quelques heures) ou très brefs mais intenses (quelques minutes), pourront être enregistrés, puis pris en compte dans l'analyse des processus d'érosion.

En dehors de la technologie des radars météorologiques qui reste très coûteuse et hors de propos dans un contexte de mesure très localisée et devant être robuste, le seul instrument capable de répondre aux besoins est le pluviomètre à augets basculants de précision 0,2 mm.

A ce stade de la définition du dispositif il n'est pas utile de préciser le régime des pluies car les pluviomètres à pas de temps variable sont des standards utilisés depuis plusieurs dizaines d'années avec une qualité des mesures reconnues. Il sera donc proposé de mettre en place des pluviomètres analogues au modèle PrécisMeca avec un col d'entrée de 400 cm^2.

Dans une configuration idéale, il serait nécessaire de mettre en place ce type de pluviomètre au droit de chaque parcelle d'érosion. Par souci d'économie et dans un objectif de cohérence d'investissement, ainsi que de facilité d'entretien, il est recommandé de disposer d'un ou deux pluviomètres à proximité des parcelles d'érosion qui seront regroupées dans un rayon géographique restreint (inférieur à 200 mètres) et sur des altitudes et expositions proches.

2.1.2 Quantification de la lame d'eau ruisselée et instrumentation

Pour chaque épisode de pluie, la quantification du volume liquide produit par la parcelle d'érosion (issu du ravinement superficiel direct) est une donnée essentielle puisqu'elle permet de mettre en évidence les volumes d'eau en jeu pour in fine permettre une compréhension de la capacité des sols à favoriser ou non l'écoulement des eaux, ainsi que la concentration des matériaux en suspension.

Ces quantifications reposent sur la méthode par intégration puisqu'il est envisagé de mettre en place des parcelles d'érosion d'environ 100 m^2 de surface. Concrètement, il s'agit de mesurer un débit d'écoulement

liquide. En hydraulique de nombreuses méthodes permettent de mesurer un débit. Dans le cas présent, le moyen le plus pertinent est de procéder à la mesure à l'aide d'un canal calibré.

Ce canal peut-être, soit monté directement sur place, soit être déjà fabriqué en usine. Dans le premier cas, la courbe de tarage (relation hauteur d'eau – débit) qu'il est nécessaire de déterminer dépend très fortement de la bonne réalisation de l'ouvrage. Des campagnes de mesures sont alors nécessaires pendant une période allant de une à plusieurs saisons hydrologiques.

Dans le deuxième cas, les gabarits déjà précalibrés en usine permettent une quantification immédiate après la mise en œuvre sur le site.

Afin de gagner du temps pour la campagne de mesures **nous préconisons de s'orienter vers la solution du gabarit de canal précalibré en usine**.

Dans ce cas, plusieurs géométries sont envisageables. Elles dépendent :

- du débit maximum qu'il est nécessaire de mesurer ;
- des faibles débits représentatifs des averses de pluie courantes ;
- de la précision des mesures ;
- de la prise en compte du risque obstruction par des flottants ;
- de la prise en compte des dépôts (sables et graviers) qui peuvent se former ;
- de la facilité de mise en œuvre et d'entretien ;
- du coût d'achat, d'installation et de mise en route.

Les gabarits les plus courants qui peuvent répondre à ces exigences sont notamment :

- Le canal de type H-Flume[21] avec sa variante HS-Flume ;
- Le canal jaugeur de type Kafaghi-Venturi ;
- Le canal jaugeur de type Parshall.

2.1.2.1 Estimation des débits potentiellement produits par une parcelle de 100 m²

Avant d'aller plus loin dans la présentation des avantages et inconvénients de chaque gabarit, il est impératif de déterminer avec exactitude les débits caractéristiques qui peuvent être produits par la parcelle.

Compte tenu de la faible superficie des parcelles considérées, il est tout à fait adapté d'utiliser la méthode rationnelle en utilisant les coefficients de Montana du secteur d'étude.

$$Q_T = \frac{C_R \cdot i(t_c, T) \cdot S}{3{,}6}$$

avec : Q_T : débit de pointe de la période de retour T (m^3/s)

C_R : coefficient de ruissellement du bassin, fonction de T

$i_{mm/h}(t_c, T)$: intensité de la pluie de durée t_c et de période de retour T (mm/h)

S : superficie du bassin versant (km^2)

t_c : temps de concentration[22] du bassin (h)

[21] *L'appellation H provient du fait que cette géométrie correspond à la huitième conception du canal (8ème lettre de l'alphabet) d'une série commençant par "A". Cette géométrie combine la sensibilité d'un déversoir à paroi mince avec les propriétés d'auto-nettoyage d'un canal.*

[22] *Temps que met la goutte d'eau tombée à l'extrémité du bassin pour atteindre l'exutoire en suivant le plus long chemin hydraulique.*

Les coefficients de Montana liés au contexte pluviométrique de la zone d'étude[23] sont liés par les relations :

$$P_{mm}(t_c,T) = a_T \cdot t_c^{1-b}$$ et $$i_{mm/h}(t_c,T) = a_T \cdot t_c^{-b}$$

avec : $P_{mm}(t_c,T)$: hauteur de pluie de durée t_c et de période de retour T (mm)

a_T et b : coefficients de Montana de la période de retour T pour la zone géographique étudiée

La synthèse et la régionalisation des données pluviométriques de la Nouvelle-Calédonie (Davar, Nicolas ROMIEUX, 2011) permettent de retenir les coefficients de Montana suivants :

$a_{T=100}$= 120 mm

$a_{T=10}$ = 86 mm

b = 0,32 *(cette très faible valeur de b caractérise l'influence du relief et la survenue de nombreuses pluies brèves et intenses)*

➢ Détermination du temps de concentration t_c

Avec une surface de parcelle d'environ 100 m^2 (longueur dans le sens de la pente de 20 mètres et largeur de 5 mètres), le plus long chemin hydraulique parcouru par les écoulements sera de l'ordre de 20 mètres. Cette distance correspond à un temps de concentration très court, bien en deçà de ce qui est habituellement observé sur les bassins versants et pour lesquels plusieurs méthodes hydrologiques de détermination du temps de concentration peuvent être utilisées. Dans le cas des parcelles, ces méthodes se trouvent en dehors de leur champ d'application respectif. En effet, très peu de formules ont été construites à partir des temps de concentration très courts. Par exemple, la formule de Kirpich, réputée pour estimer fidèlement les temps de concentration des très petits bassins, a été déterminée à partir d'un échantillon de bassins dont la surface est comprise entre 0,4 ha et 43 ha.

A titre de comparaison, les parcelles d'érosion à étudier possèdent une surface de l'ordre de 0,01 ha, soit 40 fois moins que le plus petit échantillon de définition de la formule de Kirpich.

La seule méthode applicable, et qui donne généralement des résultats très satisfaisants, est celle dite « des vitesses ». Il s'agit d'une formule à base physique détaillée dans l'ouvrage Hydrologie *(Musy et Higy, 2004)*. Le temps de concentration t_c est alors la somme des 3 termes suivants :

- le temps d'humectation t_h → *temps nécessaire pour saturer le sol avant l'apparition de ruissellement*
- le temps de ruissellement sur plan incliné t_r → *temps de parcours en écoulement diffus*
- le temps d'écoulement t_e → *temps de parcours en écoulement concentré*

Ce qui s'écrit de la manière suivante : $\mathbf{t_c = t_h + t_r + t_e}$

Le principal objectif des parcelles d'érosion est de mesurer l'ablation de la strate superficielle de sol sous l'effet du forçage des précipitations. Les processus liés aux ravinements et aux écoulements concentrés ne traduisent pas la variable d'ablation que nous souhaitons quantifier. Il est donc impératif d'éviter la survenue de ces processus afin de ne pas fausser la mesure. Pour cela, la faible surface des parcelles permettra de s'en affranchir. Par conséquent, le temps d'écoulement t_e est volontairement considéré comme nul.

Le temps d'humectation est en général compris entre 5 minutes et 10 minutes. Ce temps d'humectation peut être considérablement réduit dans les cas suivants :

[23] *La pluie de projet retenue est fonction du temps de concentration tc du bassin.*

- une pluie sur un sol très sec sera difficilement absorbée dans les premiers instants (principe du filet d'eau qui ruisselle facilement au début sur une éponge très sèche). Dans le cas d'une surface très petite, les écoulements peuvent parcourir un linéaire significatif avant que les terrains ne deviennent prédisposés à l'infiltration ;
- une pluie sur un sol déjà saturé en eau. Dans ce cas, le temps d'humectation est très court avant que l'eau précipitée commence à ruisseler.

Le **temps d'humectation** peut alors être compris entre **1 minute et 5 minutes**.

En ce qui concerne le temps de ruissellement, celui-ci correspond à :

- un écoulement sur un plan incliné avec des écoulements non concentrés. Dans le cas présent, on fait l'hypothèse que ce type d'écoulement intervient sur les 10 premiers mètres. Comme l'indique la figure ci-dessus, le temps correspondant serait de l'ordre de 1,2 minutes, ce qui correspond à une vitesse moyenne de ruissellement de près de 15 cm/s.
- un écoulement sur un plan incliné avec un début de concentration des écoulements. Ce phénomène de concentration des écoulements doit être quantifié car il est responsable en grande partie de l'entrainement des matériaux vers le réseau hydrographique. Dans le cas présent, compte tenu de la pente des terrains et du type de sol, nous retenons une vitesse moyenne de l'ordre de 1,5 m/s. Ce temps correspond au parcours des 10 mètres en partie basse. Il est très faible, de l'ordre quelques secondes (10 s).

METHODE A BASE PHYSIQUE

$Tc = Th + Tr + Te$ avec
Th : Temps d'humectation
Tr : Temps de ruissellement sur plan incliné
Te : Temps d'écoulement

Temps d'humectation : temps nécessaire à la production de ruissellement

t_h = 5 min

Temps de ruissellement : temps nécessaire aux écoulement pour rejoindre le réseau hydrographique

1- Temps de ruissellement non concentré : t_{r1}

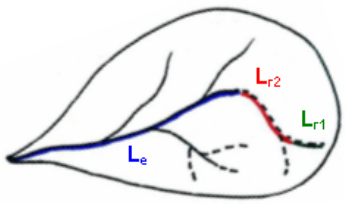
a_{100} =	120.00	paramètre de Montana
b =	0.32	paramètre de Montana
e_{100} =	0.80	coefficient d'écoulement
n =	0.15	coefficient de rugosité de Manning
L_{r1} =	10 m	longueur du cours d'eau
I_{r1} =	0.30 m/m	pente du tronçon du cours d'eau

t_{r1} = 1.2 min

2- Temps de ruissellement concentré : t_{r2}

L_{r2} =	10.0 m	longueur du cours d'eau
V_{r2} =	1.50 m/s	vitesse de ruissellement

t_{r2} = 0.1 min



$t_{r1} + t_{r2}$ = t_r calculé = 1.3 min
t_r retenu = 1 min

Temps d'écoulement : temps nécessaire aux écoulements pour rejoindre l'exutoire du bassin

Figure 7 : Calcul du temps de ruissellement à l'aide de l'outil ONF RTM

Ainsi, **le temps de ruissellement direct** sur la parcelle serait de l'ordre de **1 minute**.

Au bilan, le **temps de concentration d'une parcelle d'érosion de 100 m²**, selon les conditions initiales du sol, se situerait dans la gamme de **[2 min – 6 min].**

➢ Débits caractéristiques

En préalable au choix de l'instrumentation à mettre en place (géométrie du bâti et capteurs), il est indispensable de préciser la gamme des valeurs des débits ruisselés issue de la parcelle d'érosion.

Les flux à mesurer vont être générés, aussi bien par les épisodes pluvieux courants que ceux qualifiés d'exceptionnels. Afin de proposer la gamme de mesure la plus large possible, nous retenons la **pluie centennale** comme valeur **dimensionnante pour le gabarit**.

Les coefficients de Montana ont été déterminés (d'après ROMIEUX, 2011), à partir des mesures de pluie pour un pas de temps de mesure supérieure à 6 min. Les pluviomètres ne fournissent quasiment jamais les caractéristiques des pluies pour un pas de temps inférieur à 6 min. Dans le cas présent, et malgré un temps de concentration nettement inférieur au pas de temps minimal de détermination des coefficients de Montana, nous considérons que ces derniers **restent applicables pour le calcul de l'intensité pluvieuse.**

On retient un coefficient de ruissellement de l'ordre de 1 (valeur volontairement surestimée pour une occurrence centennale).

- pour t_c = 6 min → $i_{(6\ min\ ;\ 100\ ans)}$ = 251 mm/h → $\mathbf{Q_{100\ ans}}$ ≈ **7,5 l/s**
- pour t_c = 2 min → $i_{(2\ min\ ;\ 100\ ans)}$ = 356 mm/h → $\mathbf{Q_{100\ ans}}$ ≈ **10 l/s**

La valeur de **10 l/s** correspondrait à un débit spécifique de l'ordre de 100 m³/s par km². Ce débit spécifique nous parait être <u>un large maximum vraisemblable</u> pour la zone d'étude.

Tableau 6 : Débits estimés des épisodes de pluie plus fréquents

				S = 100 m²		*S = 200 m² (pour information)*[24]	
	coef. de Montana		ruisselle ment	t_c = 2 min	t_c = 6 min	*t_c = 3 min*	*t_c = 7 min*
période de retour	a	b	Cr	débit (l/s)		*débit (l/s)*	
2 ans	58,8	0,37	0,2	1,1	**0,8**	*2*	*1,4*
5 ans	75	0,35	0,3	2	1,4	*3,5*	*2,6*
10 ans	86,3	0,33	0,4	3	2,1	*5,2*	*3,9*
20 ans	97	0,32	0,6	4,8	3,4	*8,4*	*6,4*
50 ans	111	0,31	0,8	7,1	5	*12,5*	*9,6*
100 ans	122	0,30	1	**9,5**	6,8	*16,7*	*12,9*

[24] *Les débits caractéristiques sont estimés pour une parcelle de 200 m² <u>à titre informatif</u> dans le cas où les flux ne seraient pas suffisants avec une parcelle de 100 m² pour pouvoir être correctement interprétés. Ce cas pourrait se produire en secteur de forêt dense humide.*

Les estimations indiquent que la pluie biennale pourrait générer un débit de l'ordre de 0,8 l/s. Afin de mesurer l'intégralité des ruissellements, il est indispensable de pouvoir quantifier les très faibles débits générés par les averses pluvieuses courantes.

Dans l'idéal, la gamme de mesure à prendre en compte correspondrait à **l'intervalle [0 ; 10/s]**. Néanmoins, les instruments de mesure (canal et capteurs) présentent des valeurs seuils qui obligeraient pour certains à réduire cet intervalle (surtout pour les très faibles débits).

2.1.2.2 Choix du canal de mesure

Afin de rendre opérationnel le plus rapidement possible les dispositifs construits sur place et non issus de gabarits d'usine, il est obligatoire de recourir à une campagne d'étalonnage qui peut se révéler longue (au moins une saison), difficile (difficultés d'accès) et contraignante (nécessité de se rendre sur place pendant les épisodes pluvieux).

Pour s'affranchir de ces contraintes, il est fortement recommandé de **mettre en place un appareillage de mesure précalibré de type canal jaugeur (flume)**.

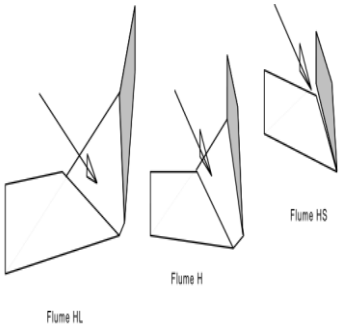
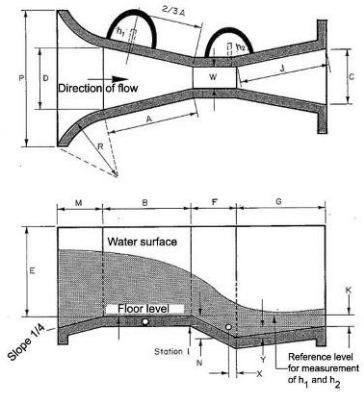
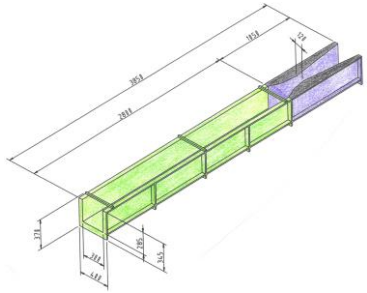
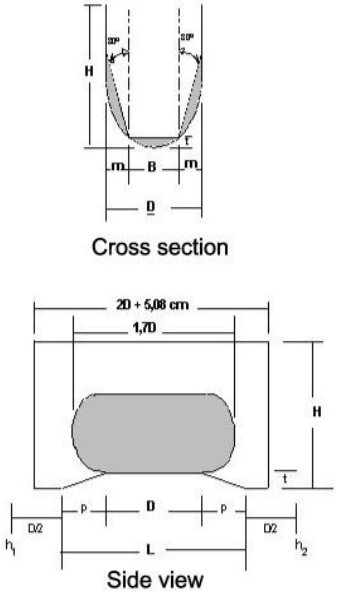
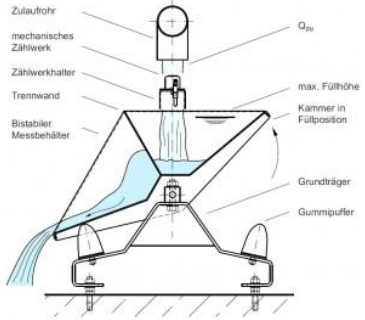
Ces appareils présentent les avantages suivants :

- Précalibrage en usine et utilisation immédiate ;
- Pas de dérive de la mesure tant que la géométrie du canal est inchangée (pas de dégradation) ;
- Installation facile dans le bâti à prévoir ;
- Conçu pour limiter les dépôts jusqu'à une certaine valeur. Le fond plat facilite le nettoyage ;
- Peu sensible au piétinement des animaux si le bâti béton est bien réalisé.

Les inconvénients de ce type de canal sont :

- La forme spécifique des gabarits interdit les organes en saillie comme par exemple la présence d'une sonde de mesure intrusive (capteur de pression pour le niveau d'eau). Dans ce cas il est préférable d'utiliser une mesure par ultrasons (consommation plus importante) ;
- Pour l'utilisation d'une sonde pression, il est nécessaire de créer un puit de mesure en amont du convergent. La courbe de tarage (relation hauteur/débit) peut alors être notablement modifiée pour les gabarits qui n'intègrent pas l'option de puit de mesure ;
- Organe en matière plastique (polypropylène) qui peut être endommagé par le feu ;
- Nécessité de construire un canal d'amenée en béton lissé et ne présentant aucune aspérité avec la partie du canal destinée à la mesure.

Tableau 7 : Comparatif des différents appareils envisageables pour la mesure du débit et figures diverses de canaux jaugeurs

	H-Flume	*Parshall*	*Khafagi-Venturi*	*Palmer BOWLUS*	*Fluid Tipper*
ILLUSTRATIONS					
SCHEMAS	Il existe trois types « flume » :  le H-Flume le HL-Flume pour les forts débits le HS-Flume pour les faibles débits Grâce à des géométries différentes, ils couvrent plusieurs gammes de débits.	 Le canal Parshall fonctionne sur le principe d'un rétrécissement (effet Venturi) combiné à une « marche » en fond. Comme tous les canaux, il permet aux écoulements de passer par le régime critique (de fluvial à torrentiel).	 Le canal Khafagi-Venturi possède un fond plat et les écoulements subissent un rétrécissement (effet Venturi pour un passage en régime critique).	 Fonctionnement également sur le principe du régime critique.	 La mesure est basée sur le principe des volumes élémentaires, à l'image du fonctionnement des pluviomètres à augets.
AMPLITUDE DE MESURE DE DEBITS POSSIBLES (SELON MODELE)	• Hs-122 mm : 0,0046 l/s à 2,41 l/s • Hs-152 mm : 0,0056 l/s à 3,96 l/s • Hs-183 mm : 0,0066 l/s à 6,513 l/s • Hs-244 mm : 0,0086 à 13,31 l/s	• col de 25 mm : 0,13 l/s à 4,38 l/s • col de 51 mm : 0,4 l/s à 8,75 l/s • col de 76 mm : 0,82 l/s à 52,56 l/s	• QV302 : 0,5 l/s à 6,93 l/s • QV303 : de 0,5 l/s à 29 l/s	• diamètre 102 mm : 0,2 l/s à 2,2 l/s • diamètre 152 mm : 0,98 l/s à 8,9 l/s • diamètre 203 mm : 2,1 l/s à 18,96 l/s	• modèle 2 L → jusqu'à 0,25 l/s • modèle 5 L → jusqu'à 0,63 l/s • modèle 10 L → jusqu'à 1,3 l/s • modèle 16 L → jusqu'à 2 l/s

	H-Flume	***Parshall***	***Khafagi-Venturi***	***Palmer BOWLUS***	***Fluid Tipper***
	• Hs-305 mm : 0,0105 l/s à 23,22 l/s				• modèle 25 L → jusqu'à 3,1 l/s • modèle 40 L → jusqu'à 5 l/s
Canal d'amenée – caractéristiques	Longueur d'au moins 5 fois la hauteur d'eau maximum. Pente du canal d'amenée < 1 %	Longueur d'au moins 20 fois la dimension du canal d'arrivée d'eau Pente du canal d'amenée < 1 %	Longueur d'au moins 10 fois la hauteur d'eau maximum. Pente du canal d'amenée < 0,2 %	Longueur d'au moins 25 fois la dimension de la conduite d'amenée Pente du canal d'amenée < 2 %	Aucun, principe de la chute
Mage d'erreur renseignée	Le Flume de type Hs permet de mesurer les plus petits débits avec une étendue assez intéressante vers les débits les plus forts et une faible marge d'erreur.	± 3 % à condition d'un strict respect des dimensions de construction et d'installation	± 1 % sur la gamme de débit comprise entre 5 et 100 % du maximum	± 3 % A condition d'un strict respect des dimensions de construction et d'installation	Non précisé par le fabricant
Facilité de construction sur place à partir de plans	Difficulté = moyenne	Difficulté = forte (nombreux plans à assembler)	Difficulté = forte (courbure à respecter)	Difficulté = Forte	Inenvisageable
Prix (hors frais de port et douane)	3 000 $ pour un canal et le capteur de mesure de hauteur d'eau (y compris la batterie et le data logger) Aux USA	Environ 2000 € en europe	Environ 1 000 € en europe	inconnu	entre 1 600 € et 2 300 € H.T. selon modèle

D'autres canaux jaugeurs moins courants peuvent être également cités CUTTHROAT, LEOPOLD-LAGCO, etc. mais ne permettent généralement pas d'effectuer des mesures précises des petits débits et, ont de ce fait, été écartés de l'analyse comparative des options techniques.

Au regard des caractéristiques techniques présentées dans le tableau ci-dessus, ainsi que les plages de mesure respectives de chacun des appareils illustrés sur le graphique ci-dessous en comparaison à la plage recherchée de [0 – 10 l/s], il apparaît que le modèle Hs Flume de 244 mm est le plus adapté. En effet, la valeur maximum de 13,31 l/s de ce modèle peut nous assurer d'une bonne prise en compte des pluies exceptionnelles. Mais ce qui est intéressant, c'est surtout la capacité de l'appareil à mesurer les très faibles débits (à partir de 0,0086 l/s[25]). Pour atteindre ces précisions, les sondes de mesures de hauteur d'eau devront être placées en dessous du radier du HsFlume, idéalement dans un puit de tranquillisation.

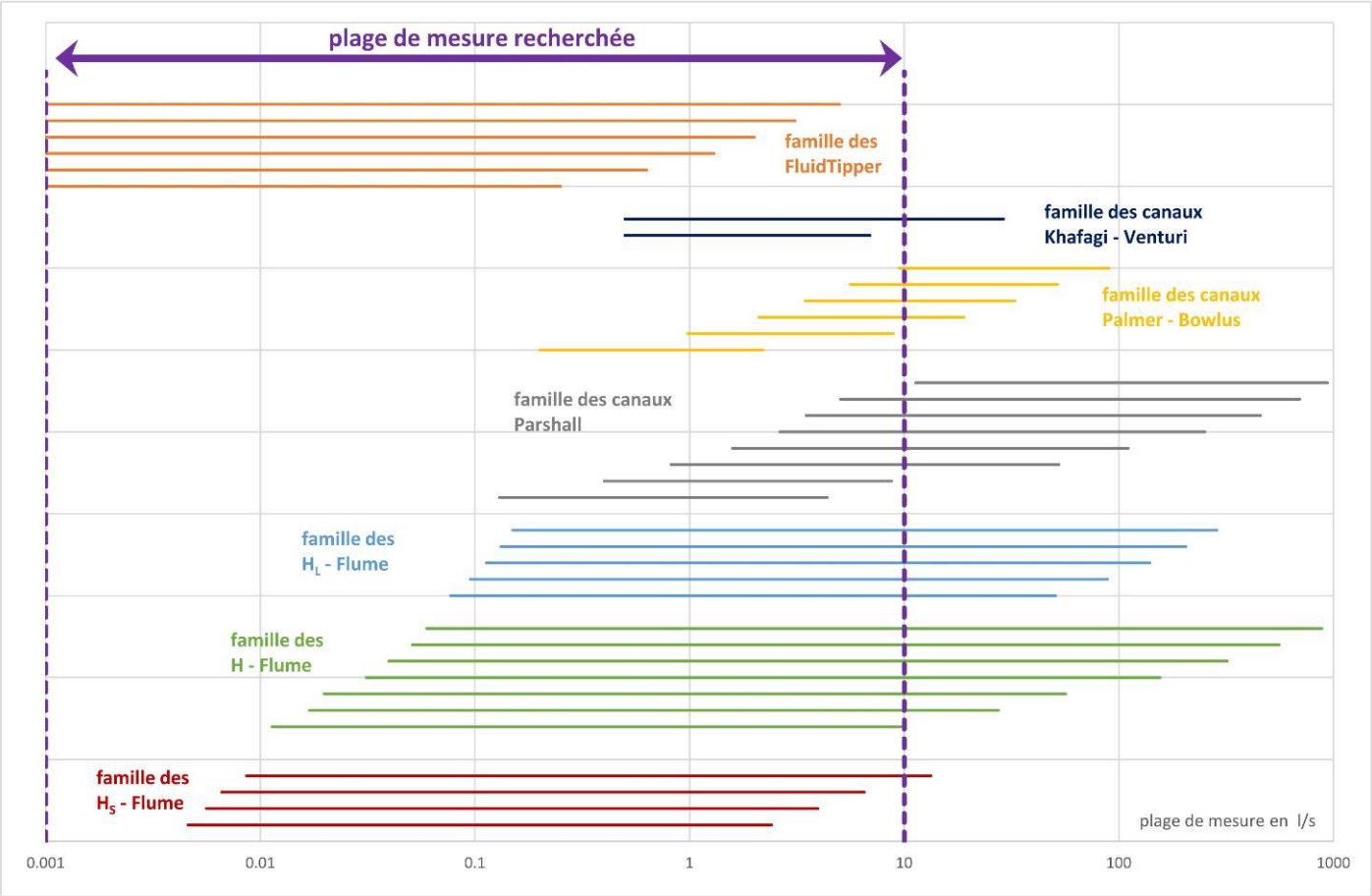


Figure 8 : Simulation des plages de mesures des différents canaux jaugeurs par rapport à la plage souhaitée

[25] *Afin de se rendre compte de cette faible valeur de débit, cela est équivalent à vider de manière constante une bouteille de 1 L pendant presque 2 minutes*

2.1.2.3 Mesure de niveau d'eau (pour détermination du débit)

Compte tenu de l'isolement des sites de mesures, les solutions envisageables pour la détermination de la hauteur d'eau concernent, soit la mesure intrusive par sonde de pression hydrostatique (par exemple les sondes de marque InSitu couramment utilisées), soit la mesure à distance par ultrasons.

Chacune de ces solutions présente des avantages et des inconvénients qu'il convient de préciser pour procéder au choix du capteur le mieux adapté :

Tableau 8 : Tableau comparatif des capteurs de hauteur d'eau

TYPE DE CAPTEUR	AVANTAGES	INCONVENIENTS
Sonde de **pression hydrostatique** *Implantation : en fond de canal*	➢ grande autonomie ➢ faible coût (environ trois fois moins cher que la sonde US) ➢ pas visible (moins de risque de vandalisme)	➢ vulnérable à l'ensablement et envasement (nécessité d'un entretien périodique) ➢ peut perturber l'écoulement dans les canaux de mesure (biais dans la mesure)
Mesure du niveau du miroir d'eau par **réflectivité ultrasons (US)** *Implantation : au-dessus du canal*	➢ aucune incidence sur la déstructuration des écoulements, ➢ insensible à l'ensablement du canal	➢ nécessité de mesurer également la température, ➢ difficilement autonome et consommation permanente pour générer les pulses de mesure (nécessite une alimentation externe de type batterie ou panneau solaire), ➢ coûteux ➢ chaine de mesure plus complexe

Le capteur à préconiser devra permettre d'offrir le meilleur compromis parmi les objectifs suivants :

- Offrir une plage de mesure en accord avec l'amplitude maximale à mesurer (de 0 à 30 cm environ) ;
- Donner une mesure fiable (fidélité du capteur) et une bonne sensibilité (pas de mesure) ;
- Avoir une faible dérive dans le temps (écart avec l'étalonnage) ;
- Disposer d'une grande autonomie dans le temps (> 1 mois) ;
- Avoir une conception robuste (résister aux fortes températures, au passage rapide du feu, aux cyclones) ;
- Etre discret pour limiter le vandalisme ;
- Etre le moins coûteux possible, facile à entretenir et à remplacer ;
- Etre assez insensible aux phénomènes d'ensablement ;
- Intégrer un stockage des données simple à utiliser.

Malgré un retour d'expérience mitigé sur la périodicité d'entretien des sondes de pression hydrostatique sur l'exemple de l'instrumentation de la mine de Poro (cf. illustration ci-dessous), il s'avère que cette solution reste **la plus fiable et la plus éprouvée** dans le contexte néo-calédonien.

Figure 9 : Etat de la goulotte avant et après nettoyage à Poro amont (source rapport de synthèse 2009-2012 DAVAR Convention Hydromine)

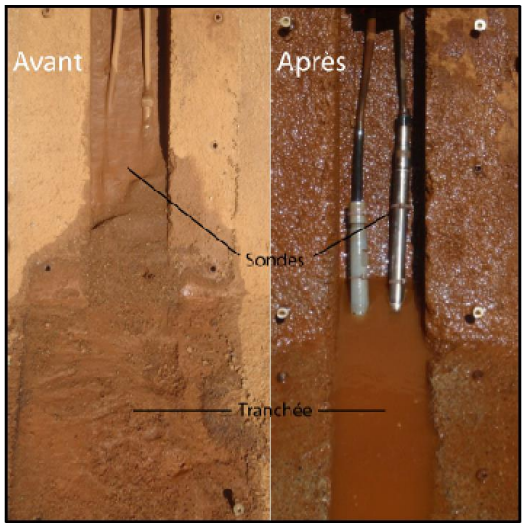


Figure 10 : Démontage de la goulotte à Poro aval (source rapport de synthèse 2009-2012 DAVAR Convention Hydromine)

Afin de corriger les inconvénients liés à la présence de la sonde dans le canal (perturbation des écoulements dans un gabarit étalonné), il est préconisé d'installer le capteur dans un puits de mesures dédié.

Le schéma ci-contre donne une représentation de l'implantation de la sonde de pression hydrostatique dans le puits de mesure du canal. Afin de mesurer les faibles débits (et donc les faibles hauteurs d'eau), il est recommandé de positionner la sonde de mesure en dessous de la côte du fond de canal. Cette configuration confère une prédisposition à l'ensablement. A ce jour, aucune solution technique ne permet de s'affranchir de ce phénomène en ce qui concerne les mesures intrusives.

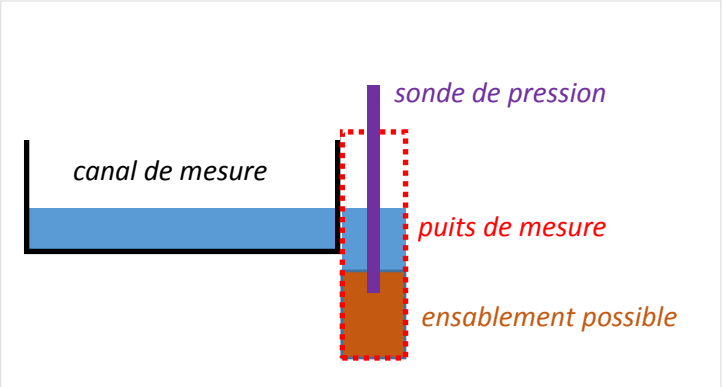


Figure 11 : Schéma du canal de mesure et de son puit

Au bilan, **nous préconisons l'utilisation de sonde de mesure du niveau d'eau par pression hydrostatique** car il s'agit du capteur le plus robuste sur le marché. On veillera à mettre en place des visites de surveillance périodiques afin de garantir le bon entretien des instruments.

2.1.2.4 Mesure de la charge sédimentaire

La charge sédimentaire provenant de la parcelle d'érosion sera de trois types, avec par ordre d'importance :

- Les matières en suspension (MES) qui représenteront le volume le plus important et seront quantifiées par le biais de la mesure de turbidité des écoulements (également par échantillonnage sur certains dispositifs) ;
- La charge solide de fond qui se manifestera par un ensablement du fond du dispositif ;
- Les dépôts anarchiques qui se déposeront dans le collecteur en pied de parcelle (mottes de terre, cailloux).

L'objectif premier de la mesure d'érosion sur les parcelles concerne les matières en suspension. Ainsi il est convenu que les instruments de mesure s'attacheront à quantifier au mieux cette composante solide (turbidimètre, échantillonnage). En effet, compte tenu de la volatilité des MES, il n'est pas envisageable de procéder à une mesure par le principe de décantation. Le dispositif est conçu pour un fonctionnement sans surveillance permanente, et par conséquent, les dépôts des épisodes de pluie précédents pourront perturber la mesure des écoulements en cours. Par ailleurs, la mesure des MES est susceptible d'être perturbée par la présence de flottants (morceaux de bois, feuilles), ainsi qu'en cas de suroxygénation du volume d'eau à proximité du capteur de turbidité (mesure située dans une chute d'eau).

En second lieu, la charge solide en fond ne sera pas quantifiée de manière continue, mais plutôt à la fin des épisodes et à titre davantage démonstratif que quantitatif.

Enfin, les dépôts qui peuvent se former dans le collecteur en pied de la parcelle seront périodiquement enlevés et le volume approximatif sera relevé.

En ce qui concerne la mesure des matières en suspension, la détermination de la turbidité en fonction du temps pourrait être confortée par l'utilisation d'un échantillonneur de type ISCO. Dans le cadre du partenariat avec l'IRD, il semble être possible d'installer un échantillonneur mobile sur un dispositif. Cet appareil pourra permettre, aussi bien de procéder à l'étalonnage des capteurs de turbidité, que de procéder à des relevés pour évaluer la qualité des eaux en secteur de forêt (problématique des espèces invasives) qu'en secteur de savanes (impact des feux).

2.1.2.5 Mesure de l'humidité du sol de la parcelle

La mesure de l'humidité du sol pendant les épisodes de pluie permettra de mieux comprendre le fonctionnement de ruissellement et d'infiltration des eaux. Les mesures consistent à déterminer sur une colonne verticale de sol le taux d'humidité.

L'intensité de la pluie comparée à la capacité d'infiltration du sol conditionne les quantités d'eau infiltrées et ruisselées. Cette capacité d'infiltration peut être déduite de mesure d'humidité des sols. Mesurer l'humidité des sols renseigne donc sur un des termes du bilan en eau, la quantité infiltrée. D'autre part cette mesure permet de mieux comprendre comment se déclenche le ruissellement. La mesure l'humidité du sol peut permettre de contraindre un des termes du bilan eau de la parcelle, le terme d'infiltration.

Les sondes Delta-T utilisent la propagation des signaux électriques moyenne fréquence pour fournir une mesure fiable à 1% de l'humidité. Couplées à une station d'acquisition du même constructeur elles ont une autonomie de plusieurs mois sans apport d'énergie. Elles ont été utilisées avec succès par l'équipe HydroSciences Montpellier au cours d'un projet de prévision des crues dans les Cévennes, une région aussi sur substrat cristallin et soumis à des pluies fortes.

Figure 12 : image d'une sonde Delta-T

Ces sondes constituent un moyen autonome et économique de mesurer de manière fiable l'humidité des sols. Ces sondes doivent être disposées de façon à perturber le moins possible le milieu. La solution à retenir consisterait à les planter au fond d'un trou de tarière à des profondeurs croissantes, typiquement 10 cm 50cm et 1 m et 2 m.

Les propriétés des sols en milieu non saturé seraient estimées de deux manières indépendantes : 1) par échantillonnage, détermination des propriétés granulométriques et utilisation des fonctions de pédotransfert disponibles dans la littérature et d'autre part par inversion de pluie simulée. Il s'agit de méthodes fournissant des

résultats approchés mais de bonne qualité (Siltecho et al., 2015) tout en ne nécessitant pas un laboratoire complet de mesure des sols.

2.2 DEFINITION LA PARCELLE TYPE, PLANS ET INSTRUMENTS SELECTIONNES

2.2.1 Analyse des options

Avant de définir le schéma définitif de la parcelle de type, il est nécessaire d'évaluer les différentes configurations possibles. A la lecture de la bibliographie détaillée, nous avons pu mettre en évidence deux classes de dispositifs de quantification de l'érosion des sols au niveau des parcelles :

- **Classe « volume »** : La quantification des volumes mis en jeu (dispositif rustique, largement déployé dans le monde, en particulier pour l'élaboration de la loi USLE) ;
- **Classe « flux »** : La quantification des flux (utilisation d'instruments de mesure, plutôt à vocation de description des épisodes, et quantification précise).

La classe qualifiée de « volume » a été mis en place pour la compréhension des processus d'érosion dans le monde entier. Elle présente l'avantage d'être très rustique mais nécessite une présence très régulière sur les dispositifs de mesure. Elle conviendrait alors davantage à un programme de recherche avec un personnel dédié et très présent (relevé après chaque pluie). Ce type de dispositif est recommandé dans des secteurs faciles d'accès.

Le synoptique n°1 donne le schéma fonctionnel de ce type de dispositif. Le pluviomètre à proximité de la parcelle d'érosion (1) permet de connaître précisément la quantité de l'intensité de la pluie qui affecte le sol. La première fraction de la lame précipitée est infiltrée dans le sol, puis le processus de ruissellement devient effectif. Les flux liquides et solides sont collectés en pied de la parcelle (2). Cette eau chargée est ensuite déversée dans un premier bassin de sédimentation (3). Les écoulements sont alors expurgés de la fraction solide la plus grossière, pour ensuite rejoindre le bac primaire préalable à la partition des écoulements. Cette partition est nécessaire compte tenu des volumes mis en jeu. A titre d'exemple une pluie journalière de 200 mm de lame d'eau, correspondrait pour un coefficient de ruissellement de 0,8 et une parcelle de 100 m^2 à un volume ruisselé équivalent à 16 m^3. Afin de quantifier des volumes davantage perceptibles, et surtout pour limiter le dimensionnement des installations, la partition des eaux permet de diviser l'important volume incident en une quantité facilement stockable. Dans cet exemple, il serait conseillé de diviser le volume par un facteur de 8 au moins. Ainsi, la cuve à partir de laquelle les volumes seraient quantifiés présenterait une capacité de 2 m^3.

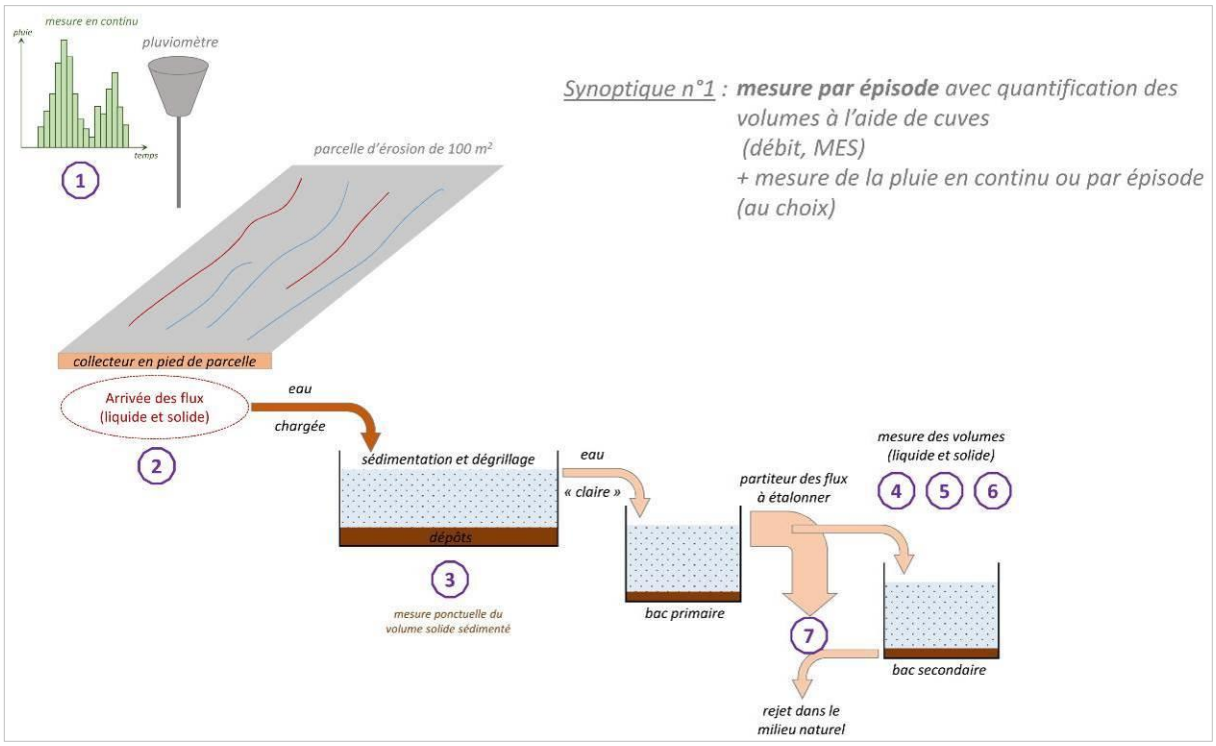


Figure 13 : Synoptique 1 de parcelle et organisation des mesures

La plus grande difficulté dans ce type de dispositif est de calibrer correctement le partiteur de débit. Dans le cas des très petites parcelles, ce calibrage peut être réalisé sur place. Dans un cas comme celui de l'étude, ce calibrage pourrait être envisagé au village de Touho (volume d'eau disponible) : il s'agirait par exemple de disposer avec une parfaite horizontalité le dispositif de partition (plaque percée de fentes ou autre) puis d'en mesurer précisément le débit incident et le débit sortant, pour ensuite implanter sur le site ce dispositif avec la même horizontalité et les mêmes caractéristiques que celles de l'étalonnage.

Une grande partie du volume serait restituée dans le milieu naturel (7), avant de rejoindre le bac secondaire dans lequel des mesures de volume liquide (et potentiellement de débit avec l'ajout d'une sonde de pression hydrostatique) seraient réalisées (4). Dans ce même bac secondaire, la turbidité de l'eau pourrait être quantifiée (5), soit par l'utilisation d'un turbidimètre, soit par échantillonnage (5).

Enfin, l'utilisation des bacs servirait d'outils pédagogiques et démonstratifs auprès des tribus pour donner des ordres de grandeurs sur les niveaux d'érosion des sols (6).

Parmi les dispositifs relevant de la classe « Flux », le synoptique n°2 dresse le schéma fonctionnel d'une mesure en continu des principaux flux.

La décomposition fonctionnelle de ce dispositif est, pour certaines étapes, identique à la précédente. La connaissance de la pluie est opérée à l'aide de pluviomètre (1). Les flux sont collectés en pied de la parcelle (2), puis dirigés vers un bac de sédimentation et de dégrillage afin d'expurger les écoulements des éléments grossiers (charge solide de fond, flottants). Les écoulements liquides qualifiés «d'eau claire » sont alors principalement composés de MES (3). Le flux liquide est ensuite dirigé vers un canal de mesure (HS Flumes, Venturi, ..) permettant de définir l'hydrogramme de l'épisode (4). En aval du canal de mesure, dans une zone assez agitée mais sans apport excessif d'air, l'installation d'un turbidimètre permettra de connaître l'évolution dans le temps de la turbidité des écoulements (5). En dernière phase, un bac « démonstratif » sera installé (6) pour visualiser l'importance de l'érosion de la placette.

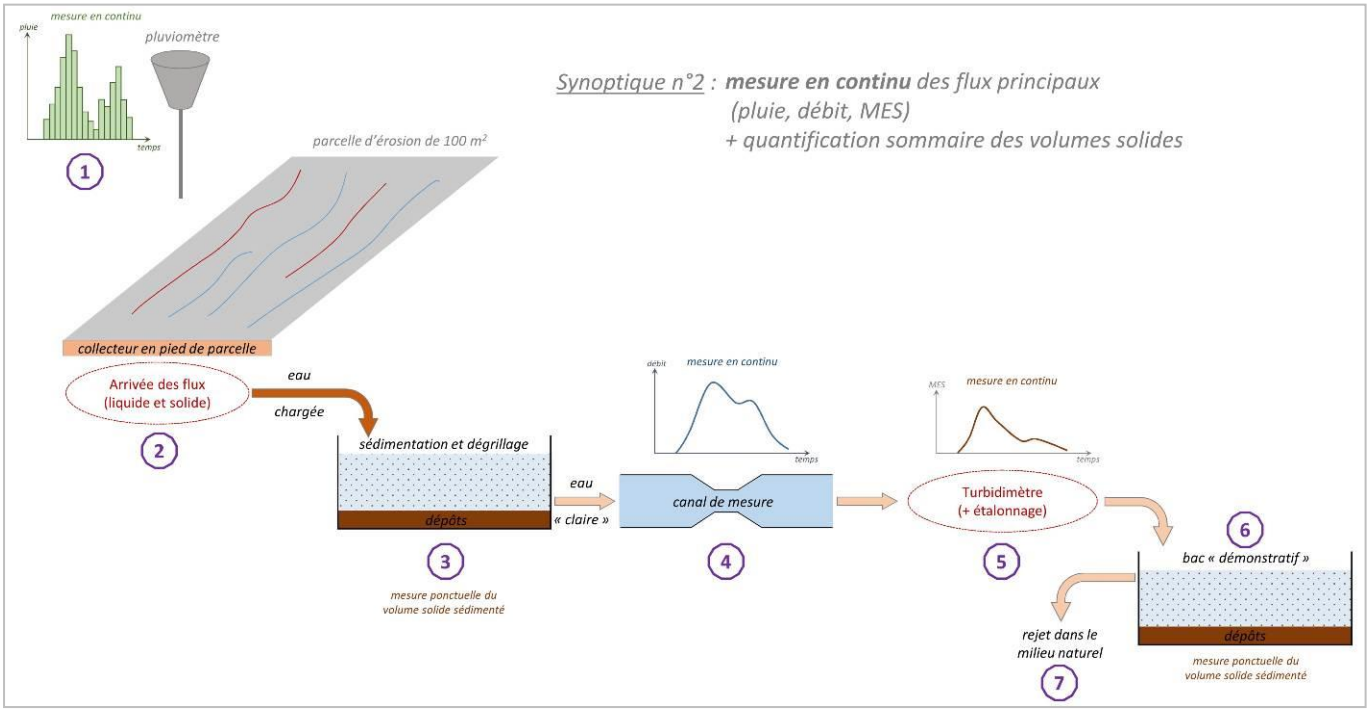


Figure 14 : Synoptique 2 de parcelle et organisation des mesures

Ce dispositif est alors assez automatisé puisque les flux Pluie, Débit et MES peuvent être connus simultanément. En revanche, la quantification du flux lié à la charge solide de fond nécessitera une mesure manuelle qui sera réalisée lors des opérations d'entretien. En restant dans les dispositifs de la classe « Flux », le synoptique n°3 présente un fonctionnement similaire au synoptique n°2, à la différence près que le flux liquide mesuré est qualifié de « chargé » (pas de sédimentation préalable : phase (3) supprimée).

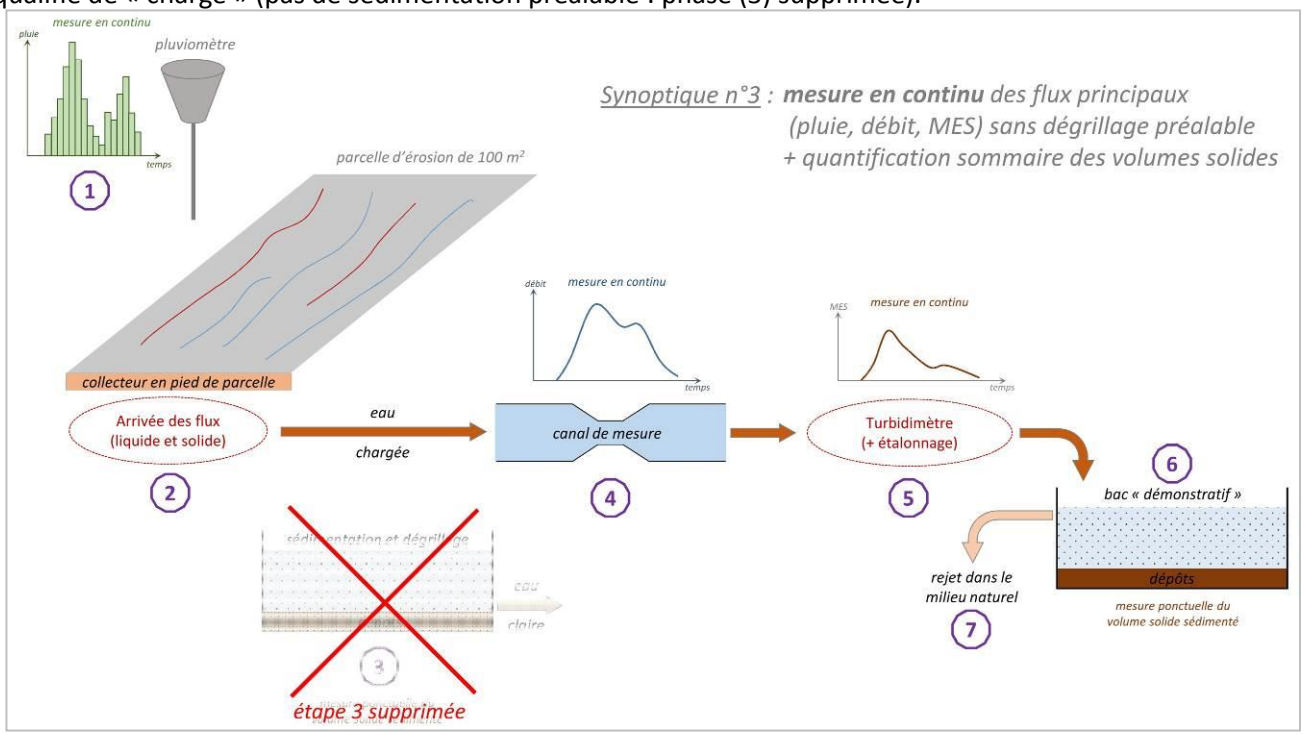


Figure 15 : Synoptique 3 de parcelle et organisation des mesures

Ce dispositif permettrait donc de connaître les flux pour les petits événements sans re-brassage des résidus des épisodes précédents. Néanmoins, la mesure des « eaux chargées » peut se révéler plus compliquée et nécessiter un entretien assez régulier.

A ce stade de la réflexion, il est mis en évidence que la définition d'un système sans contrainte répondant parfaitement aux objectifs (mesures fiables, faible périodicité d'entretien, très autonome) ne peut se concrétiser.

Chaque classe de dispositifs a ses avantages : alors que la classe « volume » permet de prendre en compte des épisodes liés aux faibles intensités de pluie, la classe « flux » permet quant à elle de mesurer les flux pendant les épisodes majeurs.

Le dispositif « idéal » serait finalement un mélange des avantages des deux classes (synoptique n°3 en début de chaine + synoptique n°1 en fin de chaine).

Ainsi, le synoptique n°4 permettrait de répondre au mieux aux objectifs : mesure des flux pour les épisodes de pluies importants (phase 1 à la phase 5), puis quantification des faibles pluies par le principe des volumes.

La partie amont ne concernerait que la quantification des flux sans se préoccuper de la problématique des dépôts solide en amont du canal de mesure. A contrario, la partie aval de la chaîne de mesures aurait les objectifs de quantification des très faibles pluies, associés à l'aspect « démonstratif » de l'érosion (bacs primaire et secondaire).

Au même titre que la description faite dans le synoptique n°1, il est envisageable d'instrumenter les bacs pour connaître le débit liquide (4 rouge) et la turbidité par échantillonnage (5 rouge).

Le synoptique de la solution préconisée est donc le suivant :

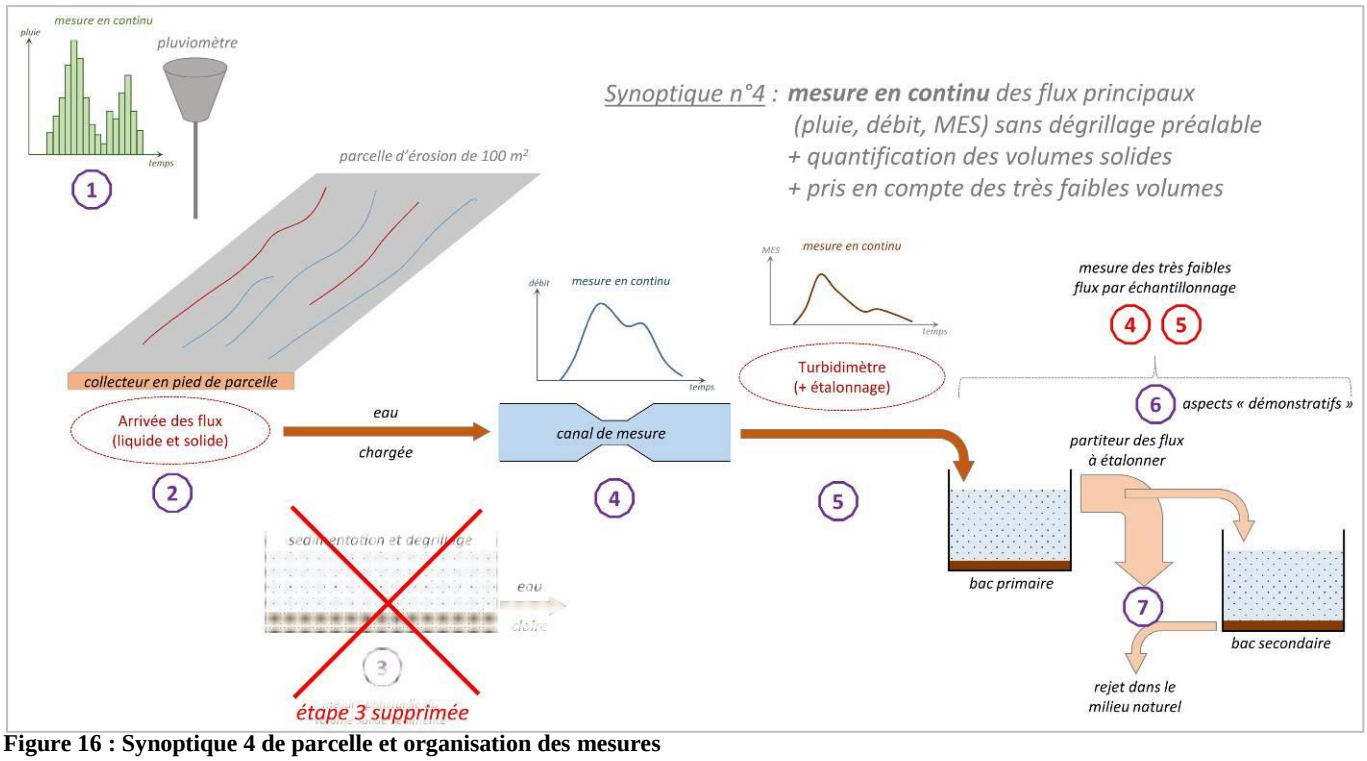


Figure 16 : Synoptique 4 de parcelle et organisation des mesures

2.2.2 Détails de l'option choisie

La parcelle d'érosion respectera une surface voisine de 100 m^2 avec une longueur de 20 m et largeur de 5 m. Entre la parcelle d'érosion et le dispositif de mesure il est recommandé d'entonner les flux ruisselés (la largeur passant de 5 m à 1 m en aval de parcelle confer figure 17) afin de minimiser les perturbations liées aux terrassements pendant le chantier. En effet, pour permettre la construction du collecteur, il est impératif de créer des fouilles pour les ouvrages. Les terrains seront donc décompactés avant la réalisation des bâtis, puis compactés pour redonner un caractère « état initial ». Ces terrassements seront une source principale d'erreur dans la mesure de la turbidité. Afin de minimiser ces effets, il est donc logiquement préconisé de réduire autant que possible l'emprise des terrassements. Sans resserrement des flux, la surface de sol décompactée serait de l'ordre de 13,25 m^2. Le resserrement des écoulements tel que schématisé sur la figure suivante, permet de limiter cette surface à 4,27 m^2.

La surface à étudier sera « isolée » de son environnement par la mise en place d'une bordure en tôles planes sur tout le pourtour. Cette bordure sera fichée dans le sol, et localement il sera nécessaire d'entailler les racines à la tronçonneuse pour faire juste le passage de la tôle. Il est important de ne pas contaminer la mesure par des terrassements trop importants, voire inutiles.

La coupe A-A de la figure 17 illustre l'implantation du collecteur dans une pente à 30 % (pente que l'on retrouve couramment sur les sites candidats).

Le collecteur aura une largeur de 50 cm, une longueur de 1 m et une hauteur de 50 cm également. Le mode de construction en parpaings bétonnés semble être la plus économique et la plus facile à mettre en œuvre sur le site. Un caillebotis métallique sera installé sur ce collecteur et présentera une largeur de plus 50 cm et une longueur de plus de 1 m.

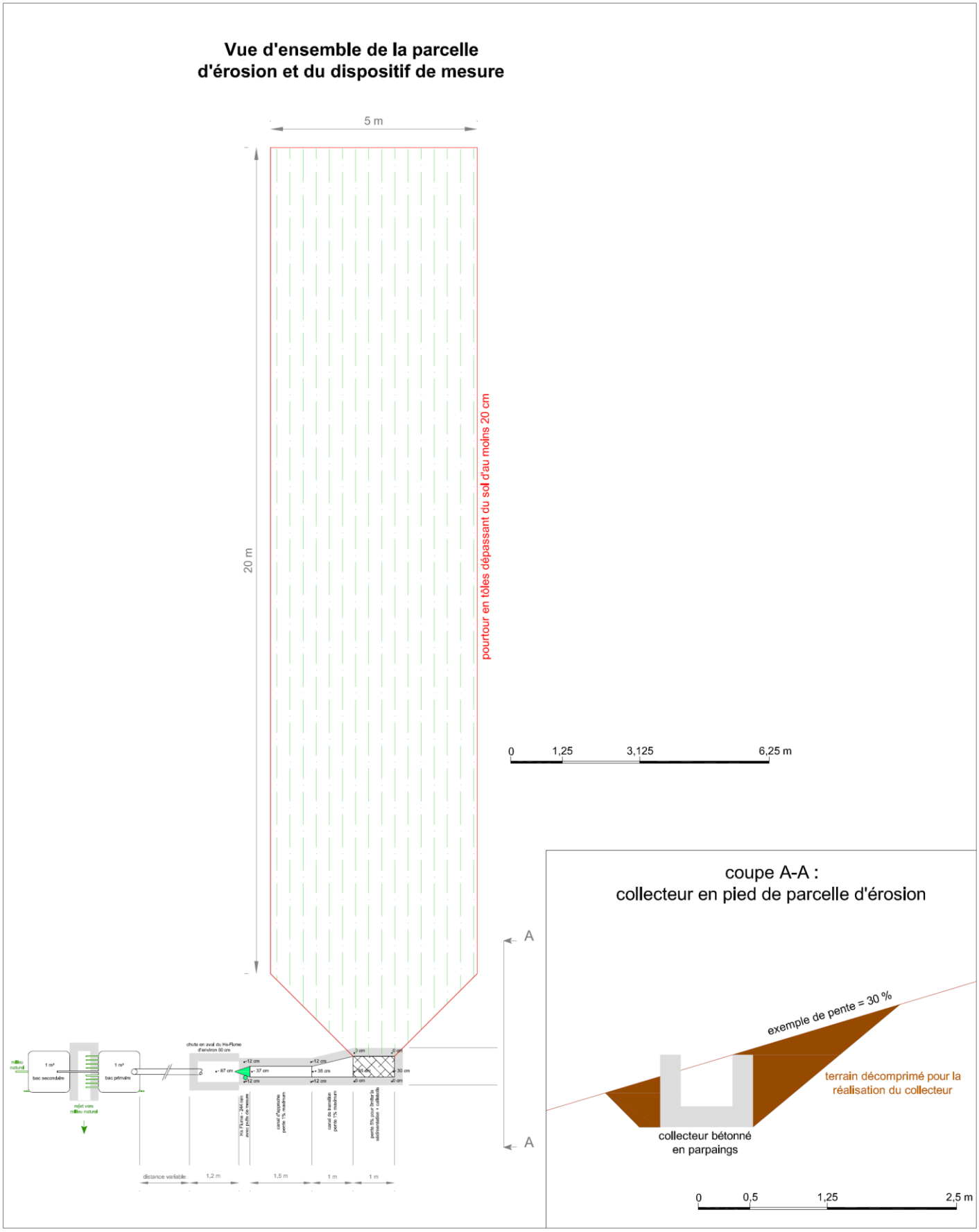


Figure 17 : Vue d'ensemble de la parcelle et du dispositif

La vue d'ensemble présente une disposition des aménagements qu'il conviendra d'adapter en fonction du terrain. En effet, alors que la première partie (collecteur, canal d'approche et HsFlume) ne nécessite pas de dénivelé très importante, la deuxième partie constituée des cuves demande quant à elle un relief accidenté afin d'éviter d'enterrer les cuves (pas souhaitable).

Ne figurant pas sur la vue en plan, il pourra être nécessaire de prévoir également une assise (50 cm x 50 cm) surmontée d'un capot métallique dans le cas où l'utilisation de batteries et de petite électronique s'avère nécessaire en fonction des capteurs proposés.

Commentaires sur le schéma du dispositif de mesure :

De l'amont vers l'aval le dispositif est composé :

- du **collecteur en pied de parcelle**, avec une longueur de 1 m, une largeur de 50 cm et une profondeur de 50 cm. Afin d'éliminer les plus gros éléments, et ainsi que pour faciliter les opérations d'entretien, un caillebotis métallique sera mis en place sur toute son emprise. Ce collecteur aura une pente soutenue de 5% afin de limiter les dépôts de matériaux.
- du **canal de transition** entre le collecteur large et la section de mesure étroite (passage de 50 cm à 24,4 cm). La pente de ce canal n'excédera pas 1 %. La hauteur des murs bajoyers passera de 50 cm à 25 cm.
- du **canal d'approche** qui permet de structurer les écoulements pour obtenir une mesure précise du niveau d'eau. Sa pente n'excédera pas 1 %.
- du **Hs-Flume (modèle 244 mm)** qui sera intégré dans le bâti afin de limiter les dégradations liées aux piétinements (animaux et humains). Cet appareil comportera un puits de mesure pour implanter la sonde de niveau d'eau.
- le **bassin de chute du Hs-Flume** et la transition vers la conduite qui est connectée au bac primaire. Ce bassin aura une longueur de 1 m et le fil d'eau de la conduite sera au même niveau que le radier du bassin. Cette canalisation aura un diamètre de 140 mm.
- la canalisation plongera au fond du **bac primaire** pour éviter de générer des ondulations trop importantes sur le miroir d'eau et perturber fortement le fonctionnement du partiteur de débit. Le volume efficace de ce bac sera de 800 litres (trop plein positionné à + 80 cm du fond de la cuve).
- le **partiteur de débit** consistera au percement de la cuve en 9 orifices de diamètre égal (25 mm). L'utilisation d'éléments de petite plomberie en PVC permettra de créer un partiteur qu'il sera nécessaire de calibrer à Touho, à proximité du réseau AEP. En prenant soin de calibrer le partiteur installé la cuve à l'exacte horizontale, il suffira sur site de retrouver cette horizontale pour s'assurer d'un étalonnage pas trop mauvais.
- L'un des 9 orifices rejoindra le **bac secondaire** qui aura un volume efficace de 800 litres. Les 8 autres orifices se déverseront dans un canal de restitution vers le milieu naturel. Cette cuve, comme le bac primaire, disposera d'une vidange.

Tous ces éléments sont cotés sur le plan ci-dessous. Il s'agit d'un exemple de dispositif. Sur la première partie du dispositif, il est important de respecter les altitudes indiquées. A contrario, sur la deuxième partie, il y a beaucoup plus de latitude sur la position et la distance entre les cuves afin de s'intégrer au mieux au terrain naturel sans avoir besoin de réaliser des terrassements conséquents.

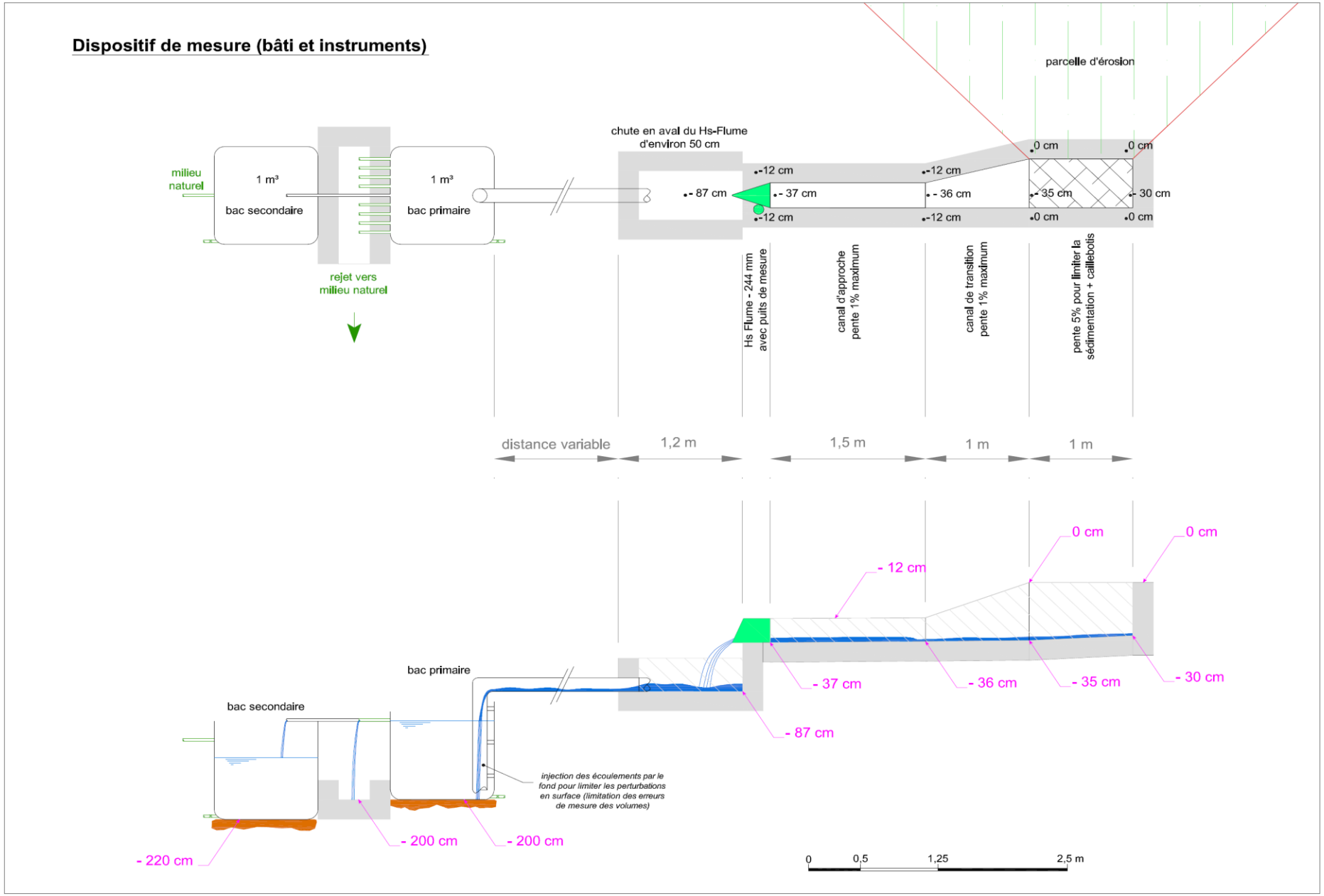


Figure 18 : Détail du dispositif de mesure

La mesure de la hauteur d'eau se fera avec une sonde de pression installée dans le puit de mesure du Hs-Flume. La localisation idéale pour la mesure de turbidité ne peut pas être identifiée sur un dispositif de ce type. En effet, il est important que la mesure ne se fasse pas dans un endroit de dépôt des matériaux, car si tel était le cas, le turbidimètre mesurait la concentration des écoulements générée par la pluie mais également la remobilisation des matériaux déposés précédemment.

Le turbidimètre pourra être placé à deux endroits, avec par ordre de préférence :

- soit dans le puit de mesure du Hs-FLume,
- soit dans le bassin en aval de la chute du Hs-Flume.

3 BUDGET D'INVESTISSEMENT NECESSAIRE A LA MISE EN PLACE

3.1 BUDGET ESTIMATIF NECESSAIRE A L'IMPLANTATION D'UNE PLACETTE TYPE

Tableau 9 : Tableau du budget estimé d'une parcelle type et d'un dispositif 3 parcelles

	Rubrique	désignation	caractéristiques	unité	PU (CFP)	Q	Montant (CFP)
	Pluviométrie	Equipement en savane à proximité des parcelles	Pluviomètre à auget cambell et data logger autonome - fixation - pile à remplacer tous les 6 mois	u	360000	1	360 000
		Socle béton pluvio		u	50000	1	50 000
		Total placette-pluvio					**410 000**
Budget parcelle	**Equipement de la parcelle avant accueil des instruments de mesure**	Bordure de la parcelle	tôle plane en acier galvanisé de 375 mm x 3 mm - Bluescope steel	ml	2858	50 ml + 15 % de recouvrement et aval de parcelle	164 335
		Caillebotis	Stepplus - Bluescope steel	pièce (5040x250x75)	16863	1	16 863
		Matériel - ciment, etc. pour réalisation collecteur et gabarit selon plans		forfait	100000	1	100 000
		Transport du matériel		forfait	100000	1	100 000
		Main d'œuvre locale		Hj	5000	25	125 000
	Hydrologie	HS Flume	HS Flume 244 mm à importer	u	120000	1	120 000
		HS puit de mesure	Puit de mesure à importer pour HS 244mm	u	120000	1	120 000
		Transport et importation HS flume et puit de mesure	Transport et douane	u	120000	1	120 000

	Rubrique	désignation	caractéristiques	unité	PU (CFP)	Q	Montant (CFP)
		Réalisation du canal d'approche à la pose du Hs flume	HS flume canal d'approche - coût matériel équipement	u	0	1	-
	Turbidimétrie, hauteur d'eau	capteur	Sonde multivariable – Turbidité et pression	u	850000	1	850 000
	Cuves	Bacs primaire et secondaire	cuve standard en plastique de 1m3	unité	50000	2	100 000
		partiteur de débit	percement et raccords tuyaux	fft	50000	1	50 000
		mise en place des cuves	fixations	fft	100000	1	100 000
	Total dispositif - parcelle						**1 966 198**
Prestataire		Nb de parcelles =	3	Total général placettes sans prestataire	7 128 594	15%	1 069 289 = coût prestataire total

Total général pour trois parcelles	**8 197 883**

Le coût d'implantation d'une parcelle et la mise en place d'un pluviomètre dédié à proximité est estimé à l'heure actuelle à 2 376 198 CPF sans la prestation de l'entreprise en charge de la réalisation des travaux. Une implantation de trois parcelles incluant le coût de la prestation de service est estimé à environ 8 200 000 CFP.

La participation des populations des tribus concernées pour la réalisation des parcelles est une condition sine quoi none au bon déroulement de l'implantation du dispositif, à sa pérennité et son fonctionnement futur.

3.2 CONTENU ARRETE DU NOUVEAU DISPOSITIF

Au regard de l'évaluation budgétaire ci-dessus faite et du budget actuellement disponible, le projet investira dans la mise en place de 2 parcelles en zone forestière (forêt peu dégradée et forêt dégradée par les espèces envahissantes) et d'une parcelle en savane. Les caractéristiques du dispositif permettent d'envisager l'extension de celui-ci au cours des années suivantes en fonction des budgets disponibles et des leçons apprises de l'implantation et du fonctionnement (phase 4).

Tableau 10 : Parcelles du dispositif et réalisation

Type de couverture végétale de la placette et état de dégradation	Nombre de parcelles	Réalisation
Forêt dense humide peu dégradée	1	2016
Forêt dense humide dégradée par les espèces envahissantes	1	2016
Savane herbacée	1	2016
Savane herbacée avec passage du feu simulé	1	Optionnel

Si les négociations avec le prestataire et la PN (budget éventuel additionnel) s'avéraient permettre la réalisation du corpus de parcelles ci-dessus envisagé, l'ensemble des travaux pourrait être réalisé en 2016.

3.3 SITES D'IMPLANTATION DES PARCELLES

L'identification des sites d'implantation des parcelles s'est faite sur la base des critères suivants :

1. La distance aux pistes, aux lieux de passage (intérêt démonstratif) et au campement (TIPWOTO) ou à la tribu pour une facilité accrue des observations des phénomènes de ruissellement sur les parcelles pendant des épisodes de pluies significatifs (exclure les sites où il est nécessaire de passer un cours d'eau à gué) ;
2. Un rayon géographique réduit de l'implantation des parcelles sous couvert forestier par rapport aux savanes où seront implantées les pluviomètres à augets (la distance à la lisière a donc toute son importance) ;
3. L'homogénéité des parcelles : d'un point de vue géologique (roches volcano-sédimentaires), avec des gammes de pente représentatives du bassin versant, la topographie et la couverture végétale ou l'état de dégradation recherchés) ;
4. L'imbrication potentielle du dispositif avec des parcelles existantes de suivi environnemental ou de recherche.

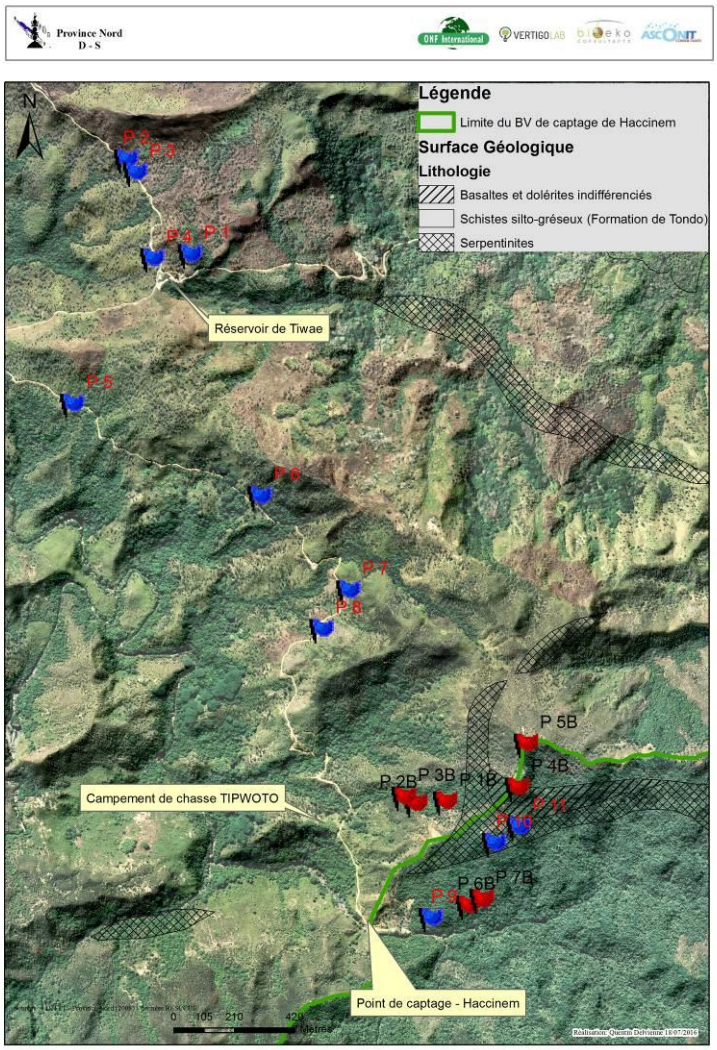
Ce dernier critère a été rapidement mis de côté étant donné le souhait de l'IAC /CIRAD de ne pas avoir une superposition de ses parcelles de suivi de la végétation avec les parcelles de suivi de l'érosion étant donné le risque évident de perturbation. Notons qu'une partie importante de la parcelle de IAC/CIRAD ne se situe pas sur un substrat volcano-sédimentaire mais bien sur de la serpentinite, roche ultramafique hydratée et métamorphisée[26], ce qui l'exclut d'une potentielle sélection. Nous cherchons bien évidemment une implantation sur roches volcano-sédimentaires (schistes gréseux ou micaschistes).

Figure 19 : Affleurement de serpentinite sur la parcelle forestière de 1ha de TIWAE de l' IAC/CIRAD

Vu l'ensemble des critères identifiés, l'espace considéré pour la recherche des parcelles s'est principalement cantonné pour les savanes : i) aux alentours du réservoir de TIWAE[27] et le long de la piste menant au captage de Haccinem et pour les forêts : i) les ripisylves situées le long de la piste menant au captage de Haccinem et les forêts nord du bassin de captage où l'on retrouve notamment les affleurements de serpentinite.

[26] *Le patron spatial des espèces observés par l'IAC/CIRAD et les densités du bois importantes observées sur la parcelle de TIWAE (Page 70 de l'ouvrage « Les forêts humides de la province Nord, Nouvelle-Calédonie » publié en 2015) s'expliquent par le fait que la forêt est située sur un subtrat ultramafique générant des sols pauvres et très arides (et non pas sur des roches volcano-sédimentaires). Sans le savoir, des recherches ont donc déjà eu lieu sur un substrat ultramafique, ce qui nécessite sans doute un erratum du dit ouvrage et de sa conclusion. Cette erreur met en évidence l'insuffisante précision des cartes géologiques au 1/50000 et la nécessité de bien vérifier la nature du substrat lors de la mise en place des placettes.*

[27] *Le réservoir de Tiwae est un lieu de passage du GR nord où les touristes observent souvent un arrêt pour contempler la vue après une longue montée (en venant de Tiwae). Y placer des placettes démonstratives en savane à proximité et proposer un moment de sensibilisation aux touristes constitue une opportunité.*



Pour l'identification des parcelles en forêt, l'approche cartographique et les discussions avec les acteurs de terrain ont permis l'identification de grandes zones devant faire l'objet d'une prospection approfondie. Plusieurs visites de prospection ont permis d'identifier à la fois des sites d'implantation de parcelles en savane mais également en forêt. L'annexe 1 propose un outil comparatif des sites d'implantation potentiels de parcelles et l'annexe 2 propose quelques prises de vue des dits sites. Les sites en savane permettent souvent l'implantation de plus d'une parcelle ce qui n'est pas le cas pour ceux situés en forêt où l'on retrouve difficilement des conditions adéquates d'homogénéité topographique. Pour la mise en place des parcelles en FDH, la proximité du captage d'eau potable de Haccinem offre dans un rayon géographique assez restreint des sites d'intérêt pour répondre à la question de recherche mise en évidence au début de ce chapitre (FDH dégradées par les EE et FDH peu dégradées par les EE) et permettre des visites de site en cours d'épisode pluvieux.

Figure 20 : Situation des sites potentiels d'implantation de parcelles

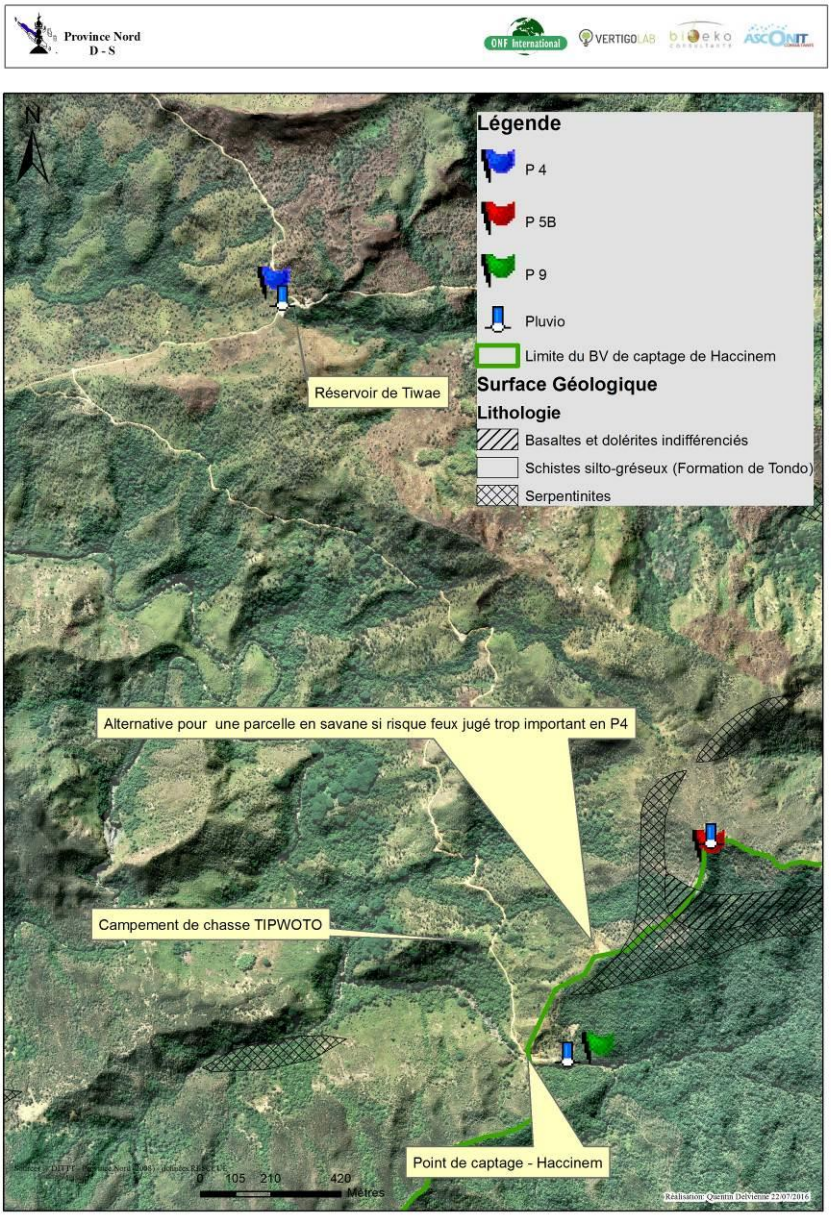
Deux options ont émané de l'analyse concernant les parcelles en FDH afin d'avoir un couple « dégradé/faiblement dégradé » le plus optimal possible :

Tableau 11 : Analyse comparative pour le choix d'un couple de parcelles dégradées/peu dégradées en FDH

P 1B et P 2B	
Avantages	**Inconvénients**
- La proximité des parcelles – environ 110 mètres ; - Le pluviomètre commun pourra être placé à moins de 100 mètres des deux parcelles.	- P 1B présente des roches affleurantes en bordure de parcelles ; - La nécessité apparente de mettre en défend P 2B ; - La rupture de pente importante en aval de parcelle ; - Des pentes pas tout à fait les mêmes.
P 9 et P 5B	
Avantages	**Inconvénients**
- Des pentes parfaitement similaires - Des états de dégradations très contrastés	- La distance entre parcelles de l'ordre de 700 mètres et la différence d'altitude (140 m) - La distance à un pluviomètre commun de l'ordre de 300 à 400 m

Au regard du budget disponible, la solution retenue est l'instrumentation des sites P 5b et P 9 avec l'implantation d'un pluviomètre à proximité de chaque parcelle. Un critère d'exclusion pour la parcelle 1B a été la présence de roches affleurantes en bordure de l'espace considéré (une inconnue importante sur la profondeur des sols et la présence de roches à proximité de la surface pouvant porter préjudice à l'homogénéité d'une parcelle).

Pour la mise en place des parcelles en zone de savane herbacée, la proximité du réservoir de Tiwae offre un panel d'options intéressantes. Non seulement ce site permettra de placer le pluviomètre dans l'enceinte du réservoir pour prévenir les dégradations volontaires (vandalisme et feu) mais donnera également au dispositif un caractère démonstratif, mettant en avant les travaux provinciaux pour les citoyens au niveau local et pour les touristes du GR. **L'option d'une implantation de parcelle en P4 est retenue** du fait de la possibilité d'accès aval de la parcelle en voiture.



Retenons que ces lieux sont régulièrement atteints par les feux (la parcelle qui serait mise en place sera une parcelle où le feu à transité en 2015). Il y a donc un risque réel de destruction du matériel par le feu. Une alternative serait de positionner la parcelle de savane à proximité de P 9 et P 5B mais le caractère sensibilisateur d'une affectation en P4 (sensibilisation supplémentaire des usagers du GR notamment) serait perdu. Le SIEC devra statuer sur ce risque et sur l'intérêt réel d'une implantation en P4. Autant que possible et vu le panel de sites potentiels sur cette formation, la pente recherchée approchera les pentes de P9 et P5B.

Figure 21 : Cartographie du dispositif 2016 de parcelles et pluviomètres.

Chapitre 7 : Opérationnalisation du dispositif

Ce chapitre propose une subdivision de la logique d'intervention pour la mise en place du dispositif, son test, son fonctionnement et sa valorisation par phases en spécifiant les résultats attendus de celles-ci tout en restant réaliste sur le contenu au regard de la conjoncture actuelle.

Tableau 12 : Phases d'opérationnalisation du dispositif de suivi provincial

Phases	Résultats attendus	Temporalité
Phase 1: Mise en place des parcelles	Un dispositif composé de parcelles est matérialisé sur le terrain et un cadre de gestion est précisé.	Août 2016 – Décembre 2016
Phase 2 : Test et adaptations du dispositif	Un dispositif composé de parcelles est fonctionnel sur le terrain, génère de la donnée de qualité et le traitement local des échantillons peut être réalisé	Janvier 2017 – Août 2017
Phase 3 : Collecte des données et valorisation	Le dispositif génère de la donnée en flux continu, donnée qui est archivée, sécurisée, traitée et valorisée	Septembre 2017 – Août 2020
Phase 4: Fonctionnement et extension du dispositif (Optionnel et fonction du bilan de la phase 3)	La phase 3 permet la mise en valeur du dispositif, son développement et son fonctionnement à plus long terme	Septembre 2020 - 2030

Le tableau suivant reprend la planification détaillée des phases en veillant à l'identification des responsabilités.

Tableau 13 : Planification des phases de mise en œuvre du dispositif de suivi

				2016						2017											2018	2019	sept-20	2030
				Phase 1						Phase 2														
	Nb	**Activités**	**Responsabilité**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**							**Phase 4**
Phase 1	A 1.1	Commanditer un prestataire de service pour la réalisation des parcelles et leur instrumentation	PN/DDEE/SIEC																					
	A 1.2	Commander le matériel nécessaire	Prestataire 1																					
	A 1.3	Etalloner le matériel	Prestataire 1																					
	A 1.4	Délimiter les parcelles et poser des instruments	Prestataire 1																					
	A 1.5	Vérifier la bonne réalisation des travaux du prestataire 1 et demander les ajustements nécessaires	RESCCUE (L3.1)																					
	A 1.6	Préciser le protocole d'entretien du dispositif	RESCCUE (L3.1)																					
	A 1.7	Préciser le protocole de récolte et d'archivage des données	RESCCUE (L3.1)																					
	A 1.8	Préciser le protocle d'analyse laboratoire et le matériel nécessaire	RESCCUE (L3.1)																					
	A 1.9	Préciser les protocoles d'analyse des données	RESCCUE (L3.1)																					
	A 1.10	Préparer un dossier de thèse CIFRE en collaboration avec l'IRD pour la mise en œuvre de la phase 3	IRD/SIEC/RESCCUE																					
Phase 2	A 2.1	Exécuter et tester les protocoles A 1.6, A 1.7 et A 1.8	Prestataire 2																					
	A 2.2	Suivre l'exécution des activités du prestataire 2	RESCCUE																					
	A 2.3	Analyser les problèmes rencontrés et proposer des améliorations en collaboration avec le prestataire 2 et l'IRD	RESCCUE																					
	A 2.4	Préparer la venue du Thésard - équipement et divers	RESCCUE - PN																					
	A 2.5	Mettre en place au niveau des docks provinciaux un laboratoire simplifié pour le traitement des échantillons dont acquisition du matériel	Prestataire 2																					
Phase 3	A 3.1	Incorporer le thésard dans les locaux RESCCUE de Tuo Cèmuhî (Touho)	RESCCUE																					
	A 3.2	Accompagner le thésard dans sa prise en main du dispositif	RESCCUE																		mai-18			
	A 3.3	Suivre la mise en œuvre du dispositif et tester le protocole A 1.9	RESCCUE (L5.1)																		mai-18			
	A 3.4	Exécuter les protocoles A 1.6, A 1.7 , A 1.8 et A 1.9	Prestataire 3 (à travers CIFRE)																					
	A 3.5	Faire le bilan du lancement du dispositif et présenter les premières analyses	RESCCUE (L6.1)																		mai-18			
	A 3.6	Valoriser les permiers résultats du dispositif	Prestataire 3 (à travers CIFRE) et RESCCUE																					
	A 3.7	En fonction du bilan RESCCUE, identifier les pistes de développement du dispositif ou adopter une stratégie de sortie	IRD, partenaires, PN, prestataire 3																					
	A 3.8	En fonction de A 3.7, construire avec les partenaires de recherche une phase 4	IRD, partenaires, PN, prestataire 3																					
Phase 4	A 4.1	Mettre en œuvre la phase 4 sur base des leçons apprises de RESCCUE	IRD, partenaires, PN, prestataire 3																					

1 PHASE 1: MISE EN PLACE DES PARCELLES

Dès validation du présent livrable, la PN commanditera un prestataire de service qui sera en charge de la commande du matériel et de la réalisation des travaux. Le délai de commande et de réception du matériel est estimé à 2 mois maximum ce qui autorise la réalisation des travaux dans le courant du mois d'octobre 2016.

Les canaux jaugeurs et puit de mesure calibrés en usine seront importés des USA. Diverses sociétés offrent ces matériels, les contacts pourront être transmis au prestataire qui sera retenu par la PN. Le prestataire retenu se rapprochera de ceux-ci pour se faire livrer les éléments nécessaires dans les temps impartis.

La coordination du projet RESCCUE identifiera matériellement les sites d'implantation des parcelles (délimitation provisoire) et facilitera le lancement des travaux du prestataire retenu. Le projet RESCCUE suivra la mise en œuvre des travaux. Outre ces activités, RESCCUE renforcera la collaboration avec l'IRD et traduira les engagements pris à cette étape (mise à disposition d'un échantillonneur).

Pour rappel, les éléments techniques d'importance à prendre en compte par le prestataire lors de la mise en place des parcelles sont les suivants:

- L'implantation des bordures se fera en perturbant le moins possible l'intérieur de la parcelle (faire une saignée et enfoncer les bordures à la masse);
- Les bordures seront enfoncées de 20 cm et la terre sera replacée et damée le plus naturellement possible ;
- Les plaques des bordures se recouvriront l'une l'autre et un joint de silicone sera placé de part et d'autre ;
- La parcelle ne sera pas nettoyée des bois et branches pour laisser à celle-ci toute sa naturalité ;
- Le responsable des travaux de terrain veillera à ce que les intervenants perturbent le moins possible l'intérieur des placettes (exécution des travaux le plus possible par l'extérieur, pas de coupe de végétation non nécessaire) ;
- La réalisation du collecteur en bas de parcelle se fera en perturbant le moins possible l'aval de la parcelle (la remise en état du sol devra se faire avec le plus grand soin afin de redonner au sol son caractère naturel) ;
- Une grande précision dans la mise en place des collecteurs et canaux est nécessaire, celle-ci doit se faire Mili métriquement et en parfait accord avec les plans délivrés dans la présente étude.

Dans le cadre de RESCCUE en PN, la mission de Yann Queffelean des services RTM de l'ONF permettra en novembre 2016 d'établir outre un état de la mise en place du dispositif :

- le protocole d'entretien du dispositif ;
- le protocole de récolte et d'archivage des données ;
- le protocole d'analyse laboratoire et le matériel nécessaire ;
- les protocoles d'analyse des données.

Au cours de cette phase, il sera également nécessaire en appui à la province d'avancer sur l'identification d'un prestataire pour la phase 2 (prestataire 2) et le montage d'un CIFRE en étroite collaboration avec l'IRD (phase 3 – prestataire 3). Le contenu de la thèse CIFRE a déjà été ébauché par l'IRD (Hydroscience de Montpellier) qui porte également ce projet.Le contenu de la collaboration et le prêt du matériel ISCO par l'IRD sera également précisé à travers une convention de collaboration ou tout autre écrit attestant de l'engagement des parties.

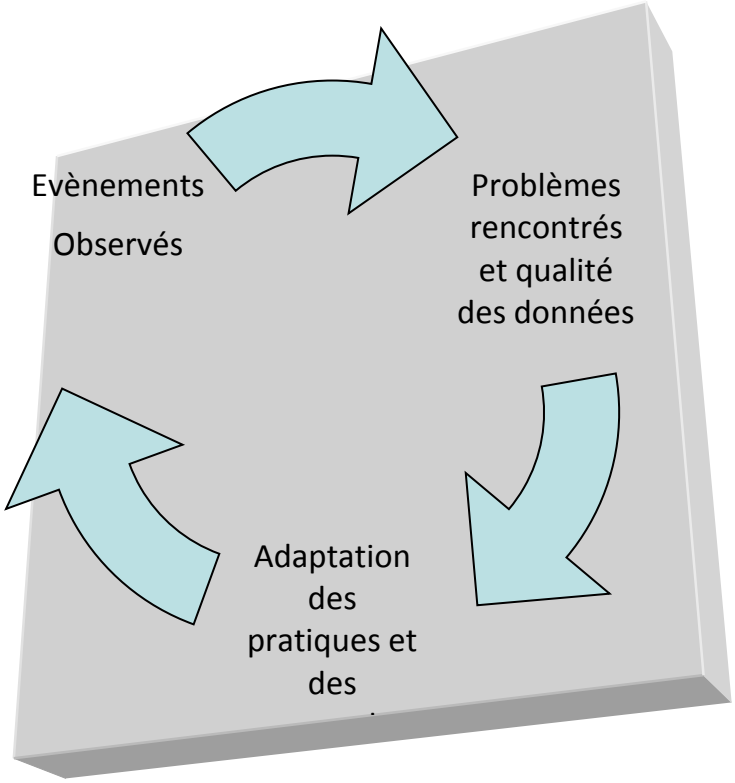
Le projet RESCCUE devra également sonder le coût d'une assurance pour le vol et la destruction du matériel.

Le coût de la phase 1 pour la PN est évaluée au montant de l'investissement soit environ 8 200 000 CFP.

2 PHASE 2 : TEST ET ADAPTATIONS DU DISPOSITIF

Le prestataire retenu (prestataire 2, retenu en cours de phase 1) mettra en œuvre les protocoles établis dans le cadre de RESCCUE (A 1.6, A1.7, A1.8) et procédera à la mise en place d'un laboratoire de terrain dans les docks de la PN (détermination des MES par filtration et pesée). L'investissement en matériel est grossièrement évalué à 600 000 CFP, une étuve est déjà en procession du SIEC et pourra être réutilisée à cette fin. Le listing détaillé du matériel sera précisé dans le cadre du protocole A 1.8.

Cette phase 2 doit permettre d'identifier les problèmes techniques et trouver des solutions opérationnelles pour assurer une récolte des données de qualité en continu. En collaboration avec le prestataire retenu, RESSCUE adaptera les protocoles pour plus de fluidité de capture des évènements avant la fin de la phase 2.



Le budget associé à cette phase 2 est évalué à :

- **1 000 000 CFP pour les investissements matériels : équipement d'un laboratoire de terrain (600 000 CFP) et un jeu de sonde d'humidité pour équiper une parcelle (400 000 CFP);**
- **2 000 000 CFP pour le prestataire de service ;**
- **Une réserve doit être prévue pour le fonctionnement et les modifications nécessaires éventuelles soit 500 000 CFP**

Soit un total de 3 500 000 CFP

Durant cette phase, RESCCUE s'attèlera, outre l'amélioration continue de la récolte des données et des protocoles, à concrétiser le développement d'une thèse CIFRE avec l'IRD pour la bonne mise en œuvre de la phase 3.

La mise en place d'un jeu de sondes d'humidité (voir 2.1.2.5) sera exécutée par l'IRD (Pierre Genthon) en fin de phase 2. Un seul jeu de sonde sera mobilisé et pourra être déplacé de parcelle en parcelle pour mieux comprendre les phénomènes de ruissellement sur les différentes parcelles au cours de la phase 3.

3 PHASE 3 : COLLECTE DES DONNEES ET VALORISATION

La phase 3 constitue le cœur de la récolte des données et la valorisation de celles-ci. Cette phase fait intervenir un CIFRE pour assurer le bon déroulement de la phase et l'atteinte d'une valorisation de l'investissement effectué.

Le CIFRE sera logé durant la période de sa thèse dans les locaux provinciaux afin de réduire au maximum les coûts (bureau : le local actuel de RESCCUE et logement : une chambre dans la maison de passage des docks provinciaux de Tuo Cèmuhî (Touho)).

Tableau 14 : Budget estimé de la phase 3

	Unité	Quantité	Coût unitaire (CFP)	Total (CFP)
Coût du CIFRE	Année	1	3 520 235	3 520 235
Déplacements internationaux	AR avion	1	262 526	262 526
Déplacements locaux	Forfait	1	298 325	298 325
Mise à disposition véhicule	IRD ou PN			
Bureau sur Tuo Cèmuhî (Touho)	Docks de la province à Tuo Cèmuhî (Touho)			-
Logement sur Tuo Cèmuhî (Touho)	Docks de la province à Tuo Cèmuhî (Touho)			-
Bureau sur Noumea	IRD			
Frais divers - participation, etc.	Forfait	1	250 000	250 000
Divers matériel - fonctionnement dispositif et traitement des échantillons	Forfait	1	250 000	250 000
Total annuel				**4 581 086**

Le fonctionnement minimal annuel de la phase 3 est estimé à 4 581 086 CFP. Dans ce budget les éventuels casses ou actes de vandalisme n'ont pas été pris en compte. La prise ou non d'une assurance dédiée devra être tranchée par le SIEC au cours de la phase 1.

4 PHASE 4: FONCTIONNEMENT ET EXPANSION DU DISPOSITIF (OPTIONNEL ET FONCTION DU BILAN DE LA PHASE 3)

Le contenu de cette phase optionnelle sera détaillé ou non en cours de phase 3 en fonction des résultats obtenus et des retours d'expérience. L'inclusion du dispositif dans un réseau plus vaste de parcelles à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie devra être envisagée notamment si des moyens se dégagent pour la réalisation de parcelles suite à la proposition de RESCCUE en PS.

Chapitre 8 : Conclusion

Le présent livrable après avoir fait une succincte revue bibliographique de la mise en place de parcelles de suivi de l'érosion, propose la mise en place d'une option technique originale alliant quantification précise des flux, suivi de l'infiltration et démonstration des phénomènes d'érosion pour diverses couvertures des sols sur des parcelles standardisées d'environ 100 m².

Le présent livrable rappelle les limites de ce genre de dispositif par rapport aux questions que se posent les gestionnaires et le souhait usuel d'extrapoler les résultats à des échelles plus importantes. Bien que l'instrumentation proposée tendra plus à satisfaire les chercheurs que les gestionnaires des milieux au regard de la notion d'extrapolation des résultats, la question de recherche posée reste de grand intérêt.

Quatre phases de mise en œuvre ont été identifiées, qualifiées et quantifiées : i) mise en place des parcelles ; ii) test et adaptations du dispositif, iii) collecte des données et valorisation et iv) fonctionnement et extension du dispositif (Optionnel et fonction du bilan de la phase 3).

La solution retenue ne doit être mise en œuvre que si le budget et les moyens nécessaires sont disponibles et facilement mobilisables pour l'exécution des phases de fonctionnement faisant suite à l'installation du dispositif (phase 2 et 3). Tabler sur une durée de vie de 3 ans en plein fonctionnement semble être assez réaliste, une révision de la durée de vie du dispositif pourra être faite au cours de la phase 3.

Une opportunité pour la mise en œuvre de ce dispositif est le souhait de l'IRD de travailler sur le bassin de la Thiem en étroite collaboration avec la PN et de valoriser le dit dispositif. L'intégration d'un jeune chercheur basé à Tuo Cèmuhî (Touho), à ce projet de recherche fait du sens et permet d'imaginer une continuité au projet RESCCUE et d'assurer une valorisation minimale des investissements qui seront faits.

Bibliographie

Bellon Loic, 2009. Développement sous logiciel libre (R) d'outils génériques d'estimation et de spatialisation de l'érosion hydrique des sols. Rapport de stage IRD unité ESPACE 140. 27 p.

YPSILANTIS B., 2011. Upland soil erosion monitoring and assessment: an overview. 48 p.

BOIX FAYOS & al. Measuring soil erosion by field plots: Understanding the sources of variation. 20 p.

Boix-Fayos C. & al. Erosion rates in Alicante and Murcia (Spain). A overview of results, methods and scales of study of the last two decades. 9 p.

BORGE A. 1993. Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du Sud. Hydrology. Université Joseph-Fourrier Grenoble. 259 p.

CALTRANS, 2000. Erosion Control pilot Study. 560 p.

Catherine Paul-Hus, 2011. Méthodes d'étude de l'érosion et gestion des sites dégradés en Nouvelle Calédonie. Essai présenté en vue de l'obtention du grade de maître en environnement. 127 p.

CHEBBANI & al. Etude de différentes échelles de risques d'érosion dans le bassin versant de l'ISSER. 11 p.

CHEGGOUR A., 2008. Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi-aride et spatialisation par des SIG: Application au bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas, Maroc. Thèse de doctorat. 231 p.

CHOI & al. Date inconnue. Soil erosion measurement and control techniques. Korea. 12 p.

Ciesiolka & al., 2004. A simple method for improving soil loss measurement in USLE type experiments. 4 P.

COULIOU & al. 2013. Amélioration d'un modèle prédisant l'effet d'un couvert forestier sur l'érosion hydrique. 72 p.

DUMAS J. date inconnue. Relation entre érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. 27 p.

El-Swaify & al. 1982. Soil erosion by water in the tropics. 184 p.

FENGYIN Y. 2009. Modélisation de l'érosion du sol à Tahiti - premier résultat du modèle USLE. Présentation ppt 22 slides.

FOURNIER F., 1967. Mesure de l'érosion: principes de base et incidence de l'instrumentation nouvelle sur l'établissement des réseaux de mesure. 14 p.

GUEYTE, R. 2008. Sedimentary contribution of catchments on Efate Island Vanuatu: Instrumentation and modelling. CRISP IRD. 49 pp.

Hudson, 1993. Field measurement of soil erosion and runoff. FAO

LAL R., xxx. Soil erosion research methods, second edition

LANG R.D.,1992. Accuracy of two sampling methods used to estimate sediment concentrations in runoff from soil-loss plots. Département of conservation and land management, research center. Australia. Short communication. 4p.

LAWRENCE P. 1996. Guidelines on field measurement procedures for quantifying catchment sediment yields. Report OD/TN 77. 108 pp.

Lisein & al. Détection de l'érosion dans un bassin versant agricole par comparaison d'images multidates acquises par drone. 9 p.

MCBROOm M. & al. 2002. Forest clearcutting and site preparation on a saline soil in East Texas: Impacts on water quality. Stephen F. Austin State Universtity. Faculty publications. 9 p.

McCOOL & al. 1995. The revised universal soil loss equation. 9 p.

Ministère du développement durable, de l'envrironnement et des parcs du Québec. 2007. Flow measurement methods in open channels. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, Booklet 7. 227 p.

MOUNIROU, L., 2012. Etude du ruisselement et de l'érosion à différents échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso: Quantification et transposition des données. Thèse de doctorat (Université de Monpellier). 249 p.

National Management Measures To control Nonpoint Pollution from Agriculture, chapter 4C: erosion and sediment control. 4-89 à 4 - 106.

NIKKAMI,2012. Investigating sampling accurancy to estimate sediment concentrations in erosion plots tanks. TUBITAK 8 p.

NOUVELOT J-F. 1993. Guide des pratiques hydrologiques sur petits bassins versants ruraux en afrique tropicale et equatoriale. 547 p.

PRINTEMPS, Julia. Estimation et spatialisation de l'érosion hydrique des sols en Nouvelle-Calédonie. Mémoire de M2. 80 p.

RAPP J. & al. 2011. Comparing soil erosion estimates from RUSLE and USLE on natural Runoff plots. 6 p.

REVILLION & al., date inconnue. Dynamiques des bassins versants et vulnérabilité des récifs coralliens, l'exemple de la martinique. Pwt 17 P.

ROOSE E. 1990. Erodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. 24 p.

ROOSE E. 2002. Evaluating, Monitoring and forecasting Erosion. ISCO conference. 8 p.

ROOSE et LELONG, 1976. Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique Tropicale. Etudes sur les petites parcelles expérimentales de sol. 10 p.

ROOSE, 1973. Dix sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruisselement sur un sol ferralitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat. 221 p.

ROUET I. 2009. Caractérisation et éléments de quantification d'aléas naturels liés à l'évolution des versants dans les massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie. Thèse de doctorat, Ecole Doctorale du Pacifique. 218 p.

USDA, 1963. Runoff plot design and installation for soil erosion studies. 34 p.

USDA, 1978. Prediting rainfal erosion losses. A guide to conservation planning. 67 p.

USDI, 1985 A ruinoff and soil-loss monitoring technique using paired plots. 32 p.

WALL & al. 2002 RUSLE CAN. Manuel d'évaluation des pertes de sol causées par l'érosion hydrique au Canada. Direction générale de la recherche, agriculture et agroalimentaire. 117 p.

WHITE & al. 1986. Problèmes d'érosion, de transport solide et sédimentation dans les bassins versants. UNESCO 155 p.

Annexes

1 TABLEAU COMPARATIF DES SITES POTENTIELS D'IMPLANTATION DE PARCELLES

ID de parcelle	Exposition	FDH ou Savane	Caractérisation succincte de la couverture	Passage du feu	Pente	Substrat rocheux	Accessibilité	X	Y	ALT (m)
P1	SSO	S	Savane clairsemée – couverture herbacée diversifiée – présence de jeunes pieds	x	30°	Schistes silto-gréseux	Accès à la piste difficile - 200 m - Hors du BV de la Thiem	308944	377868	175
P2	**SSO**	**S**	**Savane clairsemée – couverture herbacée diversifiée – pas de jeunes pieds**	**x**	**20°**	**Schistes silto-gréseux**	**Accès facile**	**308722**	**378198**	**220**
P3	SO	S	Savane clairsemée – couverture herbacée diversifiée – pas de jeunes pieds	x	10°	Schistes silto-gréseux	Accès facile	308754	378153	215
P4	**SSO**	**S**	**Savane clairsemée – couverture herbacée diversifiée – pas de jeunes pieds**	**x**	**25°**	**Schistes silto-gréseux**	**Accès très facile**			
P5	SSE	S	Savane mixte (jeunes pied et vieux pieds) – couverture herbacée diversifiée		13°	Schistes silto-gréseux	Distance piste 20 m	308535	377348	193
P6	SSO	S	Savane clairsemée – couverture herbacée diversifiée – pas de jeunes pieds		23°	Schistes silto-gréseux	En bordure d'une ancienne ripisylve	309186	377027	208
P7	NO	S	Savane mixte (jeunes pied et vieux pieds) – couverture herbacée pas complète – état de dégradation décelé	x	20 – 25°	Schistes silto-gréseux	30 m de la piste	309494	376699	226
P8	N	S	Savane mixte (jeunes pied et vieux pieds) – couverture herbacée pas complète – état de dégradation décelé	x	30 - 35°	Schistes silto-gréseux	Bord de piste	309401	376565	214
P9	**N0**	**FDH**	**FDH Haccinem – jeune forêt claire, peu de vieilles tiges – couverture de régénération importante - très peu d'indice d'érosion**		**18 - 20°**	**Schistes silto-gréseux**	**Très proche de la piste (70m)**	**309782**	**375561**	**255**
P10	SSE	FDH	FDH Haccinem –forêt claire– état de dégradation important – peu de litière		15°	Serpentinites	Distance à la piste importante	310001	375821	332
P11	SE	FDH	FDH Haccinem – jeune claire, peu de vieilles tiges – état de dégradation important – peu de litière		22°	Serpentinites	Distance à la piste importante	310086	375878	346
P1B	**N**	**FDH**	**FDH en lisière (amont de la parcelle) - Présence de schistes - roches affleurantes - indices visuels d'érosion - Palmiers et Pandanus**		**23°**	**Schistes silto-gréseux**	**Distance à la piste importante**	**309831**	**375966**	**322**

ID de parcelle	Exposition	FDH ou Savane	Caractérisation succincte de la couverture	Passage du feu	Pente	Substrat rocheux	Accessibilité	X	Y	ALT (m)
P2B	**NO**	**FDH**	**FDH en lisière (amont de la parcelle) - Présence de schistes - peu d'indices visuels d'érosion - régénération existante - Palmiers et Pandanus**		**25°**	**Schistes silto-gréseux**	**Distance à la piste importante**	**309727**	**375959**	**283**
P3B	NO	FDH	FDH en lisière (amont de la parcelle) - Présence de schistes - indices visuels d'érosion (litière absente - passage du cerf) - quelques pieds de régénération		34°	Schistes silto-gréseux	Distance à la piste importante	309687	375982	270
P4B	SO	FDH	FDH jeune multi-étagée - absence de sous-couvert et quasi pas de litière - rupture de pente aval de la parcelle		24°	Basaltes et dolérites indifférenciées	Distance à la piste très importante	310081	376015	393
P5B	**S**	**FDH**	**FDH très claire - quasi pas de sous-couvert - indice d'érosion très marqués**		**18°**	**Schistes silto-gréseux**	**Distance à la piste très importante**	**310111**	**376167**	**392**
P6B	NE	FDH	FDH - peu d'indices d'érosion - litière - non loin de la parcelle IAC - facilité mise en place		20°	Schistes silto-gréseux	Distance à la piste 200 m	309910	375604	255
P7B	S	FDH	FDH - peu d'indices d'érosion - litière - peu de régénération - facilité mise en place		22°	Schistes silto-gréseux	Distance à la piste 250 m	309958	375626	268

2 PRISE DE VUES DES SITES POTENTIELS D'IMPLANTATION DE PARCELLES

ID de parcelle	Prise de vue
P1	
P2	**Similaire à P4**
P3	**Similaire à P4**
P4	
P5	
P6	
P7	

ID de parcelle	Prise de vue
P8	
P9	
P10	
P11	Similaire à P11
P1B	

ID de parcelle	Prise de vue
P2B	
P3B	
P4B	
P5B	
P6B	

ID de parcelle	Prise de vue
P7B	