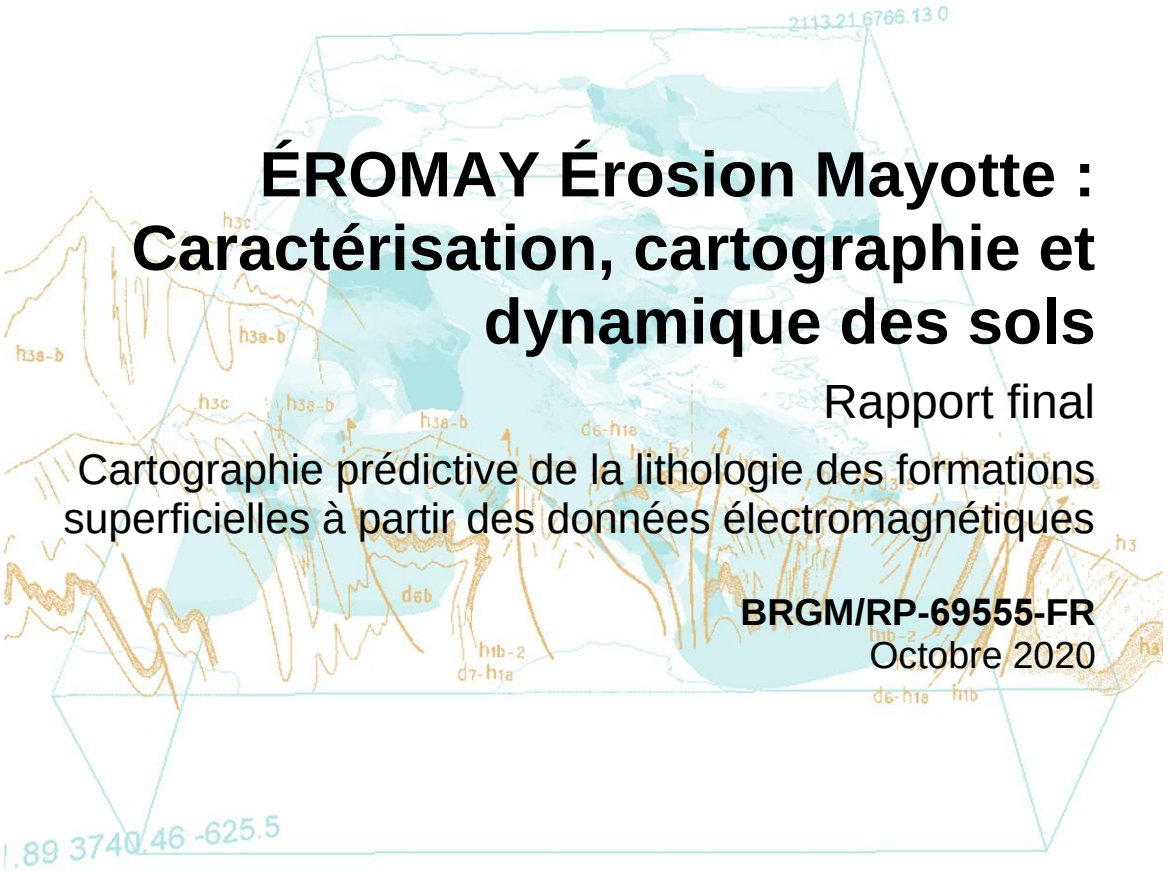
Document public



ÉROMAY Érosion Mayotte : Caractérisation, cartographie et dynamique des sols

Rapport final

Cartographie prédictive de la lithologie des formations superficielles à partir des données électromagnétiques

BRGM/RP-69555-FR
Octobre 2020

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

ÉROMAY Érosion Mayotte : Caractérisation, cartographie et dynamique des sols

Rapport final

Cartographie prédictive de la lithologie des formations superficielles à partir des données électromagnétiques

BRGM/RP-69555-FR
Octobre 2020

Étude réalisée dans le cadre des projets de Recherche du BRGM 2017

C. Prognon, J. Bernard, P.-A. Reninger, F. Lacquement, A. Raingeard, I. Bernachot

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : H. TISSOUX	Nom : C. MUCIG
Fonction : Expert scientifique	Fonction : Directrice DAT Mayotte
Date : 04/11/2020	Date : 27/10/2020
Signature **:**	Signature **:**

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : Mayotte, Érosion, Cartographie, Électromagnétisme.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Prognon C., Bernard J.,. Reninger P.-A, Lacquement F., Raingeard A., Bernachot I. (2020) - ÉROMAY Érosion Mayotte : Rapport final. Cartographie prédictive de la lithologie des formations superficielles à partir des données électromagnétiques - BRGM/RP-69555-FR. 45 p., 24 fig., 1 tab.

© BRGM, 2020, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le BRGM a proposé dans le cadre du Contrat Plan État Région (CPER) et dans le cadre de la feuille de route sur la lutte contre l'érosion des sols de Mayotte, la réalisation d'une étude concernant la caractérisation et la dynamique des formations superficielles à Mayotte. Les besoins étant de caractériser et cartographier les matériaux facilement mobilisables. La connaissance des capacités d'infiltration et d'érodibilité des différentes formations superficielles permet, entre autres, d'identifier les zones sensibles à protéger en priorité, sur lesquelles les mécanismes d'érosion apparaissent plus rapidement et plus intensément, et également de caler certains paramètres physiques fondamentaux pris en compte dans la modélisation du ruissellement, de la production et du transport des matières minérales qui se retrouveront en suspension dans les eaux de ruissellement.

Afin de produire une carte pertinente des formations mobilisables permettant de répondre à la problématique, une analyse des données électromagnétiques acquises lors d'un levé aéroporté en 2010 couplée avec des observations fines de terrain, des traitements géomorphologiques et une expertise géologique ont été réalisés. Le travail a nécessité plusieurs phases. Une campagne d'observations de terrain a été engagée dans un premier temps sur des bassins versants tests (Dzomogné et Mstamboro). Une méthodologie de travail a été définie pour croiser les données de terrain et les données d'électromagnétisme héliportés afin de produire une première carte prédictive de la lithologie de ces deux bassins versants. Dans un second temps, la méthodologie a été appliquée à l'ensemble de l'île. Les résultats se sont avérés moins discriminants à grande échelle. Un travail plus fin de recherche entre géophysiciens et géologues a été initié pour faire évoluer la méthode. Après un retour terrain pour compléter l'acquisition de données et à apporter un œil critique à la première carte prédictive, la méthode a évolué et a conduit avec succès à la réalisation de la carte lithologique prédictive des formations de surface de Mayotte à l'échelle du 1/10 000.

Sommaire

1. Introduction 9

1.1. PROBLÉMATIQUE 9

1.2. OBJECTIFS DU PROJET 10

2. Contexte 11

2.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE 11
2.1.1. État des lieux 11
2.1.2. Description des formations rencontrées 13

2.2. LEVÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE HÉLIPORTÉ 22
2.2.1. Principe de la mesure 22
2.2.2. Acquisition des données 23

3. Méthodologie 25

3.1. CAMPAGNES DE TERRAIN 25

3.2. ANALYSE ET TRAITEMENT DES DONNÉES GÉOPHYSIQUES 28
3.2.1. Traitement des données 28
3.2.2. Interprétation par classification ascendante hiérarchique (CAH) 29

3.3. APPROCHE PRÉDICTIVE 33

3.4. DESSIN DE LA CARTE LITHOLOGIQUE PRÉDICTIVE DE SURFACE 35

4. Résultats 37

4.1. CARTE PRÉDICTIVE À PARTIR DES GRILLES EM 37

4.2. CARTE LITHOLOGIQUE DE SURFACE 39

5. Conclusions 43

6. Bibliographie 45

Liste des figures

Figure 1 : (page suivante) : Extrait SIG de la carte géologique de Mayotte à 1/30 000 (Lacquement et al., 2013). 12

Figure 2 : Profil schématique des différents horizons composant un profil d'altération typique de l'île deMayotte (d'après Thiery et al. 2018). 13

Figure 3 : Affleurement de roche massive saines (phonolite) (H2) affecté par de rares fractures associées au phénomène d'altération formant une falaise au sud de la carrière de M'Tsamoudou (commune de Bandrélé). 14

Figure 4 : Exemples d'observations de terrain où l'horizon « H3 » a été décrite (Point JB155). 15

Figure 5 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « H4a » a été décrite (Points JB088 à g. et JB313 à d.). 15

Figure 6 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « H4b » a été décrite (Points JB044 à g. et JB353 à d.). 16

Figure 7 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « H4c » a été décrite (Points JB327 à g. et JB141 à d.). 16

Figure 8 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « H5 » a été décrite (Points JB210 à g. et JB046 à d.). 17

Figure 9 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « X » a été décrite (Points JB027 à g. et CP0187 à d.). 18

Figure 10 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « FG » a été décrite (Points CP128 à g. et JB217 à d.). 18

Figure 11 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « FL » a été décrite (Points JB318 à g. et FL0155_02 à d. au dessus des FG). 19

Figure 12 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « CH5 » a été décrite (Points JB201 à g. et JB030 à d.). 20

Figure 13 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « Colluvion » a été décrite (Points FL084 à g. et JB390 à d., où 1m de colluvions reposent sur des H4B laviques après une transition bien visible). 20

Figure 14 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « CB » a été décrite (Points JB014 à g. et JB007 à d.) 21

Figure 15 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « CBJ » a été décrite (Point JB006). 21

Figure 16 : Localisation et lithologie de surface des 1 046 points d'observations étudiés dans le cadre du projet Éromay (voir le texte, section 2.1, pour la légende). Les points d'observations réalisés lors de la cartographie géologique (Lacquement et al., 2013) sont représentés également. 27

Figure 17 : Dendrogramme correspondant à la CAH 20 classes (resistivité, pente, courbure) sur tous les sondages EM de Mayotte. Paramètres utilisés : résistivité de surface, pente et courbure du relief. 30

Figure 18 : Observation du résultat de la CAH à quatre classes (resistivité, pente, courbure) par rapportaux groupes de lithologies sur les données des basins de Dzoumonié et Mtsamboro (haut) sur la carte lithologique et (bas) statistiques normalisées sur le nombre d'échantillons. 31

Figure 19 : Observation du résultat de la CAH à quatre classes (resistivité, pente, courbure) par rapport aux groupes de lithologies sur l'ensemble des données de l'île (normalisé sur le nombre d'échantillons de chaque classe). 32

Figure 20 : Observation du résultat de la CAH à 30 classes (resistivité, pente, courbure et coordonnées X et Y) par rapport aux groupes de lithologies sur l'ensemble des données de l'île (normalisé sur le nombre d'échantillons de chaque classe). 32

Figure 21 : Cartographie prédictive des lithologies par définition de zones dans l'espace 3D (résistivité – pente – courbure). 33

Figure 22 : Résumé des différentes étapes de la construction de la carte lithologique de surface à travers l'exemple d'un secteur situé aux alentours du Mlima Choungui (Crêtes du Sud). ..36

Figure 23 : Résultat de la cartographie prédictive de la lithologie de surface sur l'ensemble de l'ile de Mayotte (voir texte pour les explications). 38

Figure 24 : Carte lithologique de surface (tranche 0-1m) à 1/10 000 de l'île de Mayotte. 41

Liste des tableaux

Tableau 1 : Regroupement des lithologies observées. 31

1. Introduction

1.1. PROBLÉMATIQUE

Le projet ÉROMAY s'inscrit dans le cadre de la Feuille de Route sur la lutte contre l'érosion des sols à Mayotte sollicitée par les autorités publiques (DEAL, 2012). Il participe à l'acquisition de données indispensables au projet LESELAM (Lutte contre l'Érosion des Sols et l'Envasement du Lagon à Mayotte). Le projet vise à engager les acteurs mahorais dans une démarche collective afin de définir et mettre en œuvre un ensemble de pratiques techniques et organisationnelles de lutte contre l'érosion des sols pour une adéquation durable entre le développement de l'agriculture et de l'habitat rural d'une part et la qualité du milieu lagunaire, d'autre part. Les objectifs opérationnels portent sur : (1) la création d'un observatoire de l'érosion visant à caractériser l'érosion hydrique ; (2) la création, en partenariat avec les acteurs, d'un démonstrateur de bonnes pratiques visant à tester et évaluer à différentes échelles les premières mesures de remédiation de type agriculture de conservation (AC) et défense-restauration des sols (DRS) ; et (3) sur la structuration de l'action collective (ateliers multi-acteurs) et la sensibilisation de la société civile avec un important volet de communication et de transfert de compétences vers les différents acteurs concernés.

L'érosion hydrique des sols représente un enjeu majeur à plusieurs égards. Du point de vue agricole, la perte de sols due à l'érosion s'accompagne d'une baisse du potentiel de production. Compte tenu de la forte croissance démographique, cette évolution représente une sérieuse menace en termes de sécurité alimentaire du territoire. L'érosion provoque également un transfert accru de particules solides via le réseau hydrographique, entrainant une dégradation des écosystèmes aquatiques, dont la manifestation la plus spectaculaire est l'envasement du lagon et la détérioration irréversible des récifs frangeants. Or, ce patrimoine naturel exceptionnel représente une opportunité unique de développement touristique – donc économique – qu'il convient de préserver.

C'est dans ce contexte que les services de l'État et les principaux acteurs concernés par l'érosion ont engagé une réflexion collective ayant débouchée sur un document stratégique intitulé « Feuille de Route Érosion ». Cette feuille de route propose un ensemble d'actions à réaliser sur le continuum bassin versant - lagon afin de contrôler les différents facteurs biophysiques déterminants de l'érosion hydrique des sols en milieux naturels, agricoles et d'habitat rural et préserver ainsi l'atout majeur environnemental, économique et touristique de Mayotte : son lagon.

Les actions mises en œuvre en 2015, 2016 et 2017 en appui au projet LESELAM sur les bassins de référence de Mtsamboro et Dzoumogné portent sur l'instrumentation hydrométéorologique multi-échelles (observatoire), la réalisation, le suivi-évaluation des premières mesures de remédiation de type AC-DRS (démonstrateur) et la tenue de séries d'ateliers multi-acteurs pour la communication-sensibilisation, le transfert des connaissances et la co-construction de plan d'actions.

Le projet ÉROMAY s'intéresse plus particulièrement à l'érosion hydrique des sols, et vise à mieux connaître les propriétés géologiques des bassins versants. Le BRGM propose dans le cadre du CPER (Contrat Plan État Région) la mise en place d'une étude portant :1) sur la caractérisation cartographique de la nature lithologique de la première tranche du sous-sol mahorais (en surface, entre 0 et 1 m) et 2) sur la sensibilité des différentes lithologies rencontrées face aux facteurs d'érodibilité et de ruissellement.

1.2. OBJECTIFS DU PROJET

Dans le cadre de la compréhension des volumes de roches transférées depuis le domaine émergé vers le lagon, il est nécessaire de réaliser une caractérisation et une cartographie des matériaux facilement mobilisables à Mayotte. La connaissance des capacités d'infiltration et d'érodibilité des différentes formations superficielles permet, entre autres, d'identifier les zones sensibles, à protéger en priorité, sur lesquelles les mécanismes d'érosion apparaissent plus rapidement et plus intensément ainsi que de caler certains paramètres physiques fondamentaux pris en compte dans la modélisation du ruissellement et de la production et du transport des matières minérales qui se retrouveront en suspension dans les eaux de ruissellement.

À partir des documents existants et de compléments terrains, une cartographie lithologique des formations superficielles est réalisée au cours de cette étude. Elle permettra d'établir une carte de paramètres en termes d'érodibilité et de capacité de ruissellement à 1/10 000.

La première année a été consacrée à l'étude de deux bassins versants ainsi qu'à des repérages au niveau d'un troisième bassin versant. Une méthodologie de travail préliminaire est définie sur ces zones pilotes, elle fait l'objet d'un rapport intermédiaire (Prognon *et al*., 2017) et constitue la base de la méthodologie globale détaillée dans le présent rapport. L'une des différences majeures réside ici dans la mise en œuvre d'une cartographie prédictive de la proche surface appliquée à l'ensemble de l'île de Mayotte. Le but a été d'utiliser les travaux menés sur les zones pilotes de manière à calibrer le traitement des données morphologiques et d'électromagnétisme (EM) héliporté acquises en 2010 sur l'ensemble de l'île afin de déterminer statistiquement les lithologies les plus à même de correspondre à un type de signal géophysique donné. L'objectif étant d'obtenir une information sur la lithologie de surface de l'ensemble de l'île, venant compléter l'information portée par la carte géologique (Lacquement *et al*., 2013) et qui concerne quant à elle une tranche généralement plus profonde du sous-sol.

2. Contexte

2.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

2.1.1. État des lieux

Afin de répondre aux attentes de caractérisation des matériaux susceptibles d'être mobilisés par l'érosion et transportés jusqu'au lagon, il est nécessaire d'avoir à disposition une information sur la nature lithologique des terrains affleurant directement à la surface et formant la toute première tranche du sol (les premières dizaines de centimètres jusqu'à un mètre environ).

Actuellement le seul document cartographique permettant de fournir des informations concernant la nature lithologique des terrains affleurant sur l'ile de Mayotte correspond à la carte géologique de Mayotte à 1/30 000 réalisé en 2013 (Figure 1). Sur ce document, les auteurs ont caractérisé différentes formations géologiques en apportant une information sur le degré d'altération des roches autochtones (en « place ») ainsi que sur la nature des formations allochtones (alluvions et formations de pente) masquant les terrains autochtones. En résumé, l'île de Mayotte (10 Ma à 0,15 Ma) se compose de trois ensembles volcaniques morphologiquement et structuralement distincts qui forment le soubassement de l'île : il s'agit des complexes du sud, du nord-ouest et du Mtsapéré ; auxquels s'ajoutent une activité récente sur Petite-Terre (Nehlig *et al.*, 2013). Ce socle volcanique est principalement composé de laves, avec des niveaux plus ou moins importants de dépôts volcanoclastiques. Une altération supergène généralisée des terrains a entrainé le développement d'un régolithe autochtone (« altérites ») complexe, que l'on retrouve partout sur l'île, et qui a une forte influence sur l'érodibilité des sols.

Pour chaque entité décrite en carte, la description des terrains concernés permet d'avoir une idée des différents états de la roche suivant son altération, ou des différents faciès lithologiques résultant d'un contexte de remobilisation et/ou dépôt. Ces variations sont parfois importantes au sein d'un même caisson et ne permettent pas une traduction directe de celui-ci en terme de lithologie, une variabilité importante de lithologie pouvant être contenu au sein d'un seul caisson. Ainsi par exemple, le caisson des colluvions englobe l'ensemble des dépôts meubles formés dans les pentes et constitués par une roche dont la matrice est argilo-silteuse peu compacte et contenant des éléments rocheux dont la proportion, la forme et la taille peuvent varier fortement (de l'amont vers l'aval et/ou latéralement). De la même manière les séries laviques altérées sont souvent rassemblées dans le faciès « isaltérites ». Or ce faciès regroupe plusieurs sous-ensembles dont la variabilité n'est pas représentable à 1/30 000 à Mayotte (Figure 1). Ce constat n'est plus valable à 1/10 000, à cette échelle les différentes natures de roches peuvent être caractérisées dans des ensembles homogènes ayant un comportement univoque en surface face aux facteurs d'érosion. Cette échelle correspond à l'échelle de restitution de notre étude. Enfin, comme sur toute carte géologique, les caissons représentés sur la carte géologique de Mayotte ont vocation à représenter les roches, formations ou régolithes constituant l'assise des terrains étudiés, et font souvent abstraction du premier mètre du sol.

Afin de rendre compatible les informations de cartographie géologique avec les objectifs du projet (à savoir une information portant sur le tout premier mètre du sol), une méthodologie spécifique et un important travail interprétatif a été réalisé en prenant en compte également des données de géophysique aéroportées. L'objectif final étant de produire un document cartographique à 1/10 000 permettant de restituer les variations lithologiques présentes en surface.

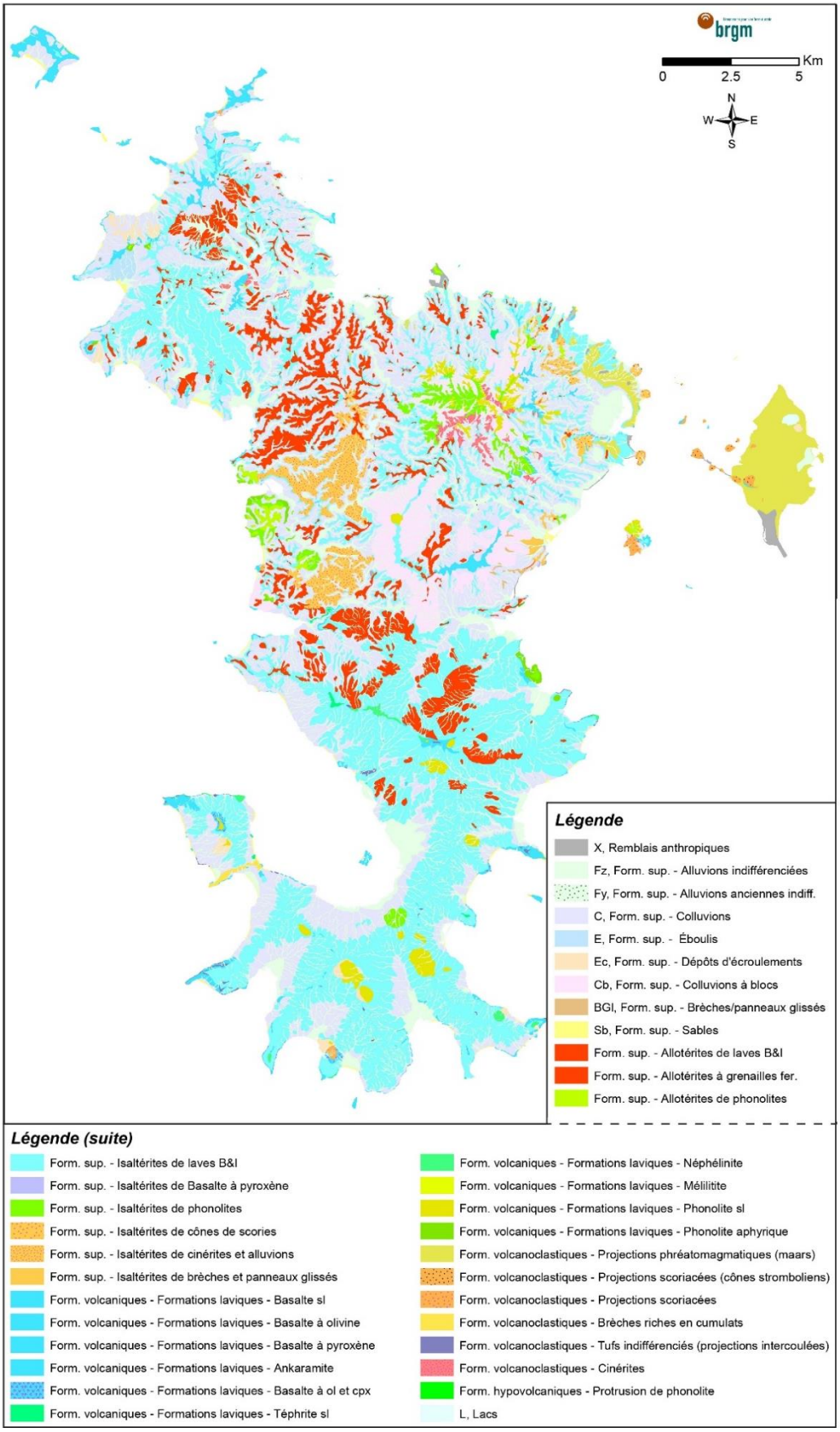


Figure 1 : (page suivante) : Extrait SIG de la carte géologique de Mayotte à 1/30 000 (Lacquement et al.*, 2013).*

2.1.2. Description des formations rencontrées

a) Les formations autochtones

Les formations autochtones correspondent à l'ensemble des roches constituant le « socle » volcanique de l'île de Mayotte (ensembles laviques, pyroclastiques, volcanoclastiques et intrusifs). Chaque formation est caractérisée selon son degré d'altération. L'altération est un phénomène de transformation de la roche saine de manière progressive depuis la surface vers la profondeur. L'évolution du phénomène se caractérise par une dégradation de la roche jusqu'à sa transformation totale en « allotérite », c'est-à-dire un matériel dans lequel n'est plus possible d'identifier la roche initiale. Cette évolution est classifiée selon différents horizons d'altération en fonction de la dégradation progressive des roches. L'ensemble des roches ayant subi une altération météoritique « partielle » sont regroupées sous le terme générique d'« isaltérite ». Un profil d'altération est ainsi divisé en cinq horizons (Thiery *et al*. 2018) selon le degré de fracturation, d'oxydation et de cohésion et de transformation de la roche. Une représentation schématique de l'ensemble des horizons est proposée en Figure 2 tandis que des illustrations de terrain à la fois en surface et en coupe (lorsque les conditions d'affleurement le permettent) sont présentées dans la suite de cette section, de manière à permettre au lecteur de mieux appréhender ces objets en trois dimensions.

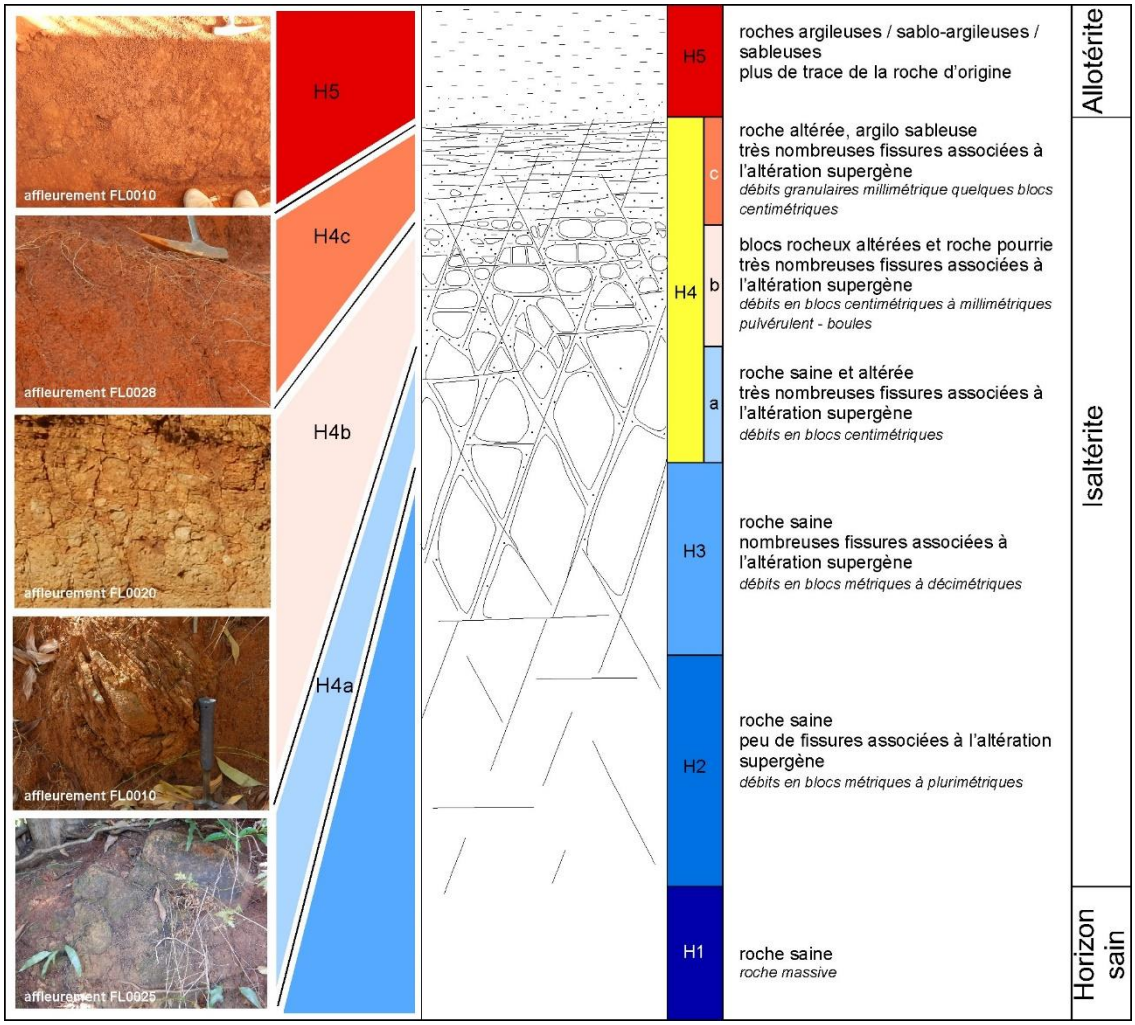


Figure 2 : Profil schématique des différents horizons composant un profil d'altération typique de l'île deMayotte (d'après Thiery et al*. 2018).*

Dans le détail, et depuis la base du profil vers son sommet, les cinq horizons sont :

- ***l'horizon H1***, qui correspond à la roche saine. Elle ne présente aucune trace d'altération à l'échelle de l'affleurement dans sa totalité (i.e. le long d'aucune fracture ou plan préférentiel) ;
- ***l'horizon H2***, qui correspond à la base du profil d'altération. L'altération se marque par la présence de fractures au niveau desquelles les traces d'une altération supergène peuvent être identifiées (transformations minéralogiques par exemple). Les fractures sont peu nombreuses et distantes de plusieurs mètres. Les horizons H1 et H2 ne sont que peu présents à l'échelle de l'île à l'affleurement, et essentiellement concentrés le long de talus routiers, au niveau de fronts de taille de carrières, et plus rarement sur les crêtes et autres pointements rocheux les plus marqués (Figure 3) ;

Figure 3 : Affleurement de roche massive saines (phonolite) (H2) affecté par de rares fractures associées au phénomène d'altération formant une falaise au sud de la carrière de M'Tsamoudou (commune de Bandrélé).

- ***l'horizon H3*** correspond à l'horizon fissuré du profil d'altération où les fissures sont nettement plus nombreuses que dans l'horizon H2 et délimitent des blocs non altérés de taille décimétrique à métrique (Figure 4). En dehors des couloirs de fracturation la roche reste saine. Cet horizon est présent le long de talus routiers, en particulier en bord de mer et sur un nombre relativement important de crêtes et de reliefs, ainsi que dans le cours de nombreuses rivières de l'île, où des dalles de roche de taille variées sont fréquemment visibles entre les alluvions ;

Figure 4 : Exemples d'observations de terrain où l'horizon « H3 » a été décrite (Point JB155).

- ***l'horizon H4,*** le plus souvent à dominante orange correspond à l'horizon de transition marqué par le passage de roches fissurés intensément altérées à une roche meuble où seuls persistent des fantômes de roches. Il s'agit des isaltérites au sens large. Une subdivision de cet horizon en trois niveaux permet de mieux appréhender son évolution complexe et la transition entre des niveaux aux propriétés mécaniques (et donc d'érodibilité) potentiellement très différentes. On retrouve, depuis la base vers le sommet (Figure 2) :
  - ***le sous-horizon H4a***, où l'intensité de la fracturation devient très importante. Il se marque par la présence d'une masse rocheuse fortement fracturé avec de nombreux blocs centimétriques à décimétriques, au sein desquels seuls les cœurs restent sains (Figure 5),

Figure 5 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « H4a » a été décrite (Points JB088 à g. et JB313 à d.).

- ***le sous-horizon H4b*** correspond à l'horizon de transition entre les horizons où la roche est cohérente et très fracturée et celle où la roche devient meuble. Cet horizon se caractérise par une roche est intensément fracturée libérant des blocs de toute taille (millimétriques à décimétriques). Des débits en boules et pelures d'oignon sont observables avec de rares cœurs contenant parfois des reliques de roches saines (Figure 6). Il devient difficile de définir la roche d'origine, seules les reliques les moins altérées donnent une information sur la nature de la roche mère. La cohésion des matériaux devient faible,

Figure 6 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « H4b » a été décrite (Points JB044 à g. et JB353 à d.).

- ***le sous-horizon H4c*** correspond à une roche meuble pulvérulente, seuls quelques éléments fantômes de roches persistent (Figure 7). Plus on se dirige vers le haut du profil plus la quantité de fantôme de roche décroit ;

Figure 7 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « H4c » a été décrite (Points JB327 à g. et JB141 à d.).

- ***l'horizon H5*** correspond à l'allotérite, la roche d'origine (ou roche-mère) n'est plus identifiable, la roche est meuble et constituée par un matériel compact rouge-orangé, parfois rouge hématitique et de nature argilo-ferrugineuse (Figure 8). Les analyses minéralogiques indiquent une disparition complète des minéraux volcaniques primaires. L'épaisseur de cet horizon est généralement métrique, le maximum observé atteint 1,5 mètres. Cet horizon est essentiellement localisé au niveau des replats, des paléosurfaces et de quelques zones de crêtes à faible pente situées sur les pourtours de bassins versants, préservés des zones d'intenses érosions.

Figure 8 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « H5 » a été décrite (Points JB210 à g. et JB046 à d.).

b) Les formations allochtones

Les formations allochtones correspondent à des dépôts où le matériel qui compose la formation a subi un transport plus ou moins important, que ce soit sous l'effet de l'eau (ex : les alluvions), de la gravité (ex : les colluvions), ou de l'homme (ex : les dépôts anthropiques). Dans l'immense majorité des cas, ces formations allochtones recouvrent les formations autochtones du vieux « socle » volcanique de l'île de Mayotte. Elles sont classées selon le processus qui a entrainé leur formation, et peuvent être affectées par des degrés variable d'altération.

- **X - Dépôts anthropiques**

Les dépôts anthropiques correspondent à toutes les formations géologiques très largement modifiées et/ou induites par l'homme. Il s'agit par exemple de remblais ou de déblais (urbanisme, quais maritimes, polders, etc.), des sites de décharge, des barrages, etc. La plupart des aires urbaines reposent sur des épaisseurs plus ou moins importantes de dépôts anthropiques. La nature des terrains varie depuis les faciès argileux jusqu'aux faciès à blocs avec des proportions variables (Figure 9). Leur épaisseur varie en fonction de la nature du dépôt, de sa composition et de la topographie. En général il ne dépasse pas les quelques mètres d'épaisseur et présente des variations latérales de faciès et d'épaisseur rapides et importantes (Figure 9)

Figure 9 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « X » a été décrite (Points JB027 à g. et CP0187 à d.).

- **FG - Dépôts alluvionnaires torrentiels**

Ces dépôts, notés FG en carte, correspondent à des alluvions grossières d'origine torrentielles, localisées dans les fonds de vallée qu'ils comblent. On les rencontre depuis les zones de prélèvements des sédiments jusqu'à la mer (ils sont parfois localisés sur des pentes non-négligeables dans les zones amont des drains hydrographiques). Ils sont constitués de blocs de taille centimétrique à métrique, et plus exceptionnellement plurimétrique, dont la nature dépend de la source des matériaux. Les blocs sont moins émoussés en amont qu'en aval. Les dépôts de FG sont parfois sans matrice (Figure 10) et parfois avec une matrice sablo-limoneuse, ils peuvent s'accompagner de lentilles sablo- graveleuses. L'épaisseur des dépôts torrentiels est métrique à pluri métrique, la base est très rarement observée. Ces dépôts conglomératiques sont recouverts dans les zones de plaine par une épaisseur plus ou moins forte de limons argileux fluviatiles (notés FL en carte), traduisant ainsi un changement de dynamique de dépôt des sédiments au cours de l'histoire géologique de l'île. Actuellement les cours d'eau ont généralement tronqué les alluvions fines et s'écoulent au sein des alluvions grossières anciennes ou parfois directement sur le substratum. Ces dépôts remanient les formations volcaniques saine et celles de la partie inférieure du profil d'altération (H1 à H4b).

Figure 10 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « FG » a été décrite (Points CP128 à g. et JB217 à d.).

- **FL - Dépôts alluvionnaires limoneux**

Ces dépôts sont constitués d'alluvions fines argilo-sableuses qui se sont déposées généralement au niveau de plaines alluviales formant de larges zones planes dans les vallées principales et au sein des plaines littorales/côtières (Figure 11). Elles recouvrent parfois les dépôts alluvionnaires torrentiels, qui leur sont donc antérieurs. Elles sont recoupées par le réseau hydrologique actuel. Les dépôts sont de couleur brune du fait d'une proportion plus importante en matière organique. La texture est grumeleuse fine avec des « grumeaux » de quelques millimètres au maximum. L 'épaisseur des dépôts est variable, le maximum observé est de deux mètres. Ces dépôts remanient essentiellement les dépôts volcano-sédimentaires cendreux et la partie supérieure du profil d'altération (H4b à H5).

Figure 11 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « FL » a été décrite (Points JB318 à g. et FL0155_02 à d. au dessus des FG).

- **CH5 - Dépôts de pente fins dérivant des allotérites**

Les dépôts de pente fins remanient essentiellement les allotérites. Ils sont caractérisés par des limons argileux rougeâtres pouvant contenir de petits éléments anguleux à sub-anguleux de quelques millimètres à 5 cm de diamètre, en faible proportion (moins de 15 %). L'épaisseur cartographiée est de 20 cm minimum et peut parfois être plurimétrique. En surface, la formation se présente sous la forme de petits « grumeaux » de quelques millimètres à quelques centimètres de diamètres (Figure 12).

En dehors de la pente (faible mais perceptible) sur laquelle se situent les dépôts de CH5, la différence majeure avec les dépôts alluvionnaires limoneux FL réside dans la présence de blocs et/ou fragments généralement de petite taille (inférieurs à 5 cm) de matériel identifiable (isaltérites) au sein des dépôts de pente. Il est cependant parfois très difficile de faire la différence entre les colluvions fin (CH5) et les limons fins (FL), notamment au niveau de la tête de drains peu marqués qui commencent à inciser des paléo-surface (comme par exemple aux alentours de Combani).

Figure 12 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « CH5 » a été décrite (Points JB201 à g. et JB030 à d.).

- **C - Dépôts de pente**

Ces dépôts de pente fins sont composés de limons argileux pouvant contenir des blocs rocheux de nature et de taille variable en relativement faible proportion (<15 %). Ils sont généralement bruns (Figure 13), ce qui les différencie des CH5 et montre qu'ils contiennent une proportion plus importante de matière organique, trahissant une évolution sans doute plus poussée que ces derniers. En surface ces dépôts se présentent sous la forme de petits « grumeaux » de quelques millimètres à quelques centimètres de diamètres.

Ces dépôts peuvent se retrouver sur des pentes relativement accusées et leur épaisseur aura tendance à croitre à mesure que l'on descend depuis les crêtes vers le bas de pente. L'épaisseur cartographiée est de 20 cm minimum et peut parfois être pluri-métrique. La proportion en blocs et leur taille est directement lié à la présence en amont à la qualité du matériel source.

Figure 13 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « Colluvion » a été décrite (Points FL084 à g. et JB390 à d., où 1m de colluvions reposent sur des H4B laviques après une transition bien visible).

- **CB - Dépôts de pente à blocs**

Ces dépôts sont caractérisés par des terrains composés d'une matrice de limons argilo-sableux généralement de couleur brun rougeâtre qui emballe des proportions variables (entre 15 % et 50 %) de blocs hétérométriques sub-anguleux à arrondis de dimension variable (pouvant atteindre le mètre. En surface, les dépôts de la fraction matricielle se présente sous la forme de petits « grumeaux » de quelques millimètres à quelques centimètres de diamètre (Figure 14), cette matrice est identique à celle qui caractérise colluvions C ou CH5, seule la proportion en blocs varie et est fonction du matériel source

Figure 14 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « CB » a été décrite (Points JB014 à g. et JB007 à d.)

- **CBJ - Dépôts de pente à blocs jointifs**

Ces dépôts représentent un assemblage de blocs anguleux à sub-anguleux sains, jointifs, de taille centimétrique à métrique, avec dans les interstices une matrice argilo-limoneuse brune. La matrice prise individuellement est très proche (voire identique) à celle autres formations de pente défini ci-dessus. La quantité de bloc est supérieure à 50 %. L'épaisseur est généralement supérieure au mètre (Figure 15).

Figure 15 : Exemples d'observations de terrain où une lithologie « CBJ » a été décrite (Point JB006).

2.2. LEVÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE HÉLIPORTÉ

En complément de l'étude géologique de terrain, une évaluation de la méthode EM héliportée a été entreprise afin de tester son utilisation en tant qu'outil de support à la cartographie lithologique prédictive. La méthode a montré son efficacité à imager les environnements hydrogéologiques dans plusieurs études (Auken *et al*., 2017), toutefois, la cartographie de la lithologie de surface n'est pas une application directe car elle est au-delà de ses limites de résolution théoriques. Grâce à différentes études menées par le passé, le BRGM a cependant pu entrevoir le potentiel de la méthode EM héliportée à apporter des informations pertinentes sur la nature des roches présentes en proche sub-surface. Ceci doit, toutefois, nécessairement passer par un traitement précis et adapté de la donnée acquise. Ces traitements sont expérimentaux et en développement.

2.2.1. Principe de la mesure

La théorie de l'EM appliquée à la géophysique est documentée dans différents ouvrages tels que Ward et Hohmann (1988).

Les grands principes de l'EM se basent sur les équations de Maxwell (19^{e} siècle), et plus particulièrement sur celles du domaine diffusif (i.e. les courants de conduction dominent) dans le cas d'un levé EM en domaine temporel. Ces équations permettent d'expliquer la diffusion des courants dans le sous-sol suite à une excitation externe; diffusion qui dépendra, au premier ordre, de la conductivité/résistivité électrique du milieu, qui sera donc le paramètre imagé.

Le système de mesure utilisé est le système SkyTEM® (http://skytem.com). Il est composé d'une boucle émettrice, qui permet l'excitation du sous-sol, d'une boucle réceptrice, pour mesurer la réponse du sous-sol, d'un générateur, comme source d'énergie, ainsi que de différents instruments de navigation tels que GPS, inclinomètres et altimètres laser afin de positionner à tout moment la mesure dans l'espace. Un magnétomètre, enregistrant le champ magnétique naturel, est également placé à l'avant du système ; les mesures magnétiques n'ont pas été utilisées dans la présente étude et ne sont donc pas discutées plus en détail. La particularité du système SkyTEM® est d'émettre deux moments magnétiques différents (fonction du nombre de tour et de l'aire de la boucle d'émission et de l'intensité du courant injecté) : un moment, dit faible, qui assure une résolution en proche surface (dans la gamme ~0-50m) et un moment, dit fort, fournissant une information à des profondeurs plus importantes. Ces deux moments sont interprétés conjointement et correspondent à un même point de mesure.

Lors d'une mesure EM, un courant d'une intensité donnée est injecté dans la boucle émettrice afin de créer un champ magnétique, dit primaire (d'après l'équation de Maxwell Ampère). Ce même courant est ensuite coupé le plus nettement possible, entraînant alors une variation du champ primaire. Celle-ci se traduit par l'induction de courants dits de Foucault dans le sous-sol (d'après l'équation de Maxwell Faraday), créant, à leur tour, un champ magnétique dit secondaire et mesuré au niveau de la boucle réceptrice. Les courants se dissipant dans le sous-sol avec le temps (effet Joule), la donnée recueillie informera donc sur la décroissance du champ secondaire en fonction du temps, celle-ci étant directement liée à la conductivité du milieu. La profondeur d'investigation de la méthode, de l'ordre de 150 m en moyenne dans le cadre de la mission menée à Mayotte, dépend de l'intensité du courant injecté, de l'aire de la boucle d'émission, du niveau de bruit de la mesure ainsi que de la conductivité du sous-sol.

2.2.2. Acquisition des données

Le levé EM de l'île de Mayotte, effectué par l'université d'Aarhus (Danemark) en partenariat avec le BRGM, s'est déroulé du 6 octobre au 10 novembre 2010. Il comprend 3 000 km sous la forme de lignes de vol nord-sud espacées de 200 m. Des zones d'intérêts pour les risques naturels ou l'hydrogéologie ont également fait l'objet d'une densification. Celle-ci a consisté soit en l'acquisition de données supplémentaires selon des directions différentes de l'orientation principale du levé (nord-sud), soit en un resserrement local des lignes de vol. Lors d'un vol, la mesure est prise sans discontinuer et à pas régulier, ce qui, dans le cas du levé de l'île de Mayotte, représente en moyenne un point de donnée tous les 30 m environ, le long des lignes de vol.

3. Méthodologie

3.1. CAMPAGNES DE TERRAIN

Mille quarante-six (1 046) points d'observation directe ont été réalisés dans le cadre du projet au cours des campagnes de terrain de 2017 et 2018. Ils s'ajoutent aux points d'observations des campagnes de cartographies géologiques de 2012 et 2013 pour lesquels les photographies de terrain accompagnant les descriptions ont permis de retrouver l'information lithologique caractérisant le premier mètre du sol. Ces observations in situ conduisent à identifier 11 terrains de nature différente : 6 pour les terrains allochtones, dont les formations anthropiques, et 5 pour les terrains autochtones. Elles sont pour partie utilisées pour calibrer les paramètres géophysiques (pour celles portant sur les zones-pilotes) et pour partie utilisées pour évaluer la pertinence de la cartographie prédictive. Dans le détail, deux campagnes de terrain ont été organisées au cours des hivers australs 2017 et 2018. Elles ont été menées par une équipe de 3 géologues du régolithe et ont abouti à la collecte d'informations sur le très proche sous-sol (tranche du premier mètre) avec les 1 046 points d'observations (Figure 16). La collecte d'informations a été réalisée en lien avec les données géophysiques (Figure 22A), qui se doit de combiner au mieux la représentativité à la fois lithologique et géographique des différents types de terrains constituants la couche de surface. Pour cela, la stratégie adoptée a été de se focaliser autour du réseau de communication (routes et chemins) puis de cibler des zones plus isolées, notamment celles porteuses d'un signal géophysique contrasté et/ou inhabituel, ainsi que les secteurs caractérisés par des lithologies originales sur la carte géologique.

Les buts de ces campagnes étaient :

- pour la première (2017) : d'identifier et de cartographier en détail la tranche du premier mètre du régolithe au niveau de zones pilotes (les bassins versants de Dzoumogné et Mtsamboro (nord de l'île), et dans une moindre mesure de Salim Bé (sud) (Prognon *et al*., 2017) qui correspondent à trois des sites instrumentés dans le projet LESELAM). Les données récoltées devant servir par la suite à calibrer les données de géophysique aéroportée et de morphologie des terrains pour le développement d'une méthode de cartographie prédictive ;
- pour la seconde (2018) : d'évaluer la pertinence de la cartographie prédictive préliminaire (par de la validation/contrôle terrain), puis d'augmenter de manière significative le nombre de points d'observations terrain afin d'améliorer la représentativité statistique des différentes lithologies, et ainsi rendre plus robuste la cartographie prédictive.

Dans le détail, la méthodologie de terrain déployée sur la campagne de 2017 est définie comme suit (Prognon *et al.*, 2017) :

- identification des différentes formations géologiques en termes de lithologie sur le terrain et choix d'une méthode de cartographie à 1/10 000 ;
- description d'affleurements représentatifs de l'ensemble des lithologies rencontrées. Une attention particulière a été portée aux affleurements au droit des lignes de vol EM ;
- définition d'une légende détaillée adaptée ;
- réalisation de cartes lithologiques du premier mètre des bassins versant de Dzoumogné (levée à 1/5 000) et de Mtsamboro (levée à 1/3 000), restituées toutes deux à l'échelle de 1/10 000 pour les besoins du projet ;
- propositions d'implantation de placettes complémentaires pour le projet LESELAM en fonction des lithologies rencontrées sur le terrain.

Au cours de la première campagne, 356 points d'observation ont été récoltés sur les bassins versants de Dzoumogné et de Mtsamboro. Pour chaque point d'observation, la position GPS a été relevée et la nature lithologique des terrains de proche surface décrite. Pour ceux présentant de faibles épaisseurs et là où il était possible d'identifier la nature des terrains sous-jacents, les géologues ont décrits la puissance de la couche de surface et décrits la formation sous-jacente.

La seconde campagne (2018) a permis :

- d'améliorer très sensiblement la couverture spatiale des observations lithologiques sur l'ensemble de l'île, et d'augmenter de manière importante leur nombre (avec pour objectif une représentativité statistique accrue) ;
- de confronter les résultats préliminaires de la cartographie prédictive avec les réelles observations du terrain et de noter les dérives des premiers travaux prédictifs afin de les corriger ;
- de récolter des données et des contraintes de terrain permettant le dessin de la carte lithologique de surface sur l'ensemble de l'île, pour un rendu à 1/10 000.

Le protocole d'acquisition de données (coordonnées GPS, descriptions lithologiques, légende, etc.) de la mission de 2018 suit rigoureusement celui défini pour celle de 2017 afin de pouvoir fusionner de manière optimale les deux jeux de données. Une attention toute particulière a été portée sur la recherche de points d'observation situés au droit des lignes de vol EM.

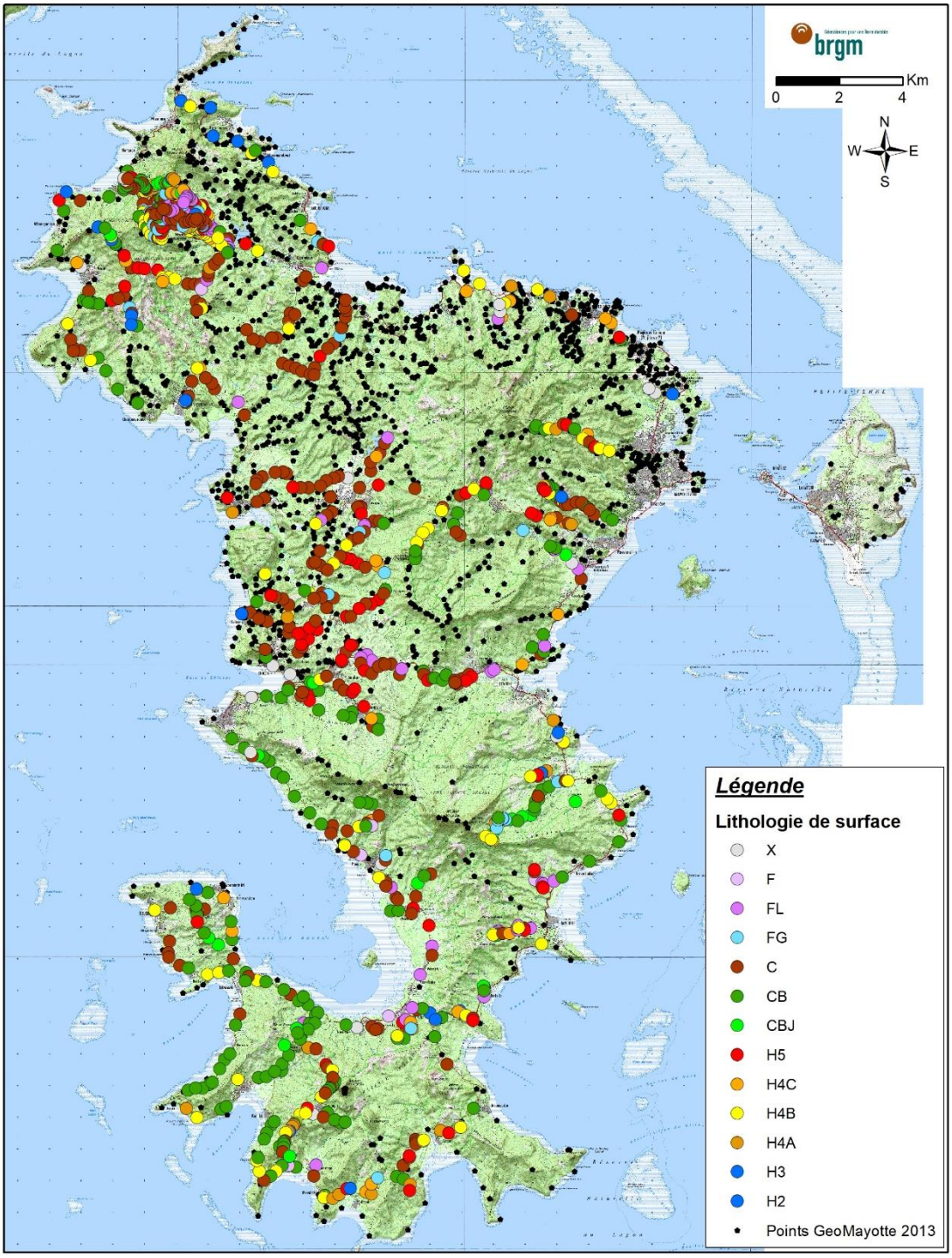


Figure 16 : Localisation et lithologie de surface des 1 046 points d'observations étudiés dans le cadre du projet Éromay (voir le texte, section 2.1, pour la légende). Les points d'observations réalisés lors de la cartographie géologique (Lacquement et al.*, 2013) sont représentés également.*

3.2. ANALYSE ET TRAITEMENT DES DONNÉES GÉOPHYSIQUES

3.2.1. Traitement des données

Suite à la campagne de 2017, un retraitement spécifique des données EM a été réalisé au niveau du bassin versant de Dzoumogné dans le but d'optimiser l'exploitation des données EM. Il a permis d'apporter une meilleure imagerie/résolution des couches superficielles et est détaillé ci-dessous.

Lors de l'acquisition, la position du dispositif est mesurée toutes les secondes grâce aux GPS différentiels installés à la fois sur la boucle et à la station de base. La position de la boucle est alors obtenue en interpolant la donnée GPS par ajustement polynomial.

L'attitude de la boucle est mesurée suivant l'axe de vol et sa perpendiculaire horizontale grâce aux deux inclinomètres placés sur la boucle. Ceux-ci permettent de suivre le comportement du système durant le levé afin de calculer les aires effectives des boucles d'émission et de réception. Un filtre médian permettant de retirer les valeurs aberrantes a été appliqué sur ces mesures. À noter que les aires effectives ont été corrigées de la topographie (Reninger *et al*., 2015).

Il existe deux moyens de connaitre l'altitude du dispositif, d'une part, grâce aux deux altimètres situés sur la boucle, d'autre part, par traitement du GPS différentiel et soustraction du modèle numérique de terrain. La première solution est souvent complexe et subjective, particulièrement dans le cas d'une topographie accidentée. La seconde solution a donc été préférée.

La mesure EM est extrêmement sensible aux champs EM « ambiants », aussi bien naturels qu'artificiels, ces derniers induisent un bruit sur la donnée. Comme source naturelle de bruit, on peut citer les « sphérics », ondes EM, issues de l'activité orageuse, se propageant dans l'ionosphère ; les sources artificielles de bruits comprennent quant à elles toutes installations humaines interagissant avec ou produisant un champ électromagnétique (Macnae *et al*., 1984). Sur l'île de Mayotte, les bruits EM observés sont relativement faibles et les données sont de bonne qualité.

Afin de garder uniquement les mesures fiables, il est donc nécessaire d'appliquer un filtre dans le but de « débruiter » le jeu de données. Un traitement basé sur l'utilisation de la décomposition en valeurs singulières a été utilisé (Reninger *et al*., 2011). Ce traitement permet également de récupérer toute donnée exploitable, non acquise sur une ligne de vol mais provenant des différents allers et retours de l'hélicoptère sur la zone. Ce traitement a ensuite été complété par une procédure de stack s'adaptant au niveau de bruit affectant chacune des mesures et par une édition manuelle.

Dans le cadre de la cartographie de l'île, le projet ne permettait pas de retraiter le jeu données à cette échelle. Ainsi, les données utilisées sont celles qui ont été traitées suite au lever, suivant une procédure standard (Nehlig *et al*.,2013).

Les deux échelles d'étude (i.e. le bassin versant de Dzoumogné et l'île de Grande-Terre) ont bénéficié d'une ré-inversion des données. Le principe de l'inversion en géophysique est de retrouver les propriétés physiques du sous-sol à l'origine des différents signaux mesurés (i.e. ici les décroissances EM), affectés par les caractéristiques de celui-ci. Pour ce faire, il est nécessaire de trouver le modèle, schématisant le sous-sol, qui minimise la différence entre les données mesurées et celles prédites par la théorie; celui-ci est obtenu par itération de modélisations EM et comparaisons à la donnée mesurée. Les modèles pris en considération à cette étape permettent donc d'imager les contrastes de résistivité dans le sous-sol.

L'inversion couramment utilisée considère, pour chaque point de mesure, un modèle 1D (selon la profondeur) constitué d'un nombre n de couches, caractérisée par une épaisseur et une résistivité (appelé sondage EM). Afin de stabiliser le processus, des contraintes spatiales entre les différentes couches des différents modèles sont également appliquées lors de l'inversion (cf. Spatially Constrained Inversion ; Viezzoli *et al*., 2008). Au cours de cette inversion, la profondeur d'investigation de chaque mesure est également testée afin de calculer une limite basse (hypothèse pessimiste ; profondeur d'investigation la plus faible) et une limite haute (hypothèse optimiste ; profondeur d'investigation la plus importante).

À l'issue de l'étape d'inversion, nous obtenons donc, à l'emplacement de chaque mesure, un modèle 1D constitué de n couches et défini par n épaisseurs et résistivités sensés rendre compte des contrastes de résistivité existants en sub-surface. Le nombre n'est pas fixé avant l'inversion et dépend de notre appréhension de l'environnement géologique et de la complexité de celui-ci.

Dans le cadre de cette étude, une inversion de type « Smooth » a été réalisée. Celle-ci consiste en la définition de modèles 1D possédant de nombreuses couches d'épaisseur fixe, ici 25 (entre 0 et 300 m de profondeur), dont seule la résistivité peut varier. Ce type d'inversion a l'avantage d'être moins dépendant des a priori définis pour initialiser le calcul (i.e. reflétant notre appréhension de la subsurface), mais il a le désavantage d'imager des variations lissées de la résistivité selon la profondeur. D'autres types d'inversion existent et peuvent se montrer plus efficaces pour imager précisément des interfaces. Toutefois, ces dernières sont plus dépendantes des a priori considérés pour initialiser le calcul. De plus, celles-ci sont moins efficaces pour imager de fines couches en surface.

3.2.2. Interprétation par classification ascendante hiérarchique (CAH)

À la suite de la première phase du projet, notre travail s'est porté, pour commencer, sur l'utilisation d'une classification ascendante hiérarchique (CAH) à trois paramètres. Cette méthode donnait de bons résultats à l'échelle des bassins de Dzoumogné et Mtsamboro.

La CAH est une méthode de classification itérative. On commence par sélectionner un ou plusieurs paramètres à prendre en compte (ici la résistivité de surface, la pente et la courbure du relief) qu'on observe sur N objets (ici 114 843 points de mesure EM héliporté). Chaque objet définit sa propre classe au départ, nous avons donc 114 843 classes. Puis on regroupe les deux classes dont les valeurs (ici résistivité, pente et courbure) sont les plus proches. Ils forment ainsi une classe et nous avons N-1 classes. On répète ensuite l'opération de regroupement deux à deux jusqu'à n'avoir qu'une classe contenant tous les objets regroupés.

Ces regroupements successifs produisent un arbre de classification ou dendrogramme, dont la racine correspond à la classe unique regroupant tous les objets. Il représente une hiérarchie des classes. La certitude des corrélations entre les objets est indiquée par la longueur du trajet pour aller d'un élément à un autre sur l'arbre.

On peut alors choisir de tronquer l'arbre à un niveau voulu (20 classes par exemple, Figure 17) afin d'observer la répartition des objets dans ces classes.

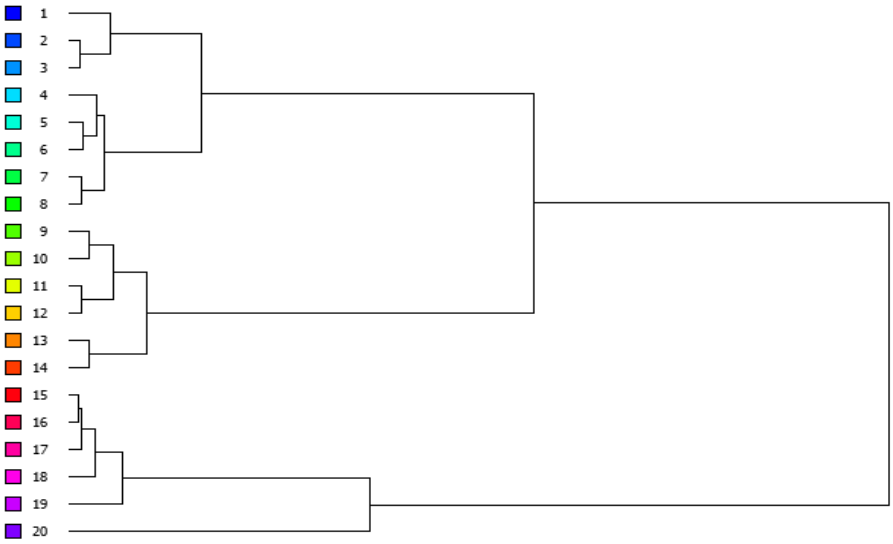
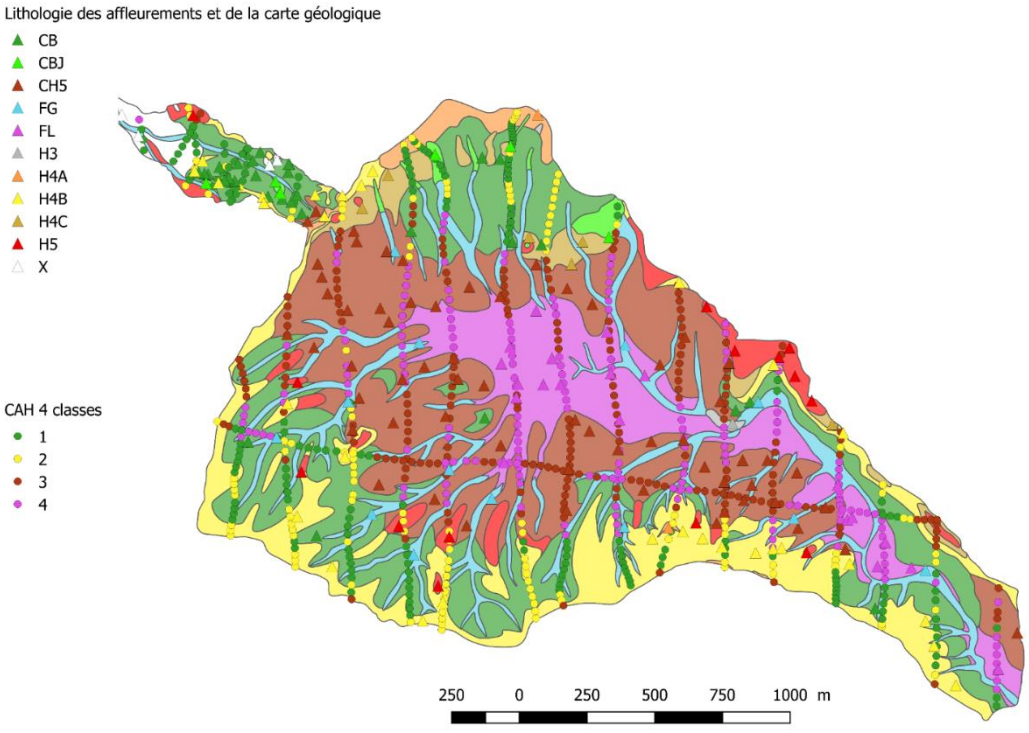


Figure 17 : Dendrogramme correspondant à la CAH 20 classes (resistivité, pente, courbure) sur tous les sondages EM de Mayotte. Paramètres utilisés : résistivité de surface, pente et courbure du relief.

Nous avons cherché à associer ces classes aux lithologies ciblées (décrites en 2.1.2) lors des terrains de juillet 2017 et juillet 2018. Pour cela nous avons regardé les classes obtenues après CAH et les lithologies associées au point d'observation lithologique le plus proche (dans la limite de 50 m de distance). Ainsi, on tente d'attribuer à chaque classe de CAH une lithologie principale.

Les premiers résultats de CAH sur la zone restreinte du terrain 2017 avec un nombre réduit de classes (4) donnaient des résultats plutôt discriminants d'un point de vue lithologique malgré un niveau de détail limité. Ils permettaient de séparer grossièrement les colluvions à blocs (classe numéro 1) des colluvions fines (classe numéro 3), ainsi que des dépôts alluvionnaires (classe numéro 4) et de l'horizon « plus sain » H4 (classe numéro 2).



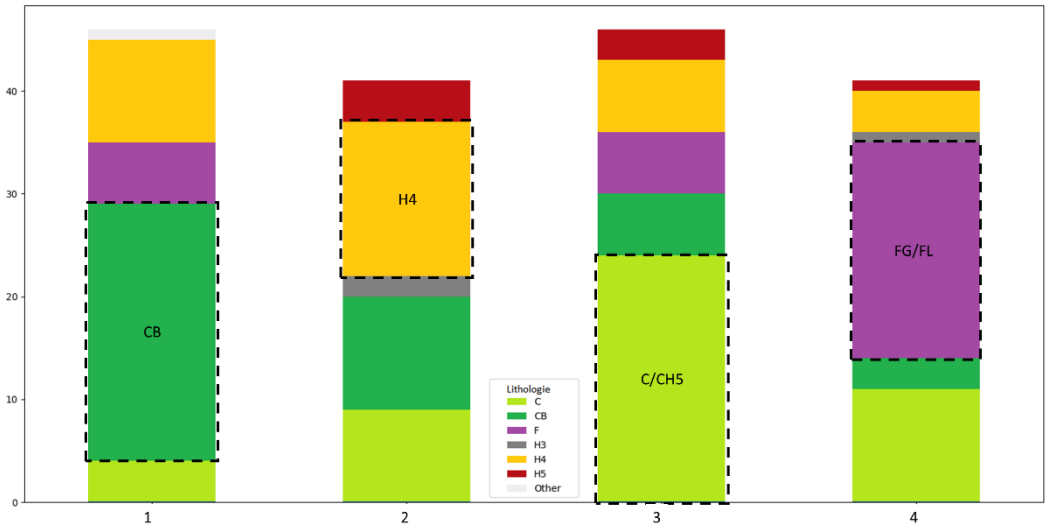


Figure 18 : Observation du résultat de la CAH à quatre classes (resistivité, pente, courbure) par rapportaux groupes de lithologies sur les données des basins de Dzoumonié et Mtsamboro (haut) sur la carte lithologique et (bas) statistiques normalisées sur le nombre d'échantillons.

Nous avions défini un nombre de classe qui permettait de leur attribuer des lithologies cohérentes, tout en gardant une représentativité statistique.

La méthodologie a été testée en utilisant 20 classes au lieux de 4. Le résultat à 20 classes donnait un meilleur niveau de détail sur la zone du terrain 2017. Malgré cela on observait qu'il restait assez difficile de séparer les classes correspondant aux lithologies H4a, H4b et H4c et qu'il était préférable de les regrouper. Par ailleurs, le nombre de points tombant dans le H3 étant bien trop faible, il était impossible de définir une classe de point EM caractérisant le H3 en utilisant uniquement la CAH. Malgré cela, les points (résistivité + pente + courbure) ainsi divisés et la lithologie associée à leur classe leur étant attribuée semblent donner des résultats cohérents avec la carte géologique pour plus de 80 % des points.

Dans la deuxième phase, la même analyse statistique CAH a été faite, avec l'intégralité du jeu de données, à l'échelle de l'île. L'objectif était toujours de tenter d'associer une lithologie à chaque classe de la manière la plus objective et représentative possible. On cherche donc la lithologie la plus probable pour chaque classe, en effectuant les mêmes regroupements lithologiques que ceux faits lors des tests sur la zone de terrain 2017 (Tableau 1).

Nom du regroupement	Lithologies regroupées
C	C, C-F, C-FL, C-X, CH5
CB	CB, CBJ
F	FG, FG-FL, FL, F
H2	H2
H3	H3
H4	H4A, H4AB, H4B, H4BC, H4C, H4
H5	H5

Tableau 1 : Regroupement des lithologies observées.

En réalisant le même exercice de classification à 20 classes sur l'ensemble des données de l'île on ne parvient pas à associer une lithologie à une classe, la CAH à 20 classes n'est donc pas pertinente.

L'exercice sur quatre classes a donc été tenté, puisqu'il était assez discriminant à petite échelle (Figure 17 et Figure 18). Il apparait également comme non pertinent à l'échelle de l'ile ; les sept regroupements lithologiques sont représentés de façon quasi identique dans chacune des quatre classes, qui sont alors non discriminantes (Figure 19).

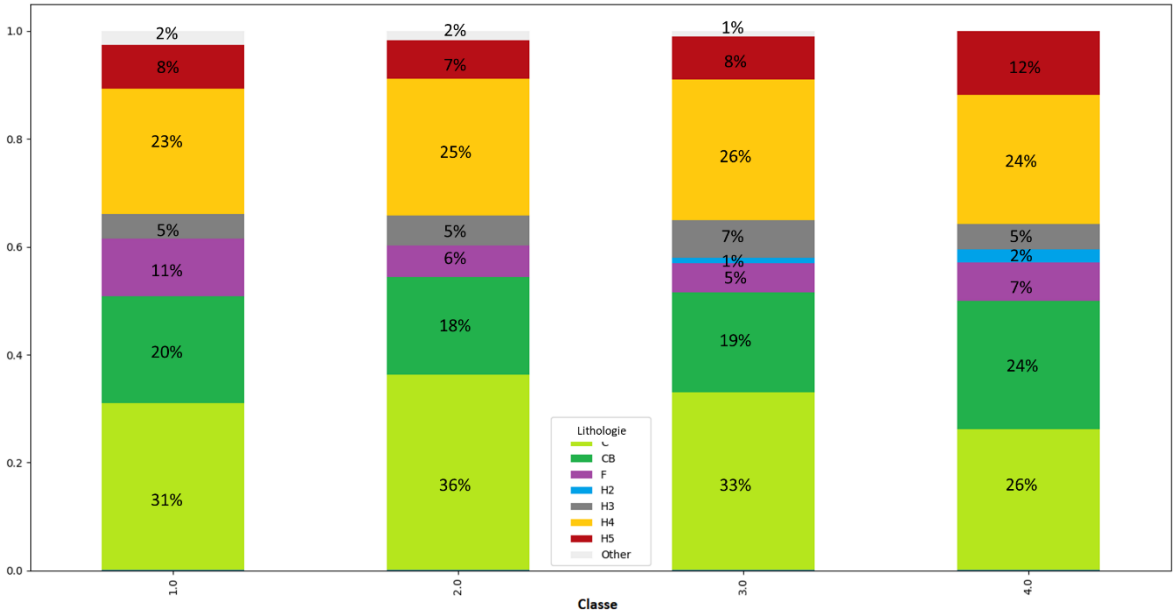


Figure 19 : Observation du résultat de la CAH à quatre classes (resistivité, pente, courbure) par rapport aux groupes de lithologies sur l'ensemble des données de l'île (normalisé sur le nombre d'échantillons de chaque classe).

Des tests supplémentaires incluant de nouveaux paramètres ont alors été réalisés. La CAH ne se fait plus uniquement sur la résistivité de surface, la pente et la courbure du MNT mais également sur les coordonnées X et Y (avec un poids moitié moins important que les trois premiers paramètres), afin de tenter de pallier au fait qu'une attribution de classe dans un secteur peut être la bonne, mais la mauvaise dans un autre. On choisit d'observer alors d'avantage de classes (ici 30 sur la Figure 20) mais le résultat n'est pas plus discriminant.

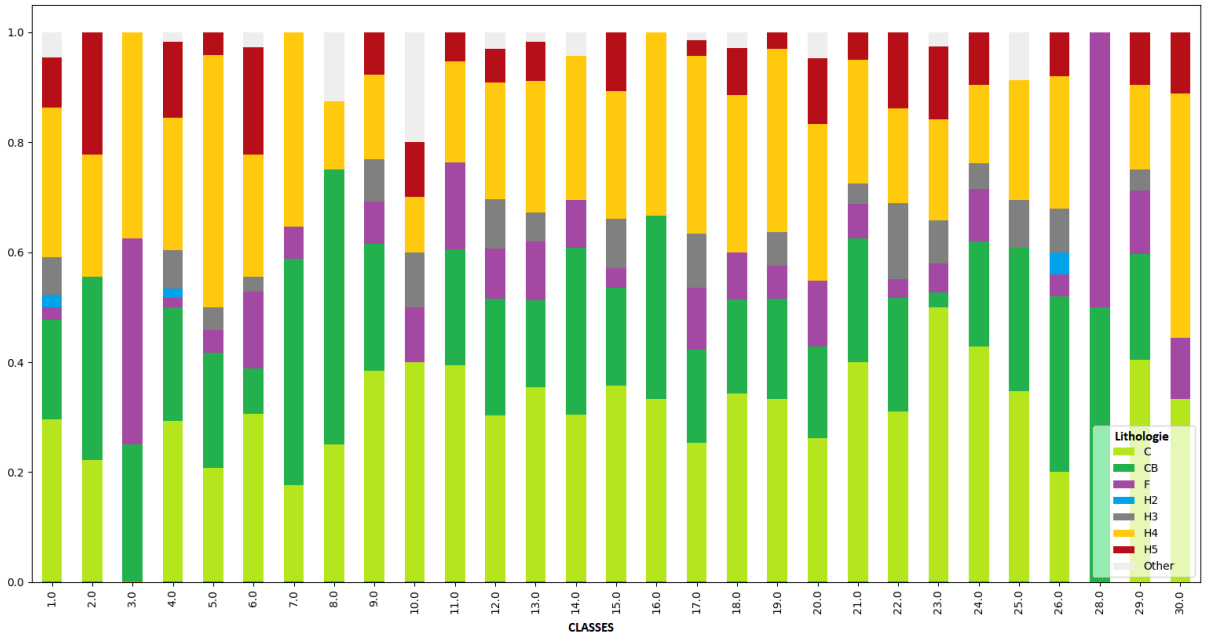


Figure 20 : Observation du résultat de la CAH à 30 classes (resistivité, pente, courbure et coordonnées X et Y) par rapport aux groupes de lithologies sur l'ensemble des données de l'île (normalisé sur le nombre d'échantillons de chaque classe).

On conclut donc que la CAH sur la résistivité de la première couche ainsi que les pentes et courbures dérivées du MNT ne sont pas assez discriminantes à grande échelle et surtout avec une densité de données lithologiques bien moins importante pour qualifier la lithologie de la surface. Ces données ont pourtant montré qu'elle pouvait donner de bons résultats à petite échelle et avec une densité de données lithologique plus élevée. C'est pourquoi nous avons décidé de changer de méthodologie, afin de prendre les points d'observation lithologique comme une donnée de départ plus importante que les autres paramètres.

3.3. APPROCHE PRÉDICTIVE

Les données lithologiques ont été acquises à proximité des points EM. Il a donc été possible d'associer à chaque point d'observation de terrain une pente, une courbure et une résistivité de « surface » (i.e. la première couche du modèle EM 1D le plus proche), l'idée étant de regarder la similitude entre les caractéristiques de ces points de référence et celles des points EM, eux-mêmes caractérisés par une résistivité de « surface », une pente et une courbure (échantillonnées sur le MNT au droit de chaque point), et donc de propager statistiquement la donnée lithologique aux points « similaires ».

Dans un premier temps, suite à la campagne de 2017 au niveau du bassin de Dzoumogné, des zones de présence de telle ou telle lithologie ont été définies dans l'espace 3D, résistivité-pente-courbure. La définition de ces zones dans les trois dimensions R,P,C s'est basée sur les résultats d'une statistique manuelle réalisée sur les résistivités, les pentes et les courbures observées au niveau des points d'observation lithologique. Ensuite, nous avons regardé dans quelle zone 3D, et donc à quelle lithologie potentielle, appartenaient les différents points EM afin de propager les différentes lithologies observées au niveau de ces points et proposer une cartographie prédictive du bassin versant (Figure 21).

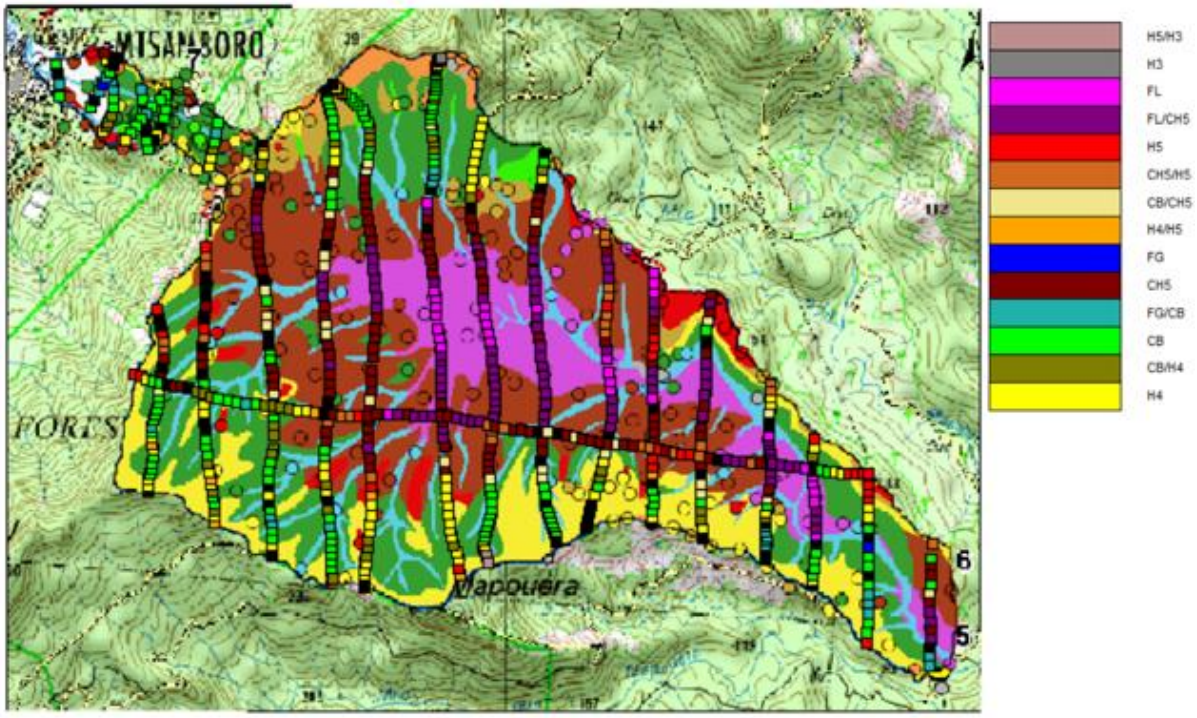


Figure 21 : Cartographie prédictive des lithologies par définition de zones dans l'espace 3D (résistivité – pente – courbure).

Dans un second temps, lors de l'étude à l'échelle de l'île de Grande-Terre, nous nous sommes aperçus que cette approche, bien que validant le potentiel de l'EM à informer sur des couches très peu profondes, était trop simpliste et rigide.

Tout d'abord, il a été décidé de travailler sur une grille de résistivité de surface. La première couche des modèles EM 1D a été interpolée de manière à obtenir une valeur de résistivité « de surface » en tout point de l'ile. La pente et la courbure du MNT ont ensuite été échantillonnées au droit de chaque pixel de cette grille afin qu'un pixel porte les informations sur la résistivité, la pente et la courbure locale.

En parallèle, Comme pour le travail précédent, les différents points d'observation lithologique ont été associés à une pente, une courbure et une résistivité. Toutefois, la définition des zones 3D a été abandonnée au profit d'un calcul de distance. Ainsi, la distance (géographique-pente-résistivité-courbure) entre chaque point d'observation lithologique et chaque pixel a été calculée. Une lithologie a alors pu être attribuée à chaque pixel, en regardant le point d'observation lithologique le plus « proche ». Les différences de distance et de nature entre les deux points d'observation lithologique les plus « proches » ont également été regardées ; la valeur de la distance minimale ainsi que les distances pour chaque lithologie sont aussi stockées dans un fichier.

Une carte prédictive des lithologies de surface de la Grande-Terre a ainsi été produite (voir ci-dessous partie 3.4). Un intérêt indirect de la méthode utilisée est que, même en cas d'erreur sur la lithologie prédite, la carte permet de faire ressortir des zones et des corps « proches », pouvant être rattachés ultérieurement à une autre lithologie au gré des travaux de terrains et de l'évolution de la connaissance.

Cette dernière approche méthodologique, utilisée pour réaliser la carte est prometteuse. Le travail mérite d'être approfondi au travers d'un projet de recherche dédié. Des évolutions sont déjà envisagées et d'autres doivent être testées, notamment au niveau de la formule du calcul de la distance et des pondérations à associer aux différents paramètres en fonction du contexte géologique. Une réflexion sur les raisons qui permettent à l'EM d'informer sur la très proche surface est également nécessaire avec des questions qui restent en suspens. Est-ce lié au contexte et aux épaisseurs/résistivités des couches de surface qui permettent leur « imagerie » ? Est-ce qu'il s'agit plutôt d'une caractérisation indirecte (i.e. les horizons plus profonds, >1-3 m de profondeur, ont un lien lithologique, géologique ou… avec la couche de surface) ?

3.4. DESSIN DE LA CARTE LITHOLOGIQUE PRÉDICTIVE DE SURFACE

Basées sur la méthodologie décrite ci-dessus, les différentes étapes du dessin de la carte lithologique de surface sont présentées sur la Figure 22, à travers l'exemple d'une zone située aux alentours du Mont Choungui (sud de l'île). Le principe général consiste à améliorer la précision des contours de la carte géologique à 1/30 000 à l'aide de cette méthodologie de cartographie prédictive et avec les points de calage et l'expertise de terrain.

Dans le détail, les différentes étapes peuvent être décrites de la manière suivante :

- acquisition de terrain (cf. ; paragraphe 3.1) ;
- la comparaison croisée (sous SIG) entre la cartographie prédictive de la couche de surface (0-1m), les points de calage terrain (Figure 22B) et la carte géologique au 1/30 000 (Figure 22C). Cette étape a pour but de faire ressortir les zones d'incohérences entre ces trois jeux de données. Dans l'exemple qui nous intéresse ici, la carte géologique montre que la zone entre les Mlimas Choungui et Djialimou est composée d'une vaste plage d'isaltérites de laves basiques à intermédiaires (Figure 22C). Or, la cartographie prédictive montre qu'une épaisseur non négligeable (dans l'optique de la couche de surface 0-1m) de colluvions de type CB recouvre ces isaltérites, ce qui est confirmé par les observations de terrain. Il est donc possible d'améliorer ici sensiblement la précision de l'information cartographique de la carte lithologique de surface.

Une fois les zones d'améliorations identifiées, l'expertise des géologues cartographes est requise pour dessiner sous SIG de nouveaux polygones représentant plus finement les différents ensembles lithologiques de la couche de surface, ainsi que leurs variations latérales de faciès (Figure 22D). Cette étape permet aussi de supprimer le « grain » (passage d'une carte en points (pixels) à une carte en polygones) de la carte prédictive, en homogénéisant des ensembles lithologiques de pixels majoritaires, sur la base : 1) de la répartition des signaux ; 2) des données de terrains ; 3) de la morphologie locale ; et 4) de l'expertise des géologues cartographes. Cette dernière étape permet d'obtenir une carte lithologique proprement dite. Dans l'exemple de la figure 22D, elle met en lumière une géométrie complexe composée de crêtes d'isaltérites (H4A, H4B et H4C) coiffées de rares butes-témoin d'allotérites (H5) entre lesquelles se trouvent des placages de colluvions riches en blocs (CB et CBJ).

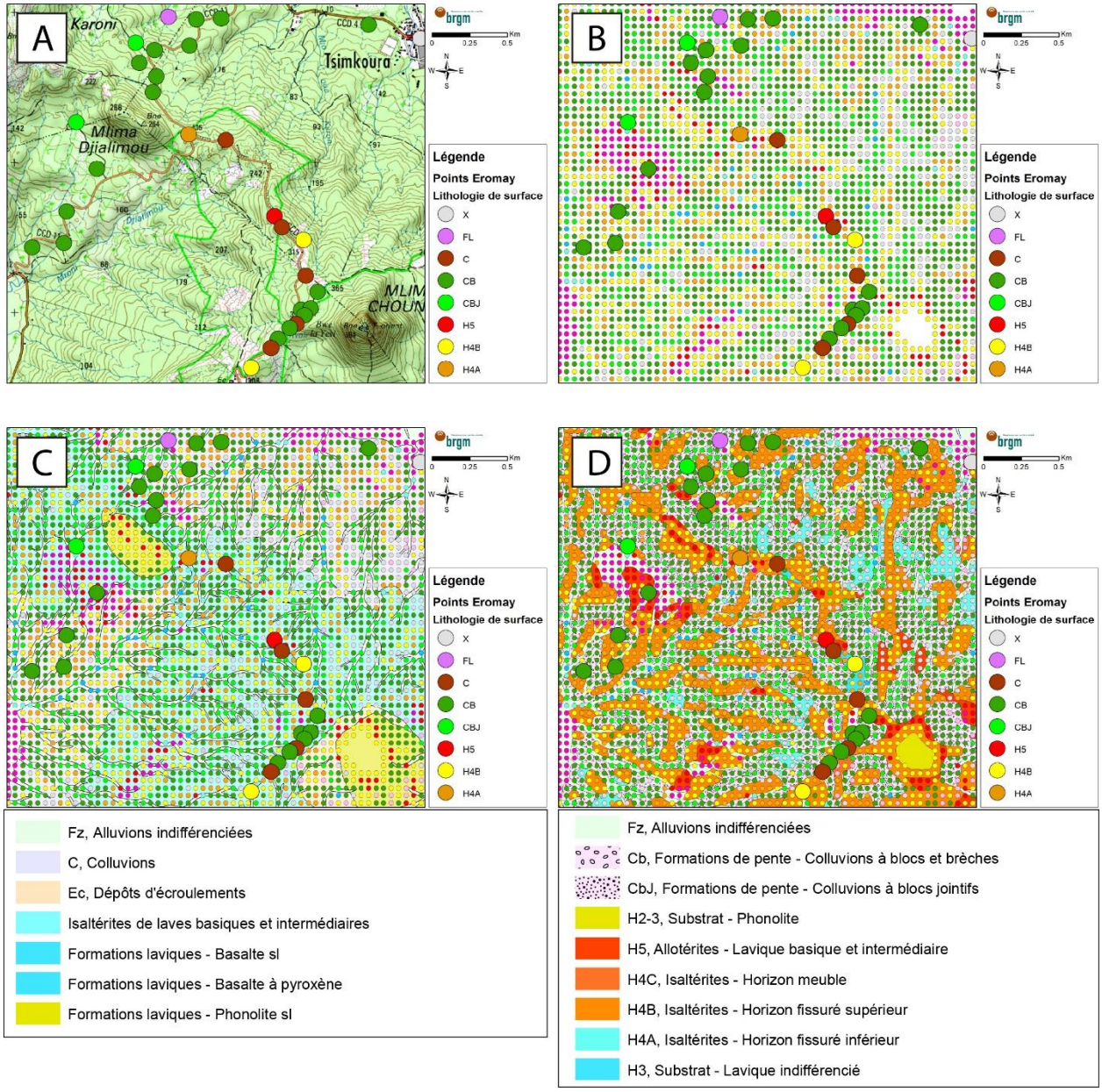


Figure 22 : Résumé des différentes étapes de la construction de la carte lithologique de surface à travers l'exemple d'un secteur situé aux alentours du Mlima Choungui (Crêtes du Sud).

A = Récolte d'observations de terrain et de points de calage ; B = Cartographie prédictive de la couche de surface (0-1m) basée sur le traitement croisé des données géophysique (EM), morphologique (MNT) et de terrain ; C = Comparaison entre la cartographie prédictive de la couche de surface et la carte géologique au 1/30 000 (Lacquement et al*., 2013) ; D = Modification, correction et dessin de la carte lithologique de surface. Voir le texte pour le détail des différentes étapes.*

4. Résultats

4.1. CARTE PRÉDICTIVE À PARTIR DES GRILLES EM

Le résultat du traitement croisé des données géophysiques (EM héliporté), morphologiques (pente et courbure du MNT) et de terrain (points d'observation) permet de proposer une cartographie prédictive de la très proche surface (tranche 0-1m) sur l'ensemble de l'île de Mayotte. Comme détaillé dans la section méthodologie, les résultats se présentent sous la forme de points (ou pixels), répartis selon une grille homogène, et pour lesquels la couleur indique la lithologie la plus probable au regard des caractéristiques géophysiques et morphologiques des différents pixel (Figure 23).

Ces résultats montrent tout d'abord que malgré cette approche discrétisée, de vastes ensembles lithologiques se dessinent sur toute l'île. Il s'agit notamment :

- des vastes épandages de colluvions au sens large (C, CH5, CB ou CBJ ; Figure 23) sur l'ensemble des reliefs majeurs de l'île (Crêtes du Nord, Massif du Mtsapéré, Massif du Bénara et Crêtes du Sud). Ces colluvions sont souvent associées de manière irrégulières (en « pointillisme ») à des pixels d'isaltérites (indifféremment en H4A, H4B ou H4C), ce qui montre que les colluvions forment une pellicule globalement fine au-dessus des isaltérites. Dans le détail, la cartographie prédictive montre que les CBJ sont préférentiellement localisées à proximité immédiate des reliefs les plus importants ainsi que des sources de roche saine (H2 ou H3). Les C/CH5 sont quant à elles situées à proximité de surfaces plus planes et/ou de paléo-surfaces où affleurent les allotérites (H5). Les CB forment quant à elles des ensembles intermédiaires entre les deux précédents faciès. Cette répartition, obtenue rappelons-le par cartographie prédictive, est remarquablement cohérente à grande échelle avec les observations de terrain ;
- des vastes plaines alluviales côtières et des rares vallées perchées (ex : celles de la Mro Oua Coconi au centre-est de l'île et de la Mro Oua Bandram au niveau du bassin versant de Dzoumogné au nord), pour lesquelles les lithologies les plus probables sont des alluvions fines (FL, Figure 23) ;
- des accumulations restreintes d'alluvions grossières (FG, Figure 23), surtout situées en tête de drain, et ce sur tout le réseau hydrographique de l'île ;
- une forte concentration d'allotérites (H5, Figure 23) selon une bande méridienne située au centre-est de l'île, centrée sur Combani et allant grossièrement de Sada/Ouangani au sud jusqu'à Dzoumogné au nord. De plus petites surfaces de H5 sont identifiées çà et là par la cartographie prédictive, notamment au niveau des Crêtes du Nord, des Massifs du Mtsapéré et du Bénara, et de manière anecdotique sur les Crêtes du Sud. Comme l'on peut s'y attendre, ces H5 sont associées à des quantités parfois importantes de colluvions CH5. Notons que cette répartition est très proche de celle identifiées sur la carte géologique à 1/30 000 (voir Figure 1), en particulier pour la paléo-surface de Combani (Lacquement *et al*., 2013). Elle permet cependant d'affiner la cartographie à 1/10 000 de certains secteurs ;
- des isaltérites laviques au sens large (H4A, H4B et H4C, Figure 23) qui se concentrent préférentiellement au sommet des crêtes un peu partout sur l'île, avec des proportions notables sur le massif du Mstapéré ainsi que dans tout le sud de l'île entre Chirongui et Bandrélé. Ces résultats sont en accord avec les levés de la carte géologique au 1/30 000, qui avaient montré que le sud de l'île était riche en isaltérites laviques. Dans le détail, la plupart des crêtes semblent être majoritairement formées par des H4B, tandis que le cluster du sud de l'île est plutôt en H4C.

Les vérifications de terrain montrent que ces grands ensembles sont réels et remarquablement cohérents avec les observations géologiques, ce qui valident ainsi (au moins à grande échelle) la méthodologie de cartographie prédictive développée ici.

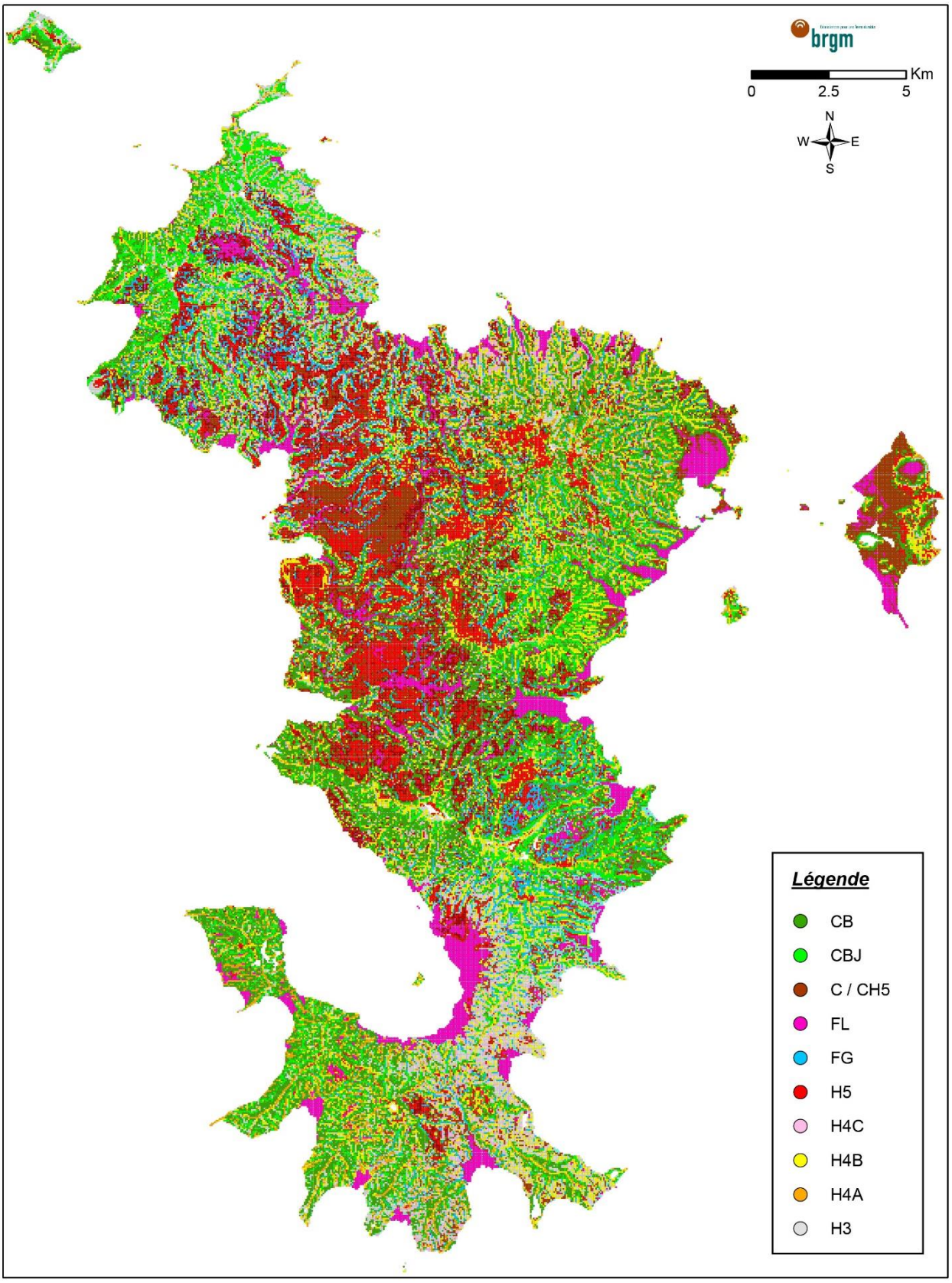


Figure 23 : Résultat de la cartographie prédictive de la lithologie de surface sur l'ensemble de l'île de Mayotte (voir texte pour les explications).

4.2. CARTE LITHOLOGIQUE DE SURFACE

La cohérence à l'échelle de l'ile, la présence des grands ensembles identifié dans le 4.1 et notre expertise nous a amené à dessiner des polygones pour la création d'une carte lithologique de surface sur l'ensemble de l'ile à une échelle de restitution à 1/10 000. Le détail des différentes lithologies de chaque caisson se trouve dans les paragraphes 2.1.2 et 2.1.3. Il s'agit du produit cartographique final pour lequel le présent projet a été mené.

Cette carte lithologique, présentée sur la Figure 24, montre que :

- les alluvions fines (FL) sont concentrées dans les plaines alluviales et/ou côtières, ainsi que dans de rares mais assez vastes vallées perchées au cœur de l'île. Elles occupent aussi généralement l'aval du réseau hydrographique, une fois que les pentes se sont amorties ;
- les alluvions grossières (FG) sont situées majoritairement en tête de versant et dans les parties amont des drains hydrographiques. On les retrouve également dans les lits actifs des rivières majeures de l'île, même en zone basse. Elles sont parfois visibles en plaines où elles sont recouvertes d'alluvions fines (et donc hors de la tranche 0-1m qui nous intéresse ici) ;
- les colluvions ont pu être cartographiées avec une bien plus grande précision que sur la carte géologique à 1/30 000 (voir Figure 1 pour comparaison), notamment dans le sud de l'île. Une attention particulière a notamment été portée sur la distinction entre les différents faciès. Il est important de souligner que la transition entre ces faciès est généralement très progressive, et qu'il est ainsi très difficile de la représenter telle quelle en carte. Les grands types de colluvions sont :
  - les colluvions fines (C ou CH5) provenant d'un matériel très pauvre en bloc, et que l'on retrouve ainsi principalement autour des zones à allotérites (H5) et/ou de paléo-surfaces altérées (notamment autour de celle de Combani, au centre-est de la carte, et dont le niveau d'altération est en H4C),
  - les colluvions à blocs (CB) sont un faciès que l'on retrouve très fréquemment dès que les reliefs commencent à être importants et qu'une source amont de matériel libère des blocs dans la pente. Il s'agit généralement d'altérites dans lequel des fragments de roche saine sont préservés (H3, H4A ou H4B). Ces colluvions sont le faciès dominant sur l'île,
  - les colluvions à blocs jointifs (CBJ) se trouvent immédiatement en pied de relief et/ou de source très importante de blocs. Il ne s'agit pas d'éboulis au sens strict dans la mesure où les blocs sont emballés dans une matrice et où un lent mouvement gravitaire latéral (fluage) s'opère. On les retrouve surtout au niveau des Crêtes du Nord et du Massif du Bénara ;
- les secteurs à allotérites (H5) correspondent dans les grandes lignes à ceux identifiés sur la carte géologique à 1/30 000 (voir Figure 1 pour comparaison), bien que la taille de certains des clusters de H5 identifiés dans le nord-est et sur le flanc nord du Massif du Bénara aient été réévalués à la baisse. La majorité des allotérites affleurant en surface se trouvent dans le quart nord-est de l'île, avec une proportion qui devient significative dans les environs de la paléo-surface de Combani ;

- les isaltérites ont pu, tout comme les colluvions, être cartographiées avec une bien plus grande précision que sur la carte géologique à 1/30 000 (voir Figure 1 pour comparaison). Une attention particulière a notamment été porté sur le détail du niveau d'altération (H4A, B ou C), qui a une influence importante sur l'érodibilité des terrains :
  - les isaltérites H4C, les plus évoluées, se retrouvent principalement au niveau de la paléo-surface de Combani qui représente une succession volcano-sédimentaire fortement altérée (cohérente avec la carte géologique à 1/30 000). On les retrouve çà et là au sommet de buttes témoins souvent isolées un peu partout sur l'île. Notons aussi que le matériel cendreux récent de Petite Terre a été classé dans cette catégorie, bien que de plus amples études soient sans doute nécessaires pour mieux caractériser ces matériaux,
  - les isaltérites H4B forment le gros des altérites affleurant à Mayotte : on les retrouve en grande quantité, à la fois sur les planèzes des Crêtes du Nord, autour du Massif du Mtsapéré et sur toute la moitié sud de l'île, où leur importance cartographique a cependant été légèrement réévaluée suite à la prise en compte de la faible pellicule de colluvions souvent présente (voir précédemment et Figure 1 pour comparaison avec la carte géologique à 1/30 000). Les H4B arment aussi de nombreuses crêtes et sont la source probable d'une quantité importante de fragments de roches saines que l'on retrouve dans les colluvions,
  - les isaltérites H4A, peu représentées, affleurement majoritairement dans le sud de l'île et sur les côtes ;
- les affleurements de roches saines (H3) correspondent à ceux de la carte géologique à 1/30 000, autant pour les ensembles basiques à intermédiaires (laviques indifférenciés) que pour les phonolites. Ils sont relativement rares à l'échelle de l'île et concernent majoritairement les pointements et les crêtes rocheuses de l'île ;
- notons enfin que les terrains volcanoclastiques récents (projections phréato-magmatiques de type maar) de Petite-Terre possèdent un signal géophysique marqué, qui diffèrent assez fortement de ceux de Grande-Terre, cible privilégiée de la présente étude. La méthodologie développée dans le cadre de cette étude n'a donc pas pu y être pleinement appliquée. La lithologie de surface de Petite-Terre est donc désignée sous le terme « volcanoclastites » et rattaché à l'horizon H4B de par la présence à la fois de blocs et de matériel fin au sein des dépôts.

Une simple comparaison visuelle entre la carte géologique à 1/30 000 (Figure 1) et la nouvelle carte lithologique de surface (tranche 0-1m) à 1/10 000 produite dans le cadre de ce projet permet de se rendre compte de l'amélioration significative de la précision des données de surface, notamment pour les différents faciès contenus dans les caissons de la carte géologique.

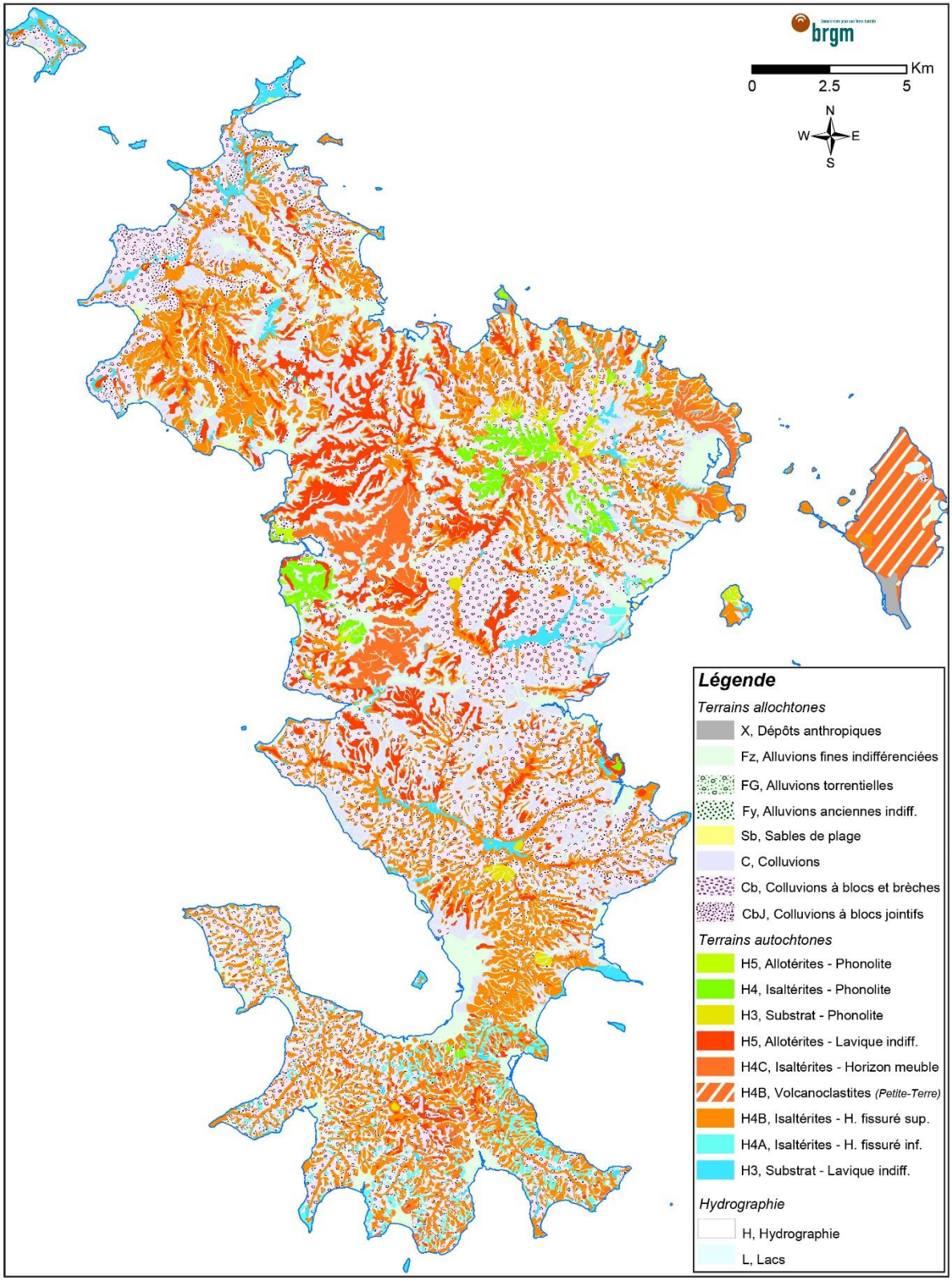


Figure 24 : Carte lithologique de surface (tranche 0-1m) à 1/10 000 de l'île de Mayotte.

5. Conclusions

Les objectifs de ce travail étaient de produire un document cartographique utile en matière de caractérisation de la nature lithologique des formations géologiques de surface (0-1m) à 1/10 000 pour permettre la déclinaison de ce document en cartes d'érodibilité et de ruissellement par exemple en lien avec le projet LESELAM et LESELAM 2.

À partir des documents existants et de campagnes de terrains, une cartographie lithologique des formations superficielles à 1/10 000 a été réalisée sur l'ensemble du territoire de Mayotte. L'utilisation des données d'électromagnétisme (EM) héliporté acquises en 2010 a alors été testée dans le cadre de ce projet pour évaluer leur potentiel en termes de cartographie prédictive.

Les résultats obtenus en utilisant les données EM démontrent une sensibilité du signal à la nature lithologique de la proche surface. Les résultats de ce projet soulignent l'intérêt majeur du travail conjoint entre géologue et géophysiciens et le potentiel des données EM pour élaborer des cartographies lithologiques prédictives pertinentes pour de nombreux sujet comme l'érosion des sols, les risques mouvements de terrain, …

6. Bibliographie

Auken E., Boesen T., Christiansen A.V. (2017). Chapter Two – A Review of Airborne Electromagnetic Methods With Focus on Geotechnical and Hydrological Applications From 2007 to 2017. Advances in Geophysics 58, 47-93.

Macnae J.C., Lamontagne Y., West G.F (1984). Noise processing techniques for time-domain EM systems. Geophysics, 49, 934-948.

Lacquement F., Nehlig P., Bernard J. (2013). Carte géol. France (1/30 000), feuille Mayotte (1179). Orléans : BRGM.

Nehlig P., Lacquement F., Bernard J. *et al.* (2013). Notice de la Carte géologique de Mayotte. BRGM/RP-61803-FR, 135 p., 1 ann.

Prognon C., Bernard J., Lacquement F. *et al.* (2017) - ÉROMAY Érosion Mayotte : Caractérisation, cartographie et dynamique des sols. Rapport intermédiaire: mise en place d'une méthodologie de cartographie de la lithologie des formations superficielles des bassins versants de Dzoumogné et de Mtsamboro BRGM/RP-67348-FR.

Reninger P.-A., Martelet G., Deparis J. *et al.* (2011). Singular value decomposition as a denoising tool for airborne time domain electromagnetic data. Journal of Applied Geophysics 75, 264–276.

Reninger PA., Martelet G., Perrin J. (2015). Frame effective tilt correction for HEM data acquired over rugged terrain. First European Airborne Electromagnetics Conference, 6-10 Septembre, Turin

Thiery Y, Lacquement F., Marçot N. (2018). Landslides triggered in weathering crystalline rocks of modarate latitudes : A case of study in Mediterrannean environment (The maure Massif, France). *Engineering Geology. 248, 164-184.*

Viezzoli A., Christiansen A.V., Auken E. *et al.* (2008). Quasi-3D modeling of airborne TEM data by spatially constrained inversion. Geophysics 73, F105-F113.

Ward S.H., Hohmann G.W. (1988). Electromagnetic theory for geophysical applications. Nabighian, M.N. (Ed.), Electromagnetic methods in applied geophysics, Society of Exploration Geophysicists 1, 131-311.

Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France - Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr