

Le GIS Sol dans les départements et régions d'Outre-mer français

M. Brossard^(1*), K. Fujisaki^(1,2), C. Jolivet⁽²⁾, E. Dupuits-Bonnin⁽³⁾, M. Jameux⁽⁴⁾, S. Jalabert⁽⁵⁾, E. Toulemonde Le Ny⁽⁶⁾, T. Becquer⁽¹⁾, D. Blavet⁽¹⁾, A. Beaudou⁽⁷⁾, L. Boulonne⁽²⁾, T. Desjardins⁽⁸⁾, H. Le Martret⁽⁹⁾ et C. Ratié⁽²⁾

- 1) IRD, UMR 210 Eco&Sols, 34060 Montpellier cedex 2, France
- 2) INRAE, Unité Info&Sols, 45075, Orléans, France
- 3) 44300, Nantes, France
- 4) PNR du Lubéron, Apt, France
- 5) UMR 5805 EPOC, Bordeaux Sciences Agro, 33175 Gradignan Cedex, France
- 6) INAO, Montpellier, France
- 7) Retraité, ancien pédologue IRD
- 8) IRD-IEES, Centre IRD France Nord, 93143 Bondy cedex, France.
- 9) Retraité, ancien informaticien et pédologue IRD

* Auteur correspondant : michel.brossard@ird.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente les axes des travaux pédologiques effectués dans les régions ultramarines françaises dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique Sol. Ces travaux concernent les programmes « Réseau de mesures de la qualité des sols » (RMQS) et « Inventaire, Gestion et Conservation des Sols » (IGCS), conduits aux Petites Antilles, Martinique et Guadeloupe, à La Réunion et Mayotte, et en Guyane. Ces travaux revêtent un caractère particulier du fait que les territoires concernés sont soumis à des climats variés dans la bande intertropicale et des conditions de développement des sols contrastées sur des lithologies continentales du socle et insulaires volcaniques.

Dans le cadre du programme IGCS, les travaux se sont axés dans un premier temps sur l'inventaire et la sauvegarde numérique des connaissances de la distribution des sols acquises dans ces territoires depuis les années 1950. Dans un second temps, des synthèses morpho-pédologiques ont été réalisées grâce à ces données pédologiques numérisées et intégrées à une base de données, complétées par des données géologiques et géomorphologiques. Ces travaux sont illustrés dans cet article à travers le cas de la Guadeloupe.

Comment citer cet article:

Brossard M., Fujisaki K., Jolivet C., Dupuits-Bonnin E., Jameux M., Jalabert S., Toulemonde Le Ny E., Becquer T., Blavet D., Beaudou A., Boulonne L., Desjardins T., Le Martret H. et Ratié C., 2023 - Le GIS Sol dans les départements et régions d'Outre-mer français, *Étude et Gestion des Sols*, 30, 145-168

Comment télécharger cet article:

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-30/>

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS:

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/>

La première campagne du programme RMQS, qui s'est déroulée entre 2006 et 2015, a porté sur 67 sites dans les mêmes territoires. La mise en place de ce programme en Outre-mer s'est faite avec quelques adaptations par rapport au dispositif mis en place dans l'Hexagone, et qui concernent l'implantation des sites, les analyses de sols réalisées et la gestion des échantillons de sols. Quelques résultats de ce programme sont discutés, concernant les stocks de carbone du sol en Guyane, et les teneurs en éléments traces métalliques et hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les territoires insulaires. Enfin, les pistes d'évolution du programme sont discutées, afin d'améliorer le suivi des propriétés des sols dans ces territoires.

Mots-clés

Sol tropical, RMQS, IGCS, qualité des sols, base de données pédologiques, Guadeloupe, Guyane, Martinique, La Réunion, Mayotte

SUMMARY

THE "GIS SOL" IN THE FRENCH OVERSEAS DEPARTMENTS AND REGIONS

This article presents the main lines of soil research carried out in the French ultramarine regions within the framework of the Scientific Interest Group Sol (GIS Sol). This work concerns the programs "French Soil Quality Monitoring Network" (RMQS) and "Soil Inventory, Management and Conservation" (IGCS), which were conducted in the Lesser Antilles, Martinique and Guadeloupe, Reunion and Mayotte, and French Guiana. This work has a particular nature because these territories are subject to various climates in the intertropical area, contrasting soil development conditions on continental basement and volcanic island lithologies.

For IGCS program, in a first step, legacy data from 1950s regarding soil distribution in these regions were compiled and saved in digital medium. In a second step, morpho-pedological syntheses were made thanks to these legacy data along with geological and geomorphological data, embedded in a database. These works are illustrated in this article with the case of Guadeloupe.

The first campaign of RMQS program in overseas was conducted between 2006 and 2015. 67 sites were sampled. The experimental set-up was made with a few adaptations from the set-up in mainland France, regarding site installation, soil analyses, and soil samples management. Some results of this program are presented and discussed: soil carbon stocks in French Guiana, and contents of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in island areas. Lastly, strategic pathways for this program are discussed, in order to improve the monitoring of soil properties in these regions.

Key-words

Tropical soil, RMQS, IGCS, soil quality, soil data base, Guadeloupe (WI), French Guiana, Martinique (WI), Réunion, Mayotte.

RESUMEN

EL "GIS SOL" EN LOS DEPARTAMENTOS Y TERRITORIOS FRANCESES DE ULTRAMAR

Este artículo presenta los ejes de los trabajos edafológicos desarrollados en las regiones ultra-marinas francesas en el marco de la "Agrupación de Interés Científico suelo" (GIS Sol). Estos trabajos se refieren a los programas «Red de medidas de la calidad de los suelos de Francia» (RMQS) y «Inventario, Gestión y Conservación de los suelos» (IGCS), fueron ejecutados en las Antillas Menores, Martinica y Guadalupe, en La Reunión y Mayotte en el Océano Índico, en Guyana francesa. Estos trabajos revisten un carácter particular porque los territorios afectados están sometidos a climas variados en la franja intertropical, condiciones de desarrollo de los suelos contrastadas sobre litologías continentales del zócalo e insulares volcánicas.

En el marco del IGCS, en un primer tiempo se ejecutó el inventario y el rescate numérico de los conocimientos de la distribución de los suelos, inventarios adquiridos desde los años 1950. En un segundo tiempo, fueron realizadas síntesis morfo-edafológicas gracias a esos datos integrados en una base de datos, completados por datos geológicos y geomorfológicos. Estos trabajos están aquí ilustrados con el ejemplo de la Guadalupe.

La primera campaña del programa RMQS abarcó 67 sitios en los mismos territorios, entre 2006 y 2015. El establecimiento de este programa en ultramar fue hecho con algunas adaptaciones del dispositivo inicial del territorio de la metrópoli, en particular sobre la instalación de los sitios, el análisis de suelos, y la gestión de las muestras de suelos. Algunos resultados de este programa son discutidos, en particular los estoques de carbono del suelo en la Guyana, las concentraciones de elementos trazos metálicos, e hidrocarburos aromáticos policíclicos de los territorios insulares. Finalmente, algunas evoluciones del programa son discutidas con el fin de mejorar el acompañamiento de las propiedades de los suelos de estos territorios.

Palabras clave

Suelo tropical, IGCS, RMQS, calidad del suelo, base de datos de suelos, Guadalupe (Antillas Menores), Guyana francesa, Martinica (Antillas Menores), La Reunión, Mayotte.

1. INTRODUCTION

En 2006, l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) intègre en tant que partenaire le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol, www.gissol.fr), apportant ainsi l'expertise des sols des régions ultramarines (Arrouays *et al.*, 2022). Les travaux se sont déclinés dans le cadre des programmes IGCS (Inventaire, Gestion et Conservation des Sols) et RMQS (Réseau de mesures de la qualité des sols).

Les sols tropicaux français occupent une surface proche du cinquième du territoire hexagonal si l'on comptabilise les collectivités territoriales ultramarines. Les travaux qui ont été réalisés dans le cadre du GIS se sont centrés sur les départements et régions des territoires de la Guadeloupe, de la Guyane, de la Martinique, de La Réunion et de Mayotte (Figure 1, Tableau 1). Ils sont répartis dans la zone intertropicale et couvrent environ 92 000 km² sur lesquels vivent plus de deux millions d'habitants (2 177 251 hab., données INSEE 2019 et 2017 pour Mayotte) (INSEE 2022). Ces milieux subissent actuellement l'impact de fortes pressions démographiques sur des surfaces réduites, 90 % des populations évoquées vivant en domaine insulaire. Ces régions sont particulières au regard de l'expérience métropolitaine des pédologues. La Guyane est un domaine continental à climat équatorial, alors que les milieux insulaires sont majoritairement volcaniques et présentent des contraintes

physiographiques et bioclimatiques particulières. Entre 2010 et 2020, l'espace cultivable a diminué dans les îles, mais a augmenté en Guyane (ODEADOM, 2022). Les sols des Outre-mer font face à diverses pressions anthropiques. La pression foncière est importante et a provoqué la diminution des espaces agricoles aux Antilles; son évolution au cours des prochaines décennies sera soumise à la dynamique démographique, qui est contrastée en Outre-mer. La lutte contre les bioagresseurs dans les agroécosystèmes passe très fréquemment par l'emploi de produits phytosanitaires, pouvant provoquer des effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine. Le cas le plus connu est celui du chlordécone, un insecticide organochloré massivement utilisé dans les bananeraies aux Antilles entre 1972 et 1993. Si de nombreux travaux sont menés pour évaluer l'ampleur de la contamination des écosystèmes par le chlordécone et ses effets sur la santé humaine (Cabidoche et Lesueur-Jannoyer, 2011; Maudouit et Rochoy, 2019; Rochette *et al.*, 2020), la contamination des sols et ses conséquences sur les écosystèmes par les autres produits phytosanitaires ont été peu étudiées en Outre-mer (Mamy *et al.*, 2022). Enfin, les sols forestiers en Guyane sont menacés par la déforestation d'origines agricole et minière. L'exploitation aurifère, en partie illégale, a contribué à la remobilisation des éléments traces naturellement accumulés dans les sols au cours du temps, dont le mercure (Grimaldi *et al.*, 2015). Les conditions anoxiques

Figure 1 : Les départements et régions françaises de l'Outre-mer concernés par le développement des programmes IGCS et RMQS (2004-2022), cerclés en rouge, parmi l'ensemble de l'Outre-mer français. (Source : site du Ministère en charge des Outre-mers, 2009).

Figure 1: French overseas departments and regions where the IGCS and RMQS programs were developed (2004-2022), red circles around the French overseas territories (yellow points). (Source: site of the Ministry in charge of French overseas, 2009).



Tableau 1 : Principales caractéristiques des territoires étudiés : géographie physique, statut administratif, densité de population, occupation des sols.

Table 1: Main characteristics of the studied territories: physical geography, administrative status, population density, land cover.

Territoire	Guadeloupe	Guyane	Martinique	La Réunion	Mayotte	
Géologie	Volcanisme actif depuis le Plio-pléistocène (8 Ma) et Sédiments calcaires du Miocène	Socle Précambrien (2500 - 542 Ma) et formations sédimentaires depuis le Pliocène (542 Ma/actuel)	Volcanisme actif actuel depuis 8 Ma, et volcanisme « ancien » actif durant Eocène-Miocène	Volcanisme de point chaud, 2,1 Ma, partie active récente émergée depuis 530 Ka.	Volcanisme éteint depuis 8 Ka.	
Climat	Tropical maritime, chaud et humide, tempéré et uniformisé par l'alizé, saisons contrastées. Archipel soumis aux cyclones. L'altitude et l'exposition aux vents contrôlent la pluviométrie.	Équatorial humide	Tropical maritime, chaud et humide, tempéré et uniformisé par l'alizé, saisons contrastées. Archipel soumis aux cyclones. L'altitude et l'exposition aux vents contrôlent la pluviométrie.	Tropical maritime, alizés du sud-est, confèrent un climat très humide au vent et plus contrasté sous le vent. L'altitude et l'exposition aux vents contrôlent la pluviométrie.	Tropical d'alizé maritime à saisons contrastées. Île parfois soumise aux cyclones.	
Statut	Département & Région	Collectivité unique	Collectivité unique	Département & Région	Département	
Densité Population, hab km⁻² *	236,0	3,4	323,1	344,0	702,9	
Superficie, km²	1628	83534	1128	2504	374	
Occupation des sols (moyenne 2017-2018-2019)** % surface	Sols artificialisés	13	0,02	15	14	8
	Surfaces sous les eaux	2	8	2	2	1
	Landes, friches, sols nus naturels	9	-	6	13	9
	Bois et forêts	49	92	51	52	56
	Formations végétales herbacées des régions tropicales et sub-tropicales	9	0,3	9	4	1
Sols cultivés	17	0,004	17	14	26	

* www.INSEE.fr/statistiques données 2019 consultées en 2022, Mayotte données 2017 ; ** Agreste 2021

rencontrées dans les sols hydromorphes des bas-fonds provoquent la conversion du mercure en monométhylmercure, qui constitue la forme de mercure la plus toxique et accumulable par les organismes vivants (Carmouze et al., 2001).

Les territoires de l'Outre-mer sont régulièrement le siège de revendications multiples (Jacob, 2017). Les enjeux de l'usage des sols en lien avec leur qualité ne peuvent être ignorés comme l'a mis en valeur la crise de la chlordécone. Les efforts de connaissance des sols et d'une offre la plus large possible de cette connaissance doivent être soutenus.

2. CONNAISSANCE DES SOLS ULTRAMARINS : CONTRIBUTION AU PROGRAMME INVENTAIRE GESTION ET CONSERVATION DES SOLS (IGCS)

2.1. Les travaux d'inventaires anciens et les grands traits pédologiques

Au début des années 1950, l'Office de la recherche scientifique et technique Outre-mer (Orstom) a réalisé des travaux de reconnaissances pédologiques en Afrique, en Nouvelle-Calédonie et en Guyane. Ces travaux effectués à l'initiative de l'organisme, implanté sur place, ont été autofinancés dans la majorité des cas, bien que les documents produits ne le signalent généralement pas. Au cours des deux décennies suivantes, la cartographie s'est étendue aux deux départements antillais, Guadeloupe et Martinique, à la demande de différents services de l'État et de groupements de producteurs qui l'ont en partie financé. Les cartes produites s'accompagnent de notices décrivant les sols, précisant leurs caractéristiques physico-chimiques, leurs contraintes édaphiques et leurs potentialités agricoles.

En Guyane, le climat équatorial est à l'origine d'une intense altération des roches qui conduit à des paysages morpho-pédologiques assez peu diversifiés et caractéristiques des milieux équatoriaux issus de formations du socle précambrien. Les facteurs de genèse des sols sur le socle guyanais sont assez uniformes. Le couvert forestier y est dense et continu, les conditions climatiques sont sensiblement les mêmes et les températures varient très peu. La nature de la roche-mère est en fait le facteur de pédogenèse le plus variable du socle précambrien (Blancaneaux, 1981; Lévêque, 1963). Le cas est différent pour la zone alluviale littorale où les éléments de pédogenèse sont l'âge du dépôt d'argiles, le degré de salinité et le drainage. Les deux grands ensembles de sols de Guyane sont donc les sols du socle guyanais et les sols de la plaine littorale.

À l'inverse, les milieux insulaires tropicaux et volcaniques des Antilles et de l'Océan Indien présentent une grande diversité de sols et de paysages liée à celles des matériaux parentaux, à leur âge et aux conditions locales du climat (*Tableau 1*) (Colmet-Daage et Lagache, 1965; Quantin *et al.*, 1991; Rosello, 1984; Riquier et Zebrowski, 1975; Zebrowski, 1975). À l'intérieur même de ces petits territoires insulaires, la variabilité des sols est très grande (par ex. à la Martinique, *Tableau 2*). La grande diversité des sols et des paysages y est donc un des traits marquants.

À partir des années 1980-90, on constate à l'IRD un ralentissement des activités pédologiques de prospections et d'inventaires cartographiques. Des chercheurs, de par l'accès aux outils informatiques, se sont alors investis dans une stratégie de sauvegarde et de modernisation des données pédologiques

(Beaudou, 1989). L'objectif était de valoriser les acquis anciens à des fins de conservation des ressources naturelles et de protection de l'environnement tout en fournissant des connaissances aux collègues. Cela s'est traduit par la création de bases de données géoréférencées sols/environnement et de bases de connaissances, permettant une meilleure accessibilité aux données et une large diffusion des informations (Beaudou et Le Martret, 2004; Le Martret *et al.*, 2008).

La diversité des échelles des études produites est importante (*Tableau 3*). Aux Antilles les échelles de restitution cartographique sont au 1/20 000^e dans les régions volcaniques, Martinique et Basse-Terre (Colmet-Daage, 1970), à la Guadeloupe des travaux originaux non publiés sont au 1/10 000^e, pour la Grande Terre et Marie Galante (Colmet-Daage, 1968). À La Réunion, dans le cadre des travaux du Cirad, des inventaires au 1/25 000^e des régions peuplées d'altitude sont réalisés par Brouwers et Raunet (1981) et Brouwers (1982a,b). Raunet (1988) propose une cartographie de l'île de La Réunion au 1/50 000^e. L'île de Mayotte n'a jamais été l'objet d'un inventaire systématique des sols. En Guyane les principaux travaux ont été exécutés au 1/50 000^e. Dans l'ouest du territoire, la complexité et la diversité des organisations morpho-pédologiques ont conduit nos prédécesseurs à proposer des associations de sols pour représenter les unités cartographiques à la même échelle (Turenne et Le Rouget, 1973). Une première synthèse cartographique de ces travaux a été proposée sous forme de base de données (Leprun *et al.*, 2001).

Deux points sont à souligner dans ce contexte historique. D'une part les référentiels taxonomiques des sols sont évolutifs. Ils ont leur caractère particulier dans la mesure où les auteurs proposaient alors des éléments de classification portés par la complexité pédologique rencontrée, qui viendront alimenter la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (C.P.C.S., 1967). Par la suite certains de ces pédologues apporteront leur contribution au Référentiel Pédologique Français (AFES, 2008). Deuxièmement, les profils de sols décrits et analysés sont d'un nombre très variable d'un territoire à l'autre, et les analyses doivent également se lire à l'aune des méthodes appliquées au cours des différentes décennies.

2.2. Les travaux dans le cadre du programme IGCS

Les travaux ont été financés par l'IRD et soutenus sous forme de conventions particulières dans le cadre des appels d'offres IGCS. Deux phases de travaux peuvent être distinguées dans le cadre de cette participation de l'IRD au programme IGCS du GIS Sol (*Tableau 3*). La première concerne l'inventaire des travaux existants de ces territoires ultramarins, leur nature et la mise en production de leur numérisation pour les données cartographiques (avec les outils SIG) et la sauvegarde de données pédologiques et environnementales qui les accompagnent dans

Tableau 2 : Exemple de la complexité pédologique en milieu insulaire. Cartographie des sols de la Martinique par Colmet-Daage (1970), d'après Toulemonde et al. (2006).

Table 2: An example of the pedological complexity in island milieu. Martinique's soils cartography by Colmet-Daage (1970), after Toulemonde et al. (2006).

Dénomination des sols par Colmet-Daage (1970)		Ensembles cartographiques (légende de la carte)	Surface km ²	Nb d'unités cartographiques	Faciès	Sous-faciès	Associations cartographiques	Sols polyphasés
Sols récents d'apport	Alluvions continentales	A	59,79	385	9	5	30	0
	Colluvions	B	10,28	140	31	4	5	0
	Alluvions marines, marécages	D	20,88	239	5	0	0	0
Sols jeunes sur volcanisme récent	Sols brun-rouille à halloysite	H	62,97	709	4	14	27	16
	Sols peu évolués sur cendres	J	48,17	742	16	0	8	14
	Sols à allophanes sans gibbsite sur cendres et ponces	P	104,30	1043	9	10	23	5
	Sols à allophanes avec gibbsite sur tufs fins	T	87,23	671	6	0	8	10
	Ferrisols compacts	G	113,92	1364	9	1	38	28
Sols évolués de volcanisme ancien	Sols rouges ou bruns à montmorillonite	I	76,97	1111	9	2	37	31
	Intergrades ferrisols-vertisols	K	27,27	482	7	2	10	18
	Sols vertiques et mollisols	N	28,82	486	4	2	6	10
	Sols vertiques calcaires	Nca	0,15	5	1	0	0	0
	Vertisols UDIC	U	6,68	73	3	2	2	4
	Vertisols	V	187,60	3775	5	5	46	19
	Vertisols calcaires	Vca	4,54	131	4	14	0	0
Fortes pentes, zones non cartographiées		Y	227,92	574	/	/	/	/
Zones urbanisées		X	35,61	356	/	/	/	/
Étendues d'eau et rivières			0,26	6	/	/	/	/
Total			1103,37	12302	122	61	240	155

la base de données VALSOL-IRD (Beaudou et Le Martret, 2004). La seconde concerne la réalisation de synthèses pédologiques et leurs restitutions appropriées qui ont été réalisées dans le cadre d'une composante d'IGCS. Ces synthèses pédologiques sont à la base du RRP (Référentiel Régional Pédologique), qui a pour objectif la création d'une base de données sur les sols à l'échelle de la région ou du département. Pour les territoires qui nous intéressent, les synthèses morpho-pédologiques ont été réalisées grâce à l'actualisation des données anciennes sur les sols, en lien avec les données géologiques et morphologiques.

Enfin signalons pour mémoire que les premiers pas d'une

possible intégration des données de la base de données VALSOL-IRD de ces territoires à la base de données DONESOL-INRAE, base de données des sols métropolitains (Grolleau et al., 2004) ont été réalisés en 2021 en vue d'une offre de restitution dans le cadre du GEOPORTAIL (Messant et al., 2021).

Tableau 3 : Inventaire résumé des données historiques et travaux menés dans le cadre du programme IGCS.**Table 3:** Summary of the legacy data and studies developed in the IGCS program.

Territoire	Guadeloupe	Guyane	Martinique	La Réunion	Mayotte
Travaux historiques					
Cartographies réalisées, % superficie	100	13	100	100	0
Inventaires et cartographies, échelles	1/100 000 1/20 000 1/10 000	1/100 000 1/50 000	1/150 000 1/20 000	1/100 000 1/50 000 1/25 000	-
Travaux actuels IRD-IGCS					
Numérisation et sauvegarde 2006-2011	x	x	x	x	-
Synthèses morphopédologiques 2010-2015	x	x	x	x	-
Premiers essais d'intégration de données dans la base de données DoneSol		x			

2.3. Un exemple de sauvegarde des données anciennes : les sols des régions volcaniques de Basse-Terre de Guadeloupe

Les sols des régions volcaniques de Basse-Terre de Guadeloupe sont divisés en deux grands groupes (Colmet-Daage et Lagache, 1965) : (1) les sols résultants de pédogenèses de temps longs, issus de roches mères anciennes (labradorites, andésites, dacites) peu perméables, correspondant principalement à des sols Ferrallitiques (Ferrallitols), des Ferrisols, des sols intergrades vers les Vertisols (Ferralsols à montmorillonite) et des Vertisols ; (2) les sols résultants de pédogenèses de temps courts, issus de projections volcaniques récentes très perméables, correspondant principalement à des sols sur cendres et ponces, des sols à allophanes (Silandosols) et des sols brun-rouille à halloysites (Nitosols).

La carte des sols de Basse-Terre au 1/20 000^e (Colmet-Daage, 1970) est divisée en 18 feuilles (<https://www.cartographie.ird.fr/sphaera/>). La numérisation finale a été faite après insertion et calage des scans des cartes originales, la digitalisation des polygones, la mise à jour de la légende. La couche de la base de données géographique obtenue, sous forme SIG, compte 5549 polygones et couvre une surface totale d'environ 847 km². De nombreuses cartes peuvent alors être extraites directement à partir de la légende de Colmet-Daage : les ensembles de sols (Figure 2), les sols, les pentes, les propriétés hydromorphes ou encore la densité d'affleurements rocheux.

La répartition des types de sols sur Basse-Terre nous indique que les Ferrallitols et les sols à allophanes (Andosols) et à halloysites (Nitosols) dominant (Figure 3). La répartition est contrastée en fonction de la morphologie, de la géologie et du climat. Le contraste est illustré par la forte différence pédologique entre la côte au vent, à l'Est, et sous le vent, à l'Ouest, de Basse-Terre (Figure 4). Le versant Ouest est plus

abrupt que le versant Est. Ce transect se situe dans la partie Nord de l'île où les lithologies sont anciennes, la présence de sols vertiques et de Ferrallitols est cohérente avec l'âge des matériaux les plus anciens précités. Suivant la pluviosité, cela aboutit à des sols vertiques lors de déficits hydriques importants notamment sur la côte sous le vent ou à des sols Ferrallitiques faiblement désaturés, Ferrallitols meubles kaoliniques (pluviosité moyenne < 2000-2500 mm) ou fortement désaturés en conditions de pluviosité importante (> 2500 mm).

2.4. Un exemple de synthèse morpho-pédologique

Poursuivons notre voyage en Guadeloupe. Ses paysages morpho-pédologiques se dessinent aisément avec les données géologiques, climatiques, géomorphologiques, pédologiques, et de la végétation (Figure 5). Le tableau 4 présente les critères de détermination pour délimiter les grands paysages de la Guadeloupe. Les zones dominées par les roches calcaires (Grande-Terre, Petite-Terre) se distinguent des zones volcaniques (Basse-Terre et les Saintes) sauf pour la Désirade où affleurent les deux types de roches. Le paysage de plaines alluviales et de marécages fait le lien entre les îles de Basse-Terre et de Grande-Terre. Les grands paysages reprennent en partie les paysages géomorphologiques pour la Grande-Terre principalement et en partie pour Basse-Terre mais leurs limites se précisent grâce aux cartes pédologiques et géologiques.

À titre d'exemple nous détaillons le GP10 :

- Localisation : sur l'axe montagneux de Basse-Terre, du Nord à la Pointe Allègre au Sud. Il est limité à l'Est par le « Grand Paysage de versant Sec » à 200 m (GP9) et à l'Ouest par la « Plaine » à partir de 100 m d'altitude. Il se divise en deux unités paysages :

- Au Nord, paysage septentrional de relief ancien, GP10_1 ;
- Au Sud, paysage de la chaîne axiale plus récent, GP10_2.

Figure 2 : Carte numérisée des Ensembles de sols de Basse-Terre (Guadeloupe) à 1/20 000^e, légende selon Colmet-Daage (1970) (Dupuits-Bonin et al., 2015).

Figure 2: Digital Map of soils groups of the Basse-Terre (Guadeloupe) at 1/20,000 scale, legend after Colmet-Daage (1970) (Dupuits-Bonin et al., 2015).

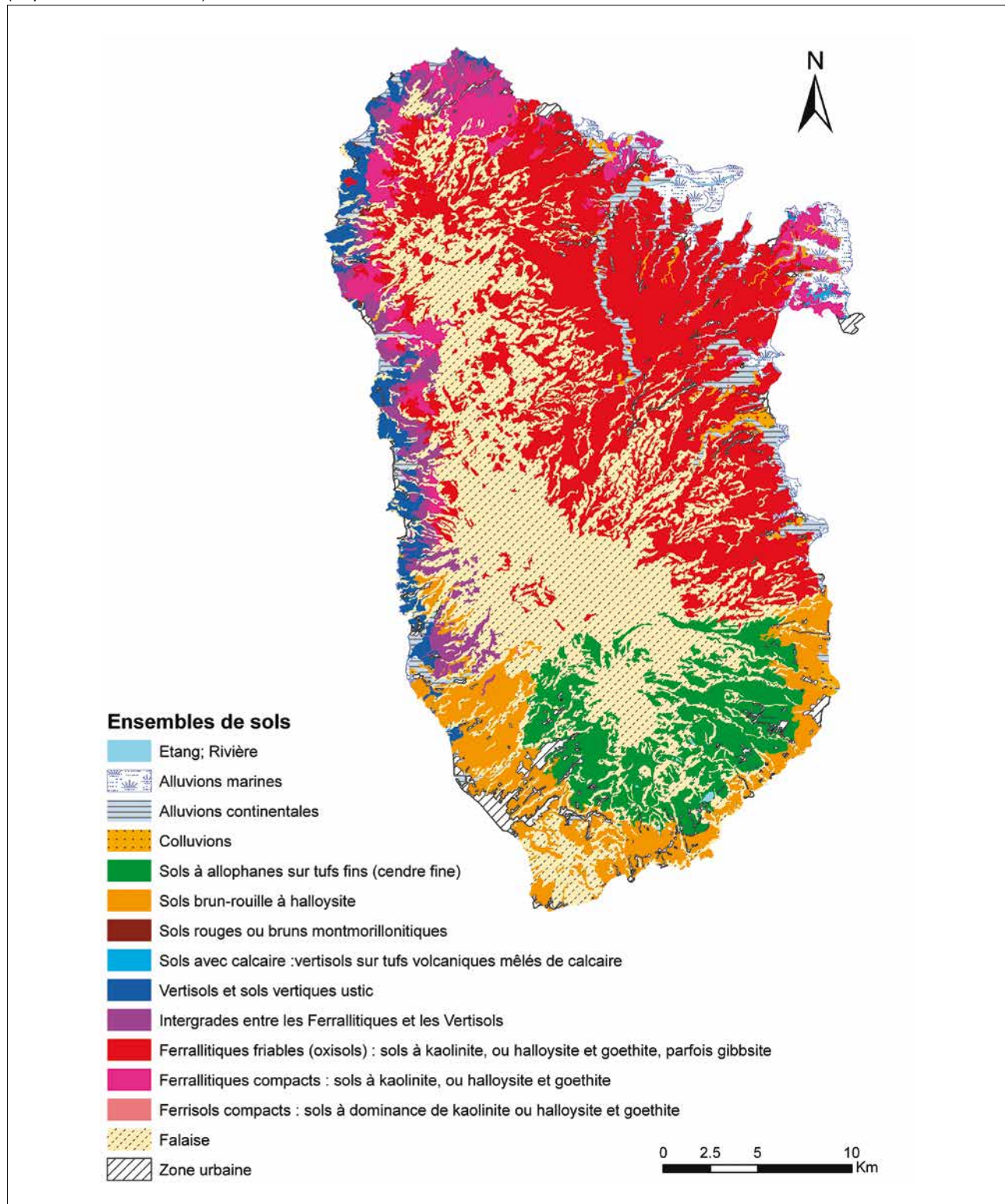


Figure 3 : Répartition surfacique des types sols de Basse-Terre réalisée à partir de la base de données SIG (Dupuits-Bonin *et al.*, 2015).

Figure 3: Soils type surface distribution in Basse-Terre obtained with the GIS data base (Dupuits-Bonin *et al.*, 2015).

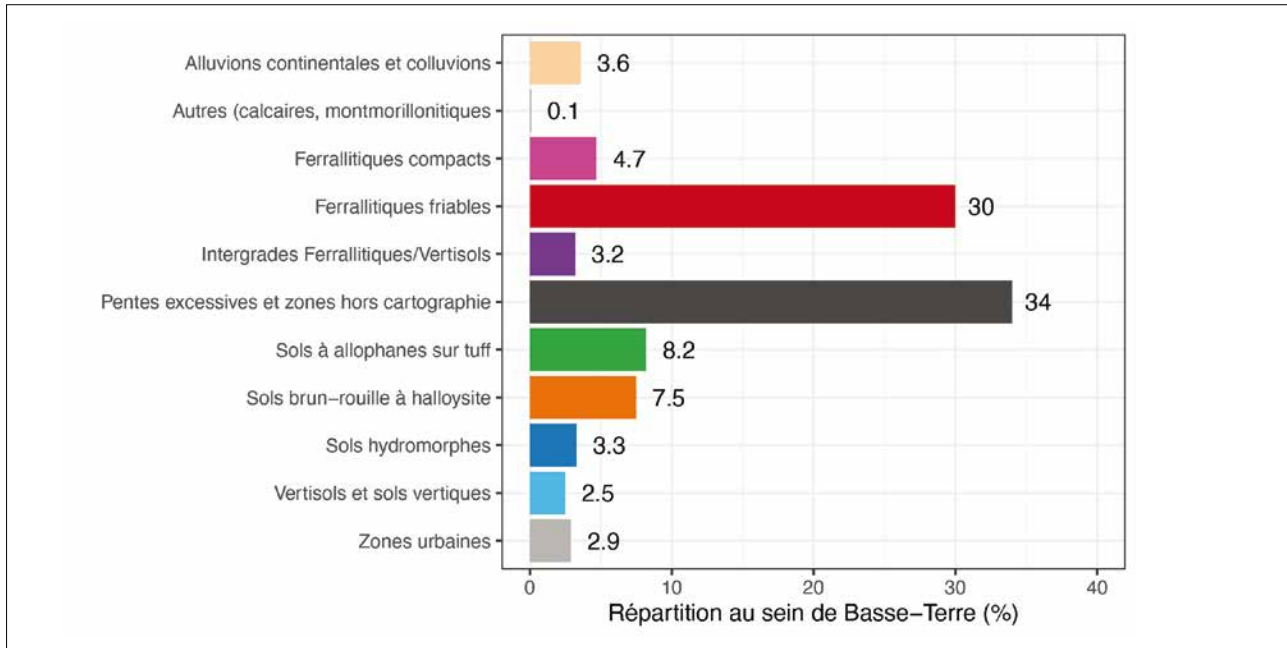


Figure 4 : Transect pédologique synthétique Ouest/Est au nord de Basse-Terre en Guadeloupe (Dupuits-Bonin *et al.*, 2015). (Échelles d'altitude et de distance en m, Carrés bleus Pluviosité en mm/an).

Figure 4: Synthetical pedological transect W/E in the north of Basse-Terre in Guadeloupe (Dupuits-Bonin *et al.*, 2015). (Altitude and distance scales in m. Blue squares rainfall level in mm/year).

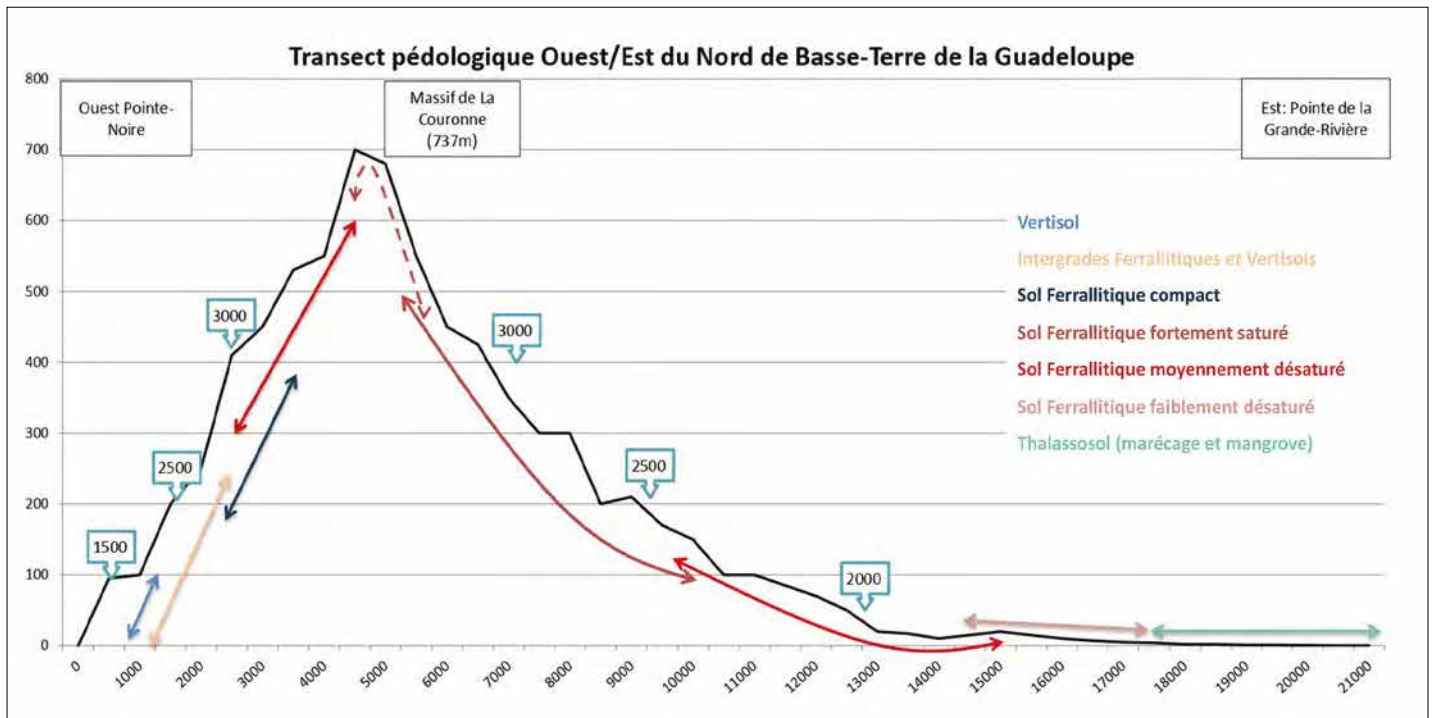
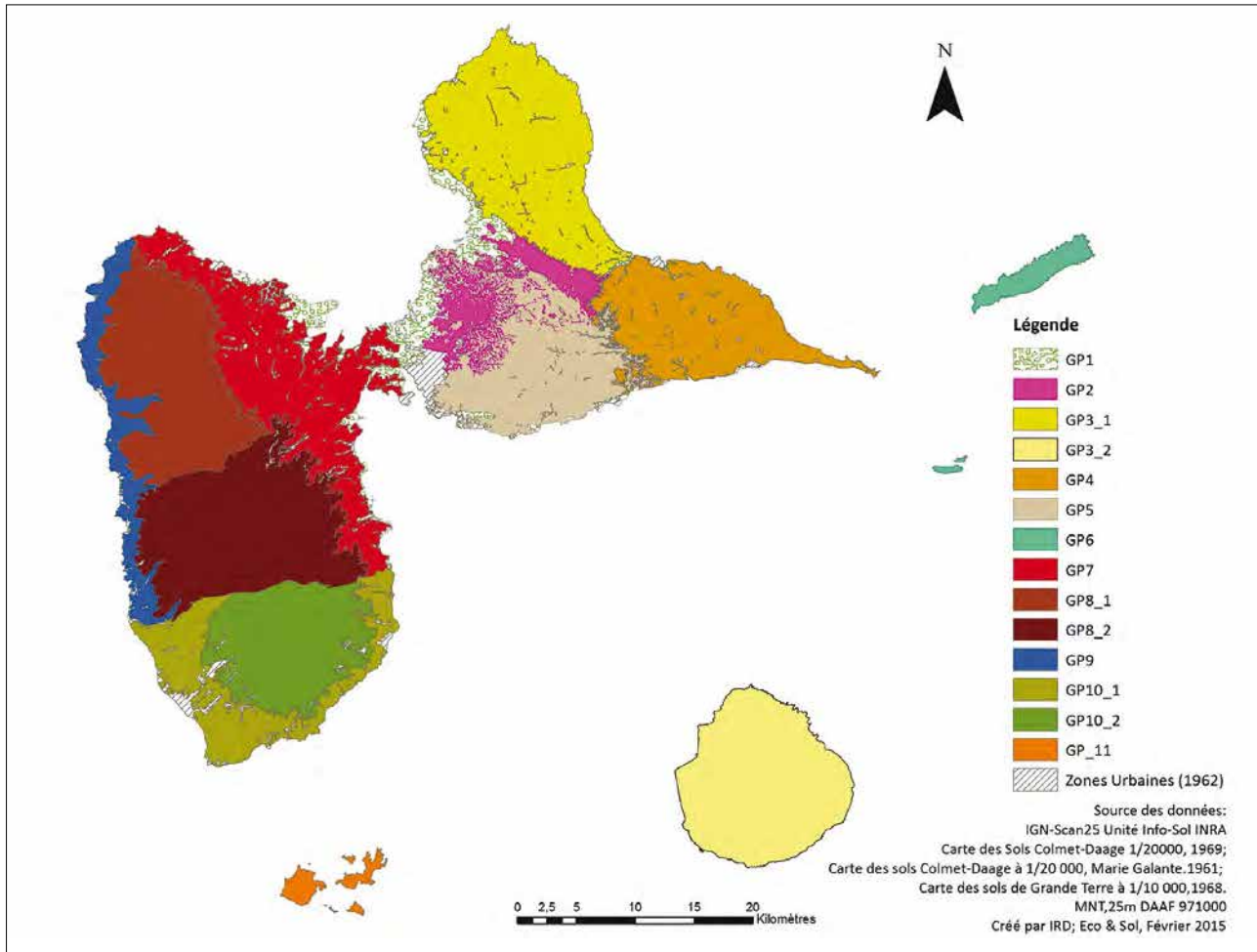


Figure 5 : Carte des grands paysages (GP) et paysages (ex. _1 dans GP10) de la Guadeloupe (Dupuits-Bonin et al., 2015).

Figure 5: Map of Guadeloupe landscapes, first (GP) and second (ex. GP10_1) order.



- Formations géologiques : du nord au sud, (i) le complexe basal mis en place entre 2,8 et 2,7 Ma, puis (ii) la chaîne septentrionale mise en place entre 1,8 et 1,15 Ma, délimitée au sud par la dépression des Deux Mamelles, qui se compose de laves en planèzes disséquées et de coulées pyroclastiques, et enfin (iii) la chaîne axiale d'âge compris entre 1 et 0,6 Ma, où les roches sont constituées de coulées massives d'andésites et de projection pyroclastiques.
- Géomorphologie : le grand paysage de relief de l'île de Basse-Terre présente des versants à pentes fortes (souvent supérieures à 15 %) qui sont largement entaillés par de nombreuses rivières. L'altitude est plus faible et le relief est plus doux au Nord qu'au Sud, ce qui est dû à l'ancienneté des matériaux.
- Climat : le climat est tropical humide (de 2 500/3 000 à 4 500 mm/an en moyenne). La partie sud de la zone est plus pluvieuse que la partie nord (environ 1 000 mm de plus). La végétation se compose essentiellement de deux étages. Le

premier correspond à un étage de forêt tropicale hygrophile compris entre 500 m et 1 100 m d'altitude avec une pluviosité variant de 3000 à 5000 mm/an. La forêt est caractérisée par sa densité importante de plantes et une structure particulière où les strates sont nombreuses et présentent une grande richesse floristique (Imbert et Portecop, 2008 ; Trouvilliez et Mortier, 2011). Le second étage, au-dessus de 1 100 m d'altitude, correspond à l'étage tropical de montagne, qui bénéficie de la pluviosité la plus importante de l'île, où l'humidité est comprise entre 90 et 100 % tout au long de l'année entretenue par un ennuagement quasi permanent.

- Sols (Figure 6) : au sein du grand-paysage se développent les Ferrallitols à halloysite, et les sols à allophanes avec ou sans gibbsite (Vitrandosol, Silandosol). Les sols à allophanes se développent sur les dépôts récents de tufs fins. Les sols à halloysite forment une ceinture bien développée dans les reliefs les plus anciens.

Tableau 4 : Critères de délimitation des grands paysages de Guadeloupe.**Table 4:** First order landscape criteria delimitation for Guadeloupe.

Identifiant Grand Paysage	Grands Paysages	Critère principal de détermination	Critère de détermination 2	Critère de détermination 3
GP1	Paysage de mangrove de Basse-Terre et de Grande-Terre	Végétation	Origine de la roche mère	
GP2	Plaines argileuses de l'Ouest de Grande-Terre	Morphologie du paysage	Origine de la roche mère et type de sol	
GP3	Plateaux calcaires du Nord de Grande-Terre et de l'Île de Marie-Galante	Morphologie du paysage	Climat/Végétation	Age des matériaux, type de sol
GP4	Plateaux calcaires du Sud-Est de Grande-Terre	Morphologie du paysage	Climat/Végétation	Age des matériaux, type de sol
GP5	Les Grands-Fonds de Grande-Terre	Morphologie du paysage	Origine de la roche mère	
GP6	Plateau calcaire surplombant le complexe volcanique de la Désirade	Morphologie du paysage	Origine de la roche mère	
GP7	Plaines du Nord-Est de Basse-Terre	Age des matériaux	Type de sol	Morphologie du paysage
GP8	Le massif volcanique de la Grande-Découverte et les Monts Caraïbes de Basse-Terre	Age des matériaux	Type de sol	Morphologie du paysage (GP8_1 et GP8_2)
GP9	Paysage des versants secs sous le vent de la côte Est de Basse-Terre	Age des matériaux	Climat/Végétation	
GP10	Grand Paysage de relief de Basse-Terre	Age des matériaux	Type de sol	Morphologie du paysage (GP10_1 et GP10_2)
GP11	L'archipel volcanique des Saintes	Age des matériaux	Morphologie du paysage	

2.5. Quelques exemples d'application de ces travaux

Les données géoréférencées ont été utilisées dans le sud de la Martinique où sont très largement développés les sols à argiles gonflantes. À la demande du département en charge du développement du réseau de fibres optiques, une expertise a été engagée. La contrainte mise en avant par le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage était de déterminer les profondeurs de passages de fibres. Nous avons alors fourni les profondeurs d'apparition des lithologies, l'épaisseur des sols et la distribution des pentes.

En 2016, la Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DAAF) de la Guadeloupe a mis à jour sa base de données des potentialités agricoles et s'est appuyée sur la base de données pédologiques (https://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/carte-des-terres-agricoles-valorisables-a29.html?id_rubrique=144).

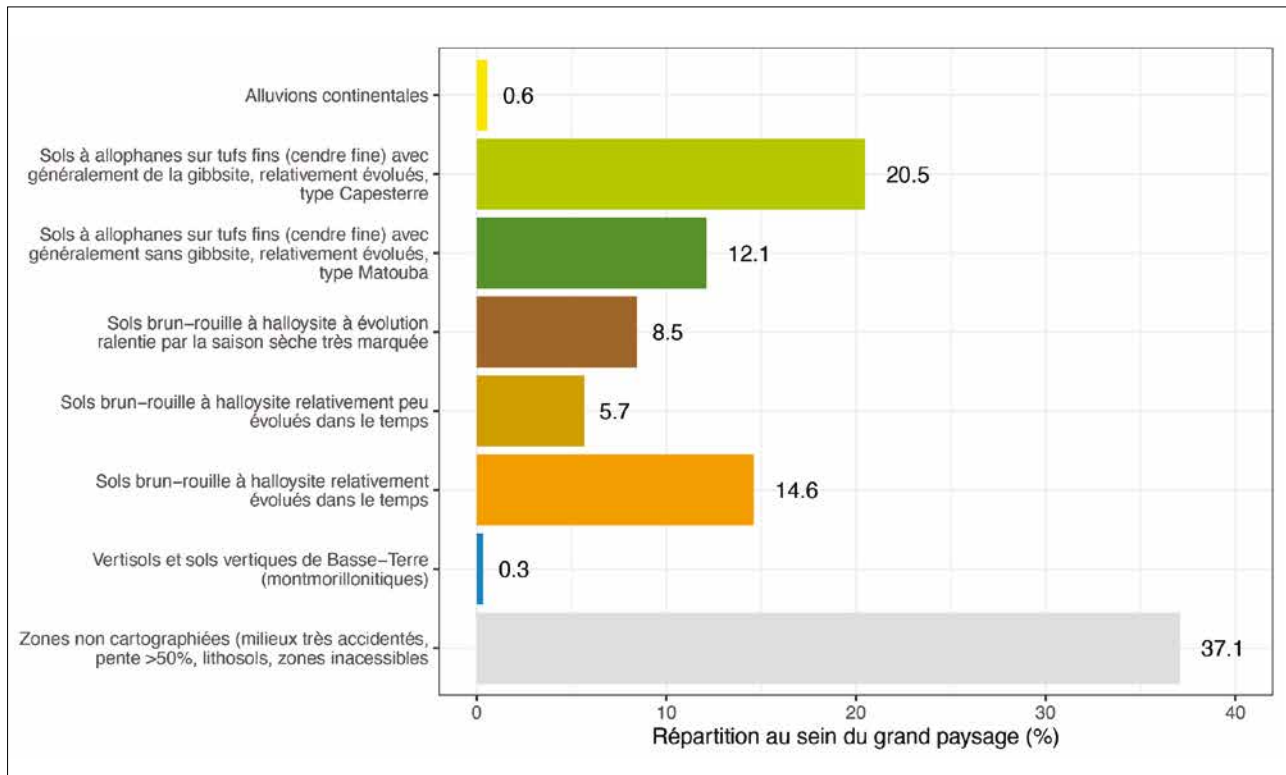
En Guyane, la Chambre d'agriculture a utilisé la base de données pour cerner le choix de sites de mise en place d'expérimentations des boues de Stations d'épuration des eaux usées (STEP).

À La Réunion, la base de données a été utilisée par l'équipe Cirad-IRD dans le cadre des études sur le carbone du sol (Todoroff *et al.*, 2019).

Signalons également l'utilisation de la base de données VALSOL pour l'expertise pédologique concernant la définition des « zones défavorisées simples » à la demande du Ministère en charge de l'agriculture.

3. UNE PREMIÈRE CAMPAGNE DU PROGRAMME RMQS

Le Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) a été implanté en France métropolitaine à partir de l'année 2000. Ce programme de surveillance des sols consiste à analyser tous les 15 ans les propriétés des sols sur près de 2000 sites répartis de façon homogène. À partir de 2006, ce réseau s'est étendu à plusieurs territoires ultramarins. La taille de la maille permettant la création de cellules au sein desquelles ont été implantés les sites est la même que pour la métropole, 16x16 km, sauf pour Mayotte où une maille de 10x10 km a été utilisée.

Figure 6 : Répartition des sols du grand paysage GP10.**Figure 6:** Soils distributions in the landscape GP10.

Soixante-sept sites ont ainsi été implantés pour la première campagne du RMQS en Outre-mer (Figure 7): 10 sites à la Guadeloupe (2006), 8 à la Martinique (2007), 13 à La Réunion (2013), 3 à Mayotte (2013), et 33 sur la bande côtière de la Guyane (2014 et 2015). Cette première campagne a été menée par l'unité InfoSol d'INRAE Orléans, en collaboration avec INRAE de Guadeloupe pour les sites des Antilles, INRAE Dijon à la Martinique, l'IRD (UMR Eco&Sols) pour les sites de la Martinique, de La Réunion, de Mayotte, et de la Guyane, le Cirad à La Réunion, et la DAAF à Mayotte. Dans cette section sont présentés la méthodologie du RMQS ultramarin, les caractéristiques des 67 sites implantés en Outre-mer lors de la première campagne, quelques résultats marquants, et une discussion sur l'évolution du réseau, notamment au regard de la représentativité des sites dans les territoires insulaires.

3.1. Méthodologie : implantation des dispositifs, échantillonnage et analyses

La méthodologie employée pour implanter les sites, l'échantillonnage et les analyses de sols réalisées dans le cadre du RMQS est similaire entre les sites d'Outre-mer et de l'Hexagone et la Corse, et est décrite pour la première

campagne par Jolivet *et al.* (2006). Concernant l'implantation des sites, brièvement, une fois la localisation du site déterminée, une zone d'échantillonnage de forme carrée est délimitée, au sein de laquelle est prélevée un échantillon composite de sol. Une fosse est creusée à l'extérieur de ce carré, où le sol est décrit et des échantillons prélevés dans chacun des horizons du profil de sol.

Quelques adaptations de la méthodologie ont cependant été nécessaires dans certaines situations. L'implantation de la zone d'échantillonnage à l'aide d'appareils GPS a parfois été difficile, en raison de l'absence de correction en temps réel dans certains territoires. Dans ces situations, la correction des levés a été faite à l'aide de données relevées sur des stations permanentes, et en l'absence de stations permanentes (comme à Mayotte), des levés en parallèle ont été effectués en utilisant une borne IGN de coordonnées connues.

Dans les sites forestiers de Guyane, il est difficile d'implanter une zone d'échantillonnage de forme carrée. Des dispositifs en étoile ont été mis en place, et des marqueurs passifs ont été installés sur ces sites afin de faciliter leur réimplantation.

Le menu analytique est similaire entre les sols de l'Hexagone et des Outre-mer, mais quelques différences notables sont à mettre en exergue. Les analyses sont classiquement réalisées

sur des échantillons de sols séchés à l'air ; or ce séchage à l'air peut altérer de façon irréversible les propriétés physico-chimiques des Andosols. Pour cette raison, les analyses physico-chimiques réalisées sur les Andosols prélevés à La Réunion (9 sites sur 13) et à la Guadeloupe (2 sites sur 10) ont été réalisées sur des échantillons de sol frais. Ces analyses sur échantillons frais n'avaient pas pu être effectuées pour la campagne à la Martinique (un site concerné, *Tableau 4*). Le menu analytique concernant les contaminants est également adapté au contexte local. Des analyses des teneurs en chlordécone sont en cours de réalisation sur les échantillons des Antilles.

Enfin, les échantillons de sol du RMQS Outre-mer ne peuvent être archivés de la même manière que les échantillons de sols de l'Hexagone. Les échantillons de sols tropicaux sont en effet soumis à une réglementation spécifique, imposant que ces échantillons soient stockés et analysés par des laboratoires habilités à traiter des échantillons de sols nécessitant une mesure de quarantaine (niveau L2). Contrairement aux échantillons du RMQS de l'Hexagone qui sont archivés au CEES (Conservatoire Européen des échantillons de Sols) à Orléans, les échantillons des Antilles, de La Réunion et de Mayotte sont ainsi archivés à la pédothèque confinée de l'Unité Eco&Sols à Montpellier, tandis que les échantillons de Guyane sont actuellement conservés au centre IRD de Cayenne.

3.2. Mode d'occupation et typologie des sols du RMQS en Outre-mer

La distribution des modes d'occupation des sols dans le réseau présente une grande différence avec ceux rencontrés dans l'Hexagone. Les surfaces agricoles dans le RMQS en Outre-mer sont souvent consacrées à des cultures pérennes (vergers), des cultures de cycles pluriannuels (bananeraies, canne à sucre) ou à des prairies pâturées (*Figure 7*). Les successions culturales sont peu représentées et concernent la plupart du temps des parcelles de canne à sucre ou en jachère. Des systèmes de cultures spécifiques à certains territoires sont également représentés dans le réseau, tels que les abattis-brûlis (cultures vivrières et production spécifique de manioc) dans l'ouest de la Guyane. Quelques sites ont été implantés dans des milieux naturels, c'est-à-dire des écosystèmes non exploités (par exemple prairie naturelle, savane, mangrove). Enfin, près de la moitié des sites sont situés sous forêt ($n = 32$), dont 23 en Guyane ; de nombreux sites forestiers en Outre-mer sont naturels ou semi-naturels.

Les sols rencontrés dans les sites du réseau sont développés sur des matériaux volcaniques, plutoniques, et même calcaires (sols de Grande-Terre en Guadeloupe). Combiné à une importante variabilité du climat à l'échelle régionale dans ces territoires et à des âges de la pédogénèse qui varient du millier d'années (dépôts récents des volcans insulaires) à quelques milliards d'années (socle précambrien

Figure 7 : Localisation et mode d'occupation des sites de la première campagne du RMQS en Outre-mer.

Figure 7: Sites Location and land cover from first campaign of RMQS in French overseas.

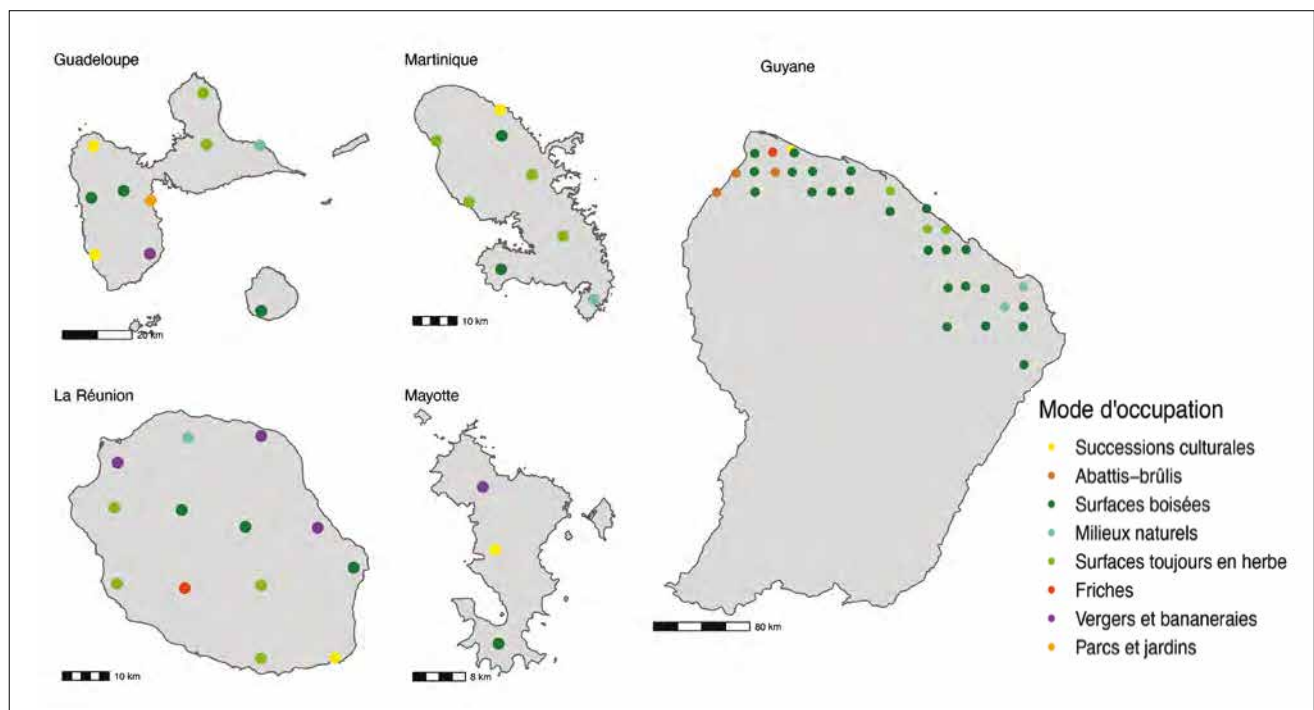


Tableau 5 : Principaux Grands Ensembles de Références de sols (Référentiel Pédologique, 2008) échantillonnés au cours de la première campagne du RMQS en Outre-mer.

Table 5: Main soil types (Référentiel Pédologique, 2008) sampled in the first RMQS campaign in French overseas.

Territoire	Grands Ensembles de Références	Nombre de sites
Guadeloupe	Calcisols et Calcosols	2
	Vertisols	2
	Nitosols	1
	Ferrallitols	3
	Andosols	2
Martinique	Vertisols	2
	Nitosols	1
	Ferrallitols	2
	Andosols	1
	Regosols	1
	Rankosol	1
La Réunion	Andosols	6
	Vitrandosol	1
	Colluviosol	1
	Fluviosol	1
	Brunisols	3
	Nitosols	1
Mayotte	Ferrallitols	3
Guyane	Ferrallitols	21
	Rédoxisols	5
	Réductisols	2
	Fluviosols	2
	Podzosols	1

en Guyane) (*Tableau 1*), les sols du RMQS en Outre-mer présentent une grande diversité, où la plupart des types de sols tropicaux sont représentés (*Tableau 5* et *Figure 8*). On retrouve ainsi des sols développés sur des matériaux volcaniques à des degrés croissants d'évolutions pédogénétiques : Régosols pyroclastiques aux premiers stades de la pédogenèse, qui peuvent évoluer vers des Brunisols ou des Nitosols à halloysite et des Andosols à allophanes selon les conditions climatiques locales. Les Ferrallitols se développent sur les matériaux volcaniques les plus anciens. Les sols aux propriétés vertiques en Outre-mer peuvent être issus de matériaux volcaniques (côte sous le vent à climat contrasté et moins pluvieuses, *Figures 2* et *4*) ou sédimentaires, dans des régions où le climat subhumide entraîne la formation de smectites (Vertisols à la Martinique, Vertisols, Calcisols et Calcosols en Guadeloupe). Enfin, les sols des sites de Guyane sont dominés par les Ferrallitols, typiques des pédogenèses anciennes sur des roches plutoniques sous climat chaud et humide, mais les conditions topographiques peuvent aussi entraîner la formation de sols hydromorphes (Réductisols et Rédoxisols).

Figure 8 : Environnements et profils de sols sur quelques sites du RMQS en Outre-mer [auteurs des clichés : C. Jolivet (Martinique, Mayotte) et M. Brossard (La Réunion, Guyane)].

Figure 8: Environments and soil profiles in several RMQS sites in French overseas [credits: C. Jolivet (Martinique, Mayotte) and M. Brossard (La Réunion, Guyane)].

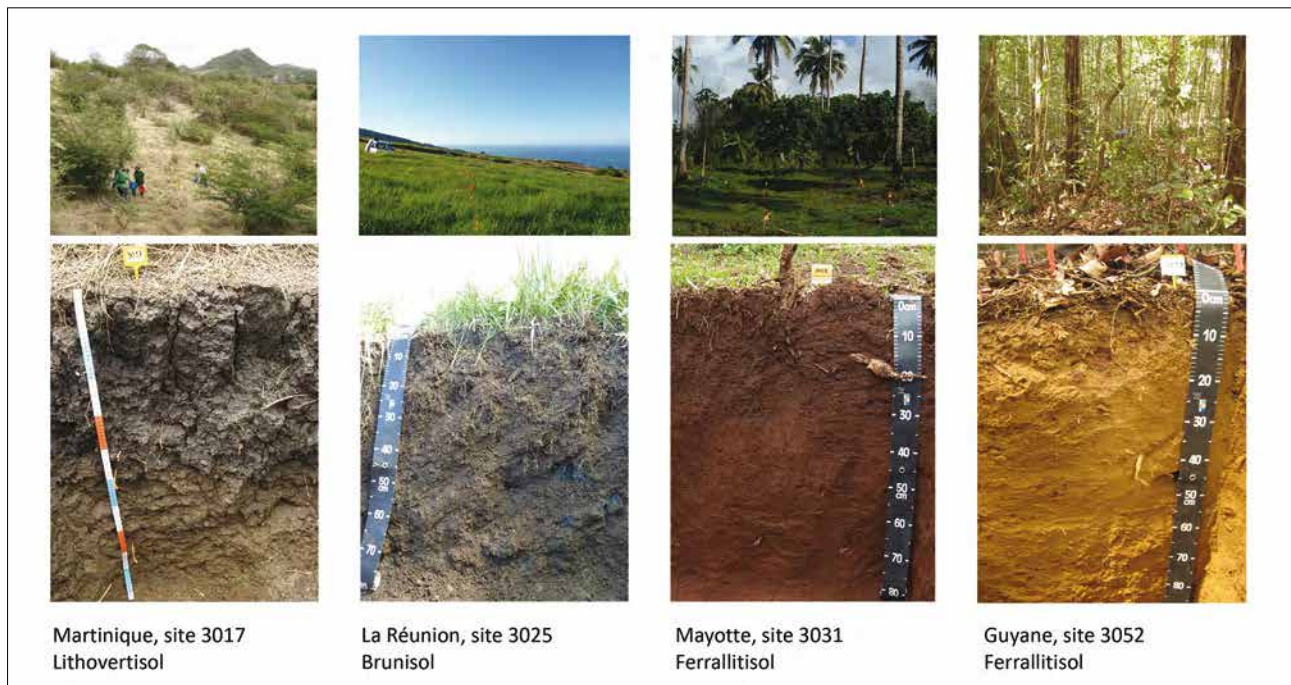


Figure 9 : Teneurs totales en ETM des sites du RMQS en Outre-mer dans la couche de surface des sols (0-30 cm).

Figure 9: Total content in trace metals from overseas RMQS sites in the soil surface layer (0-30 cm).

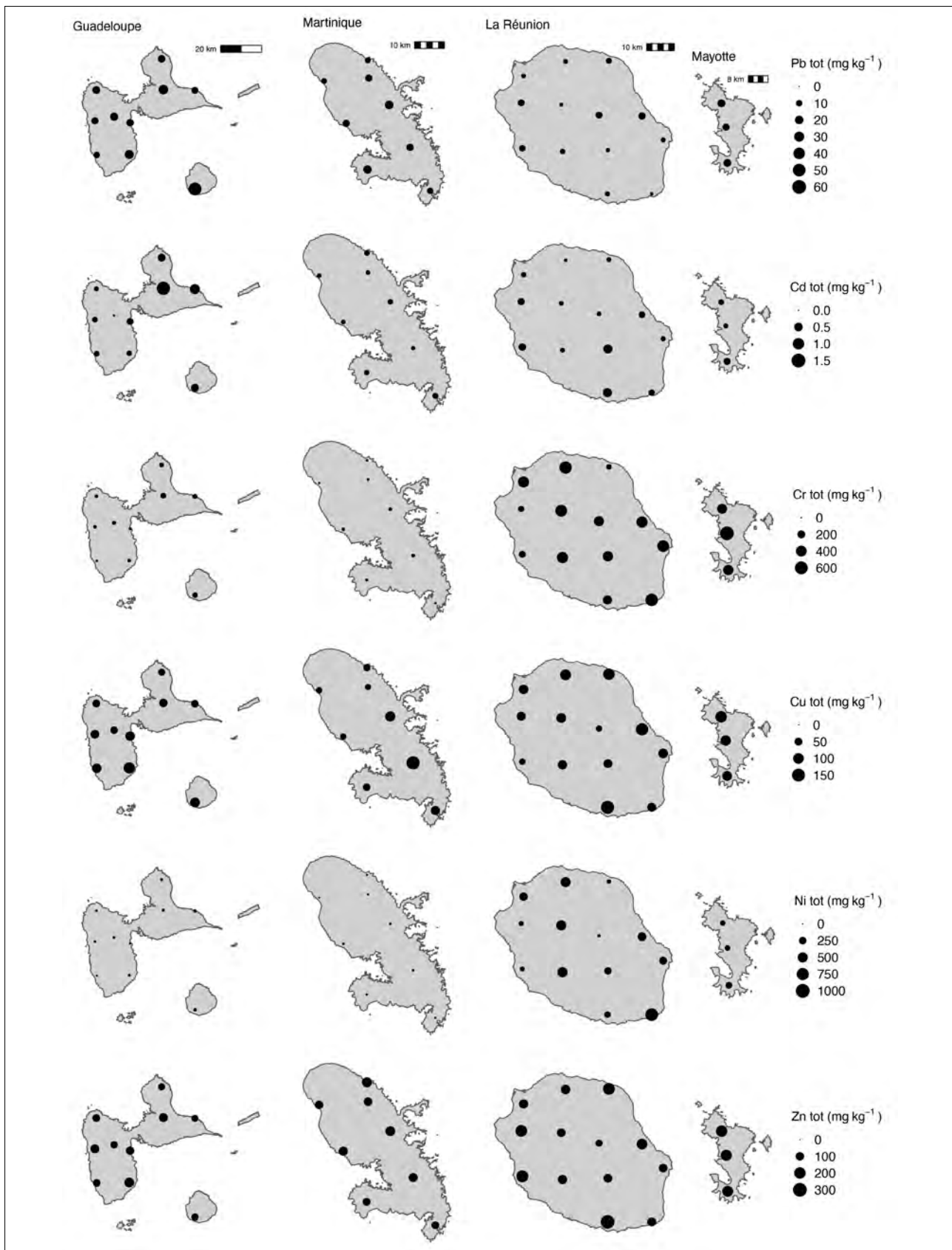
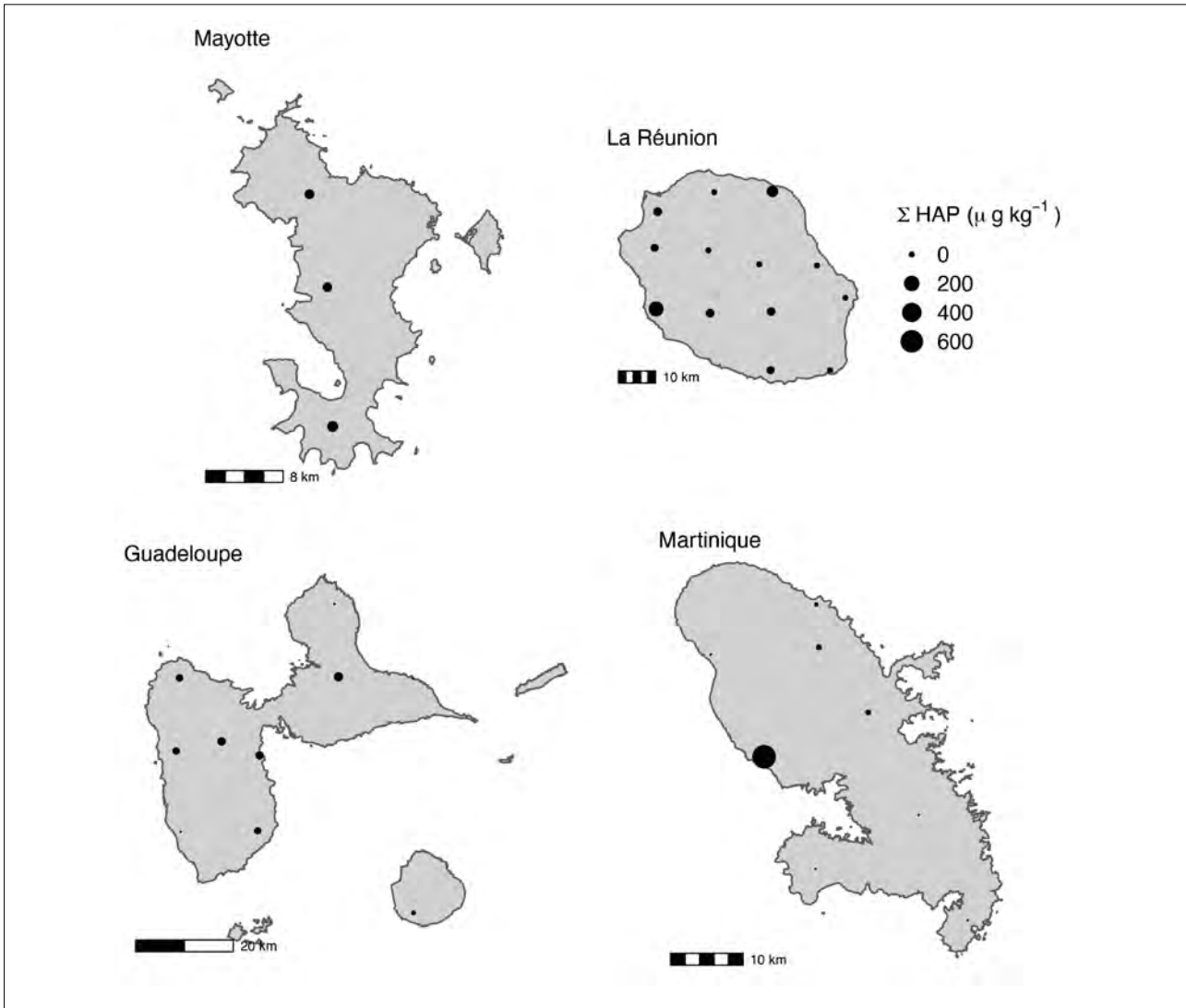


Figure 10 : Teneurs en HAP (somme de 15 molécules) de la couche 0-30 cm des sols du RMQS en Outre-mer. Q25 et Q75 correspondent respectivement au 1^{er} et 3^e quartiles des données. Voir Froger et al. (2021) pour le détail des molécules analysées. La Guyane n'apparaît pas dans cette figure car les données n'ont pas encore été analysées.

Figure 10: PAH contents (sum of 15 molecules) in layer 0-30 cm from overseas RMQS sites. Q25 and Q75 are respectively the first and third quartiles. See Froger et al. (2021) for the analyzed molecules. French Guiana was not included in this figure since data were not analyzed yet.



3.3. Quelques résultats issus du RMQS Outre-mer

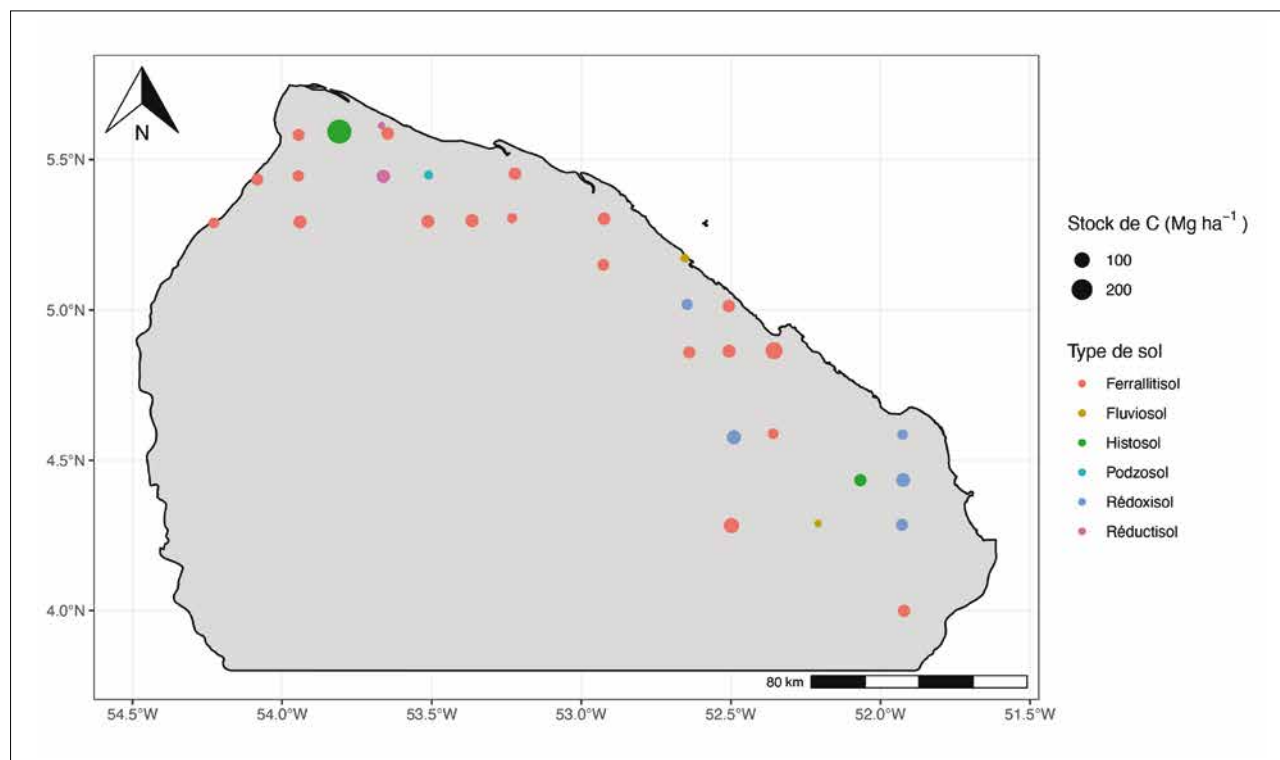
3.3.1 Éléments traces métalliques et hydrocarbures aromatiques polycycliques

Les analyses de contaminants réalisés sur les échantillons de sols permettent de dresser des cartogrammes des teneurs en éléments traces métalliques (ETM) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Les données sont actuellement

disponibles pour les Antilles, Mayotte et La Réunion. Pour les sols de Guyane, les analyses ont été réalisées mais les données n'ont pour l'instant pas été saisies.

Les teneurs en ETM mesurées dans la couche 0-30 cm montrent des disparités entre certains territoires, qui peuvent être expliquées par la nature des matériaux parentaux des sols (Figure 9).

Par exemple, les teneurs les plus élevées en cadmium sont observées dans les sols de Grande-Terre en Guadeloupe, développés sur des calcaires récifaux; cette tendance est

Figure 11 : Cartogramme des stocks de carbone du sol (couche 0-30 cm) sur les sites RMQS de Guyane.**Figure 11:** Soil carbon stocks (layer 0-30 cm) cartogram in the French Guiana RMQS sites.

également observée dans l'Hexagone, avec des teneurs en cadmium les plus élevées observées dans des régions calcaires (GIS Sol, 2011). Les teneurs en Ni et Cr sont les plus élevées pour les sites de La Réunion (en particulier dans les Andosols) et Mayotte, et du même ordre que celles reportées par (Dœlsch *et al.*, 2006) à La Réunion. Ces auteurs indiquent que ces teneurs élevées sont d'origine naturelle, les matériaux parentaux volcaniques contenant des proportions notables d'ETM. Les teneurs en Cu sont assez élevées dans les quatre territoires, au-delà de 50 mg kg⁻¹, en raison des matériaux parentaux volcaniques naturellement riches en Cu.

Ces résultats ne montrent pas de contamination d'origine anthropique des sites du RMQS en Outre-mer par les ETM. L'importance du fond géochimique dans la variabilité des concentrations en ETM de sites RMQS avait été mise en évidence dans le cas du Vanadium aux Antilles, qui est un marqueur des éruptions volcaniques passées (Cabidoche et Brossard, 2009).

Les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) ont été mesurés. Ces contaminants organiques sont dispersés dans l'environnement suite à la combustion incomplète de composés organiques (bois, charbon, pétrole), et ont des origines variées (feux, industries, gaz d'échappement automobiles). Les teneurs en HAP sont exprimées ici en additionnant les teneurs de 15 molécules, de façon analogue aux travaux réalisés dans

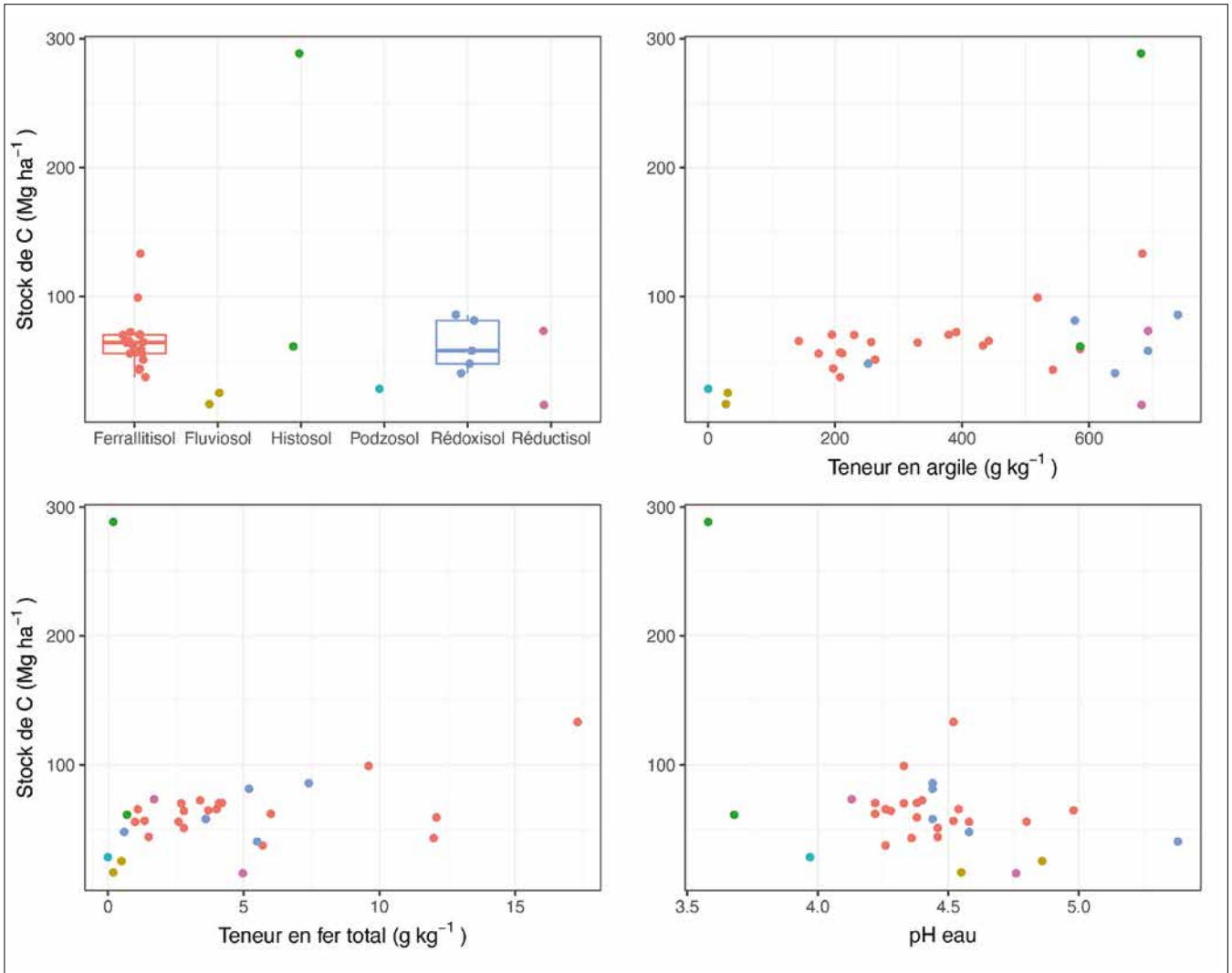
l'hexagone (Froger *et al.*, 2021). Les teneurs en HAP sont dans l'ensemble peu élevées pour les quatre territoires insulaires, avec une médiane de 12 µg kg⁻¹ dans la couche superficielle 0-30 cm (Figure 10). Avec ces teneurs, les sols ne sont pas considérés comme contaminés (Maliszewska-Kordybach, 1996) ; à titre de comparaison, la teneur médiane en métropole est de 33 µg kg⁻¹ (Froger *et al.*, 2021). Le site ayant la teneur en HAP la plus élevée (686 µg kg⁻¹) est situé à la Martinique (Figure 10). Ce site peut être considéré comme contaminé (Maliszewska-Kordybach, 1996), avec une origine de la contamination probablement urbaine compte tenu de la proximité avec Fort-de-France, située à quelques kilomètres à l'est du site, et sous le vent de la raffinerie de la Baie de Fort-de-France.

3.3.2 Stocks de carbone des sols en Guyane

Les données de stocks de carbone (C) du sol des sites RMQS en Guyane ont été utilisées pour réaliser la cartographie des stocks de C (couches 0-30, 0-50 et 0-100 cm) de la bande côtière de Guyane dans le cadre du projet CarSGuy (Brossard *et al.*, 2018). Ces données ont été intégrées à un jeu de données comprenant des données anciennes issues de travaux de cartographie des sols en Guyane et d'un inventaire récent. Les stocks de C du sol dans la couche 0-30 cm mesurés sur les sites RMQS présentent une amplitude importante, entre 16 et

Figure 12 : Stocks de C du sol (0-30 cm) sur les sites RMQS de Guyane selon le type de sol, la teneur en argile, la teneur en fer total, et le pH mesuré dans l'eau.

Figure 12: Soil carbon stocks (0-30 cm layer) in function of the soil type, the clay content, the total iron content and the water pH.



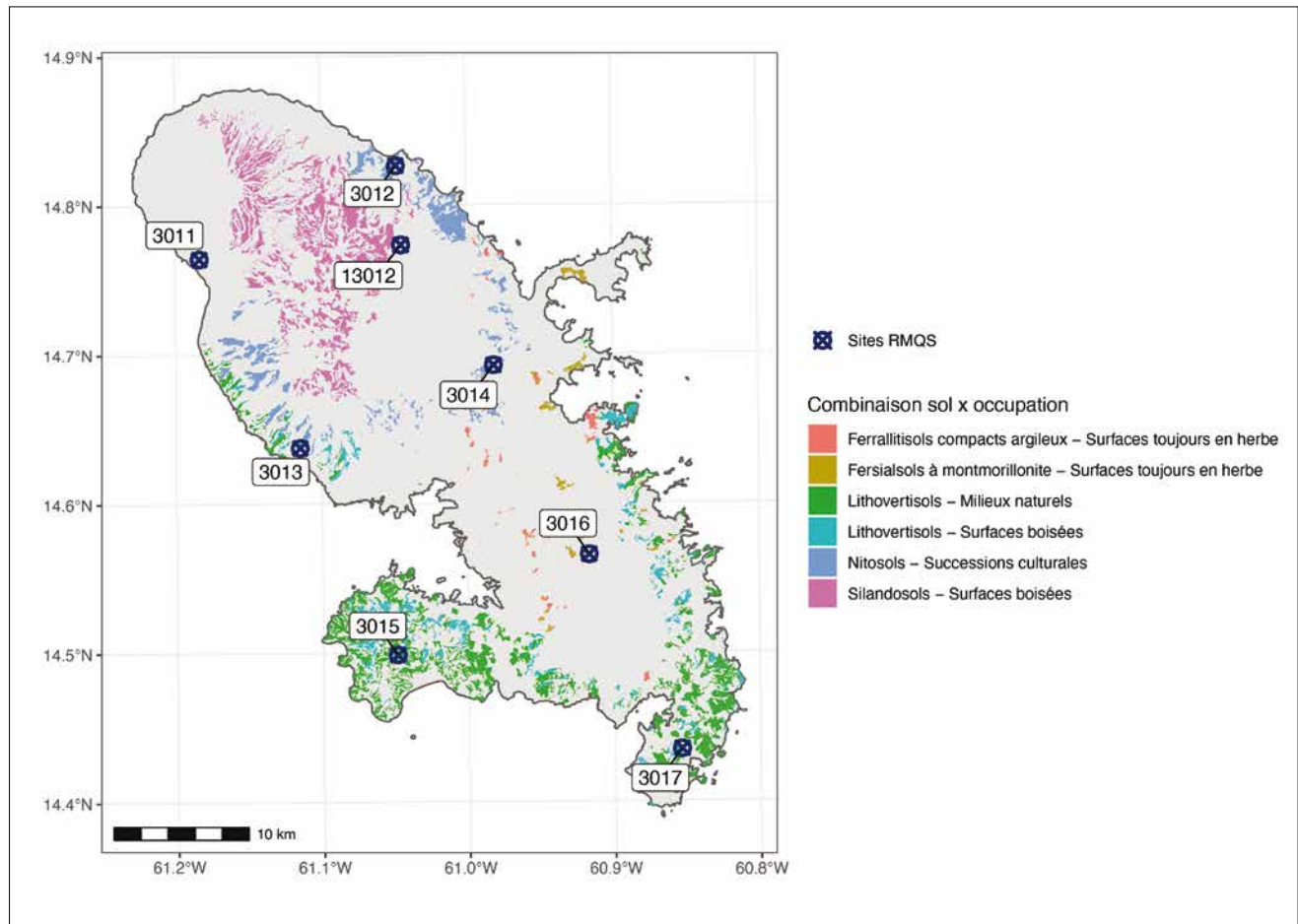
289 Mg C ha⁻¹, et une médiane de 61 Mg C ha⁻¹ (Figures 11 et 12). Hormis la valeur de stock la plus élevée qui peut s'expliquer par le type de sol, un Histosol, il est difficile avec le jeu de données actuel de mettre en avant les déterminants importants de stocks de C dans les sols du RMQS en Guyane (Figure 12). Une relation positive entre la teneur en argile et les stocks de C aurait pu être attendue dans le cas des Ferrallitols car elle est observée à l'échelle du biome amazonien (Quesada et al., 2020). Cependant, peu de Ferrallitols du RMQS en Guyane contiennent plus de 50 % d'argile, rendant délicate l'analyse de cette relation. L'analyse ultérieure des relations entre teneur ou stocks de C et les teneurs en oxy-hydroxydes

de fer et d'aluminium, non disponibles actuellement, pourrait apporter des éléments explicatifs de la variabilité des stocks de C, comme l'ont montré Quesada et al. (2020).

3.4. Évolution du RMQS et représentativité des sites

3.4.1. Évolution du réseau

Plusieurs axes d'amélioration sont actuellement envisagés afin de renforcer l'efficacité du RMQS Outre-mer pour suivre l'évolution des propriétés des sols.

Figure 13 : Combinaisons sol - occupation associées aux sites RMQS à la Martinique.**Figure 13:** *Combinations soil - land use associated with the RMQS sites in Martinique.*

Le premier point est l'amélioration de la couverture du réseau dans ces territoires, adaptée à leurs contextes. En Guyane, la couverture actuelle du réseau est limitée à la bande côtière : une extension du réseau vers l'intérieur de la Guyane est donc envisagée, en particulier sur les régions à forte pression humaine, par exemple le long des fleuves Maroni et Oyapock. La maille de 16x16 km serait conservée, compte-tenu de la taille importante du territoire. La représentativité du réseau actuel et étendu sera analysée, notamment au regard de la diversité géologique, pédologique et des habitats forestiers du territoire.

Dans les territoires insulaires, la diversité des sols et des modes d'occupation est grande, et varie sur de faibles distances. Il est donc légitime d'envisager l'intensification de l'échantillonnage lors des campagnes suivantes afin d'améliorer la représentativité pédologique et paysagère du réseau.

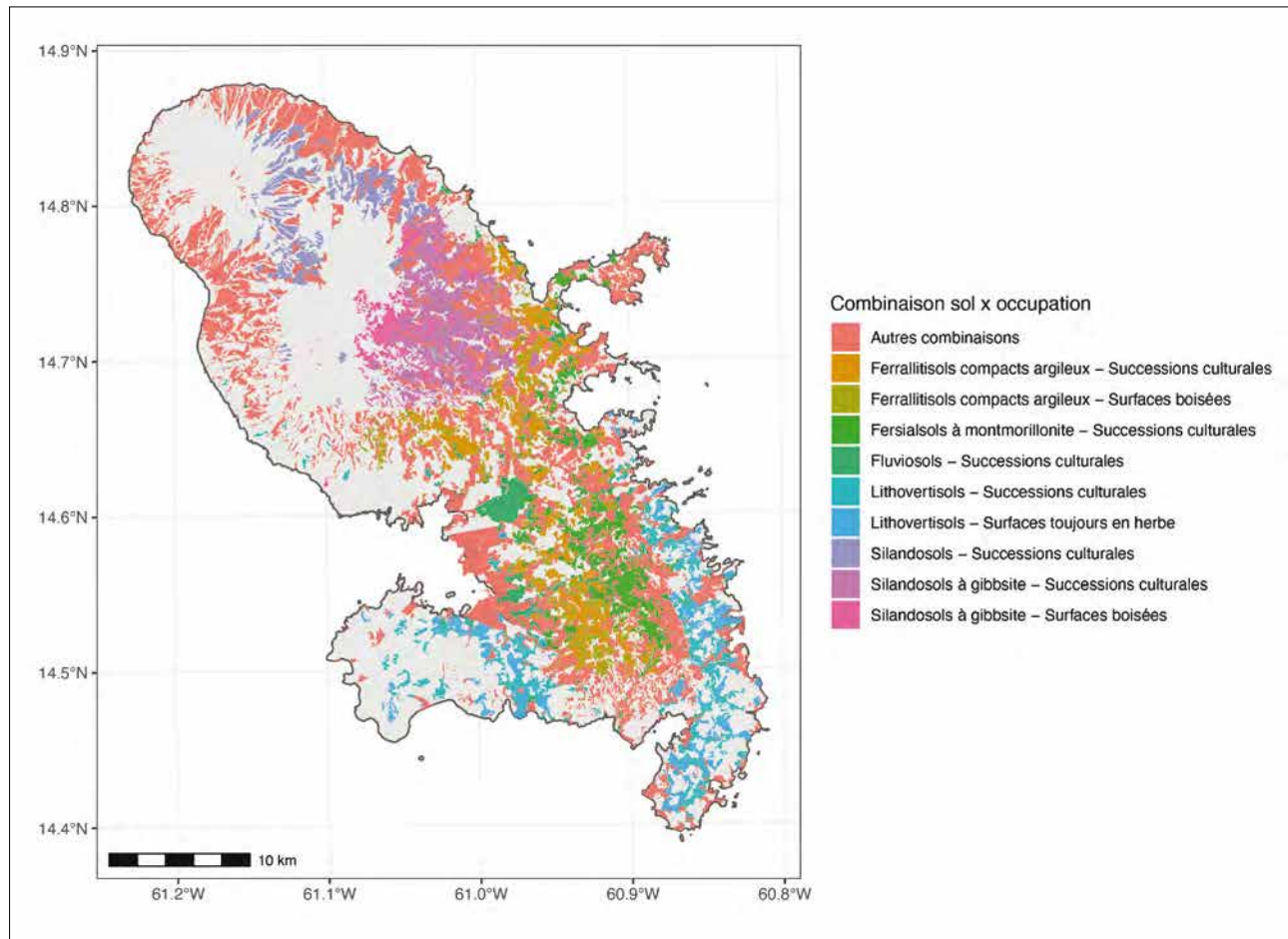
Le menu analytique devra également prendre en compte certaines spécificités locales, en particulier concernant les contaminants, avec par exemple l'analyse du mercure et de

l'arsenic, qui entrent dans les déterminations effectuées sur les sols de Guyane, ainsi que du chlordécone aux Antilles.

Outre l'intensification de l'échantillonnage dans les territoires insulaires nécessaire pour renforcer la représentativité du réseau, un élargissement du RMQS aux autres territoires d'Outre-mer qui ne bénéficient actuellement d'aucune surveillance des sols sera envisagé. En effet, afin de garantir l'égalité de traitement de l'ensemble des territoires et des citoyens de la république et de répondre aux enjeux majeurs liés aux sols dans les territoires ultra-marins (biodiversité, contaminants, ressources alimentaires et en eau face au changement climatique, artificialisation, etc.), le RMQS devrait être étendu au reste des territoires ultra-marins en association avec les collectivités concernées qui en ont la compétence environnementale (Nouvelle Calédonie, Polynésie, Terres australes et antarctiques françaises, notamment).

Figure 14 : Combinaisons sol - occupation non associées aux sites RMQS à la Martinique.

Figure 14: *Combinations soil - land use unassociated with the RMQS sites in Martinique.*



3.4.2. Représentativité des sites dans les territoires insulaires: le cas de la Martinique

Compte tenu de la diversité des sols et des modes d'occupation sur les territoires insulaires ultramarins, il est important d'évaluer la représentativité des sites échantillonnés lors de la première campagne. Nous analysons ici la représentativité des sites dans le cas de la Martinique avec une méthode inspirée de Arrouays *et al.* (2001), qui ont étudié dans le contexte métropolitain la représentativité de réseaux de surveillance générés par des grilles de taille variable. Des cartes de types de sols et de modes d'occupation sont croisées, et la superficie des combinaisons sol - occupation dans lesquelles les points du réseau se situent est comptabilisée.

Dans le cas de la Martinique, la carte des sols utilisée a été réalisée par Colmet-Daage (1970) puis harmonisée et numérisée par l'IRD (Toulemonde *et al.*, 2006). Les noms de sols de cette carte ont été traduits vers le Référentiel Pédologique de 2008. La carte d'occupation des sols utilisée est le CORINE

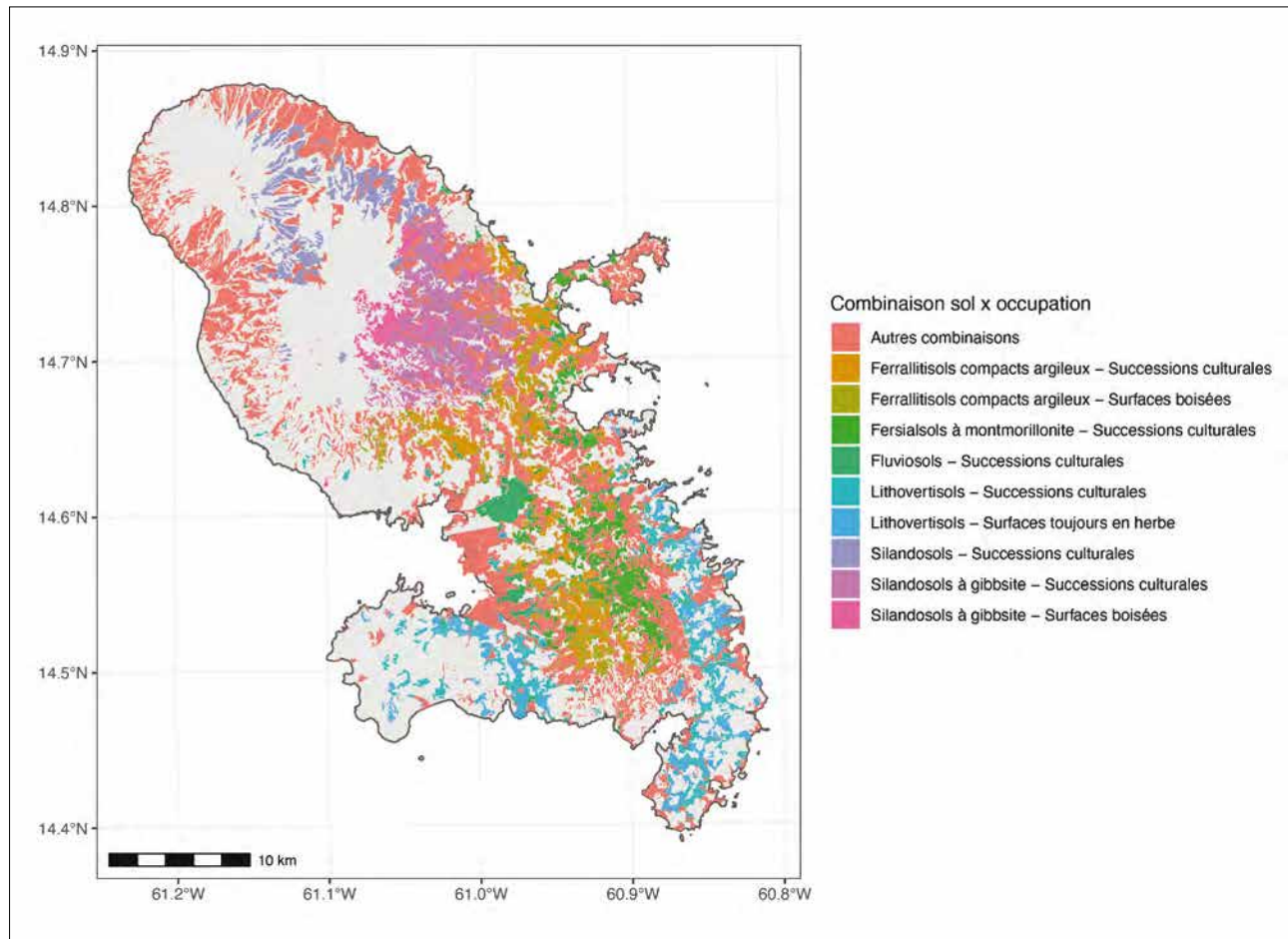
Land Cover de niveau 2 datant de 2006, dont les catégories ont été traduites pour correspondre aux catégories de modes d'occupation classiquement utilisées pour le RMQS à l'échelle nationale (Successions culturales - Surfaces toujours en herbe - Milieux naturels - Surfaces boisées - Vignes et vergers).

Selon cette analyse spatiale, les huit sites RMQS en Martinique sont associés à six combinaisons sol - occupation, qui couvrent au total 17677 ha, soit 24 % de la superficie analysée ici, qui exclut les zones sans sols et les occupations urbaines et industrielles (Figure 13). Les milieux représentés par le réseau sont notamment situés dans le centre-nord et le sud de l'île, où l'on rencontre respectivement des forêts développées sur des Silandosols et des forêts ou savanes développées sur des Lithovertisols.

À l'inverse, les combinaisons de sols et de modes d'occupation non représentées par le réseau couvrent une superficie totale de 55467 ha à la Martinique, soit 76 % de la superficie analysée. Cela concerne en particulier le centre de l'île et le littoral nord de l'île (Figure 14). Les

Figure 14 : Combinaisons sol - occupation non associées aux sites RMQS à la Martinique.

Figure 14: *Combinations soil - land use unassociated with the RMQS sites in Martinique.*



successions culturales, correspondant en Martinique aux cultures permanentes (canne, banane, vergers), annuelles, et aux zones agricoles hétérogènes, constituent une part importante des agroécosystèmes non représentés par le RMQS, et ce pour différents types de sols. Une analyse plus fine pourrait prendre en compte la variabilité du climat afin d'étudier la représentativité des sites RMQS au sein d'unités agropédoclimatiques ; ce choix n'a pas été fait ici, d'une part car la typologie des sols des territoires insulaires ultramarins intègre en partie l'effet du climat sur la pédogenèse (voir section 2.2.). D'autre part, cette analyse de la représentativité des sites de la première campagne sera utilisée pour tester différentes stratégies d'échantillonnage avec un nombre de sites plus élevés pour la deuxième campagne du RMQS. Dans cette perspective, concevoir une stratégie d'échantillonnage stratifiée selon de très nombreuses unités n'est pas optimal si l'on souhaite évaluer la performance statistique de cette stratégie.

4. CONCLUSIONS

L'apport des travaux « Outre-mer » dans le cadre du GIS Sol est indéniable. Il a souvent reposé sur la mobilisation de collègues convaincus de l'intérêt de ces actions. Dans le cadre du programme IGCS, nous sommes conscients que tout n'est pas terminé. S'agissant des politiques publiques, le travail à effectuer dans un futur proche pour l'intégration de synthèses dans le GEOPORTAIL est important car il permettra de rendre visibles « les sols ultramarins », en tout cas pour une partie des territoires.

Les données acquises dans le cadre de la première campagne du RMQS en Outre-mer sont encore en cours de traitement et seront valorisées prochainement. La deuxième campagne ultramarine en cours de préparation devra s'inscrire dans le calendrier global de la deuxième campagne du RMQS (2016-2030).

Les données de ce programme contribueront à renforcer le niveau de connaissance sur les sols ultra-marins, et sur leurs

évolutions à l'échelle pluri-décennale sous l'effet du changement climatique et des pressions anthropiques. Les stocks de carbone des sols mesurés sur les sites ultramarins pourraient permettre de valider les résultats de travaux de spatialisation existants ou futurs dans ces territoires. Les données du RMQS pourraient également combler les manques de connaissances actuels sur les stocks de carbone du sol et leurs dynamiques dans les écosystèmes forestiers et peu anthropisés de la Guadeloupe et de La Réunion, territoires où les stocks de carbone des sols ont surtout été étudiés dans des systèmes cultivés (Allo, 2019; Chopin et Sierra, 2021; Sierra et al., 2015; Todoroff et al., 2019)

Les contaminants analysés ne montrent pas de contamination anthropique des sols par les éléments traces métalliques, et un seul site dans les îles semble contaminé en HAP. L'urbanisation croissante dans ces territoires nécessite néanmoins une importante vigilance concernant les contaminants. L'étude de la biodiversité du sol des sites RMQS ultra-marins sera également renforcée, seul l'ADN du sol ayant été mesuré par INRAE de Dijon durant la première campagne, alors que ces territoires renferment une biodiversité très importante.

Contrairement aux échantillons de métropole qui bénéficient de conditions de conservation optimales dans les locaux du Conservatoire Européen des Échantillons de Sols (CEES, www.gissol.fr) à Orléans, les échantillons ultra-marins sont dispersés et stockés dans des conditions de conservation différentes, sans locaux ni ressources matérielles et humaines spécifiquement dédiées à leur conservation. L'accessibilité à ces échantillons est donc particulièrement difficile et il n'existe pas de possibilité d'accueillir de nouveaux échantillons, notamment pour la nouvelle campagne du RMQS à venir. Une infrastructure de stockage des échantillons de sols ultra marins devra donc être développée rapidement.

S'agissant des départements et régions, Guadeloupe et Réunion, et des collectivités territoriales, Guyane et Martinique, nous devons convenir que les travaux se sont déroulés sans qu'une appropriation réelle des acquis soit atteinte, mis à part aux Antilles. Mais l'expérience montre aussi que les instruments financiers de ces collectivités se trouvent face à des impératifs de demandes structurelles multiples, ce qui a limité leur manifestation d'intérêt et notre capacité de mobilisation locale.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Haut Comité de Groupement du GIS qui, convaincu de l'importance de l'Outre-mer, a su ménager les espaces financiers pour la réalisation de ces travaux.

Les auteurs remercient les personnes ayant contribué à l'implantation et l'échantillonnage des sites RMQS en Outre-mer:

Guadeloupe 2006 : équipes INRAE d'Orléans et Guadeloupe avec J. André, D. Arrouays, L. Boulonne, F. Burner, Y.-M. Cabidoche, J. Doux, C. Jolivet, S. Lehmann, A. Mulciba, C. Palmier, F. Razan, A.C. Richer-de-Forges.

Martinique 2007 : équipes INRAE d'Orléans, Guadeloupe et Dijon, avec F. Burner, Y.-M. Cabidoche, S. Dequiedt, C. Jolivet, A. Mulciba, L. Ranjard, C. Ratié, F. Razan, E. Tientcheu, équipe de l'IRD avec L. Rangon, F. Reynaud, T. Woignier.

Réunion 2012 : équipes INRAE d'Orléans P. Berché, C. Jolivet, N. Soler-Dominguez, C. Ratié; de l'IRD, T. Becquer, M. Brossard, E. Dupuits-Bonin, M. Villeneuve; du Cirad, M. Bravin, F. Feder, J.-P. Nirlo.

Mayotte 2012 : INRAE Orléans, P. Berché, C. Jolivet; IRD M. Brossard, E. Dupuits-Bonin; DAF-Mayotte, T. Soumaila.

Guyane 2014-2015 : INRAE Orléans, P. Berché, L. Boulonne, C. Jolivet, B. Maître, N. Soler-Dominguez, E. Tientcheu; IRD, D. Blavet, M. Brossard, T. Desjardins, J.-C. Doudou, M. Sarrazin (laboratoire) et les intérimaires J.-P. Fleurissant, J. dos Santos Quaresma, M. Marques, S. Braga-Cardoso, R. Fernández-Abad.

Ainsi que les Représentations du Cirad à La Réunion, d'INRAE en Guadeloupe et de l'IRD à la Martinique et en Guyane pour leur appui logistique.

Nous remercions vivement les deux relecteurs de cet article pour leurs lectures attentives et leurs propositions constructives.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES (2008). Référentiel pédologique. Association française pour l'étude du sol (Afes). Éditions Quæ, Versailles, 405 p.
- Agreste (2021) AgresteGraph'Agri 2021. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation Secrétariat général. Service de la statistique et de la prospective. 223 p. ISBN 978-2-11-162013-1.
- Allo M. (2019). Usages et changements d'usages des sols agricoles : impacts sur les stocks de carbone organique du sol en milieu volcanique tropical. Approche spatiale et bilan des gaz à effet de serre à l'île de La Réunion. Th. Doctorat - Sciences agronomiques, Université de Montpellier, 252 p.
- Arrouays D., Thorette J., Daroussin J., King D. (2001). Analyse de représentativité de différentes configurations d'un réseau de sites de surveillance des sols. *Étude et Gestion des Sols* 8, pp. 7-17.
- Arrouays D., Stengel P., Feix I., Lesaffre B., Morard V., Bardy M., Bispo A., Laroche B., Caquet T., Juille F., Rabut M., Soussana J.-F., Voltz M., Gascuel-Oudou C. (2022). Le GIS Sol, sa genèse et son évolution au cours des vingt dernières années. *Étude et Gestion des Sols*, 29, pp. 365-379.
- Beaudou A.G. (1989). Recherche d'un système d'information pour le milieu physique. Une méthode de saisie et de traitement des données

- pédologiques appliquée aux régions tropicales. Paris : ORSTOM, 566 + 244 p. (Travaux et Documents Microédités ; 63). Th. Doct. État Géogr., Paris 1. 1988. ISBN 2-7099-0981-2. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:27316>
- Beaudou A., Le Martret H. (2004). MIRURAM/VALSOL : un système d'information et une base de données pour représenter les sols tropicaux et leurs environnements. *Étude et Gestion des Sols*, 11(3), pp. 271-284.
- Blancaneaux P. (1981). Essai sur le milieu naturel de la Guyane française. Travaux et Documents de l'ORSTOM, n° 137, ORSTOM, Paris (France). 126 p. 2-7099-0618-X. fdi:01877
- Brossard M., Barthès B.G., Perrin A.-S., Courte A., Fujisaki K., Kouakoua E., Cambou A., Moulin P., Beaucher E., Sarrazin M. (2018). Stocks de Carbone des sols de Guyane : mesure et distribution, 2016-2018 : CarSGuy. Rapport final, cartes et annexes. Angers : ADEME. 63 p. +17 p.
- Brouwers M. (1982a). Le milieu physique et les sols de la zone de moyenne altitude de Saint-Paul, aptitudes à la canne à sucre. IRAT-DDA. + carte 1/25000.
- Brouwers M. (1982b). Inventaire morpho-pédologique dans les « hauts » de La Réunion, aptitudes agricoles des terres. Deuxième phase. IRAT-DDA + carte 1/25000.
- Brouwers M., Raunet M. (1981). Inventaire morpho-pédologique dans les « hauts » de La Réunion, aptitudes agricoles des terres. IRAT-DDA + carte 1/25000.
- Cabidoche Y.-M., Brossard M. (2009). Le RMQS Outre-mer. La Lettre du GIS Sol n° 19, novembre 2009.
- Cabidoche Y.-M., Lesueur-Jannoyer M. (2011). Pollution durable des sols par la chlordécone aux Antilles : comment la gérer ? *Innovations Agronomiques* 16, 117.
- Carmouze J.-P., (ed.), Lucotte M., (ed.), Boudou A., (ed.). (2001). Le mercure en Amazonie : rôle de l'homme et de l'environnement, risques sanitaires. Paris : IRD, 494 p. (Expertise Collégiale). ISBN 2-7099-1467-0
- Chopin P., Sierra J. (2021). Potential and constraints for applying the "4 per 1000 Initiative" in the Caribbean: the case of Guadeloupe. *Reg. Environ. Change*, 21, 13. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01740-4>
- Colmet-Daage F., Lagache P. (1965). Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cahiers ORSTOM*, III(2) pp. 91-121.
- Colmet Daage F. (1968). Carte des sols de Grande Terre à 1/10 000, Guadeloupe. + Légende. ORSTOM (Non publiée).
- Colmet-Daage F. (1970) Carte des sols des Antilles à 1/20 000° - Guadeloupe - Martinique (légende) / établie par F. Colmet Daage ; interprétation des fotogr. aériennes et mise au net des maquettes par J. Bernard ; analyses des sols au laboratoire par J. et M. Gautheryou ; avec le concours de F. Lagache, J. de Crécy, A. Poumaroux, A. Pallud. - Pointe à Pitre (GLP) : ORSTOM, Office de la recherche scientifique et technique Outre-mer, Centre des Antilles. Bureau des sols ; Pointe à Pitre (GLP) : Secrétariat général des départements d'Outre-mer, Préfecture de la Guadeloupe, 1969 - 1970 - 1:20000. 18 et 24 cartes en coul. h.t. ; 26 x 70 cm.
- C.P.C.S. (1967). Classification française des sols. Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. Grignon, doc. polycopié, 96 p.
- Døelsch E., van de Kerchove V., Saint Macary H. (2006). Heavy metal content in soils of Réunion (Indian Ocean). *Geoderma* 134, pp. 119-134. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.09.003>
- Dupuits-Bonin E., Jameux M., Brossard M. (2015) Rapport Final de Convention MAAF - DGPAAT. Programme régional Inventaire Gestion et Conservation des Sols. Référentiel Régional Pédologique : ROM - Guadeloupe, Guyane, Île de la Réunion. Synthèses morpho-pédologiques. Doc. Eco&Sols, IRD Montpellier, 171 p.
- Froger C., Saby N.P.A., Jolivet C., Boulonne L., Caria G., Freulon X., de Fouquet C., Roussel H., Marot F., Bispo A. (2021). Spatial variations, origins, and risk assessments of polycyclic aromatic hydrocarbons in French soils. *SOIL* 7, pp. 161-178. <https://doi.org/10.5194/soil-7-161-2021>
- GIS Sol (2011). L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p. <https://www.gissol.fr/publications/rapport-sur-letat-des-sols-de-france-2-849>
- Grimaldi M., Guédron S., Grimaldi C. (2015). Impact of gold mining on mercury contamination and soil degradation in Amazonian ecosystems of French Guiana. In Brearley F.Q. (ed.), Thomas A.D. (ed.). *Land-use change impacts on soil processes: tropical and savannah ecosystems*, Wallingford : CABI, 2015, p. 95-107. ISBN 978-1-78064-210-9
- Grolleau E., Bargeot L., Chafchafi A., Hardy R., Doux J., Beaudou A., Le Martret H., Lacassin J.-C., Fort J.-L., Falipou P., Arrouays D. (2004). Le système d'information national sur les sols : DONESOL et les outils associés. *Étude et Gestion des Sols*, 11(3), pp. 255-270.
- Imbert D., Portecop J. (2008). Hurricane disturbance and forest resilience: Assessing structural vs. functional changes in a Caribbean dry forest. *Forest Ecology and Management*, 255, 3494-3501, doi:10.1016/j.foreco.2008.02.030
- INSEE (2022). <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6011070?sommaire=6011075> ; <https://www.insee.fr/fr/information/2409261>.
- Jacob T. (2017). Une Guyane plurielle, entre abandon et dépendance. *L'ENAHLM*, 470, pp. 20-21.
- Jolivet C., Boulonne L., Ratié C. (2006). Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols, Éd. 2006. Unité InfoSol, INRA Orléans, France.
- Le Martret H., Beaudou A., Blanca Y., Brossard M., Le Rouget Zuritta B. (2008). Interface web cartographique de visualisation des données pédologiques. *Le Monde des Cartes : Revue du CFC*, 197, 31-36. fdi:010044925
- Leprun J.-C., Missot M., Viala A.-L. (collab.), Le Martret H., Wegnez F., Cheaib N., Beaudou A., Le Rouget B. (2001). Cartographie agro-pédologique des sols guyanais à partir des documents existants et intégration dans un SIG : rapport général de fin de convention. Montpellier (FRA) : IRD ; Cayenne (GUY) : EPAG, 150 p.
- Lévêque A. (1963). Les sols développés sur le bouclier antécambrien guyanais. Paris (FR) : ORSTOM, 1963, 244 p. multigr. fdi:10814
- Maliszewska-Kordybach B. (1996). Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination. *Applied Geochemistry, Environmental Geochemistry* 11, pp. 121-127. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(95\)00076-3](https://doi.org/10.1016/0883-2927(95)00076-3)
- Mamy L. (coord.), Pesce S. (coord.), Sanchez W. (coord.), Amichot M., Artigas J., Aviron S., Barthélémy C., Beaudoin R., Bedos C., Bérard A., Bery P., Bertrand C., Bertrand C., Betoulle S., Bureau-Point E., Charles S., Chaumot A., Chauvel B., Coeurdassier M., Corio-Costet M.-F., Coutellec M.-A., Crouzet O., Doussan I., Faburé J., Fritsch C., Gallai N., Gonzalez P., Gouy V., Hedde M., Langlais A., Le Bellec F., Leboulanger C., Margoum C., Martin-Laurent M., Mongruel R., Morin S., Mougin C., Munaron D., Néliou S., Pelosi C., Rault M., Sabater S., Stachowski-Haberkorn S., Sucré E., Thomas M., Tournèze J., Achard A.-L., Le Gall M., Le Perchech S., Delebarre E., Larras F., Leenhardt S. (coord.) (2022). Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques. Rapport d'ESCo, INRAE - Ifremer (France).
- Maudouit M., Rochoy M. (2019). Revue systématique de l'impact du chlordécone sur la santé humaine aux Antilles françaises. *Thérapies* 74, pp. 611-625. <https://doi.org/10.1016/j.therap.2019.01.010>
- Messant A., Lehmann S., Moulin J., Lagacherie P., Jalabert S., Noraz A., Lemercier B., Chafchafi A., Mure J.-P., Laroche B., Sauter J. (2021). Diffusion des Référentiels Régionaux Pédologiques sous la forme d'une carte des sols dominants (France métropolitaine hors-Corse) accessible sur le Géoportail. *Étude et Gestion des Sols*, 28(1), pp. 57-70.
- ODEADOM (2022). Recensement agricole 2020 dans les DROM : premiers enseignements.
- Quantin P., Balesdent J., Bouleau A., Delaune M., Feller C. (1991). Premiers stades d'altération de ponces volcaniques en climat tropical humide (Montagne Pelée, Martinique). *Geoderma*, 50(1-2), pp. 125-148.
- Quesada C.A., Paz C., Oblitas Mendoza E., Phillips O.L., Saiz G., Lloyd J. (2020). Variations in soil chemical and physical properties explain basin-

- wide Amazon forest soil carbon concentrations. SOIL 6, pp. 53-88. <https://doi.org/10.5194/soil-6-53-2020>
- Raunet M. (1988). Carte morpho-pédologique de La Réunion, 1/50000, 4 feuilles. Cirad-IRAT et Région Réunion.
- Riquier J., Zebrowski C. (1975). Atlas de La Réunion : pédologie. In, Atlas des départements français d'outre-mer - 1 : La Réunion. CEGET-IGN, Diffusé par le C.N.R.S. Paris 1975.
- Rochette R., Bonnal V., Andrieux P., Cattani P. (2020). Analysis of surface water reveals land pesticide contamination: an application for the determination of chlordecone-polluted areas in Guadeloupe, French West Indies. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, pp. 41132-41142. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10718-y>
- Rosello V. (1984). Les sols bruns des Hauts, île de La Réunion. Caractérisation minéralogique et microstructurale de matériaux andosoliques. Reconnaissance expérimentale de leur comportement. Thèse de spécialité, Université de Paris VII.
- Sierra J., Causseret F., Diman J.L., Publicol M., Desfontaines L., Cavalier A., Chopin P. (2015). Observed and predicted changes in soil carbon stocks under export and diversified agriculture in the Caribbean. The case study of Guadeloupe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 213, pp. 252-264. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.08.015>
- Todoroff P., Albrecht A., Allo M., Thuries L., Tillard E. (2019). C@RUN : séquestration de carbone dans les sols agricoles réunionnais : évaluations, modélisation et potentiels d'atténuation du changement climatique. Cirad-IRD, 82 p.
- Toulemonde E., Le Martret H., Brossard M. (2006). Numérisation et actualisation de données pédologiques anciennes : cas de la carte de la Martinique au 1/20.000ème de F. Colmet-Daage (1969), Rapport de convention IRD-MOM 3083, sous égide de la convention GIS Sol. Documents de l'Unité VALPEDO, IRD Montpellier, 10 décembre 2006. 23 p. & CD-ROM avec SIG.
- Trouvilliez J., Mortier F. (2011). Les forêts en Outre-mer : un enjeu mondial pour la biodiversité. *Revue forestière française*, 63, pp. 540-558. <https://doi.org/10.4267/2042/46103>
- Turenne J.-F., Le Rouget G. (ill.) (1973). Carte pédologique de Guyane : Mana Saint-Laurent S-O, Mana Saint-Laurent S-E à 1/50.000. Notice explicative, n° 49, ORSTOM, Paris. 110 p., cartes 1/50.000.
- Zebrowski C. (1975). Étude d'une climatoséquence dans l'île de La Réunion. *Cahier ORSTOM, série pédologie*, XIII (3/4), pp. 255-278.