

Évaluation des risques de transfert des polluants à travers les sols

*Rapport final à la convention de recherche entre la Diren et le Cirad
n°2.37.053104.2006-63*

par

Frédéric FEDER
coordinateur du projet

Avec la collaboration de
Jean-Guillaume ROBIN
VCAT, chargé d'études

et de
Gérard BOURGEON
ingénieur pédologue CIRAD, consultant



SOMMAIRE

1	RAPPELS DES TERMES DE LA CONVENTION.....	7
1.1	Objectif et contexte du projet	7
1.1.1	Objectif.....	7
1.1.2	Contexte	7
1.2	Méthodologie.....	8
1.3	Rappel du calendrier prévisionnel	8
2	TRAVAUX ET TÂCHES RÉALISÉS À CE JOUR.....	8
2.1	Analyse bibliographique.....	8
2.1.1	Données relatives au milieu physique de notre zone d'étude.....	9
2.1.2	Méthode d'évaluation d'un risque environnemental.....	9
2.2	Organisation du chantier d'acquisition des données manquantes	13
2.3	Mesures pédologiques réalisées in situ	14
2.4	Mesures au laboratoire.....	15
2.5	Première interprétation des résultats pédologiques.....	16
2.5.1	Typologie des sols du haut du versant	16
2.5.2	Typologie des sols des parties basses et moyennes du versant	17
2.6	Synthèse et conclusions partielles	18
3	VULNÉRABILITÉ AU TRANSFERT DE POLLUANTS VERS LA NAPPE	20
3.1	Les grandes méthodes de modélisation	20
3.1.1	Les méthodes de simulation mécanistes	20
3.1.2	Les méthodes statistiques	20
3.1.3	Les méthodes de cartographies à index	20
3.1.4	Les méthodes de cartographies à index avec pondération des critères	22
3.1.5	Les autres outils de modélisation : exemple de la méthode SIRIS	22
3.2	Choix de la méthode de modélisation.....	24
3.3	Démarche d'agrégation des données utilisées et résultats synthétiques.....	25
3.3.1	Adimensionnalisation des variables.....	25
3.3.2	Agrégation et pondération des variables	25
3.3.3	Carte de vulnérabilité du secteur de référence	26
4	SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS	27
5	ANNEXE 1 : DESCRIPTIONS DES FOSSES PÉDOLOGIQUES.....	31
6	ANNEXE 2 : RÉSULTATS DES ANALYSES	39

Préambule

L'objet de cette convention de recherche entre la Diren (représentée par son directeur régional) et le Cirad de la Réunion (représenté par son directeur régional) est de réaliser une cartographie de la vulnérabilité des sols aux transferts de polluants vers la nappe. La zone d'étude est comprise entre la ravine de la Fontaine au sud et la Grande ravine au nord dans la zone ouest de l'île de la Réunion.

L'ensemble de ces travaux ont été réalisé au sein de l'unité de recherche du Cirad « recyclage et risques » (UPR 78, voir http://www.cirad.fr/ur/recyclage_risque). Les personnes ayant contribué à ces travaux sont : Frédéric Feder (coordinateur, Cirad Réunion), Jean-Guillaume Robin (VCAT, Cirad Réunion) et Gérard Bourgeon (consultant comme ingénieur pédologue, Cirad Montpellier). Le présent rapport est une synthèse des travaux au 30 septembre 2007 un an après le début de cette étude ci-après désignée « le projet ».

Dans une première partie, nous rappellerons le contexte et les objectifs du projet tel qu'ils ont été définis dans la convention. Ensuite, dans une seconde partie, nous présenterons une synthèse bibliographique sur le milieu physique et sur les concepts de vulnérabilité. Nous détaillerons également les résultats obtenus sur la caractérisation pédologique de la zone d'étude. La troisième partie présente dans un premier temps les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité. Ensuite, nous expliciterons la démarche que nous avons retenue pour établir une carte de la vulnérabilité des sols sur la zone d'étude du projet.

1 RAPPELS DES TERMES DE LA CONVENTION

1.1 Objectif et contexte du projet

1.1.1 Objectif

Ce projet a pour objectif général la réalisation d'une carte de vulnérabilité liés au transfert des polluants à travers les sols et vers les nappes phréatiques sur le versant occidental de l'île de la Réunion. Précisément, la zone est comprise entre la ravine de la Fontaine et la Grande ravine.

1.1.2 Contexte

La population de l'île de la Réunion ne cesse de croître ; on estime qu'en 2020, elle aura atteint plus d'un million de personnes. Inévitablement, l'augmentation de l'activité agricole et le développement urbain génèrent de plus en plus de déchets et de sous-produits susceptibles de présenter des risques environnementaux. Progressivement, le recyclage et la valorisation de ces déchets deviennent une préoccupation majeure. Des solutions existent aujourd'hui mais elles ne répondent que ponctuellement aux nombreux problèmes posés. Les principaux risques pour notre environnement sont liés aux pollutions de nos ressources vitales : l'eau et le sol essentiellement mais aussi dans une moindre mesure à la Réunion, l'air. Cependant, la multiplicité des polluants et la diversité des sols rendent impossible une étude systématique de tous les risques dans toutes les situations.

C'est pourquoi nous avons proposé de quantifier et de hiérarchiser les principales propriétés des sols susceptibles de modifier voire d'interagir avec les transferts de polluants.

La région concernée est située sur le flanc ouest du piton des Neiges, sous le vent. Au sein de cette zone, nous avons commencé par étudier un secteur de référence d'étude compris entre la grande ravine au nord et la ravine de la Fontaine au sud (figure 1).



Figure 1 : localisation de la zone d'étude à l'échelle de la Réunion et du secteur de référence compris entre la grande ravine au nord et la ravine de la Fontaine au sud.

1.2 Méthodologie

Au plan de la méthode, il était proposé d'établir cette carte des risques liés au transfert des polluants à travers les sols et vers les nappes à partir des paramètres suivants :

- les capacités d'échange cationique (CEC) et anionique (CEA) des sols ;
- les teneurs en matière organique et en minéraux mal cristallisés des sols ;
- la conductivité hydraulique, la granulométrie, la pierrosité et la profondeur des sols ;
- le pourcentage de l'eau participant réellement aux transferts.

Deux étapes principales étaient identifiées pour le faire :

– la première consistant à définir, pour chacune de ces propriétés, des unités typologiques homogènes ;

– dans la seconde étape, à l'aide de l'ensemble des informations recueillies, l'importance relative des différentes propriétés vis-à-vis des transferts d'eau sera évaluée. Pour cela, un modèle conceptuel de la sensibilité du milieu à ces risques sera proposé en s'inspirant de travaux déjà réalisés par ailleurs. Ce modèle sera à la base de l'élaboration finale d'une carte des risques potentiels de pollution liés aux transferts.

1.3 Rappel du calendrier prévisionnel

Un calendrier sur douze mois était proposé pour la réalisation complète de ce projet, il a été compétemment respecté :

Mois 1 : programmation des travaux et mise à jour des connaissances. Travail bibliographique, acquisition et préparation du matériel.

Mois 2 et 3 : étude des cartes et des données existantes. Prospection sur le terrain pour déterminer la densité des mesures et des analyses en fonction de la surface exacte et de l'échelle finale de la carte de risques. Choix des principaux sites.

Mois 4 et 5 : campagne de terrain. Il s'agira de réaliser les mesures et observation de terrain : analyse des fosses pédologiques, mesures *in situ*.

Mois 6 à 9 : réalisation des mesures de laboratoires. Elles correspondent aux échantillons précédemment prélevés.

Mois 10 à 12 : analyses et interprétation des résultats. Réalisation de la carte des risques finale. Restitution des résultats.

2 TRAVAUX ET TÂCHES RÉALISÉS À CE JOUR

Les tâches décrites pour les douze mois du projet ont été menées à bien, mais pas toujours dans l'ordre où elles apparaissent dans le document contractuel. Elles sont reprises ci-dessous et les principaux acquis sont mentionnés.

2.1 Analyse bibliographique

La zone ouest de l'île de la Réunion est un territoire soumis à de multiples contraintes. Le développement, parfois non maîtrisé, de l'urbanisation se fait au détriment de terres précédemment cultivées. Les récentes infrastructures hydrauliques ont permis l'irrigation de nouvelles surfaces agricoles. Cependant, l'utilisation d'intrants organiques et minéraux augmente les risques de pollution de la nappe phréatique de cette zone.

L'analyse bibliographique a porté sur deux aspects principaux : les données relatives au milieu physique de notre zone d'étude et les méthodes d'évaluation d'un risque environnemental.

2.1.1 Données relatives au milieu physique de notre zone d'étude

L'étude bibliographique a permis de regrouper et de synthétiser les informations existantes et nécessaires pour la poursuite du projet. Il apparaît également que les données pédologiques sont insuffisantes et nécessitent une complète mise à jour. Le territoire étudié présente une grande variabilité spatiale et de nombreuses spécificités environnementales. Plusieurs études pédologiques se sont succédées au sein de cette zone ; la plus conséquente est celle réalisée par le Cirad pour la région Réunion et synthétisée par Raunet (1991). Les types de sols sont classés par grandes familles et montrent une différenciation liée à la nature de la roche mère, à leur évolution pédogénétique et à leur utilisation actuelle. Toutefois, le document le plus récent est l'étude des sols le long d'une toposéquence aux Colimaçons (Feder *et al.*, 2006) ; il est plus adapté à notre démarche.

2.1.2 Méthode d'évaluation d'un risque environnemental

2.1.2.1 Généralités et définitions

L'analyse de travaux similaires réalisés dans d'autres contextes a permis de préciser considérablement l'aspect méthodologique du projet (Koller *et al.*, 2004). En effet, les concepts de risques, d'aléas et de vulnérabilité sont définis précisément et correspondent à des étapes successives selon le schéma ci-dessous (figure 2).

Le risque environnemental est donc indissociable d'une composante « *aléa* » (probabilité de survenance d'un phénomène susceptible d'affecter l'intégrité des eaux souterraines) et d'une composante « *vulnérabilité* » (tendance à la dégradation de la nappe en réponse aux dommages qui peuvent lui être causés). Albinet et Margat (1970) proposent que « la vulnérabilité d'un aquifère soit la possibilité de percolation et de diffusions de polluants depuis la surface jusqu'à la nappe, dans des conditions naturelles ». Ceci implique la notion de la protection de la nappe par le milieu physique qui se situe au dessus d'elle. En effet, les matériaux terrestres peuvent agir comme des filtres naturels et limiter le transfert des polluants. Cependant, cette capacité des matériaux de subsurface résulte d'une interaction complexe de processus physiques, chimiques et biologiques dans le système sol-roche-aquifère ; c'est pour cela que le potentiel de protection du milieu physique est très variable. La cartographie des propriétés du milieu physique intervenant dans ces processus et de leur variabilité permet ainsi d'identifier les zones géographiques les plus vulnérables quant au transfert de polluants vers les nappes (Schnebelen, *et al.*, 2002).

Dans le cadre d'une démarche générique telle que celle que nous avons défini vis-à-vis du transfert des polluants vers les nappes, l'étude bibliographique nous a amené à distinguer deux types de vulnérabilités (Schnebelen, *et al.*, 2002) :

- la vulnérabilité intrinsèque, qui prend en compte les caractéristiques et les propriétés générales du milieu physique (tableau 1) ;
- la vulnérabilité spécifique, caractéristique d'un polluant ou d'un groupe de polluants ayant des propriétés identiques.

Les propriétés du milieu physique qui interviennent dans la vulnérabilité intrinsèque sont essentiellement à rattacher aux différents horizons des sols. Ainsi, les capacités d'échange cationique (CEC) et anionique (CEA), les teneurs en matière organique et en minéraux mal cristallisés, la conductivité hydraulique, la granulométrie, la pierrosité, la profondeur des sols ou encore le pourcentage de l'eau participant réellement aux transferts sont les principales caractéristiques à prendre en compte pour déterminer *la vulnérabilité intrinsèque*. Les cartographies pédologiques précédemment réalisées dans les années 1980 ne nous renseignent pas sur certaines de ces propriétés ni sur leur répartition géographique dans notre zone d'étude.

C'est pour cela qu'il est indispensable de commencer par une cartographie pédologique de notre secteur.

Tableau 1 : résumé des critères de la vulnérabilité intrinsèque.

Vulnérabilité intrinsèque		
SOL	ZONE NON SATURÉE	ZONE SATURÉE
Topographie (pente)	Profondeur de la nappe libre ou épaisseur de la ZNS	Type de nappe
Propriétés physiques et chimiques (perméabilité, nature, texture, CEC, etc.)	Temps de transfert	Temps de résidence
Bilan hydrique (ruissellement et infiltration efficace)		Relation eau souterraine vs. eau de surface
	Structure de la ZNS	Piézométrie
	Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci	Épaisseur de l'aquifère
		Recharge de la nappe
		Type de système hydrogéologique
	Battement de la nappe	
Fracturations (direction et densité)		

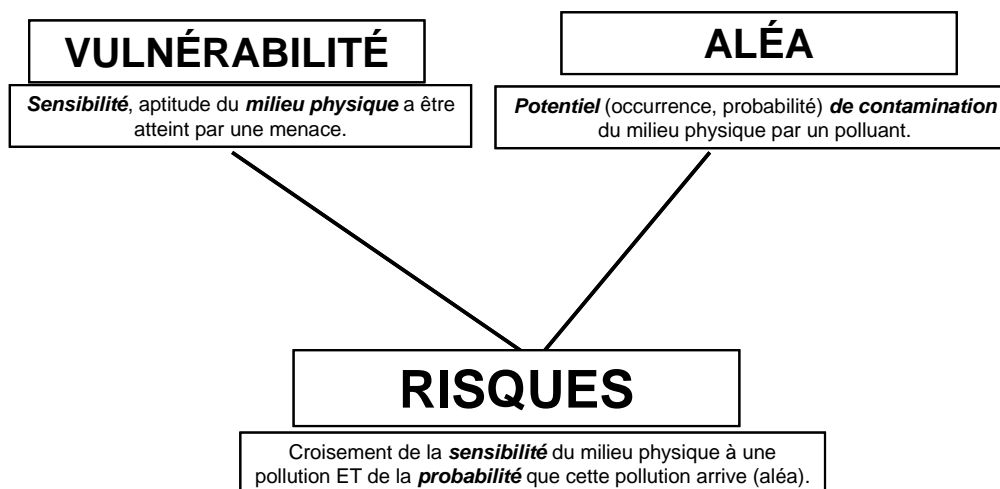


Figure 2 : schéma général de la démarche pour l'évaluation du risque environnemental.

Contrairement aux critères évoqués précédemment qui sont invariables et fixes dans le temps, ceux qui caractérisent *la vulnérabilité spécifique* prennent en compte la nature des polluants et leur comportement vis-à-vis du sol et du milieu naturel qu'ils traversent. Cette prise en compte permet de mieux apprécier les potentialités de migrations des polluants dans le sol et le sous-sol. Par définition, cette vulnérabilité est spécifique de chaque polluant (Landreau et Talbo, 1996).

Dans le cadre de ce projet, les critères de la vulnérabilité intrinsèque (en particulier les critères liés au sol) font l'objet d'une analyse détaillée et la suite ce rapport en fait largement état. L'analyse des critères de vulnérabilité spécifique sera plus succincte mais devrait permettre d'aboutir au résultat attendu (*i.e.* la carte de vulnérabilité du secteur d'étude) selon le diagramme de la figure 3.

2.1.2.2 *Les critères de vulnérabilité intrinsèque*

La vulnérabilité dépend de multiples facteurs qui jouent sur la nature et/ou la concentration en polluant soit sur le temps de transfert. Cette vulnérabilité est évaluée en prenant en compte les caractéristiques du sol, de la zone non saturée et de la zone saturée.

2.1.2.2.1 *Les critères relatifs au sol*

Nous allons maintenant rentrer dans les détails des différents facteurs du sol ayant un impact sur la vulnérabilité intrinsèque de la nappe. De même que pour la vulnérabilité de la nappe, il existe une sensibilité du sol à une pollution. Elle correspond à la potentialité pour le système sol de perdre une ou plusieurs de ces fonctions écologiques. Cela inclut évidemment son rôle de pouvoir tampon et de filtre épurateur.

Il existe un indicateur de l'effet des différentes couches d'un sol sur le devenir d'un polluant et son comportement : potentiel de lessivage d'un sol (Palmer, 1995 ; Huddleston, 1996). Le lessivage renvoie au déplacement de matériaux solubles par l'eau à travers le sol. Le potentiel de lessivage d'un sol renvoie à la possibilité qu'un polluant soit transmis à travers le sol jusqu'à la nappe (Huddleston, 1996). Un certain nombre de facteurs influencent fortement ce potentiel de lessivage. Nous allons voir l'impact de chacun de ces facteurs sur la sensibilité du sol aux fuites de polluants.

La perméabilité du sol : elle est intimement liée à la texture, la structure, le taux de matière organique dans les sols et la densité (Huddleston, 1996). Elle correspond directement à la perte de l'eau et à sa vitesse de progression dans le compartiment sol. Les mesures de perméabilité ou de conductivité hydraulique en milieu naturel sont très variables et relativement difficiles à mesurer. Cependant, nous avons choisi d'en utiliser une qui sera décrite un peu plus loin dans ce rapport : méthode de Beerkan, dite des cylindres (Findeling, 2001 ; Lassabatere *et al.*, 2006). Un certain nombre de propriétés des sols permettent d'avoir accès à la conductivité hydraulique. Ils sont listés ci-dessous :

- Effet de la texture : plus la texture est grossière et plus la vitesse d'infiltration est rapide et inversement plus la texture est fine plus le front d'infiltration progresse lentement (Gaines et Gaines, 1994). Cela s'explique par la taille des pores. Les textures grossières (sableuses) ont de larges pores qui facilitent le transfert de l'eau et des matières solubles (Huddleston, 1996).
- Le taux de matière organique : les matières organiques aident à créer et à stabiliser des agrégats de grains de sables, d'argile et de limons. Ces agrégats ont des espaces relativement larges entre permettant un mouvement de l'eau plus rapide (Huddleston, 1996).

- La densité : plus un sol est compact et dense, plus les vitesses d'infiltration sont faibles (Huddleston, 1996).

Le taux de matière organique : la matière organique est la variable la plus importante qui affecte la sorption d'un polluant. Elle fournit un grand nombre de site de liaison puisqu'elle une grande surface de contact et est chimiquement très réactive. La quantité de matière organique influe directement sur le pH puisqu'elle est essentiellement composée d'acides organiques et humiques. En particulier, le pH du sol peut modifier la répartition des charges sur le polluant (si celui-ci n'est pas neutre) et ainsi favoriser la sorption du polluant sur le complexe argileux. Le pH peut également jouer sur la charge du complexe argileux et ainsi augmenter la CEC (capacité d'échange cationique) ou la CEA (capacité d'échange anionique) assurant également la sorption de polluant (Huddleston, 1996 ; Sheng *et al.*, 2005). La CEC et la CEA peuvent également intervenir dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité spécifique.

La quantité d'argile : de la même manière que pour la matière organique, le complexe argileux offre une surface de liaison très importante et très réactive vis-à-vis de cations ou d'anions. Le complexe argileux agit de la même manière que les matières organiques sur la sorption. Il devient très important dans la zone sous les horizons de surface, là où le taux de matière organique est nettement plus faible qu'en surface (Gaines et Gaines, 1994 ; Huddleston, 1996).

D'autres variables interagissent sur la vulnérabilité intrinsèque liés au sol comme la l'épaisseur du sol par exemple. Elle agit sur le temps que peut mettre un polluant à atteindre la nappe. On distingue ainsi deux grands types de critères relatifs au sol : ceux qui influencent la vitesse de progression de l'eau et des solutés qu'elle transporte et ceux qui influencent la rétention et le stockage de polluants dans les sols.

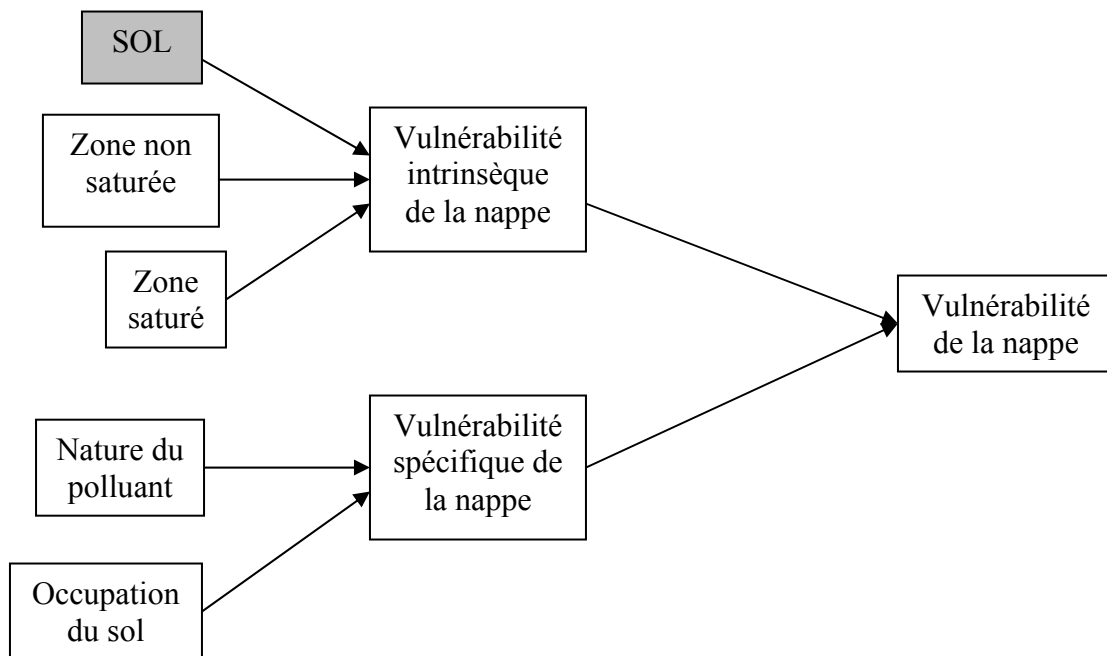


Figure 3 : schéma des composantes d'étude des deux types de vulnérabilité de la nappe.

2.1.2.2.2 Les critères relatifs à la zone non saturée (Bezèlgues et Garets., 2002)

Les principaux critères relatifs à la ZNS (ou zone non saturée) sont :

- la profondeur d'apparition du toit de la nappe libre qui conditionne le temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe et donc sa possible dégradation au cours du transfert.
- l'amplitude du battement de la nappe : conditionne l'épaisseur du recouvrement de la nappe (sol + ZNS).
- la perméabilité verticale de la zone non saturée : elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant.
- la structure de la ZNS : les variations de faciès, l'épaisseur des discontinuités, la texture, la teneur en MO conditionnent la migration des fluides vers la nappe.

2.1.2.2.3 Les critères relatifs à la zone saturée

Pour la zone saturée, les critères à prendre en compte sont les suivants :

- Le type de nappe (libre ou captive) : l'absence d'horizon imperméable confère à la nappe un caractère plus vulnérable qu'une nappe captive protégée par des formations imperméables.
- Les paramètres hydrodynamiques : ils déterminent la vitesse de migration des polluants et le temps de résidence de ceux-ci dans la zone saturée.
- La direction et sens de l'écoulement.
- Le type de système hydrogéologique : la vulnérabilité d'un tel système peut être appréhendée à partir de la connaissance de sa réactivité aux impulsions pluviométriques.
- Les relations nappe/cours d'eau.
- L'épaisseur de l'aquifère.

2.2 Organisation du chantier d'acquisition des données manquantes

Il avait été décidé de réaliser l'acquisition des données manquantes sur la zone d'étude en deux temps intitulés première et seconde campagnes de terrain.

Comme cela a été signalé ci-dessus, l'organisation du chantier de la première campagne s'est faite autour de la toposéquence des Colimaçons (Olivier, 2005 ; Feder *et al.*, 2006) en veillant à compléter la représentativité de l'échantillonnage représenté par cette toposéquence. En effet, il apparaît que la variabilité des sols est plus importante dans la partie basse du versant d'étude et la densité des observations de Olivier (2005) au sein de cette zone est moindre. Cette toposéquence a donc été prise comme axe central pour la délimitation d'un secteur à prospector qui a été nommé « secteur de référence » par analogie à ce qui fait fréquemment réalisé en cartographie lorsque l'étude d'un périmètre restreint permet de formuler des hypothèses fortes de distribution des sols dans le paysage et qui serviront à l'extrapolation des résultats à une zone plus vaste.

Aux quatorze fosses ouvertes par Olivier (2005) sont donc venues s'ajouter vingt-deux nouvelles fosses comme illustré sur la figure 4. Les fosses ont été creusées jusqu'à 150 cm de profondeur ou jusqu'à la roche mère si celle-ci apparaissait avant. Ces fosses ont permis de décrire autant de profils numérotés R-JGR-F1 à R-JGR-F22. Elles étaient suffisamment larges (au minimum 1m × 1 m) pour permettre à une personne de s'y mouvoir sans contrainte, notamment pour y réaliser l'ensemble des observations pédologiques ainsi que les mesures *in situ*.

L'ensemble des descriptions pédologiques (*in situ*) et des résultats d'analyses en laboratoire sont actuellement reportées dans les cahiers de laboratoire du Cirad suivants : 2005/962/UPR78 et

2005/963/UPR78. Ces cahiers sont régulièrement vérifiés et contresignés par un tiers témoin habilité ceci afin de garantir la traçabilité de tous les travaux de nature technique, expérimentale et scientifique effectués au sein du Cirad. Ces cahiers seront ensuite archivés pendant un minimum de vingt ans en cohérence avec la démarche qualité mise en œuvre au Cirad.

Un aliquote des échantillons de sol est toujours conservé, avant séchage, dans la pédotothèque du Cirad de la Réunion en chambre froide à 5°C ; ceci afin de réaliser des analyses complémentaires ou de vérifier certaines données si nécessaire.

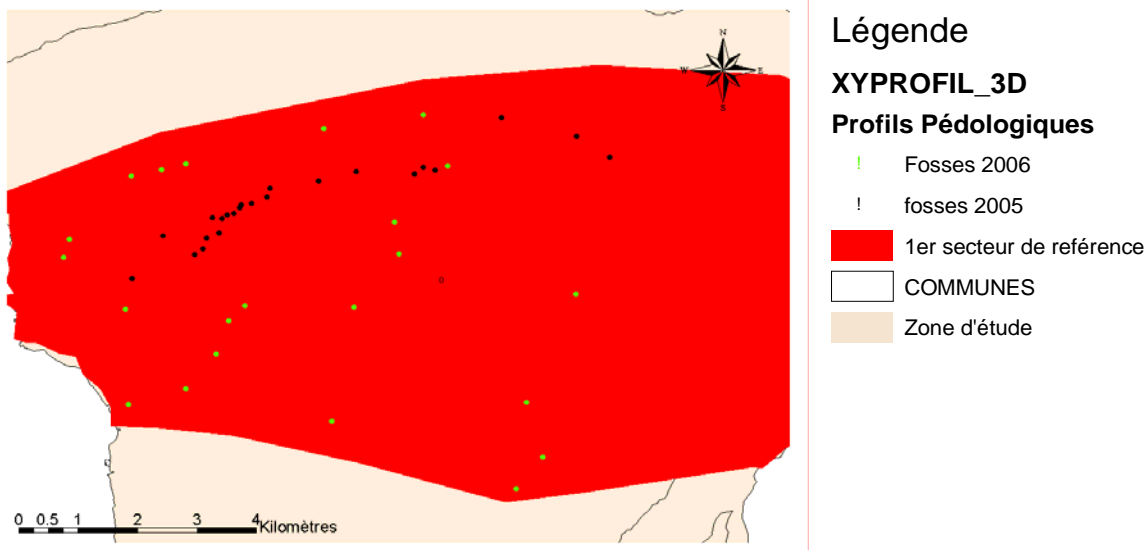


Figure 4 : localisation de l'ensemble des fosses pédologiques au sein du secteur de référence.

2.3 Mesures pédologiques réalisées *in situ*

Les descriptions de profils ont été faites selon les normes préconisées notamment par l'Inra (NF X 31-003, AFNOR 1998), sur la base de critères internationalement reconnus (FAO, 2006) et selon un système standardisé pour la description des sols et des méthodes d'analyses de laboratoire. Ce système est appelé « Système de Transfert de l'Information Pédologique et Agronomique (STIPA) ». Il comprend un manuel précisant les variables et les codes pour la description des sols. Il inclut également des programmes de gestion informatique des données. Les descriptions complètes de nos fosses ainsi que les résultats d'analyse sont archivées au sein de la base de données nationale de l'Inra (Donesol, version 3). Cette base de données n'est pas ouverte. Les noms des profils de références sont construits sur la base d'un radical (R-JGR) correspondant à notre référence interne Cirad suivi du numéro de la fosse précédé de « F ». Toutes les descriptions des fosses sont résumées dans l'annexe 1. Les observations et prélèvements ont été effectués sur la face du profil la plus haute et perpendiculaire à la pente. Les altitudes et les coordonnées de chaque fosse ont été acquises grâce à un GPS de marque Trimble (modèle GeoXM). Les coordonnées fournies par le GPS sont en degré, minutes et secondes dans le système de coordonnées « piton des Neiges ». Cependant le modèle de coordonnées du logiciel de traitement d'information géographique impose un format en mètres. Les coordonnées ont donc été transformées en mètres dans le système de coordonnées standard de la Réunion (RGR 92 – UTM 40 sud), projection « transverse mercator ». Les pentes ont été calculées à partir du modèle numérique de terrain. Elles ont été attribuées à chaque profil en réalisant une jointure spatiale entre la carte des pentes (dérivée du MNT) et la carte de localisation des profils.

Les mesures de densités apparentes par prélèvement de cylindres de volume connu (NF X 31-501, AFNOR 1992) ont été réalisées à raison de trois répétitions par horizon. Pour chacune des fosses ont également été réalisées des mesures de conductivité hydraulique à l'aide de la méthode Beerkan (Findeling, 2001 ; Lassabatère *et al.*, 2006).

2.4 Mesures au laboratoire

Pour chaque fosse, chaque horizon a fait l'objet de deux prélèvements de sol. Les échantillons prélevés à l'aide des cylindres pour la mesure de la densité apparente ont été conservés dans des sachets hermétiques. Ils ont ensuite été pesés humides, puis séchés à l'étuve à 105 °C. Ceci a permis de calculer leur masse volumique ainsi que leur teneur en eau au moment du prélèvement. La campagne de prospection pédologique et de prélèvements a été réalisée de façon à pouvoir raisonnablement faire l'hypothèse que les sols étaient alors dans un état physique proche du pF 4,2. Cette valeur est utilisée dans les classifications pédologiques pour déterminer le caractère « hydric » des sols andiques.

Le second prélèvement de sol est séché à l'air (pendant deux semaines environ) avant d'être broyé et tamisé à deux mm à l'aide d'une passoire à trous ronds (NF ISO 11464 X31-412, AFNOR 1994). La première partie des analyses a été réalisée au laboratoire de la station du Cirad de la Bretagne (Saint-Denis) :

- mesure du pH_{eau} , du pH_{KCl} et de la conductivité électrique (NF ISO 10390 X31-117, AFNOR 1994) ;
- mesure du pH_{NaF} : protocole 4C1a1a1a-b1, (Soil Survey Staff, 2004).

La seconde partie des analyses a été réalisée par le laboratoire d'analyse des sols et des plantes du Cirad à Montpellier ; celui-ci est certifié ISO 9001 depuis 2003 par l'Afaq :

- taux de carbone organique et d'azote total à l'analyseur élémentaire (code de procédure interne n° PopS31b) ;
- rétention des phosphates (méthode de Blakemore, protocole 4D8a1a-b1, Soil Survey Staff, 2004) ;
- fer, aluminium et silicium extractibles par l'oxalate d'ammonium à pH 3 et représentant les oxydes mal cristallisés ;
- fer, aluminium et silicium extractibles par le réactif CBD (citrate-bicarbonate-dithionite) représentant les oxydes bien cristallisés ;
- fer et aluminium extractibles par le pyrophosphate de sodium et représentant les éléments liés à la matière organique (complexes organo-métalliques) ;
- capacité d'échange cationique (CEC) et bases échangeables à l'acétate d'ammonium 1 M tamponné à pH 7 (code de procédure interne Cirad n° PopS20e) ;
- acidité d'échange au KCl 1 N (code de procédure interne Cirad n° PopS24a) ;
- densité optique de l'extrait à l'oxalate (protocole 4G, Soil Survey Staff, 2004) ;
- granulométrie cinq fractions, méthode à la pipette après destruction de la matière organique par l'eau oxygénée et dispersion par l'hexamétaphosphate de sodium (code de procédure interne Cirad n° PopS02c). La dispersion est parfois améliorée par un traitement aux ultrasons (appareil Vibracell 75041 – AGTT-00366 de 750 W, équipé d'une sonde de 13 mm et utilisé à 75 % de sa puissance).

Ces différentes analyses ont été réalisées au cours des deux mois qui ont suivi la réception des échantillons à Montpellier. Les résultats d'analyse des vingt-deux fosses sont répertoriés dans l'annexe 2, ils ont permis une première interprétation d'ensemble de cette première campagne de prélèvements.

Indépendamment de ces analyses qui sont réalisées en routine, des recherches sont en cours dans les laboratoires de Montpellier pour caractériser la CEA (capacité d'échange anionique) de trois profils (Gillman et Sumner, 1987). Cette analyse, qui demande beaucoup de temps ne peut en effet être faite en routine sur de nombreux échantillons.

2.5 Première interprétation des résultats pédologiques

L'objectif de cette interprétation est d'arriver à définir, pour chacune des propriétés des sols, des unités typologiques homogènes de façon à pouvoir les traiter ensuite comme des entités dans l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque. Pour cela, le recours à la classification pédologique à l'aide d'un système taxonomique moderne a été choisi : la WRB (pour World Reference Base for soil resources : IUSS Working Group WRB, 2006).

Cette classification prend en effet en compte pratiquement toutes les propriétés des sols (observées et/ou analysées) qui servent à définir la vulnérabilité. Comme son nom l'indique, cette classification est universellement reconnue et son utilisation dans le cadre du projet permettra les échanges, la réactualisation et des applications multiples, autres que celle qui est l'objet du présent projet. Elle répond aux recommandations de la directive européenne sur la protection des sols qui préconise de prendre en compte les types de sols.

La WRB s'utilise à l'aide d'une clé d'identification des types de sols à l'image de ce qui fait à l'aide d'une flore pour les végétaux. La WRB reconnaît trente deux groupes de référence au niveau mondial (Reference Soil Groups, en abrégé RSGs). Sur ces trente deux groupes, six ont été identifiés dans la zone d'étude à la date où ce rapport est rédigé. Ces six groupes sont détaillés ci-dessous dans l'ordre où l'application de la clé de la WRB permet de les identifier. Ils correspondent également aux sols situés, en premier lieu, sur le haut du versant puis sur les parties moyennes et basses du versant.

2.5.1 Typologie des sols du haut du versant

– Les *Andosols* (AN) : depuis Zebrowski (1975) qui avait diagnostiqué le caractère andique des sols des parties hautes du versant (altitudes supérieures à 900 m), toutes les études pédologiques ont montré que les *Andosols* occupaient une place importante sur le versant occidental de l'île de la Réunion. Les critères d'identification de ce groupe de sols ont été modifiés et précisés au cours du temps au sein des différents systèmes de taxonomies dans le sens d'une plus grande rigueur et en s'appuyant progressivement sur davantage de critères analytiques. De ce fait, il y a moins d'*Andosols* diagnostiqués aujourd'hui qu'il n'y en avait par le passé lorsque seules les valeurs prises par le pH_{NaF} étaient prises en compte. Pour la WRB, la détermination analytique du groupe des *Andosols* s'appuie sur les trois critères suivants :

- (i) les valeurs de la densité apparente (elles doivent être inférieures à 0,9) ;
- (ii) la somme « $\text{Al}_{\text{ox.}} + \frac{1}{2} \text{Fe}_{\text{ox.}}$ » des éléments extraits à l'oxalate (indicatrice de la présence de quantités importantes de minéraux mal cristallisés et devant être supérieure à 2 %) ;
- (iii) le pouvoir de rétention des phosphates (qui doit présenter des valeurs d'au moins 85 %).

Pour illustrer ce propos, l'interprétation des données pédologique issus des travaux du Cirad par Raunet (1991) donne une limite basse des *Andosols* non perhydratés nettement différente de celle du groupe des *Andosols* selon la WRB. Ceci n'est pas sans intérêt pour le projet puisque cela a pour conséquence de réduire significativement la superficie totale des *Andosols*. Or, les sols qui sont regroupés dans ce groupe présentent des propriétés homogènes et sont plus riches en

minéraux mal cristallisés que ceux situés plus bas et ils auront également un comportement différent vis-à-vis de certains polluants.

Au sein du groupe des *Andosols*, la distinction entre les sols ayant une teneur en eau supérieure à 100 % (à pF 4,2 *i.e.* en saison sèche correspondant donc au caractère « *hydric* » selon la terminologie WRB et proche du caractère perhydraté des systèmes antérieurs) et les autres est aisée au vu des résultats analytiques. Elle apparaît néanmoins difficile à matérialiser par une limite cartographique. Les études complémentaires devront essayer d'éclaircir ce point.

– Les *Podzols* (PZ) constituent le second groupe de référence identifié lorsque l'on applique la clé de détermination de la WRB. De même que l'andosolisation, la podzolisation a été clairement identifiée par Zebrowski (1975) mais dès 1960, Riquier parlait déjà de « sols à voune et mascaregnite ». Ces *Podzols* présentent, en effet, généralement un horizon sub-superficiel sableux composé essentiellement de phytolithes : la mascaregnite. Ceci a amené Raunet (1991) à utiliser le terme d'*Andosols* à mascaregnite préférentiellement à celui de *podzols* qui implique un processus de migration de complexes organo-métalliques au sein du profil. Les analyses effectuées ici montrent que cette migration a bien eu lieu, elle est mise en évidence par les variations de la densité optique de l'extrait oxalate (*e.g.* profil R-JGR-F18, annexe 2).

Ces *Podzols* semblent se retrouver sous des types de végétation particuliers et leur cartographie est donc relativement aisée. Néanmoins des contrôles supplémentaires par sondages à la tarière permettront de valider cette hypothèse à l'ensemble de la zone étudiée.

2.5.2 Typologie des sols des parties basses et moyennes du versant

On trouve ensuite, dans l'ordre de la clé de la WRB, des *Phaeozems* (PH), des *Alisols* (AL), des *Umbrisols* (UM) et des *Cambisols* (CM). Cet ordre est différent de celui de la succession des types de sols sur le versant où l'on note, de haut en bas, les *Umbrisols* succédant aux *Andosols*, suivis des *Alisols* puis des *Phaeozems*. Les *Cambisols* qui correspondent à des sols moins bien différenciés occupant différentes positions.

– Les *Phaeozems* (PH) correspondent à des sols présentant une relative accumulation organique dans les horizons de surface (critères de couleur et de teneur en carbone organique). Leur complexe d'échange est, de plus, bien saturé (saturation en bases échangeables supérieure à 50 % sur la majeure partie du profil). Ils caractérisent les zones les moins pentues du bas du versant et correspondent à l'ancienne dénomination sols bruns eutrophes de Raunet (1991). Mais une fois encore, les critères de la WRB sont plus stricts que ceux des anciens systèmes et un pourcentage important de ces sols bruns se retrouve aujourd'hui classé en sols peu évolués (ou *Cambisols*). La cartographie devra maintenant s'attacher à préciser les relations entre topographie de détail et présence de *Phaeozems* dans la zone d'occurrence de ce type de sol.

– Les *Alisols* (AL) : ce sont les seuls sols à profil argileux différencié identifiés au cours de l'étude, ils présentent donc « un ventre argileux » à mi-profondeur. Ils sont classés ainsi car les caractéristiques de leur complexe absorbant correspondent à une capacité d'échange cationique supérieure à $24 \text{ cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$ d'argile¹ et leur taux de saturation reste inférieur à 50 % sur l'ensemble du profil. Ils semblent correspondre à une bande altitudinale située sous celle des *Umbrisols* et les investigations ultérieures permettront de le préciser.

¹ Depuis plus d'une dizaine d'année, l'unité « milli-équivalent pour 100 grammes » *i.e.* $\text{m\text{eq}.100 \text{ g}^{-1}}$ en abrégé, est proscrite au profit des unités du système international « moles par kilogramme ». Afin de conserver une correspondance et des valeurs identiques, la sous unité $\text{cmol}_{(+)}. \text{kg}^{-1}$ est utilisée pour remplacer les $\text{m\text{eq}.100 \text{ g}^{-1}}$; les valeurs restant donc inchangées.

– Les *Umbrisols* (UM) : ils constituent l'équivalent « désaturé » des *Phaeozems* et présentent une relative accumulation organique dans les horizons de surface (mêmes critères de couleur et de teneur en carbone organique que pour les *Phaeozems*) mais le taux de saturation doit être inférieur à 50 % sur la majeure partie du profil. Ils succèdent immédiatement aux *Andosols* à la limite basse de ces derniers mais cette règle semble non systématique car, si les critères de couleur relativement contraignants ne sont pas respectés, on passe directement à des *Cambisols*. Par comparaison avec la carte de Raunet (1991), ils correspondent à une partie des sols bruns andiques et peut-être à certains *Andosols* non perhydratés et désaturés ; cela reste à vérifier lors des prospections à venir.

– Les *Cambisols* (CM) : ils se substituent aux groupes précédents (i) lorsque certains critères de classification ne sont pas remplis et (ii) dans les zones soumises à l'érosion où le développement du profil est limité en profondeur (caractère « leptic »). Ce groupe des *Cambisols* regroupe des sols assez disparates au sein duquel il faudra introduire des critères plus discriminants qui permettront de mieux traduire la réalité du terrain. Les sols les plus « rouges » qui aient été décrits (profil R-JGR-F10, cf. annexe 1) correspondent à un leptic *Cambisol* (*chromic*) ; il n'est toutefois pas exclu de trouver de véritables *Nitisols* (NT) ou encore des *chromic Luvisols* lors de la poursuite des travaux cartographiques sur les coulées de la phase géologique III et correspondant aux roches appelées « pintade ».

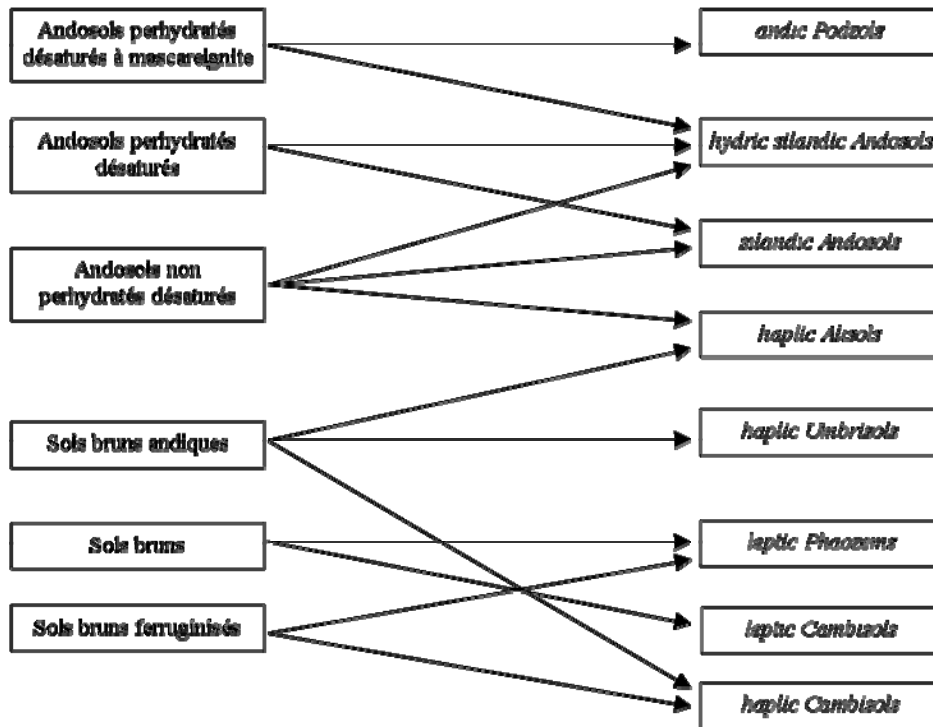
En plus de ces six groupes, un profil de *Vertisol* (VR) a été reconnu mais non échantillonné. Il semble, au vu des observations réalisées au cours de cette première campagne, que l'extension de ce groupe de sols soit très réduite et limitée à quelques poches au sein de plages associant *Phaeozems* et *Cambisols*. Les *Leptosols* (LP), sols très peu épais entrevus mais non échantillonnés lors des prospections, seront également à repérer précisément et les critères permettant d'en faire la cartographie devront être identifiés.

2.6 Synthèse et conclusions partielles

Le tableau 2 reprend synthétiquement les grandes correspondances que nous avons mis en évidence entre la dernière carte pédologique existante (Raunet, 1991) établie sur la base de la CPC (1967) et nos résultats utilisant comme système de classification la WRB (IUSS Working Group WRB, 2006). Ce tableau montre clairement la difficulté de passer de façon univoque d'un système de classification à un autre. Cette difficulté s'explique essentiellement par une évolution des critères analytiques et descriptifs utilisés pour ces classifications ; ceux-ci sont plus précis donc plus contraignants, notamment pour les délimitations des unités de référence. Ainsi, l'actualisation de la carte des sols passe obligatoirement par une nouvelle campagne de prospection pédologique. Notre objectif final, dans le cadre de ce projet, étant la réalisation d'une carte thématique (vulnérabilité de la nappe aux pollutions), l'acquisition de propriétés spécifiques indispensables (par exemple la conductivité hydraulique et la capacité d'échange anionique) se fait en parallèle.

En conclusion, il apparaît que les travaux de cartographie pédologique antérieurs (essentiellement Raunet, 1991) soient difficiles à réutiliser dans le cadre de notre projet. Néanmoins, bien que cela influence la progression de notre projet dans le sens d'un ralentissement cela ne remet pas en cause les délais d'exécution de la convention. Nous prévoyons donc un effort plus soutenu qu'initialement prévu dans le domaine de la cartographie pédologique mais cela se justifie amplement par l'importance d'acquérir des données pédologiques de bases.

Tableau 2 : correspondances établies sur notre secteur de référence entre la typologie utilisée par Raunet (1991) et celle utilisée dans nos travaux sur la base de la WRB.



3 VULNÉRABILITÉ AU TRANSFERT DE POLLUANTS VERS LA NAPPE

3.1 Les grandes méthodes de modélisation

3.1.1 *Les méthodes de simulation mécanistes*

Elles sont issues des modèles à base physique et hydrodynamique (*e.g.* Hydrus, WAVE, SWAT, STICS). Par exemple, le modèle de simulation dit à « réservoirs » SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle qui représente les processus selon des lois physiques (Laurent *et al.*, 2004 ; Bioteau *et al.*, 2002). Ce modèle est conçu pour intégrer le rôle du milieu et des activités agricoles par une représentation assez fine des itinéraires techniques et des propriétés des sols. Ce modèle représente et modélise les écoulements vers la nappe par un modèle simple à « réservoirs » avec des paramètres calibrés. C'est un modèle semi-distribué qui estime les flux d'eau, de nutriments, de pesticides, et de sédiments dans la zone racinaire, dans la nappe et dans les cours d'eau (Bioteau, *et al.*, 2002). Ce modèle, très utilisé aux États-Unis pour les problématiques d'érosion, peut fournir en sortie une estimation des fuites de polluants vers la nappe (en kg/ha/an) pour le nitrate et le phosphore.

Toutefois, les modèles mécanistes de ce type ne conviennent pas aux données que nous disposons ; ils ne sont pas du tout adaptés à l'application aux échelles auxquelles nous travaillons. Par ailleurs, le résultat final donne plutôt une image de la vulnérabilité spécifique de la nappe. Ces modèles se basent sur un type de polluant pour chaque modélisation.

3.1.2 *Les méthodes statistiques*

Elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Elles donnent également une image de la vulnérabilité spécifique de la nappe, puisqu'elles sont spécifiques d'un type de polluant. Cependant, elles peuvent être utiles pour la mise en place des modèles à indexation. En effet, ces modèles sont basés sur une hiérarchisation de variables par des poids. Il existe des tests statistiques qui fournissent une estimation des poids que l'on peut donner à chacune des variables (exemple de la régression logistique). Ce type de test fournit une information sur la probabilité d'occurrence d'une pollution (résultats binaire : 0 ou 1). Cela se traduit par la fonction suivante : $P(X=1) = F(x_i)$, avec $P(X=1)$, la probabilité d'occurrence d'une pollution et les x_i étant l'ensemble des variables qui caractérisent la pollution (par exemple texture, structure, taux de MO... dans notre cas d'étude). Les résultats de la régression fournissent une estimation du poids de chaque variable, l'importance de chaque variable dans la probabilité d'occurrence d'une pollution.

L'utilisation de ces méthodes est donc intéressante dans le sens où si elle est combinée à des méthodes d'indexation, elles permettent de lever les problèmes liés à la subjectivité de ces méthodes.

3.1.3 *Les méthodes de cartographies à index*

Elles sont basées sur la combinaison de carte de divers paramètres d'une région (paramètres = critères de vulnérabilité), en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères (type SIG). Il existe deux principales approches : la méthode des systèmes hiérarchisés et la méthode des systèmes paramétrés.

3.1.3.1 La méthode des systèmes hiérarchisés

Cette méthode est basée sur la comparaison d'une zone donnée avec les critères représentant les conditions de vulnérabilité d'autres zones. Elle est généralement utilisée pour évaluer la vulnérabilité de contextes hydrogéologiques variés à moyenne ou grande échelle.

Par exemple, les modèles hiérarchisés dits à « arbre de décision » sont souvent utilisés. Ils ne fournissent pas comme résultat final une décision, c'est l'utilisateur ou l'expert qui prend les décisions. L'arbre ne nous propose que des situations à risque, à classer les unes par rapport aux autres.

La construction de l'arbre se fait en deux temps :

- phase de construction de l'arbre ;
- phase de décision : classement et définition du risque par dire d'expert.

La première phase n'est en rien une phase de décision mais une phase qui permet de distinguer des situations les unes des autres en utilisant un arbre. En fait, il serait plus correct d'appeler cette phase « phase de distinction ». Les arbres utilisés sont souvent des arbres binaires ; il s'agit alors d'arbres dichotomiques. Mais on peut utiliser aussi des arbres ternaires ou n-aires.

La figure 5 présente un arbre binaire où « o » est la modalité favorable et « d » la modalité défavorable (les critères sont hiérarchisés) : l'arbre nous fournit ainsi, une suite de situation qu'il s'agit de classer les unes par rapport aux autres. A priori, il semble simple de classer de la façon suivante (de la gravité la plus forte à la plus faible) :

ddd > ddo > dod > doo ??? odd > odo > ood > ooo

Pour un tel arbre, il existe donc deux solutions de classification des situations à risque. Sur les arbres binaires comme celui de l'exemple, le nombre de situations fournit par l'arbre est égal à 2^n solutions, n étant le nombre de critère dans l'arbre. On voit déjà qu'avec trois clés de détermination il y a déjà des difficultés à classer les situations. Aurousseau (1999) estima qu'à partir de $n=5$ ou plus, il devient alors impossible même au meilleur des experts de différencier toutes les situations.

La technique des arbres de décisions doit être manipulée avec beaucoup de précaution. Cependant, elle est applicable lorsque le nombre de situations qui sort de l'arbre est très inférieur à une vingtaine de situations.

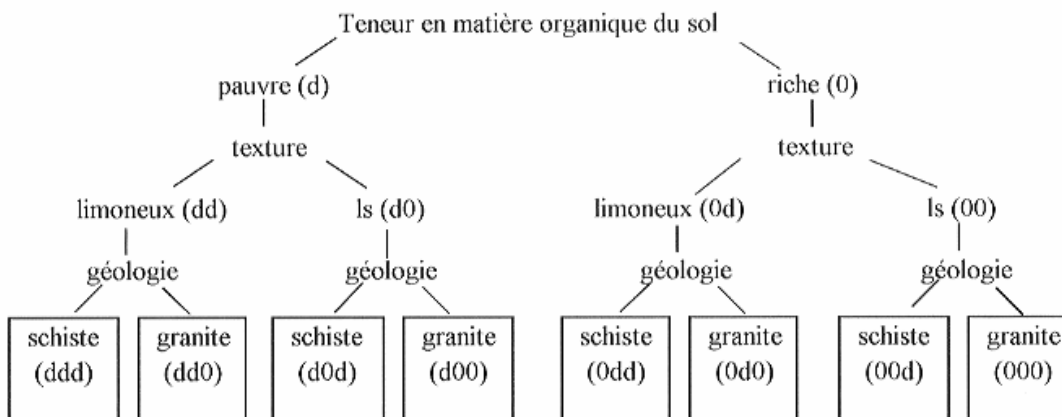


Figure 5. Schéma d'application de la méthode des arbres de décisions

3.1.3.2 La méthode des systèmes paramétrés

Cette méthode repose sur la sélection de paramètres considérés comme représentatif pour estimer la vulnérabilité d'une zone souterraine. Chaque critère a une gamme de variation naturelle définie qui est subdivisée en intervalles discrétisés et hiérarchisés. Un index est attribué à chaque intervalle, reflétant le degré de sensibilité relatif à une contamination. En poussant un peu plus loin l'analyse, cette méthode ne prend pas en compte l'importance d'un critère par rapport à un autre vis-à-vis de la vulnérabilité.

3.1.4 Les méthodes de cartographies à index avec pondération des critères

Elles sont les plus pertinentes vis-à-vis de la réalité terrain du fait de la prise en compte de l'importance relative de chaque critère par rapport à la vulnérabilité générale de la nappe.

D'un point de vue général toutes les méthodes se traduisent de la manière suivante :

$$V = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times X_i$$

où V est une quantification relative de la vulnérabilité, α_i est la pondération liée au critère X_i , et X_i un critère pris en compte pour cette évaluation.

Il existe également un certain nombre de modèles dérivés de la méthode DRASTIC (Aller *et al.*, 1987). Même si ce modèle a été très largement détaillé dans la bibliographie, il nécessite tout de même quelques améliorations pour qu'il soit parfaitement adapté à notre problème et faire de la partie sol, la part la plus importante du modèle.

3.1.5 Les autres outils de modélisation : exemple de la méthode SIRIS

Le problème rencontré dans les modèles à indexation est la hiérarchisation et surtout la pondération des différents critères. Certains modèles permettent de lever le problème de la pondération, ne nécessitant simplement que la résolution de la hiérarchisation des critères à prendre en compte. C'est le cas de la méthode SIRIS (système d'intégration des risques par interaction des scores).

La méthode SIRIS proposée par Vaillant *et al.* (1995) et utilisée ultérieurement (Aurousseau, 1999 ; Aurousseau *et al.*, 1998) est une méthode hiérarchique qui ne nécessite pas la définition des gravités des facteurs mais seulement leur classement hiérarchique du plus grave au moins grave. Elle met en fait en œuvre des règles (auto-pénalisation, etc.) qui ne sont pas très évidentes à expliciter. La méthode SIRIS est un outil d'aide à la décision pour le classement de situation à risque les une par rapport aux autres (Guerbet *et al.*, 2002). Il y a deux étapes préparatoires incontournables :

- sélection des variables à prendre en compte ;
- classification hiérarchique des critères en fonction de l'objectif de l'étude.

Cette méthode met en œuvre un ensemble de règles d'agrégation. Les règles d'agrégation constituent une solution pour tous les cas ambigus de combinaisons de modalités comme dans les exemples que nous avons vus plus haut : (d00) ? (0dd) ou encore (0dd00) ? (0d0dd) ou (0d000) ? (00ddd) ou (00d00) ? (000dd).

La méthode SIRIS est une méthode par pénalisation, de type hiérarchique (la pénalité de doo est toujours supérieure à celle de odo, elle même supérieure à celle de ood).

De même, moo > omo > oom.

Les modalités de chaque critère sont toujours classées dans le même ordre : « o » favorable, « m » intermédiaire, « d » défavorable. Dans le cas de facteurs à deux modalités; elles sont notées « o » et « d ». Dans le cas de facteurs à trois modalités, elles sont notées : « o », « m », « d ».

Tableau 3. Illustration de la règle d'interaction (Arousseau, 1999).

Facteur 1	Etape	Facteur 2	Interaction	Etape	Facteur 3	Interaction	Etape		Rang SIRIS
					o = 0			ooo	0
		o = 0			d = 2		1	ood	2
		d = 4		7	o = 0			odo	5
		o = 0			d = 3	+i = 1	2	odd	7
		d = 5			o = 0			doo	6
		o = 0			d = 3	+i = 1	3	dod	9
		d = 6			o = 0			ddo	11
	6	d = 5	+i = 1	5	d = 4	+i = 2	4	ddd	15

Chaque critère n'a pas une importance égale vis-à-vis de la décision définitive (dans notre cas, la décision est de dire si telle zone est vulnérable ou ne l'est pas), il est donc nécessaire de hiérarchiser les critères. Deux autres modalités notées « md » et « 2d » sont considérées dans le cas où deux facteurs à trois modalités ont le même niveau hiérarchique.

Il y a deux principales règles d'agrégation pour construire le modèle :

- 1 la règle d'interaction : les valeurs des pénalités attribuées aux différentes modalités (sauf pour « o » qui se voit toujours attribuer la pénalité nulle) dépendent de la situation des classes précédentes (des facteurs de risque hiérarchiquement plus importants). En effet, lorsque la situation s'aggrave dans la classe (n), la pénalité attribuée à une modalité donnée de la classe (n+1) augmente (illustré par le tableau 3.).
- 2 la règle de dissymétrie : elle concerne l'attribution de la pénalité à la modalité « m ». On a $m = E(d/2)$ où E correspond à la partie entière. Donc $m = d/2$ si d est pair et $m = (d - 1)/2$ si d est impair. Cette dissymétrie a une limitation : la pénalité attribuée à « m » doit rester supérieure à la plus haute pénalité attribuée à « m » pour le facteur suivant illustré par le tableau 4).

Dans ce cas ce sont des critères à deux modalités. On donne toujours la valeur « 2 » à la modalité défavorable du dernier critère (qui est le moins important d'un point de vue hiérarchique). On augmente la modalité défavorable de +1 (du facteur 3 lorsque l'on passe à la modalité défavorable du facteur 2 (de ood à odd, la situation s'aggrave) et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on donne une valeur à la modalité défavorable du facteur 1. Ensuite pour connaître le rang SIRIS de chaque situation, il suffit d'agréger les valeurs. Ainsi, on résout le problème par exemple de savoir quelle situation est plus à risque $odd > doo > ooo$.

On commence toujours par la valeur 2 à la modalité défavorable du facteur 3. On applique d'abord les règles d'interactions afin de déterminer les valeurs des autres modalités défavorables pour les autres facteurs. Une fois cette étape terminée, il suffit d'appliquer la règle de dissymétrie pour connaître les valeurs des modalités intermédiaires (« m »).

Comme dans l'exemple, on termine par faire une agrégation des différentes modalités pour chaque situation afin de connaître le rang SIRIS de chaque situation.

Ce genre de modèle présente un certain nombre d'intérêts par aux autres modèles présentés ci-dessus :

- prend en compte une hiérarchisation des facteurs mais sans leur donner un poids ;
- permet de distinguer un grand nombre de situation à risque très diverses (grâce à la valeur du rang SIRIS) ;

- relativement facile à mettre en place, et utilisable pour n'importe quelle autre situation géographique ;
- possibilité de travailler à l'échelle du pixel, de la parcelle ; valable pour n'importe quel type de polluant.

Tableau 4. Illustration de la combinaison des deux règles « interaction et dissymétrie » (Aurousseau, 1999).

Facteur 1	Numéro d'étape	Facteur 2	Inter action	Numéro d'étape	Facteur 3	Inter action	Numéro d'étape	Numéro d'exemple cité dans le texte		Rang SIRIS	
o = 0	25	o = 0		24	o = 0 m = 1 d = 2 o = 0 m = 1		1	ex 1	ooo	0	
									oom	1	
									ood	2	
									omo	2	
		m = 2				d = 3 o = 0 m = 2	i = 1	2	ex 2	omm	3
										omd	5
										odo	5
										odm	7
		d = 5				d = 4 o = 0 m = 1	i = 2	3	ex 3	odd	9
										moo	4
										mom	5
										mod	7
o = 0				o = 0 m = 2 d = 4	i = 1	4	ex 4	mmo	7		
								mmm	9		
								mmd	11		
								mdo	10		
m = 3		i = 1		d = 4 o = 0 m = 2	i = 2	6	ex 6	mdm	12		
								mdd	15		
								doo	8		
								dom	10		
d = 6		i = 1		d = 5 o = 0 m = 2	i = 3	7	ex 7	dmd	16		
								ddo	15		
								ddm	18		
								ddd	21		
o = 0				o = 0 m = 2 d = 4	i = 1	19	ex 5	dod	12		
								dmo	11		
								dmm	13		
								dmd	16		
m = 3		i = 1		d = 5 o = 0 m = 3	i = 3	8		dmd	16		
								ddo	15		
								ddm	18		
								ddd	21		
d = 8	11	d = 7	i = 2	10	d = 6 i = 4	9					

3.2 Choix de la méthode de modélisation

Les méthodes de simulation mécanistique des phénomènes ne sont pas adaptées pour plusieurs raisons. L'échelle à laquelle nous travaillons dans ce projet est l'échelle régionale. Or ces modèles sont destinés à des échelles plutôt locales (colonnes de sol, parcelle expérimentales...). Les méthodes statistiques, quant à elles, sont inapplicables pour ce projet parce qu'elles requièrent un jeu de donnée très important et surtout représentatif de la situation. Or pour réaliser notre cartographie pédologique, nous avons cherché à raisonner, quantitativement et qualitativement, l'acquisition des données en fonction des connaissances bibliographiques et de notre expertise sur le terrain. Ce type de modèle n'est donc pas adapté. Il pourrait cependant être utilisé conjointement à un autre modèle, en appui, pour tester ou valider certaines hypothèses. Les méthodes de cartographies à index avec pondération des critères apparaissent comme les plus adaptées de par la nature des informations dont nous disposons.

3.3 Démarche d'agrégation des données utilisées et résultats synthétiques

3.3.1 Adimensionnalisation des variables

Dans un premier temps nous avons choisi de rendre les données sans dimension sur des plages de valeurs adaptées ramenées dans un intervalle [0 ; 1]. Cette étape d'adimensionnalisation est nécessaire pour comparer et agréger des données dont les unités sont différentes : par exemple, les conductivités hydrauliques sont mesurées en m.s^{-1} tandis que les teneurs en matière organique sont en g.kg^{-1} . Par ailleurs, nous avons sélectionné des plages de valeurs qui sont adaptées à notre contexte d'étude. Par exemple, il n'est pas utile de couvrir toute la gamme de pH (de 0 à 14) ou un large champs de valeurs de conductivités hydrauliques parce que non seulement nous ne nous situons pas dans toute ces gammes mais cela aurait également pour effet de réduire significativement les variations observées entre nos valeurs.

Ainsi, une valeur Y_i d'une donnée quelconque (pH, taux de MO, etc.) est ramenée à une valeur Y_i' comprise dans un intervalle [0 ; 1] à l'aide de la formule suivante :

$$Y_i' = \frac{(Y_i - Y_{\min})}{(Y_{\max} - Y_{\min})}$$

3.3.2 Agrégation et pondération des variables

Les valeurs, une fois adimensionnalisées, peuvent ensuite être agrégées et pondérées les unes par rapport aux autres selon un formalisme de type combinaison linéaire.

Par exemple : $V = [a \text{ CH} + b \text{ MO} + c \text{ texture}] + [d \text{ ox.} + e \text{ pH} + f \text{ CEC}]$

Avec V = degré de vulnérabilité ;

a, b, c, d, e et f sont des valeurs de pondération pour chaque variable ;

CH = conductivité hydraulique à saturation ;

MO = taux de matière organique ;

texture = classe granulométrique ;

ox. = extractibilité à l'oxalate ;

CEC = capacité d'échange cationique.

Le choix des variables à prendre en compte repose sur notre connaissance existante du milieu physique et des processus hydrodynamiques et géochimiques impliqués lors du transfert de polluants dans ces types de sols (Bernard, 2004 ; Payet, 2005 ; Feder *et al.*, 2006 ; Feder et Findeling, 2007). Nous nous sommes appuyés également sur des tests de sensibilités afin de ne pas intégrer de variables inutiles parce que non discriminante dans la plage de valeurs déterminé. Par ailleurs, nous avons fait attention à ne pas choisir des variables liées ou fortement corrélées entre elles (par exemple le taux de saturation en bases et un pH). Enfin, la profondeur des sols aurait pu être une variable à part entière mais nous avons préféré l'inclure directement dans les autres variables. Par exemple, le taux de matière organique a été calculé pour toute la profondeur du sol jusqu'à un mètre et ce pour tous les sols.

In fine, nous avons choisi de retenir six variables essentielles : la conductivité hydraulique, la classe granulométrique, le taux de matière organique, l'extractibilité à l'oxalate, le pH, la capacité d'échange cationique. Ces variables exercent une influence tant sur les aspects hydrodynamiques pour les trois premières, que géochimique pour les quatre dernières ; le taux de matières organique pouvant entrer dans les deux catégories.

La détermination des facteurs de pondérations de ces variables a fait l'objet dans un premier temps d'une hiérarchisation afin de donner plus d'importance aux variables les plus explicatives.

Puis, nous avons réalisé de nouveaux tests de sensibilité sur les facteurs de pondération afin de comprendre l'influence de chaque variable. Il est apparu, par exemple, qu'un changement dans la pondération de plusieurs variables n'avait qu'un impact minime sur le résultat final (dans une certaine gamme de valeurs). Ainsi, nous avons déterminé un ensemble de valeurs robustes pour les facteurs de pondération. Nous évaluons la robustesse de ces facteurs de pondération par le fait qu'un faible changement ne modifie que peu l'évaluation globale de la vulnérabilité.

3.3.3 Carte de vulnérabilité du secteur de référence

La figure 6 présente le résultat final de la carte de vulnérabilité sur la base des modélisations expliquées précédemment. La localisation du secteur de référence est repositionnée sur la carte de la Réunion. En premier, il apparaît deux types de zones où la vulnérabilité est maximale : les ravines et la zone située aux plus fortes altitudes du bassin versant. Dans ces deux situations, c'est l'absence de sols, et donc d'une zone tampon pour les transferts de polluants vers la nappe, qui explique ces forts degrés de vulnérabilité. Toutes les autres situations résultent d'une combinaison complexe à expliciter des variables suivantes : la conductivité hydraulique, la classe granulométrique, le taux de matière organique, l'extractibilité à l'oxalate, le pH, la capacité d'échange cationique.

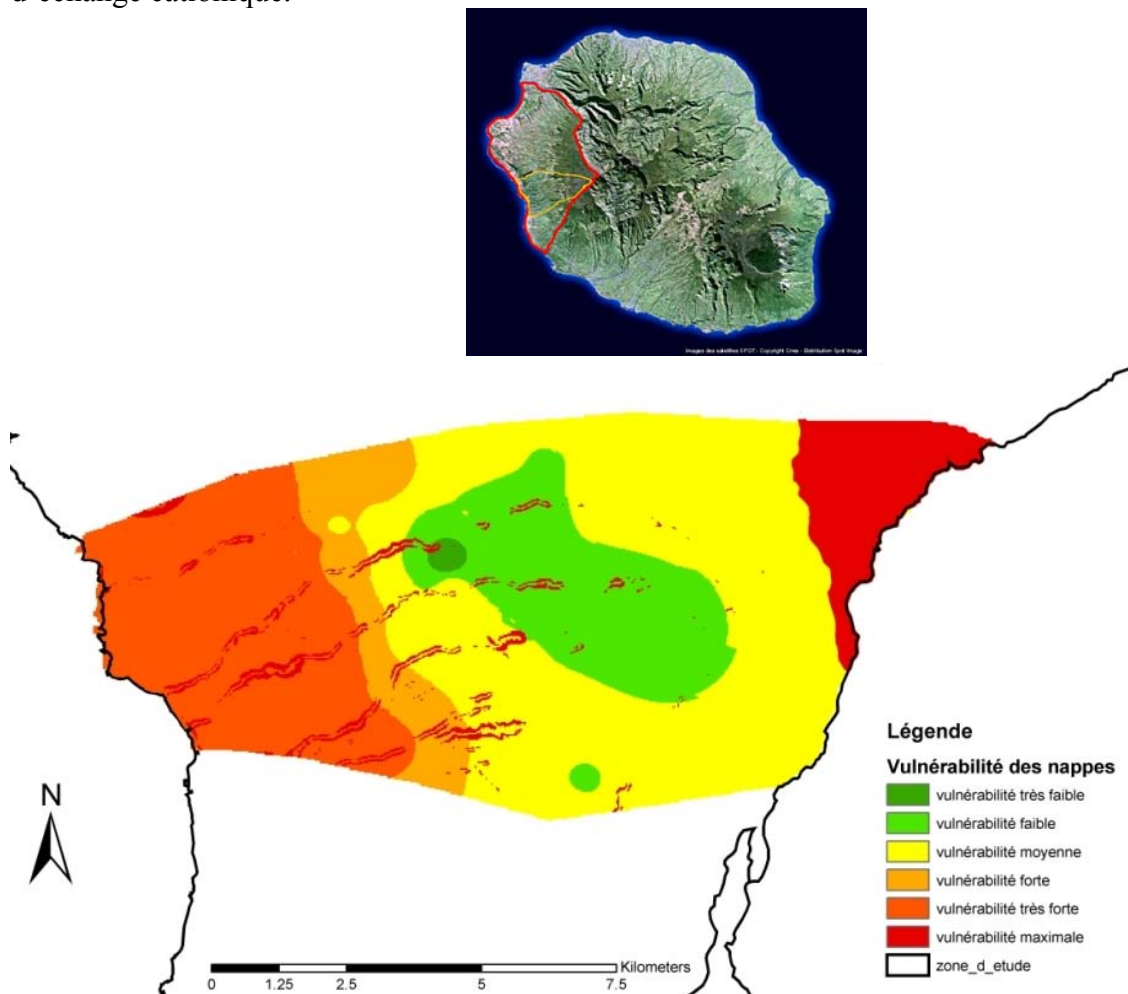


Figure 6. Carte de vulnérabilité du secteur de référence compris entre la grande ravine au nord et la ravine de la Fontaine au sud.

Les principales raisons pour lesquelles les zones du bas de versant sont classées en vulnérabilité forte ou très forte sont : des conductivités hydrauliques à saturation très fortes, des taux de matière organique plus faible qu'en haut de versant, des valeurs de l'extractibilité à l'oxalate faible. La zone d'altitude intermédiaire montre les vulnérabilités les plus faibles grâce à la conjonction des facteurs les plus favorables.

Les types de sols et leurs propriétés étant fortement structurés parallèlement aux altitudes, il est logique que l'évaluation de la vulnérabilité soit également structurée d'une manière semblable bien que cette zonation ne recouvre pas parfaitement la nature des sols.

4 SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

La démarche originale que nous avons adoptée nous a permis de distinguer et de localiser les zones les plus vulnérables au transfert de polluants vers la nappe. Compte tenu d'un contexte pédologique particulièrement diversifié et complexe, il apparaît que le sol peut jouer un rôle très variable vis-à-vis du transfert des polluants. Les modèles plus orientés hydro-géologie de type DRASTIC ne prennent pas en compte aussi finement cette variabilité du compartiment « sol ». Il serait donc intéressant d'intégrer nos conclusions dans ce type de modèle afin d'être plus complet et de prendre compte le sous-sol.

La principale difficulté d'interprétation liée à ce type d'approche par des modèles d'indexation et de pondération est de pouvoir comparer des situations complexes. En effet, si la démarche est tout à fait acceptable pour comparer directement des situations entre elles, elle souffre en revanche d'un manque de généralité. Par exemple, la comparaison des zones du bas de versant et des altitudes intermédiaires révèle des différences significatives vis-à-vis du transfert des polluants. En revanche, le degré de vulnérabilité n'a pas été normé avec pour objectif de comparer cette situation avec une autre, dans une région différente. Toutefois, notre objectif dans le cadre de ce travail peut être considéré comme atteint puisqu'il s'agissait plutôt de définir les zones les plus vulnérables et pas forcément l'intensité, le degré (dans l'absolu) de cette vulnérabilité.

Les difficultés que nous avons rencontrées pour établir une nouvelle carte pédologique montrent que l'acquisition de nouvelles données pédologiques était indispensable (mesures *in situ*, analyses au laboratoire, etc.). En effet, nous avons démontré l'absence de corrélation simple et univoque entre le système de classification des anciennes cartes pédologiques (CPCS, 1967) et la nouvelle nomenclature internationale utilisée (IUSS Working Group WRB, 2006).

La généralité de notre approche permet d'envisager une réutilisation, une adaptation rapide à un type de pollution (vulnérabilité spécifique) avec les mêmes données pédologiques mais un paramétrage différent, adapté à la nature du polluant et à ses interactions avec les sols.

Par ailleurs, l'extension de cette cartographie à la zone ouest, voire à toute l'île, est possible et requerrait des délais moindres.

Enfin, si on se rapporte au schéma de la figure 2 présentant l'imbrication des notions de vulnérabilité, d'aléa et de risque, il apparaît que l'étape suivante à prendre en compte pour évaluer les risques de pollutions concerne l'aléa. En effet, après avoir déterminé la vulnérabilité des territoires, il est important de connaître les types de polluants et leurs quantités afin de déterminer les risques exacts de pollution.

Références bibliographiques

- Albinet M. et Margat, J. (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bull. BRGM*, 2^e série (3-4): 13-22.
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. et Hacket, G. (1987). DRASTIC: a standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency. Report (EPA/600/2-87/035), Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, 455 p.
- Aurousseau, P. (1999). Notions relatives au risque en environnement. Séance du conseil scientifique de l'environnement du 14 décembre 1999. (<http://viviane.roazhon.inra.fr/spanum/publica/risque/risque.htm>).
- Aurousseau, P., Gascuel-Oudoux, C. et Squivalent, H. (1998). Éléments pour une méthode d'évaluation d'un risque parcellaire de contamination des eaux superficielles par les pesticides. *Étude et gestion des sols*, 5(3): 143-156.
- Bernard, H. (2004) Évaluation des risques de transfert d'herbicides dans les sols tropicaux de l'ouest de l'île de la Réunion. Thèse de doctorat de l'université de Poitiers. 201 p.
- Bezègues S. et Garets, E. D. (2002). Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande Terre et de Marie Galante. Phase 1: méthodologie de détermination de la vulnérabilité. BRGM/RP-51783-FR.
- Bioteau, T., Bordevane, P., Laurent, F. et Ruelland, D. (2002). Évaluation des risques de pollution diffuse par l'azote d'origine agricole à l'échelle de bassins versants : intérêts d'une approche par modélisation avec SWAT. *Ingénieries*, 32, p. 3-12.
- CPCS (1967) *Classification des sols*. École nationale supérieure agronomique, Grignon, France, 87 p.
- FAO (2006) *Guidelines for soil description*. 4th edition. Rome.
- Feder, F. et Findeling, A. (2007) Retention and leaching of nitrate and chloride in an andic soil after pig manure amendment. *European Journal of Soil Science*. **58**, 393-404. doi:10.1111/j.1365-2389.2006.00885.x
- Feder, F., Olivier, R., Alary, K. and Bourgeon, G. (2006) Characterisation Of a Soil Catena on the Western Slope of The Piton Des Neiges Volcano (la Réunion). [Cd-Rom], 18th World Congress of Soil Science. 2006/07/9-15, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- Findeling, A. 2001. Étude et Modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs pluvial au Mexique. École nationale du génie rural des eaux et forêts, Montpellier: 357 p.
- Gaines T. P. et Gaines, S. T. 1994. Soil Texture Effect on Nitrate Leaching in Soil Percolates. *Communications in soil science and plant analysis*, 25(13&14): 2561-2570.
- M. Guerbet et Jouany, J. M. (2002). Value of the SIRIS method for the classification of a series of 90 chemicals according to risk for the aquatic environment. *Environmental Impact Assessment Review*, 22(4): 377-391.
- Gillman G. P. et Sumner, M. E. (1987). Surface Charge Characterization and Soil Solution Composition of Four Soils from the Southern Piedmont in Georgia. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 51: 589-594.
- Huddleston, J. H. (1996). How soil properties affect groundwater vulnerability to pesticide contamination. EM 8559. Oregon state university.
- IUSS Working Group WRB (2006) *World reference base for soil resources 2006*. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.

- Koller, R., Sauter, J., Pierrillas, S. et Viro, M. (2004) Classification des bassins versants alsaciens en fonction de leur sensibilité aux produits phytosanitaires. *Étude et gestion des sols*, vol. 11 (3), p. 219-234.
- Landreau, A. et Talbo, H. (1996) Contribution à une normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions des nappes souterraines. BRGM/RR-38846-FR.
- Laurent, F. et Rossignol, J. P. (2004). Sensibilité d'un modèle agro-hydrologique à a cartographie des sols : test d'une méthode basée sur l'indice topographique et la lithologie. *Étude et gestion des sols*, 11(3): 199-217.
- Lassabatère, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J.M., Cuenca, R., Braud, I. et Haverkamp R. (2006) Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments – BEST. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70:521–532.
- Olivier, R. (2005) Étude d'une toposéquence dans l'île de la Réunion. CIRAD – UPR RELIER, Saint-Denis de la Réunion.
- Palmer, R. C. (1995). *Guide to Groundwater Vulnerability Mapping in England and Wales*. The Stationery Office Books.
- Payet, N. (2005). Impact des apports de lisier sur un sol cultivé de la Réunion : étude expérimentale et modélisation des flux d'eau et de nitrate dans la zone non saturée. Université de la Réunion.
- Raunet, M. (1991) *Le milieu physiques et les sols de l'île de la Réunion : conséquences pour la mise en valeur agricole*. CIRAD - région Réunion, Saint-Denis de la Réunion.
- Schnebelen, N., Platel, J.-P., Le Nindre, Y. M., Baudry, D., Hoarau, A., Dufour P. et Benhammouda, S. (2002) Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 5. Opération sectorielle – Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise. Nouvelles connaissances hydrogéologiques. Cartographie de la vulnérabilité aux pollutions. BRGM/RP-51178-FR.
- Sheng, G., Yang, Y., Huang M. et Yang, K. 2005. Influence of pH on pesticide sorption by soil containing wheat residue-derived char. *Environmental Pollution*, 134, p. 457-463.
- Soil Survey Staff (2004) *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey investigations reports, No 42, Version 4.0, USDA-NRCS.
- Vaillant, M; Jouany, JM; Devillers, J. 1995. A multicriteria estimation of the environmental risk of chemicals with the SIRIS method. *Toxicology Modeling*, vol. 1, no. 1, pp. 57-72.
- Zebrowski, C. (1975) Étude d'une climato-séquence dans l'île de la Réunion. *Cahiers de l'Orstom*, série pédologique, 13(3/4): p. 255-278.

5 ANNEXE 1 : DESCRIPTIONS DES FOSSES PÉDOLOGIQUES

	R-JGR-F1	R-JGR-F2	R-JGR-F3
Coordonnées GPS	X = 326933 Y = 7661885	X = 326860 Y = 7662423	X = 325801 Y = 7658991
Altitude (m)	1223	1245	711
Contexte	Prairie	Prairie	cannes à sucre
pente (%)	11.68	9.18	12.62
H1 limites	0-10 cm	0-5/10 cm	0-25 cm
couleur	7,5YR3/4	10YR3/4	10YR3/2
MO	oui	oui	oui
racines	oui	nombreuses	nombreuses
éléments grossiers	non	non	non
texture	L	L	La
H2 limites	10-15 cm	5/10-25 cm	25-120 cm
couleur	10YR3/4	7,5YR4/6	10YR4/3
MO	oui	non	non
racines	oui	nombreuses	peu nombreuses
éléments grossiers	non	non	non
texture	La	La	Al
H3 limites	15-30/35 cm	25-40 cm	120 et + pas de RM
couleur	7,5YR3/4	10YR3/2	10YR3/3
MO	non	non	non
Racines	oui mais moins	peu nombreuses	non
éléments grossiers	non	non	non
texture	La	La	Al
H4 limites	30/35-55 cm	40-70 cm	
couleur	7,5YR4/6	7,5YR4/6	
MO	non	non	
racines	peu nombreuses	très peu nombreuses	
éléments grossiers	graviers 1 à 5 %	non	
texture	La	La	
H5 limites	55-80 cm	70-90 cm	
couleur	7,5YR3/4	7,5YR3/4	
MO	non	non	
racines	très peu nombreuses	très peu nombreuses	
éléments grossiers	graviers 10 à 15 %	non	
texture	La	La	
H6 limites	80-120 cm	90 et + pas de RM	
couleur	10YR4/6	10YR4/6	
MO	non	non	
racines	non	non	
éléments grossiers	non	graviers 5 %	
texture	La	La	
H7 limites	120 et plus : pas de RM		
couleur	10YR3/3		
racines	non		
MO	non		
éléments grossiers	non		
texture	La		

	R-JGR-F4	R-JGR-F5	R-JGR-F6
Coordonnées GPS	X = 323851 Y = 7660154	X = 325664 Y = 7664036	X = 327346 Y = 7664281
Altitude (m)	497	1117	1390
Contexte	friche	cryptomérias	Prairie
pente (%)	19.95	5.41	6.00
H1 limites	0-20/30 cm	0-22 cm	0-7 cm
couleur	10YR4/2	103/3	10YR4/4
MO		oui	oui
racines	nombreuses	très nombreuses	très nombreuses
éléments grossiers	graviers 2 %	non	graviers 2 %
texture	Ls	L	L
H2 limites	20/30-90 cm RM	22-60/80 cm	7-22 cm
couleur	10YR3/2	7,5YR4/4	10YR3/4
MO		non	non
racines	non	nombreuses	peu nombreuses
éléments grossiers	graviers - cailloux 15 %	cailloux 5%	non
texture	A	La	La
H3 limites		60/80-90/100 cm	22-40 cm
couleur		10YR4/4	7,5YR4/6
MO		non	non
Racines		peu nombreuses	peu nombreuses
éléments grossiers		cailloux 10%	non
texture		L	La
H4 limites		90/100 et plus, pas de RM	40-60 cm
couleur		7,5YR4/4	10YR4/6
MO		non	non
racines		très peu nombreuses	très peu nombreuses
éléments grossiers		graviers 20%	graviers 1 à 5%
texture		La	La
H5 limites			60-80 cm
couleur			5YR3/4
MO			non
racines			très peu nombreuses
éléments grossiers			non
texture			A1
H6 limites			80-90 cm
couleur			10YR3/3
MO			non
racines			non
éléments grossiers			non
texture			A1
H7 limites			90 et plus pas de RM
couleur			10YR2/1
racines			non
MO			non
éléments grossiers			graviers 10%
texture			A

	R-JGR-F7	R-JGR-F8	R-JGR-F9
Coordonnées GPS	X = 322424 Y = 7663223	X = 321377 Y = 7662132	X = 321283 Y = 7661815
Altitude (m)	520	151	131
Contexte	cannes à sucre	friche	friche
pente (%)	17.50	8.56	8.77
H1 limites	0-10/15 cm	0-35 cm RM	0-10/20 cm
couleur	7,5YR3/2	10YR3/3	5YR3/4
MO	oui		
racines	nombreuses	nombreuses	très nombreuses
éléments grossiers	graviers 2 %	graviers 30 %	graviers 2 %
texture	La	L	Las
H2 limites	10/15-40/50 cm		10/20-30/45 cm
couleur	7,5YR3/2		2,5YR3/4
MO	non		non
racines	non		peu nombreuses
éléments grossiers	graviers et cailloux 10 %		cailloux 15 %
texture	La		A
H3 limites	40/50-80 cm RM		altérites RM
couleur	10YR3/2		
MO	non		
Racines	non		
éléments grossiers	cailloux 20 %		
texture	A		

	R-JGR-F10	R-JGR-F11	R-JGR-F12
Coordonnées GPS	X = 322318 Y = 7660927	X = 329359 Y = 7658381	X = 324337 Y = 7660989
Altitude (m)	262	1776	707
Contexte	Prairie	Tamarins	friche
pente (%)	16.36	12.23	16.80
H1 limites	0-50 cm	0-5 cm	0-10/20 cm
couleur	7,5YR3/2	10YR2/2	7,5YR3/2
MO	oui	oui	oui
racines	très nombreuses	très nombreuses	nombreuses
éléments grossiers	blocs 50 %	non	non
texture	Las	La	La
H2 limites	RM	5-40 cm	10/20-130 cm
couleur		7,5YR3/4	10YR3/4
MO		oui	non
racines		peu nombreuses	peu nombreuses
éléments grossiers		non	non
texture		L	L
H3 limites		40-90 cm	Pas de RM à 130cm
couleur		7,5YR4/4	
MO		non	
Racines		non	
éléments grossiers		Pierre 20 %	
texture		L	
H4 limites		90 et plus : pas de RM	
couleur		7,5YR3/2	
MO		non	
racines		non	
éléments grossiers		non	
texture		L	

	R-JGR-F13	R-JGR-F14	R-JGR-F15
Coordonnées GPS	X = 322373 Y = 7659279	X = 323335 Y = 7659556	X = 329359 Y = 7658381
Altitude (m)	88	320	629
Contexte	friche	Prairie	friche et maïs
pente (%)	11.80	10.80	15.60
H1 limites	0-25/30	0-25 cm	0-30/35 cm
couleur	7,5YR3/2	10YR3/3	7,5YR4/3
MO	oui		oui
racines	nombreuses	nombreuses	nombreuses
éléments grossiers	cailloux 20 %	graviers 3 %	cailloux 15 %
texture	Las	La	Las
H2 limites	25/30-50 cm	25-130 cm	30/35-75/90 cm
couleur	7,5YR4/4	7,5YR4/4	10YR3/4
MO	non		non
racines	non	peu nombreuses	peu nombreuses
éléments grossiers	graviers 30 à 40 %	graviers 65 %	cailloux 20 %
texture	As	Sl	Ls
H3 limites	RM à 50 cm	25-130 cm (langues)	75/90-130 cm
couleur		5YR3/3	10YR3/3
MO		non	non
Racines		peu nombreuses	non
éléments grossiers		non	non
texture		Las	Ls
H4 limites		pas de RM à 130 cm	pas de RM à 130 cm
couleur			
MO			
racines			
éléments grossiers			
texture			

	R-JGR-F16	R-JGR-F17	R-JGR-F18
Coordonnées GPS	X = 328908 Y = 7657834	X = 329084 Y = 7659318	X = 329909 Y = 7661189
Altitude (m)	1450	1593	1841
Contexte	Prairie	Prairie	Tamarins
pente (%)	7.32	10.37	12.11
H1 limites	0-15/25 cm	0-10/15 cm	0-10 cm
couleur	5YR3/2	5YR5/3	5YR2,5/2
MO	oui	oui	oui
racines	très nombreuses	très nombreuses	très nombreuses
éléments grossiers	non	non	non
texture	Al	Ls	Sl
H2 limites	15/25-35 cm	0-10/15 cm	10-10/18 cm
couleur	7,5YR4/4	2,5YR2,5/2	2,5YR4/2
MO	non	oui	oui
racines	très nombreuses	très nombreuses	très nombreuses
éléments grossiers	non	non	non
texture	Ls	Ls	Sl
H3 limites	35-65 cm	10/15-30 cm	10/18-20/30 cm
couleur	10YR3/2	7,5YR3/2	5YR3/3
MO	non	non	non
Racines	nombreuses	nombreuses	nombreuses
éléments grossiers	non	non	non
texture	Al	Las	Ls
H4 limites	65-80 cm	30-55/60 cm	20/30-30/35 cm
couleur	5YR4/4	5YR3/4	5YR3/2
MO	non	non	non
racines	nombreuses	nombreuses	nombreuses
éléments grossiers	non	non	non
texture	Al	Al	Ls
H5 limites	80-95/105 cm	55/60-90 cm	30/35-140 cm
couleur	10YR3/3	7,5YR4/4	7,5YR4/4
MO	non	non	non
racines	nombreuses	très peu nombreuses	très peu nombreuses
éléments grossiers	non	non	pierres 10/15 %
texture	A	La	L
H6 limites	95/105-115 cm	90-140 cm	Pas de RM à 140 cm
couleur	7,5YR4/4	10YR3/3	
MO	non	non	
racines	peu nombreuses	non	
éléments grossiers	non	blocs 30 %	
texture	Al	Las	
H7 limites	115-130 cm pas de RM	Pas de RM à 140 cm	
couleur	10YR3/3		
racines	non		
MO	non		
éléments grossiers	non		
texture	Al		

	R-JGR-F19	R-JGR-F20	R-JGR-F21	R-JGR-F22
Coordonnées GPS	X = 327757 Y = 7663390	X = 326177 Y = 7660965	X = 323340 Y = 7663429	X = 323335 Y = 7659556
Altitude (m)	1435	1064	700	608
Contexte	cryptomérias	Prairie	canne à sucre	canne à sucre
pente (%)	10.60	11.82	12.30	11.67
H1 limites	0-10 cm	0-10 cm	0-20 cm	0-30 cm
couleur	5YR3/3	7,5YR3/2	10YR4/3	10YR3/2
MO	oui	oui	oui	oui
racines	très nombreuses	très nombreuses	peu nombreuses	peu nombreuses
éléments grossiers	non	non	non	cailloux 10 %
texture	Sl	Las	La	Las
H2 limites	10-12/20 cm	10-35 cm	20-90 cm	30-130 cm
couleur	10YR4/6	7,5YR4/4	7,5YR4/4	7,5YR3/4
MO	oui		non	non
racines	nombreuses	nombreuses	peu nombreuses	non
éléments grossiers	non	non	non	cailloux 20 %
texture	n.d.	Ls	L	La
H3 limites	12/20-55 cm	35-90 cm	90-120 cm	Pas de RM à 130 cm
couleur	5YR3/3	7,5YR4/4	10YR3/3	
MO	non	non	non	
Racines	peu nombreuses	peu nombreuses	non	
éléments grossiers	non	non	non	
texture	Las	L	Al	
H4 limites	55-90 cm	90-100/110 cm	Pas de RM à 130 cm	
couleur	5YR3/4	5YR5/6		
MO	non	non		
racines	très peu nombreuses	très peu nombreuses		
éléments grossiers	cailloux 50 %	non		
texture	Al	Al		
H5 limites	90-140 cm	100/110-115/120 cm		
couleur	10YR3/4	7,5YR3/4		
MO	non	non		
racines	très peu nombreuses	très peu nombreuses		
éléments grossiers	cailloux 15 à 20 %	graviers 5 %		
texture	Las	Las		
H6 limites	Pas de RM à 140 cm	115/120-130 cm		
couleur		5YR4/6		
MO		non		
racines		non		
éléments grossiers		graviers 10/15 %		
texture		As		
H7 limites		Pas de RM à 130 cm		

6 ANNEXE 2 : RÉSULTATS DES ANALYSES

N° Fosse	Hz	Da	HP (%)	pH eau	pH KCl	Δ pH	pH NaF (2 min)	CE (μS/cm)	P. rétention %	Argiles (Avec U-S)	Limons fins (Avec U-S)	Limons grossiers (Avec U-S)	Sables fins (Avec U-S)	Sables grossiers (Avec U-S)	Argiles (sans U-S)
R-JGR-F1	H1	0.63	88.00	5.36	4.82	0.54	10.30	39	99.53						
R-JGR-F1	H2	0.63	88.00	5.33	4.89	0.44	10.59	24	99.73						
R-JGR-F1	H3	0.45	157.77	4.99	5.23	-0.24	10.05	20	99.75						
R-JGR-F1	H4	0.40	182.47	4.54	5.42	-0.88	10.09	19	99.82						
R-JGR-F1	H5	0.44	163.88	4.80	5.54	-0.74	9.97	16	99.82						
R-JGR-F1	H6	0.46	163.05	4.87	5.30	-0.43	9.42	13	99.21						
R-JGR-F1	H7			5.09	4.78	0.31	8.87	11	94.09						
R-JGR-F2	H1	0.50	127.78	5.46	4.88	0.58	10.47	33	99.50						
R-JGR-F2	H2	0.50	127.78	5.00	4.97	0.03	10.52	53	99.73						
R-JGR-F2	H3	0.47	132.37	5.04	5.14	-0.10	10.13	26	99.77						
R-JGR-F2	H4	0.44	151.34	4.70	5.26	-0.56	10.54	29	99.80						
R-JGR-F2	H5	0.48	137.51	4.69	5.41	-0.72	10.01	15	99.75						
R-JGR-F2	H6	0.47	147.55	4.69	5.47	-0.78	9.84	12	99.76						
R-JGR-F3	H1	1.17	37.29	5.56	4.83	0.73	8.74	27	84.20	48.40	33.40	8.00	6.30	3.90	11.57
R-JGR-F3	H2	0.96	57.00	6.06	6.01	0.05	8.99	35	97.26	35.60	34.00	19.30	7.20	3.90	0.33
R-JGR-F3	H3			6.09	5.79	0.30	9.01	24	87.08	60.50	31.30	5.40	1.80	1.00	6.98
R-JGR-F4	H1	1.14	19.50	6.44	5.24	1.20	8.32	19	51.70	53.60	24.40	13.70	3.30	5.00	48.44
R-JGR-F4	H2	1.30	21.89	6.16	4.98	1.18	8.74	29	59.59	54.80	22.10	14.40	3.80	4.80	48.99
R-JGR-F5	H1	0.72	62.60	6.00	5.25	0.75	9.06	24	96.93						
R-JGR-F5	H2	0.84	60.65	5.61	5.22	0.39	9.18	9	97.92						
R-JGR-F5	H3	0.93	51.92	5.61	4.62	0.99	9.56	12	83.23						
R-JGR-F5	H4	1.02	44.54	6.19	5.84	0.35	9.82	12	99.13						
R-JGR-F6	H1	1.06	47.25	5.49	4.49	1.00	8.96	59	84.40						
R-JGR-F6	H2	1.06	47.25	5.06	3.99	1.07	9.30	15	86.06						
R-JGR-F6	H3	0.79	65.92	4.77	4.07	0.70	9.40	30	86.77						
R-JGR-F6	H4	0.82	66.97	4.65	4.19	0.46	9.33	21	93.98						
R-JGR-F6	H5	0.79	69.87	4.73	4.27	0.46	8.72	21	96.49						
R-JGR-F6	H6	1.02	54.23	4.69	4.53	0.16	8.96	25	97.43						
R-JGR-F6	H7	1.02	54.23	4.80	4.70	0.10	8.72	23	94.91						

N° Fosse	Hz	Da	HP (%)	pH eau	pH KCl	Δ pH	pH NaF (2min)	CE (μS/cm)	P. rétention %	Argiles (Avec U-S)	Limons fins (Avec U-S)	Limons grossiers (Avec U-S)	Sables fins (Avec U-S)	Sables grossiers (Avec U-S)	Argiles (sans U-S)
R-JGR-F7	H1	1.29	21.95	6.14	5.13	1.01	8.49	37	60.52	43.40	33.00	10.60	5.70	7.30	38.32
R-JGR-F7	H2	1.43	22.83	6.40	5.54	0.86	8.49	35	63.30	48.90	32.90	9.00	4.00	5.20	37.47
R-JGR-F7	H3	1.12	30.20	6.23	5.34	0.89	8.75	28	65.13	47.30	33.00	11.20	4.20	4.30	37.99
R-JGR-F8	H1	1.42	13.82	7.57	6.82	0.75	8.52	45	31.60	39.10	35.80	14.00	5.00	6.20	32.97
R-JGR-F9	H1	1.27	10.07	6.57	5.29	1.28	8.12	27	31.45	57.80	23.60	7.10	4.80	6.60	53.57
R-JGR-F9	H2	1.32	15.58	7.15	5.83	1.32	9.06	26	50.09	52.20	21.70	7.90	9.20	9.00	40.65
R-JGR-F9	H3	1.42	17.75	7.09	5.63	1.46	8.89	18	47.32	28.50	10.60	8.70	12.60	39.50	19.83
R-JGR-F10	H1	1.30	13.64	6.86	5.98	0.88	8.16	18	42.15	53.40	25.90	6.90	3.80	10.00	50.07
R-JGR-F11	H1	0.51	95.97	5.30	4.27	1.03	9.72	16	95.82						
R-JGR-F11	H2	0.42	131.28	5.29	4.78	0.51	10.43	14	99.44						
R-JGR-F11	H3	0.84	18.46	4.94	5.05	-0.11	10.37	11	99.52						
R-JGR-F11	H4					0.00									
R-JGR-F12	H1	0.96	37.22	5.50	4.72	0.78	7.99	33	65.71						
R-JGR-F12	H2	0.76	53.09	5.85	5.47	0.38	8.97	33	79.23						
R-JGR-F13	H1	1.37	8.08	6.66	5.78	0.88	8.28	24	39.75	60.20	24.60	7.70	2.80	4.60	57.65
R-JGR-F14	H1	1.39	17.84	6.70	5.76	0.94	8.49	24	40.75	48.20	29.50	12.90	6.10	3.40	42.93
R-JGR-F14	H2	1.23	16.80	6.95	5.60	1.35	8.74	21	38.25	27.10	21.90	11.50	12.30	27.20	17.70
R-JGR-F15	H1	1.22	23.92	6.10	5.18	0.92	8.10	20	61.39	69.80	21.00	5.50	1.90	1.70	68.27
R-JGR-F15	H2	0.82	56.68	6.18	5.36	0.82	9.09	16	74.99	71.60	18.70	7.00	1.60	1.10	70.09
R-JGR-F15	H3	0.95	51.80	6.31	5.71	0.60	10.17	16	91.58	47.10	26.10	17.10	7.00	2.70	30.79
R-JGR-F16	H1	0.81	69.54	5.13	4.25	0.88	8.37	36	89.16						
R-JGR-F16	H2	0.50	133.40	5.04	4.36	0.68	9.24	29	98.47						
R-JGR-F16	H3	0.51	131.07	4.98	5.03	-0.05	9.18	18	99.33						
R-JGR-F16	H4	0.40	160.21	5.25	5.22	0.03	8.95	17	99.67						
R-JGR-F16	H5	0.56	119.66	4.85	5.24	-0.39	9.95	16	99.59						
R-JGR-F16	H6	0.58	110.81	4.83	5.25	-0.42	9.95	21	99.60						
R-JGR-F16	H7	0.63	103.81	4.76	5.45	-0.69	10.13	11	99.79						

N° Fosse	Hz	Da	HP (%)	pH eau	pH KCl	Δ pH	pH NaF (2min)	CE (μS/cm)	P. rétention %	Argiles (Avec U-S)	Limons fins (Avec U-S)	Limons grossiers (Avec U-S)	Sables fins (Avec U-S)	Sables grossiers (Avec U-S)	Argiles (sans U-S)
R-JGR-F17	H1	0.54	59.83	4.87	3.73	1.14	8.03	22	96.21						
R-JGR-F17	H2	0.52	95.18	4.95	4.62	0.33	10.13	11	99.30						
R-JGR-F17	H3	0.50	111.98	4.95	5.07	-0.12	10.53	8	99.70						
R-JGR-F17	H4	0.63	89.37	4.93	5.36	-0.43	9.90	14	99.54						
R-JGR-F17	H5	0.72	68.75	4.95	5.51	-0.56	9.95	15	98.92						
R-JGR-F18	H1	0.61	25.23	5.52	4.56	0.96	8.63	58	39.45						
R-JGR-F18	H2	0.57	67.34	5.27	4.28	0.99	7.72	20	40.15						
R-JGR-F18	H3	0.57	67.34	4.80	3.85	0.95	7.85	18	38.95						
R-JGR-F18	H4			4.85	3.97	0.88	8.53	20	93.84						
R-JGR-F18	H5	0.69	76.38	4.86	4.99	-0.13	10.85	11	99.56						
R-JGR-F19	H1	0.74	50.71	5.67	4.93	0.74	10.66	13	99.55						
R-JGR-F19	H3	0.44	121.77	4.85	4.98	-0.13	10.09	14	99.72						
R-JGR-F19	H4	0.72	76.09	4.98	5.34	-0.36	9.52	11	99.40						
R-JGR-F19	H5	0.70	70.48	5.36	5.65	-0.29	9.99	14	98.66						
R-JGR-F20	H1	0.79	67.59	6.11	4.99	1.12	10.24	29	99.10						
R-JGR-F20	H2	0.44	143.39	5.36	5.19	0.17	10.28	17	99.74						
R-JGR-F20	H3	0.49	128.77	4.56	5.25	-0.69	10.09	27	99.70						
R-JGR-F20	H4	0.59	89.09	4.58	5.43	-0.85	9.93	32	99.69						
R-JGR-F20	H5	0.64	73.67	4.57	5.50	-0.93	9.18	35	99.16						
R-JGR-F20	H6	0.78	49.55	4.91	5.51	-0.60	9.48	32	97.64						
R-JGR-F21	H1	1.14	22.74	4.86	4.11	0.75	8.67	21	78.79	46.50	27.70	9.20	7.70	8.90	39.62
R-JGR-F21	H2	0.82	53.30	6.08	5.85	0.23	9.00	33	93.04	56.00	15.20	11.20	14.70	2.80	13.85
R-JGR-F21	H3	0.93	50.45	6.14	6.00	0.14	8.51	20	88.43	66.20	21.70	7.50	3.00	1.60	26.26
R-JGR-F22	H1	1.16	24.84	6.41	5.03	1.38	8.42	13	66.06	51.80	28.20	12.00	3.20	4.80	37.32
R-JGR-F22	H2	0.95	41.39	6.12	5.69	0.43	9.21	20	90.90	62.60	17.60	12.90	5.20	1.70	16.43

N° Fosse	Hz	Limons fins (sans U-S)	Limons grossiers (sans U-S)	Sables fins (sans U-S)	Sables grossiers (sans U-S)	MO %	Corg. %	Ntot. ‰	C/N	Al éch KCl cmol.kg ⁻¹	H éch KCl cmol.kg ⁻¹	Ca éch cmol.kg ⁻¹	Mg éch cmol.kg ⁻¹	K éch cmol.kg ⁻¹	Na éch cmol.kg ⁻¹
R-JGR-F1	H1					17.41	10.10	6.61	15.28	0.05	0.06	1.00	0.46	0.47	0.05
R-JGR-F1	H2					11.54	6.69	3.68	18.20	0.01	0.01	0.17	0.16	0.12	0.04
R-JGR-F1	H3					11.60	6.73	3.60	18.71	0.01	0.01	0.09	0.09	0.09	0.03
R-JGR-F1	H4					10.53	6.11	3.15	19.37	0.02	0.01	0.10	0.05	0.06	0.04
R-JGR-F1	H5					9.43	5.47	2.83	19.31	0.01	0.01	0.05	0.05	0.15	0.05
R-JGR-F1	H6					4.08	2.37	1.33	17.77	0.01	0.01	0.05	0.04	0.31	0.14
R-JGR-F1	H7					2.08	1.21	0.65	18.63	0.32	0.06	0.20	0.13	0.11	0.47
R-JGR-F2	H1					16.33	9.47	5.67	16.71	0.19	0.10	1.69	0.22	0.30	0.07
R-JGR-F2	H2					14.87	8.62	4.57	18.89	0.08	0.01	0.54	0.08	0.35	0.04
R-JGR-F2	H3					10.12	5.87	3.52	16.70	0.04	0.01	0.35	0.29	0.24	0.03
R-JGR-F2	H4					10.17	5.90	3.12	18.88	0.04	0.01	0.05	0.06	0.16	0.02
R-JGR-F2	H5					8.05	4.67	2.75	16.96	0.06	0.01	0.09	0.05	0.06	0.05
R-JGR-F2	H6					8.68	5.04	2.20	22.87	0.01	0.01	0.04	0.05	0.04	0.02
R-JGR-F3	H1	27.27	27.83	22.85	10.48	6.70	3.89	3.97	9.78			5.07	1.64	0.33	0.08
R-JGR-F3	H2	4.85	9.76	26.46	58.59	2.51	1.45	1.26	11.56			2.68	0.76	0.07	0.34
R-JGR-F3	H3	9.99	20.54	42.25	20.24	1.51	0.87	0.55	15.84			3.75	0.70	0.04	1.42
R-JGR-F4	H1	24.83	12.87	4.35	9.51	3.96	2.30	1.94	11.86			5.12	3.73	2.00	0.28
R-JGR-F4	H2	25.20	14.12	5.10	6.59	0.80	0.46	0.42	10.88			3.93	3.31	3.98	0.94
R-JGR-F5	H1					19.53	11.33	6.87	16.49			10.59	3.23	0.63	0.15
R-JGR-F5	H2					2.49	1.44	1.02	14.20			1.27	0.79	0.14	0.46
R-JGR-F5	H3					1.11	0.65	0.45	14.40			2.63	2.06	0.30	0.75
R-JGR-F5	H4					1.60	0.93	0.59	15.84			1.41	0.85	0.11	0.22
R-JGR-F6	H1					6.80	3.94	2.93	13.47	1.37	0.75	4.83	2.63	2.00	0.22
R-JGR-F6	H2					1.86	1.08	0.72	15.06	7.51	1.61	1.90	0.96	0.65	0.54
R-JGR-F6	H3					2.19	1.27	0.90	14.19	5.49	1.29	0.91	0.69	0.18	0.49
R-JGR-F6	H4					2.58	1.50	0.95	15.76	2.43	0.73	0.35	0.35	0.11	0.41
R-JGR-F6	H5					3.51	2.04	1.32	15.47	0.47	0.28	0.21	0.17	0.06	0.62
R-JGR-F6	H6					2.95	1.71	1.03	16.59	0.13	0.05	0.20	0.20	0.05	0.66
R-JGR-F6	H7					2.38	1.38	0.88	15.77	0.21	0.13	0.10	0.37	0.10	0.51

N° Fosse	H _z	Limons fins (sans U-S)	Limons grossiers (sans U-S)	Sables fins (sans U-S)	Sables grossiers (sans U-S)	MO %	Corg. %	Ntot. ‰	C/N	Al éq KCl cmol.kg ⁻¹	H éq KCl cmol.kg ⁻¹	Ca éq cmol.kg ⁻¹	Mg éq cmol.kg ⁻¹	K éq cmol.kg ⁻¹	Na éq cmol.kg ⁻¹
R-JGR-F7	H1	35.94	11.04	6.51	8.19	3.96	2.29	2.10	10.94			7.08	2.40	2.34	0.12
R-JGR-F7	H2	38.40	13.80	4.75	5.58	3.67	2.13	1.99	10.72			9.11	2.55	1.66	0.12
R-JGR-F7	H3	37.98	14.09	4.99	4.94	3.60	2.09	1.97	10.62			8.04	2.53	1.20	0.19
R-JGR-F8	H1	38.36	16.20	5.19	7.29	6.91	4.01	3.49	11.48			28.04	5.62	1.59	0.23
R-JGR-F9	H1	23.21	9.24	6.64	7.34	3.52	2.04	1.60	12.78			14.41	6.18	0.79	0.91
R-JGR-F9	H2	19.30	10.72	11.61	17.71	0.76	0.44	0.36	12.03			15.93	8.36	1.64	1.67
R-JGR-F9	H3	9.10	9.16	14.67	47.25	0.38	0.22	0.22	9.99			15.69	7.80	1.01	2.72
R-JGR-F10	H1	26.47	7.07	5.05	11.33	4.24	2.46	2.41	10.19			13.48	3.67	2.07	0.11
R-JGR-F11	H1					29.27	16.98	15.49	10.96	1.61	0.49	2.05	0.52	0.16	0.06
R-JGR-F11	H2					15.69	9.10	6.06	15.02	0.14	0.04	0.05	0.06	0.07	0.04
R-JGR-F11	H3					8.76	5.08	3.06	16.60	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.03
R-JGR-F11	H4														
R-JGR-F12	H1					5.99	3.47	3.19	10.90	0.01	0.06	5.45	1.98	0.47	0.31
R-JGR-F12	H2					1.94	1.13	1.18	9.57	0.01	0.01	5.15	1.29	0.06	0.88
R-JGR-F13	H1	26.89	7.24	3.56	4.66	3.33	1.93	1.77	10.90			15.05	5.55	0.27	0.31
R-JGR-F14	H1	28.39	12.77	7.46	8.45	3.33	1.93	1.64	11.77			5.37	2.18	2.40	0.32
R-JGR-F14	H2	17.61	11.62	13.88	39.20	0.52	0.30	0.23	12.99			5.86	1.74	2.82	0.87
R-JGR-F15	H1	13.66	0.11	13.34	4.62	5.31	3.08	2.69	11.47			7.06	2.77	1.76	0.20
R-JGR-F15	H2	20.90	5.95	1.70	1.36	1.64	0.95	0.69	13.80			5.03	1.14	0.06	1.30
R-JGR-F15	H3	25.13	20.14	14.63	9.31	1.22	0.71	0.48	14.80			4.62	1.07	0.04	1.07
R-JGR-F16	H1					15.99	9.28	6.54	14.19	0.50	0.39	3.00	1.63	0.13	0.07
R-JGR-F16	H2					13.81	8.01	4.89	16.37	0.96	0.40	1.11	0.81	0.08	0.06
R-JGR-F16	H3					10.80	6.26	3.70	16.91	0.09	0.01	0.26	0.28	0.04	0.03
R-JGR-F16	H4					13.00	7.54	3.86	19.51	0.01	0.01	0.09	0.16	0.08	0.04
R-JGR-F16	H5					11.92	6.91	3.72	18.60	0.01	0.01	0.11	0.17	0.04	0.04
R-JGR-F16	H6					11.75	6.82	3.48	19.56	0.03	0.01	0.08	0.11	0.02	0.04
R-JGR-F16	H7					10.40	6.03	3.04	19.85	0.01	0.01	0.07	0.13	0.02	0.03

N° Fosse	Hz	Limons fins (sans U-S)	Limons grossiers (sans U-S)	Sables fins (sans U-S)	Sables grossiers (sans U-S)	MO %	Corg. %	Ntot. ‰	C/N	Al éch KCl cmol.kg ⁻¹	H éch KCl cmol.kg ⁻¹	Ca éch cmol.kg ⁻¹	Mg éch cmol.kg ⁻¹	K éch cmol.kg ⁻¹	Na éch cmol.kg ⁻¹
R-JGR-F17	H1					24.74	14.35	10.67	13.45	0.39	0.36	1.10	0.82	0.20	0.10
R-JGR-F17	H2					19.64	11.39	6.94	16.40	0.71	0.33	0.29	0.21	0.07	0.04
R-JGR-F17	H3					17.28	10.03	5.82	17.22	0.05	0.01	0.03	0.04	0.04	0.03
R-JGR-F17	H4					7.79	4.52	2.54	17.80	0.01	0.01	0.03	0.05	0.03	0.02
R-JGR-F17	H5					4.41	2.56	1.54	16.60	0.16	0.01	0.02	0.03	0.04	0.02
R-JGR-F18	H1					9.61	5.58	6.33	8.81	0.19	0.01	4.24	1.99	0.25	0.09
R-JGR-F18	H2					11.48	6.66	6.96	9.57	0.57	0.01	4.43	1.63	0.06	0.06
R-JGR-F18	H3					7.70	4.47	3.72	12.01	1.04	0.21	1.75	0.67	0.04	0.04
R-JGR-F18	H4					17.32	10.04	7.97	12.61	2.98	0.37	2.09	0.97	0.09	0.06
R-JGR-F18	H5					13.60	7.89	4.54	17.36	0.41	0.01	0.05	0.03	0.02	0.02
R-JGR-F19	H1					17.99	10.44	6.95	15.02	0.19	0.01	0.89	0.47	0.13	0.07
R-JGR-F19	H3					14.37	8.33	4.67	17.85	0.22	0.01	0.04	0.04	0.03	0.03
R-JGR-F19	H4					7.50	4.35	2.33	18.65	0.08	0.01	0.03	0.05	0.03	0.07
R-JGR-F19	H5					3.05	1.77	1.00	17.71	0.10	0.01	0.05	0.05	0.02	0.06
R-JGR-F20	H1					26.09	15.13	12.50	12.11	0.15	0.01	3.97	3.42	1.09	0.09
R-JGR-F20	H2					12.73	7.39	4.34	17.03	0.12	0.01	0.14	0.18	0.35	0.04
R-JGR-F20	H3					9.42	5.47	2.93	18.65	0.11	0.01	0.03	0.13	0.20	0.02
R-JGR-F20	H4					5.69	3.30	1.62	20.33	0.09	0.01	0.02	0.02	0.20	0.02
R-JGR-F20	H5					4.11	2.39	1.25	19.12	0.27	0.01	0.02	0.04	0.21	0.02
R-JGR-F20	H6					2.49	1.44	0.67	21.63	0.11	0.01	0.02	0.02	0.16	0.02
R-JGR-F21	H1	30.14	10.48	9.41	10.35	5.38	3.12	3.00	10.42	1.62	0.51	1.97	1.00	0.98	0.08
R-JGR-F21	H2	14.48	38.88	22.85	9.95	1.92	1.11	0.94	11.83	0.05	0.01	5.11	1.16	0.08	0.80
R-JGR-F21	H3	21.32	43.18	5.53	3.70	1.10	0.64	0.48	13.12	0.03	0.01	5.29	1.09	0.07	0.99
R-JGR-F22	H1	31.50	22.32	3.80	5.05	4.21	2.44	2.47	9.88			7.91	2.33	1.81	0.15
R-JGR-F22	H2	17.90	55.41	6.67	3.59	2.24	1.30	1.17	11.09			5.81	1.31	0.10	0.91

N° Fosse	H _z	Somme cmol.kg ⁻¹	CEC cmol.kg ⁻¹	TS %	Fe (CBD) ‰	Al (CBD) ‰	Si (CBD) ‰	Fe (ox.) ‰	Al (ox.) ‰	Si (ox.) ‰	DO	Fe (py.) ‰	Al (py.) ‰	θ à pF 4.2
R-JGR-F1	H1	1.99	51.27	3.88	87.23	44.09	5.15	38.30	70.00	18.74		31.97	23.97	39.0
R-JGR-F1	H2	0.49	51.99	0.94	83.40	47.59	6.71	31.24	77.56	22.20		15.74	14.45	40.1
R-JGR-F1	H3	0.30	56.59	0.52	73.79	48.07	8.15	18.27	76.00	22.28		3.80	10.18	54.9
R-JGR-F1	H4	0.26	50.03	0.52	87.92	48.47	7.12	18.08	74.43	21.39		1.96	8.66	48.5
R-JGR-F1	H5	0.30	48.21	0.62	89.15	44.93	5.27	23.77	72.37	21.72		2.61	7.36	52.3
R-JGR-F1	H6	0.53	27.66	1.91	87.16	41.15	10.63	40.14	35.87	9.41		5.47	7.10	52.2
R-JGR-F1	H7	0.90	21.69	4.15	100.79	20.63	5.43	20.89	13.49	3.13		5.40	4.64	28.4
R-JGR-F2	H1	2.27	57.09	3.98	67.14	37.39	4.69	32.42	69.02	20.89		26.95	20.32	41.50
R-JGR-F2	H2	1.00	67.45	1.48	82.26	47.16	4.87	30.01	78.13	22.86		18.00	16.71	45.50
R-JGR-F2	H3	0.91	55.41	1.65	69.45	39.01	6.47	14.69	71.78	23.65		2.64	8.93	45.10
R-JGR-F2	H4	0.29	54.01	0.54	89.77	48.75	6.35	18.87	73.01	23.85		2.46	9.25	41.10
R-JGR-F2	H5	0.25	52.37	0.47	102.83	45.06	7.75	16.97	68.89	23.46		1.45	7.36	43.20
R-JGR-F2	H6	0.14	54.85	0.26	103.61	53.39	6.85	24.84	71.19	22.45		1.50	7.39	40.50
R-JGR-F3	H1	7.14	26.43	27.00	102.87	28.79	6.90	13.52	13.33	2.93		5.31	5.40	25.10
R-JGR-F3	H2	3.84	20.46	18.78	117.80	34.53	9.38	15.64	16.48	5.40		1.81	2.75	26.60
R-JGR-F3	H3	5.91	23.33	25.33	104.72	20.16	4.23	9.19	7.20	2.27		2.22	1.35	35.20
R-JGR-F4	H1	11.13	22.05	50.49	67.52	7.89	3.92	5.95	4.18	1.32		0.91	1.02	25.10
R-JGR-F4	H2	12.15	27.18	44.71	56.07	6.78	3.53	5.41	4.60	1.35		0.17	0.60	31.10
R-JGR-F5	H1	14.60	50.19	29.09	90.14	30.98	6.99	33.96	30.17	7.41		29.83	17.98	38.80
R-JGR-F5	H2	2.65	40.77	6.49	108.23	33.65	16.18	20.67	29.70	13.82		1.56	3.38	27.30
R-JGR-F5	H3	5.74	21.74	26.38	91.18	14.75	13.12	15.95	13.76	5.60		1.34	2.63	23.40
R-JGR-F5	H4	2.59	35.79	7.23	117.08	38.57	18.88	21.78	53.36	29.47		0.83	3.52	30.80
R-JGR-F6	H1	9.68	41.69	23.21	60.04	11.75	5.32	21.18	10.98	1.96		15.92	8.07	27.70
R-JGR-F6	H2	4.05	40.07	10.10	51.08	10.57	5.61	17.24	9.94	1.75		6.83	5.01	21.60
R-JGR-F6	H3	2.26	26.71	8.46	58.84	12.36	5.55	17.05	10.63	2.10		9.84	7.20	24.20
R-JGR-F6	H4	1.22	28.28	4.30	67.38	20.83	8.68	11.87	15.68	4.41		14.16	15.45	35.40
R-JGR-F6	H5	1.06	35.87	2.94	82.51	27.92	10.77	16.68	23.58	8.91		11.66	9.97	37.40
R-JGR-F6	H6	1.11	25.87	4.28	94.24	32.34	12.07	20.41	26.11	10.68		2.58	4.62	33.40
R-JGR-F6	H7	1.07	23.01	4.65	103.45	26.24	10.73	19.06	19.00	7.61		2.40	3.83	32.30

N° Fosse	H _z	Somme cmol.kg ⁻¹	CEC cmol.kg ⁻¹	TS %	Fe (CBD) ‰	Al (CBD) ‰	Si (CBD) ‰	Fe (ox.) ‰	Al (ox.) ‰	Si (ox.) ‰	DO	Fe (py.) ‰	Al (py.) ‰	θ à pF 4.2
R-JGR-F7	H1	11.94	24.63	48.46	78.56	12.54	5.49	11.29	9.18	3.35		1.87	2.01	22.00
R-JGR-F7	H2	13.44	22.65	59.36	77.88	11.56	5.21	10.49	8.07	2.83		1.36	1.68	23.20
R-JGR-F7	H3	11.96	23.74	50.36	76.92	11.88	4.74	10.66	8.59	2.82		1.77	2.09	23.40
R-JGR-F8	H1	35.48	28.74	> 100	55.62	5.14	5.54	6.59	3.95	1.69		0.51	0.68	22.50
R-JGR-F9	H1	22.29	26.09	85.44	58.53	3.96	5.49	3.85	3.15	1.38		0.30	0.56	24.90
R-JGR-F9	H2	27.59	36.25	76.12	65.45	3.99	5.72	6.40	3.93	1.88		0.14	0.47	29.30
R-JGR-F9	H3	27.22	36.45	74.68	51.15	3.90	8.76	5.38	4.28	1.98		0.13	0.47	28.00
R-JGR-F10	H1	19.32	22.66	85.26	61.00	5.26	5.06	5.26	4.23	1.63		0.43	0.79	20.80
R-JGR-F11	H1	2.79	45.65	6.11	62.37	18.41	4.76	25.59	18.03	1.32	1.481	16.46	14.34	43.60
R-JGR-F11	H2	0.22	37.97	0.58	102.61	38.94	5.47	59.96	41.63	7.57	3.342	62.77	30.05	28.90
R-JGR-F11	H3	0.12	44.17	0.27	102.19	45.86	12.14	33.78	61.70	22.56	2.547	13.05	11.41	29.40
R-JGR-F11	H4													
R-JGR-F12	H1	8.20	22.37	36.67	92.78	15.20	3.16	7.22	5.14	1.19		3.08	1.74	29.30
R-JGR-F12	H2	7.38	19.82	37.25	94.68	15.74	3.59	8.10	5.24	1.68		0.64	0.75	35.70
R-JGR-F13	H1	21.18	22.77	93.00	57.72	5.68	5.53	5.53	3.67	1.56		0.40	0.57	18.80
R-JGR-F14	H1	10.27	19.97	51.43	44.70	4.62	3.63	4.11	3.63	1.09		0.53	0.85	21.20
R-JGR-F14	H2	11.29	19.80	57.04	28.56	3.47	4.54	4.21	3.62	1.45		0.18	0.45	21.50
R-JGR-F15	H1	11.79	24.42	48.28	75.93	13.41	3.35	6.67	6.08	1.80		2.78	1.86	28.10
R-JGR-F15	H2	7.52	23.11	32.52	81.80	15.12	3.46	7.06	5.77	1.63		1.86	1.33	32.20
R-JGR-F15	H3	6.80	23.76	28.63	74.85	22.13	8.38	6.16	16.10	7.40		1.24	2.47	28.80
R-JGR-F16	H1	4.83	36.09	13.37	62.14	6.79	3.47	42.29	6.48	1.22		45.00	5.79	30.20
R-JGR-F16	H2	2.06	39.29	5.24	122.28	21.78	2.84	86.18	24.98	3.59		93.32	20.72	26.70
R-JGR-F16	H3	0.61	95.27	0.64	73.71	43.17	8.32	15.63	71.63	23.30		4.30	10.23	45.60
R-JGR-F16	H4	0.36	85.37	0.42	119.81	57.37	6.89	31.58	69.32	19.60		7.46	12.13	46.50
R-JGR-F16	H5	0.35	85.87	0.41	108.52	54.07	7.66	28.36	67.57	19.97		4.79	10.51	33.10
R-JGR-F16	H6	0.25	79.87	0.31	161.26	57.01	6.35	54.82	56.63	13.81		14.00	12.14	48.60
R-JGR-F16	H7	0.24	84.87	0.29	90.13	57.42	7.89	17.41	72.12	22.65		2.91	9.95	43.50

N° Fosse	Hz	Somme cmol.kg ⁻¹	CEC cmol.kg ⁻¹	TS %	Fe (CBD) ‰	Al (CBD) ‰	Si (CBD) ‰	Fe (ox.) ‰	Al (ox.) ‰	Si (ox.) ‰	DO	Fe (py.) ‰	Al (py.) ‰	θ à pF 4.2
R-JGR-F17	H1	2.22	85.37	2.60	106.38	8.02	4.26	83.03	6.96	0.64	4.33	85.59	7.56	40.10
R-JGR-F17	H2	0.61	92.77	0.65	127.73	42.63	4.84	66.92	57.83	14.28	9.12	72.51	25.27	34.60
R-JGR-F17	H3	0.13	87.77	0.14	118.21	64.94	6.03	39.55	70.21	16.58	6.64	21.59	22.10	34.60
R-JGR-F17	H4	0.12	39.23	0.30	85.97	45.49	7.90	30.92	63.02	20.42	2.818	1.95	7.82	31.00
R-JGR-F17	H5	0.11	23.05	0.49	119.51	45.82	11.44	24.82	37.80	12.83	0.697	1.87	5.49	20.40
R-JGR-F18	H1	6.57	22.05	29.80	14.35	2.99	6.32	6.15	3.18	0.56	0.211	2.83	1.36	26.20
R-JGR-F18	H2	6.18	37.53	16.46	8.23	1.81	7.00	4.25	1.80	0.22	0.212	2.93	0.99	27.10
R-JGR-F18	H3	2.50	23.02	10.85	12.55	1.59	5.62	10.58	1.56	0.19	1.001	9.65	1.21	25.30
R-JGR-F18	H4	3.20	46.57	6.87	83.93	11.73	3.51	65.83	10.61	1.11	4.36	63.81	10.65	30.60
R-JGR-F18	H5	0.13	55.61	0.22	69.70	47.57	7.31	10.94	70.46	21.98	1.838	7.74	14.01	40.60
R-JGR-F19	H1	1.55	58.01	2.68	80.49	47.41	6.82	28.22	64.04	18.22		20.06	19.97	35.60
R-JGR-F19	H3	0.14	57.25	0.24	87.52	51.28	6.66	25.98	73.57	21.80		13.74	16.47	35.60
R-JGR-F19	H4	0.18	35.67	0.50	103.51	43.28	7.52	49.12	51.72	15.35		3.27	7.12	27.70
R-JGR-F19	H5	0.18	24.25	0.75	115.07	40.48	14.93	24.34	39.18	18.80		1.31	4.38	27.00
R-JGR-F20	H1	8.57	100.57	8.52	84.17	44.71	4.72	37.53	55.62	12.97		29.62	26.14	44.40
R-JGR-F20	H2	0.71	93.67	0.76	97.68	56.70	5.49	26.63	73.18	14.16		10.09	14.33	33.20
R-JGR-F20	H3	0.38	44.81	0.86	109.04	53.92	5.96	49.63	68.46	17.54		4.33	9.15	35.60
R-JGR-F20	H4	0.26	25.71	1.02	84.43	39.22	5.31	45.87	51.56	13.99		1.41	6.61	25.50
R-JGR-F20	H5	0.28	18.68	1.51	94.56	33.66	5.79	36.69	35.03	9.30		1.50	5.44	21.80
R-JGR-F20	H6	0.22	11.57	1.92	97.22	30.71	5.01	31.08	20.50	5.04		1.11	3.93	12.90
R-JGR-F21	H1	4.02	27.06	14.87	84.29	21.25	5.18	13.16	12.93	3.39		6.43	6.18	23.80
R-JGR-F21	H2	7.16	23.92	29.92	97.17	21.16	3.47	10.80	9.29	2.20		3.61	2.51	30.50
R-JGR-F21	H3	7.45	21.76	34.21	93.89	17.00	3.34	9.59	6.99	1.80		2.73	2.53	34.40
R-JGR F22	H1	12.20	27.67	44.09	75.84	13.56	3.51	12.63	8.38	2.35		2.68	2.52	24.90
R-JGR F22	H2	8.12	22.55	36.01	94.35	21.15	3.69	11.48	9.63	2.25		4.92	2.96	30.60