



Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA

Délimitation des entités hydrogéologiques de La Réunion

Rapport Final
Mise à jour BDLISA Version 0

BRGM/RP-63052-FR
Décembre 2013



Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA

Délimitation des entités hydrogéologiques de La Réunion

Rapport Final
Mise à jour BDLISA Version 0

BRGM/RP-63052-FR

Décembre 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM

**V. Petit, B. Aunay, JB. Charlier
R. Dufrenoy, N. Surdyk**

Vérificateur

Original signé par : D. Allier

Approbateur

Original signé par : S. Bes de Berc

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

**Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001**



Mots clés : Référentiel hydrogéologique, Système aquifère, Domaine hydrogéologique, La Réunion.

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

Petit V., Aunay B., Charlier JB., Dufrenoy R., Surdyk N. (2013) Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Année 4. Délimitation des entités hydrogéologiques de la Réunion. Rapport final BRGM/RP-63052-FR. 53 p., 10 f., 2 ann.

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le présent rapport est la mise à jour d'un travail réalisé en 2011 par Petit V. (RP-58199-FR) dans le cadre de la réalisation de BDRHF-V2. Cette mise à jour permet d'intégrer les entités hydrogéologiques décrites en 2010 à la version 0 du Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA (Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères).

Le projet a été confié en 2006 au BRGM par le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer. L'opération bénéficie du soutien financier des Agences de l'Eau, de l'ONEMA (2008-2009) et, antérieurement à 2008, du MEEDM. Il est mené sous la direction d'un comité de pilotage, dont le secrétariat est assuré par la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du MEEDM.

Pour La Réunion, il s'agit du premier référentiel hydrogéologique. Le découpage des entités a été réalisé au niveau régional (NV2) et au niveau local (NV3), conformément aux recommandations du guide méthodologique national édité en 2003 par le BRGM (BRGM/RP-52261-FR) et aux propositions faites en 2007 dans le cadre de l'actualisation de ce guide demandée par le comité de pilotage du référentiel.

Ce travail a permis d'identifier, de numériser et d'intégrer dans un SIG au format MAPINFO (V8.5) :

- 33 unités de niveau local ;
- 14 systèmes de niveau régional ;
- 6 entités classées en surcouches.

Le découpage effectué repose sur l'état des connaissances actuel et est susceptible de modifications en fonction de l'avancement des connaissances, notamment grâce aux forages qui pourraient être réalisés.

Ce référentiel hydrogéologique, grâce à une identification, une codification et une localisation précise des entités hydrogéologiques, met à la disposition de tous les utilisateurs, un cadre spatial de référence permettant :

- d'assurer la cohérence des études sur les ressources en eau souterraine,
- de consulter les informations associées aux entités hydrogéologiques,
- de faciliter l'échange de données,
- de rattacher sans ambiguïté des points d'eau à un aquifère, en particulier les points des réseaux de surveillance de la banque nationale ADES.

Ce travail est le résultat d'une concertation entre l'Office de l'eau, la DEAL de La Réunion, l'Université de La Réunion, un représentant des hydrogéologues agréés et le BRGM.

Les données du référentiel BDLISA V0 peuvent être téléchargées et exportées depuis le site du SANDRE (Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau) : <http://www.sandre.eaufrance.fr/>.

Les polygones sont proposés dans le format shapefile (ArcGis) et MIF/MID (MapInfo). Le téléchargement est réalisé avec les systèmes de projection en vigueur (lambert 93 en métropole, Corse et systèmes adéquats dans les départements d'Outremer), ils sont téléchargeables par entité, région ou par bassin.

Le référentiel BDLISA constituant un modèle 2D d'une réalité 3D des entités hydrogéologiques en France, il est difficile, voire impossible, de représenter « simplement » l'ensemble du référentiel BDLISA sur une interface cartographique.

Un accès cartographique a été adapté pour les utilisateurs de ce référentiel via <http://geotraitements.brgm.fr/viewer/bdlisa>. Cette interface cartographique permet différentes requêtes (recherche d'une entité par nom, code, départements...).

Avertissement

Ce rapport présente la version V0 du Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA qui succède au référentiel BDRHFV1.

Le référentiel national BDLISA résulte de l'assemblage des travaux menés depuis 2006 dans les différentes régions de France et dans les départements d'outre-mer (à l'exception du département de Mayotte, où la construction devrait être prévue en 2014). Il intègre aussi les entités hydrogéologiques du bassin Rhône-Méditerranée et Corse délimitées dans le cadre d'une synthèse hydrogéologique de ce bassin dont les bases ont été définies dès le début des années 2000.

Par rapport à la version précédente (version beta), parue en 2012, la version V0 du référentiel BDLISA intègre désormais les entités hydrogéologiques de niveau local du bassin Seine-Normandie avec des mises à jour des entités limitrophes de ce bassin, quelques corrections de contours et de libellés d'entités.

Ce rapport sera complété lors de la sortie de la version 1 du référentiel en tenant compte du travail réalisé en 2013 et des remarques formulées par les utilisateurs suite à la diffusion de la version Beta et de la version V0.

Enfin, au fur et à mesure de l'évolution du référentiel et des connaissances, il sera possible de mieux caractériser les entités, en particulier les parties profondes qui pourront alors être distinguées des parties superficielles si elles en diffèrent hydrogéologiquement : en effet, bien souvent, faute d'information, la nature attribuée à l'entité (à savoir aquifère ou non), reflète surtout les caractéristiques de cette entité dans la partie affleurante et à faible profondeur.

Sommaire

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 13 |
| 2 | Présentation du référentiel BDLISA..... | 17 |
| 2.1 | PRINCIPES DE CONSTRUCTION ET ASSEMBLAGE DES ENTITÉS | 17 |
| 2.1.1 | Principes de construction | 17 |
| 2.1.2 | Assemblage des entités | 17 |
| 2.1.3 | Adaptations de la méthodologie de 2003 dans la construction | 17 |
| 2.1.4 | BDLISA et le Dictionnaire de données SANDRE | 18 |
| 2.2 | PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU RÉFÉRENTIEL BDLISA..... | 18 |
| 2.3 | LES OBJETS DU RÉFÉRENTIEL | 19 |
| 2.3.1 | Les entités hydrogéologiques..... | 19 |
| 2.3.2 | Les niveaux d'utilisation des entités hydrogéologiques..... | 20 |
| 2.3.3 | Les "thèmes" des entités hydrogéologiques | 20 |
| 2.3.4 | L'attribut "Nature" des entités hydrogéologiques | 21 |
| 2.3.5 | L'attribut "Type de milieu" des entités hydrogéologiques | 23 |
| 2.3.6 | L'attribut "Etat" des entités hydrogéologiques..... | 24 |
| 2.3.7 | L'attribut "Origine de la construction" des entités hydrogéologiques | 25 |
| 2.4 | LE TABLEAU MULTI-EHELLES | 25 |
| 2.5 | LE MODÈLE DE REPRÉSENTATION DES ENTITÉS | 26 |
| 2.5.1 | Principes sous-jacents | 26 |
| 2.5.2 | Organisation des entités en 2 ensembles..... | 27 |
| 2.5.3 | Ordre absolu et ordre relatif..... | 28 |
| 3 | Méthodologie de délimitation des entités et assemblage par le modèle de gestion | 31 |
| 3.1 | PRINCIPES DIRECTEURS | 31 |
| 3.1.1 | Homogénéité du découpage | 31 |
| 3.1.2 | Emboîtement des niveaux..... | 31 |
| 3.2 | PRINCIPALES ÉTAPES DE LA DÉLIMITATION..... | 32 |
| 3.2.1 | Identification et cadrage hydrogéologique général | 32 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2.2 | De l'analyse des cartes géologiques au tableau multi-échelles | 32 |
| 3.2.3 | Individualisation de l'alluvial | 32 |
| 3.2.4 | Découpage des entités..... | 33 |
| 3.2.5 | Passage au modèle de gestion du référentiel..... | 33 |
| 3.2.6 | Organigramme | 34 |
| 4 | Mise en œuvre du découpage | 35 |
| 4.1 | DONNEES DE REFERENCE | 35 |
| 4.1.1 | Contexte scientifique | 40 |
| 4.1.2 | Méthodologie..... | 41 |
| 4.1.3 | Élaboration du tableau multi-échelles | 43 |
| 4.2 | DECOUPAGE DES ENTITES | 45 |
| 4.2.1 | Niveau 1 | 45 |
| 4.2.2 | Système aquifère du Nord (974AA)..... | 45 |
| 4.2.3 | Système aquifère de La Montagne (974AL) | 45 |
| 4.2.4 | Système aquifère de Bras-Panon (974AB)..... | 45 |
| 4.2.5 | Système aquifère de la plaine Est (974AE) | 46 |
| 4.2.6 | Système aquifère de Ste Rose St Philippe St Joseph (974AF)..... | 46 |
| 4.2.7 | Système aquifère de la plaine Sud (974AH) | 47 |
| 4.2.8 | Système aquifère de Pierrefonds Ravine Blanche (974AT) | 47 |
| 4.2.9 | Système aquifère des Makes Cocos Gol (974AG)..... | 47 |
| 4.2.10 | Système aquifère de la plaine ouest (974AW) | 48 |
| 4.2.11 | Système aquifère de St Gilles (974AJ) | 48 |
| 4.2.12 | Système aquifère de Saint-Paul La Possession (974AP)..... | 48 |
| 4.2.13 | Les systèmes aquifères des cirques (974AS, 974AC, 974AM) | 49 |
| 4.2.14 | Les unités "surcouche" | 49 |
| 5 | Limites des entités | 55 |
| 5.1 | LIMITES HYDRAULIQUES | 55 |
| 5.2 | NATURE DES CONTACTS ENTRE ENTITES | 55 |
| 6 | Outil de construction du référentiel | 59 |
| 6.1 | GÉODATABASE | 59 |
| 6.2 | FICHES D'ANALYSE DES ENTITÉS | 64 |
| 7 | Conclusions | 67 |
| 8 | Bibliographie | 69 |

Liste des illustrations

| | |
|---|----|
| Illustration 1 : Progression du référentiel sur le territoire métropolitain et dans les DOM | 15 |
| Illustration 2 – Types d'entités hydrogéologiques et codification | 21 |
| Illustration 3 – Liaisons possibles entre les entités hydrogéologiques | 24 |
| Illustration 4 – Structuration du référentiel : entités principales et complémentaires | 27 |
| Illustration 5 - Passage d'un ordre absolu à un ordre relatif dans la succession verticale des entités ... | 29 |
| Illustration 6 – Principe de construction d'une entité NV2 à partir d'entités NV3..... | 31 |
| Illustration 7 – Processus de délimitation des entités hydrogéologiques et de contrôle de la cohérence 3D de l'assemblage. | 34 |
| Illustration 8 -Légende de la carte géologique au 1/100 000 (2006) des illustrations 9 et 10 | 36 |
| Illustration 9 -Emplacement des communes et du réseau hydrographique sur fond géologique (voir légende Illustration 7)..... | 37 |
| Illustration 10 - Emplacement des sources, forages et puits sur fond géologique (voir légende Illustration 7)..... | 38 |
| Illustration 11 : Schéma conceptuel hydrogéologique selon le modèle canarien (Join et al., 1998 | 39 |
| Illustration 12: ACP avec représentation des points par secteurs géographiques | 42 |
| Illustration 13 : Carte des entités de niveau 2. | 51 |
| Illustration 14 : Carte des entités de niveau 3. | 52 |
| Illustration 15 : Les six unités classées en surcouche. | 53 |
| Illustration 16: Superposition des entités de niveau 2 et 3 avec les surcouches | 54 |
| Illustration 17 - Types de limites possibles entre entités. | 56 |
| Illustration 18 - Correspondances entre nature des contacts et limites hydrauliques..... | 57 |
| Illustration 19 - Accès à la géodatabase du référentiel par ArcMap..... | 59 |
| Illustration 20 - Tables non géométriques de la géodatabase..... | 60 |
| Illustration 21 - Interface utilisateur de la géodatabase. | 60 |
| Illustration 22 - Exemple de sélection d'une entité de niveau 3 via le menu général..... | 61 |
| Illustration 23 - Cartographie d'une entité de niveau 3 avec ses ordres de recouvrement (ordres relatifs). | 62 |
| Illustration 24 - Exemple de sélection (entités de niveau 3 et d'ordre 1). | 62 |
| Illustration 25 - Tables des limites : identifiants des limites d'entités..... | 63 |
| Illustration 26 - Table des limites : natures des contacts entre entités. | 63 |
| Illustration 27 - Éditeur de cartes du modèle de construction du référentiel..... | 64 |
| Illustration 28 - Exemple de fiche d'analyse d'une entité (partie gauche)..... | 65 |
| Illustration 29 : Exemple de fiche d'analyse d'une entité (partie droite) | 66 |

Liste des annexes

| | |
|--|----|
| Annexe 1 – Tableau Multi-échelles et tableau de correspondance avec les premiers codes régionaux | 71 |
| Annexe 2 - Lexique de caractérisation des entités..... | 73 |
| Annexe 3 - Etude fonctionnelle des aquifères littoraux de La Réunion | 77 |

1 Introduction

Ce travail s'inscrit dans le projet national de construction de la deuxième version du Référentiel Hydrogéologique Français BDRHF-V2, renommée BDLISA en 2008.

Le projet a été confié en 2006 au BRGM par le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer. L'opération bénéficie du soutien financier des Agences de l'Eau, de l'ONEMA (2008-2009) et, antérieurement à 2008, du MEEDM. Il est mené sous la direction d'un comité de pilotage, dont le secrétariat est assuré par la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du MEEDM.

La construction du référentiel a été planifiée sur 4 ans (illustration 1): elle a débuté en 2006 (2006-2007 est l'année 1 du projet, 2009-2010 est l'année 4). En année 5 une harmonisation, au niveau national, de l'ensemble des découpages régionaux a été réalisée. La présentation générale du référentiel, de ses principes de construction et de mise en œuvre est détaillée dans le rapport BRGM/RP-62261-FR, cité en bibliographie.

Un premier travail de type méthodologique (phase 1 de la construction), mené sur la période 2001-2003, a permis:

- de dresser une première liste d'entités hydrogéologiques à intégrer dans le référentiel. Ces entités ont été identifiées sur l'ensemble de la France à deux niveaux de représentation : un niveau national (grandes entités) et un niveau régional, subdivision des entités de niveau national ;
- de réaliser un premier découpage, indicatif, des entités identifiées ;
- de mettre au point une méthodologie de découpage sur la base de 6 tests réalisés sur le territoire de chacune des Agences de l'Eau (Rapport BRGM RP-52261-FR, 2004); d'élaborer un modèle conceptuel de données pour l'élaboration de la future base de données du Référentiel.

Les documents produits à l'issue de cette première phase sont listés en bibliographie.

Le référentiel hydrogéologique BDLISA succède au référentiel BDRHFV1 et remédie à certaines insuffisances de ce référentiel, en particulier :

- l'absence de représentation cartographique des entités non affleurantes, les structures multicouches des bassins sédimentaires en particulier ;
- le manque d'homogénéité et parfois de précision des découpages.

Il tient compte aussi de l'évolution des connaissances géologiques et hydrogéologiques, en particulier de l'harmonisation des cartes géologiques à l'échelle du 1/50 000^{ième}.

Le Référentiel BDLISA propose un découpage du territoire national (territoire métropolitain et départements d'outre-mer, à l'exception de Mayotte) en **entités hydrogéologiques** (formations géologiques aquifères ou non), délimitées à 3 niveaux de détail (national, régional et local) suivant des règles élaborées dans le cadre d'une méthodologie nationale.

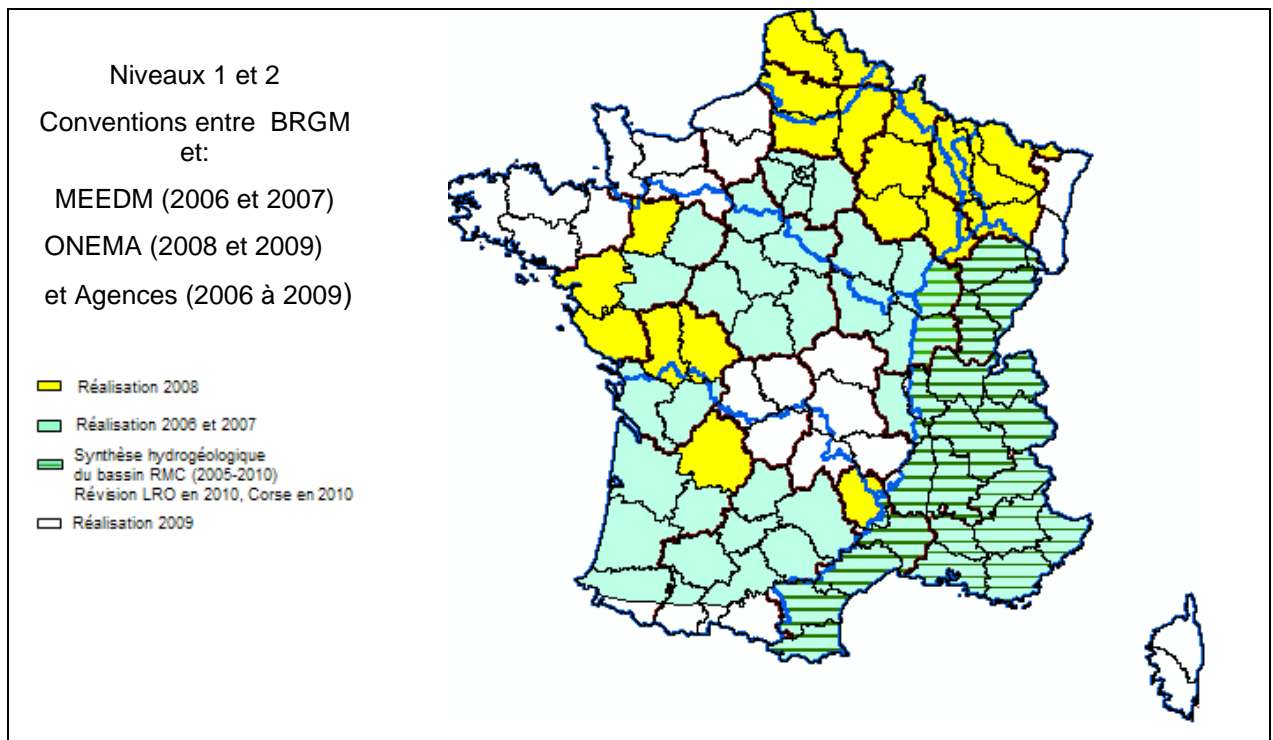
BDLISA se présente sous la forme d'un Système d'Information Géographique (SIG) dont la base de données contient les informations permettant de caractériser les entités hydrogéologiques.

Caractéristiques de la version 2 du Référentiel BDLISA

Cette deuxième version du référentiel hydrogéologique complète la version 1, en particulier en ce qui concerne :

- l'absence de hiérarchisation des entités hydrogéologiques ;
- l'absence de représentation cartographique des entités non affleurantes, les structures multicouches des bassins sédimentaires en particulier.

Le territoire national est découpé en entités hydrogéologiques (formations géologiques aquifères ou non) délimitées à 3 niveaux de détail - national (niveau 1), régional (niveau 2) et local (niveau 3) - suivant des règles élaborées dans le cadre d'une méthodologie nationale.



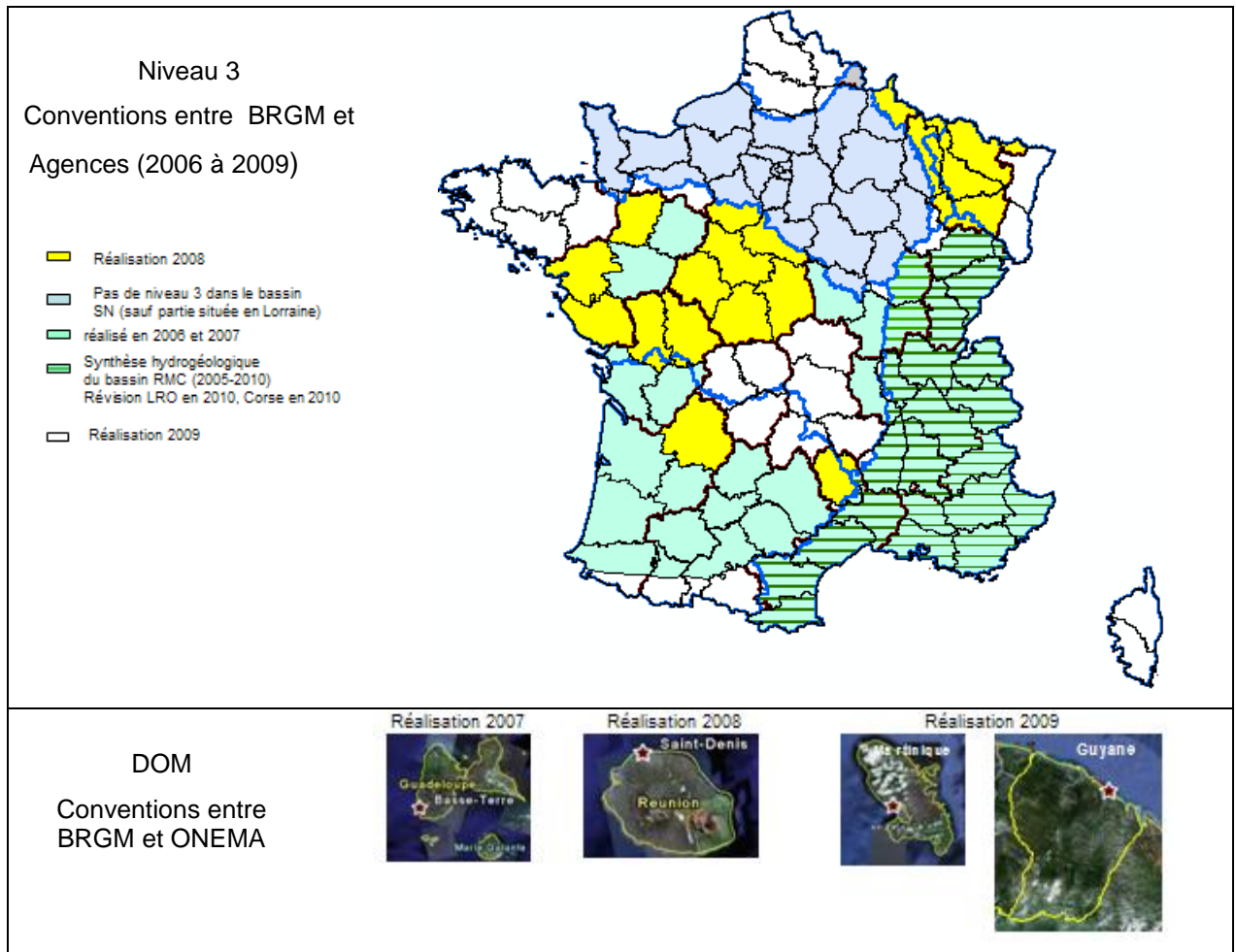


Illustration 1 : Progression du référentiel sur le territoire métropolitain et dans les DOM

Les entités hydrogéologiques sont rattachées à 5 "thèmes" correspondant à 5 grands types de formations géologiques :

- le sédimentaire (Bassin aquitain, Bassin parisien,...),
- le socle (Massif armoricain, Massif central,...),
- l'alluvial,
- le volcanisme,
- les formations intensément plissées (massifs montagneux).

Le référentiel se présentera sous la forme d'un Système d'Information Géographique (SIG) dont la base de données contiendra des informations permettant de caractériser les entités hydrogéologiques.

La Réunion

Ce rapport rend compte de la délimitation des entités hydrogéologiques de La Réunion. La délimitation des entités est réalisée aux 3 niveaux de détail du référentiel (national NV1, régional NV2 et local NV3) en conformité avec le guide méthodologique national (Rapport BRGM RP-52261-FR, 2004) et avec les propositions faites en 2007-2008 dans le cadre de l'actualisation de ce guide demandée par le comité de pilotage du Référentiel.

La Réunion est une île volcanique, située à 700 km à l'est de Madagascar, présentant une forme elliptique NW-SE et s'étendant sur 2500 km².

Le travail a été mené dans le cadre de la convention 2009 entre le BRGM et l'ONEMA et a bénéficié du soutien financier de l'ONEMA. Le découpage est le résultat d'une concertation entre l'Office de l'eau, la DEAL de La Réunion, l'Université de La Réunion, un représentant des hydrogéologues agréés et le BRGM.

2 Présentation du référentiel BDLISA

2.1 PRINCIPES DE CONSTRUCTION ET ASSEMBLAGE DES ENTITÉS

2.1.1 Principes de construction

La construction du référentiel repose sur les principes de base énoncés dans le guide méthodologique établi en 2003 (Rapport BRGM RP-52261-FR, 2003, page 11) :

- des règles de découpage sont définies pour **cinq thèmes principaux** : *Alluvial, Sédimentaire, Socle, Intensément plissé, Volcanisme* ;
- le découpage est **homogène** sur l'ensemble du territoire ;
- plusieurs échelles de visualisation sont prévues : **nationale** (1/1 000 000), **régionale** (1/250 000) et **locale** (1/50 000) ; à chacune de ces échelles, correspond un niveau de détail, respectivement : NV1 (niveau national), NV2 (niveau régional), NV3 (niveau local) ;
- le découpage des entités est réalisé sur la base des connaissances actuelles : le découpage est donc **susceptible d'évolution** ;
- l'échelle de travail est le **1/50 000** ;
- les entités hydrogéologiques sont représentées par un ou plusieurs polygones (certaines entités peuvent être disjointes) ; **les polygones sont composés d'arcs** correspondant aux limites d'extension de l'entité ; ils peuvent être caractérisés par un type de limite hydraulique ;
- **les entités sous couverture sont délimitées** ;
- une **nouvelle codification** est mise en place ; la norme de la codification a été conçue pour rester stable et être utilisée d'une manière durable.

2.1.2 Assemblage des entités

Le découpage a été réalisé à partir du niveau local (NV3), les entités régionales (NV2) étant constituées à partir des entités de niveau 3 et les entités du niveau national (NV1) constituées à partir des entités de niveau 2 (emboîtements successifs).

Une entité hydrogéologique a toujours une "entité mère" hormis pour le niveau national.

La mise au point d'un "**modèle de gestion du référentiel**" développé sous ArcGis a permis de réaliser l'assemblage 3D des entités dans un SIG et de contrôler la cohérence topologique de l'ensemble.

2.1.3 Adaptations de la méthodologie de 2003 dans la construction

Des contextes hydrogéologiques particuliers ou des contraintes opératoires ont parfois conduit à des adaptations de la méthodologie de découpage préconisée dans le guide de 2003, adaptations mentionnées dans ce rapport.

La différence majeure par rapport au guide de 2003 réside dans la distinction faite entre deux catégories d'entités (cf. § 2.5)

- les "**Entités principales**", qui ont fait l'objet d'un traitement topologique garantissant la cohérence de leur assemblage 3D ;

- les "**Entités complémentaires**", regroupant différents types d'entités qui ne permettent pas de respecter l'homogénéité du référentiel ou qui constituent des cas particuliers difficilement intégrables dans le cadre général du référentiel au stade actuel de son avancement (cf. § 2.5 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Il en est ainsi des systèmes alluvionnaires des 5 bassins du "projet national" pour lesquels il n'existe pas actuellement de différenciation entre parties productives et non productives. Ces systèmes très ramifiés sont extraits des cartes géologiques ; ils sont transverses par rapport aux entités principales qu'ils recouvrent et n'entrent pas dans les possibilités de traitements topologiques offerts par le modèle de gestion.

2.1.4 BDLISA et le Dictionnaire de données SANDRE

Le référentiel BDLISA est un outil du Système d'Information sur l'Eau (SIE) dont une tâche essentielle est la mise en place d'un langage commun pour les données sur l'eau. A cette fin, le Sandre (Service d'Administration Nationale des Données et des Référentiels sur l'Eau) est chargé :

- d'élaborer les dictionnaires des données, d'administrer les nomenclatures communes au niveau national, d'établir les formats d'échanges informatiques de données, de définir des scénarios d'échanges et de standardiser des services WEB,
- de publier les documents normatifs après une procédure de validation par les administrateurs de données Sandre.

Au référentiel BDLISA est donc associé un "*Dictionnaire des données*" (actuellement version 2.0 en cours de finalisation). Un scénario d'échange sera également disponible). Ce document a été élaboré dans le cadre d'un groupe de travail dont le secrétariat est assuré par le SANDRE et auquel ont participé l'ONEMA, les Agences de l'Eau, le BRGM.

2.2 PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU RÉFÉRENTIEL BDLISA

◆ Le référentiel est construit sur la base d'une subdivision du territoire (France métropolitaine et départements d'outre-mer) en **entités hydrogéologiques** (formations géologiques aquifères et non aquifères) délimitées suivant **3 niveaux de détail** (national, régional et local, cf. § 2.3.2) et regroupées dans **5 thèmes** (cf. § 2.3.3 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

◆ A la différence du référentiel BDRHFV1, **les parties non affleurantes des entités sont prises en compte.**

Sur la verticale, les entités sont ordonnées suivant un ordre croissant (ordre 1 pour les entités affleurantes, ordre 2 pour les entités situées juste au-dessous, ...). En Aquitaine, par exemple, il y a jusqu'à 32 "couches" d'entités sur la verticale).

Le numéro d'ordre qui est affecté aux entités permet de suivre la "progression" de chacune d'elles en profondeur et de la localiser en un point dans la "pile" des entités hydrogéologiques.

◆ Dans le référentiel, les épaisseurs ne sont pas prises en compte mais pourraient l'être ultérieurement. **Le modèle de représentation des entités est dit "2D1/2".**

◆ Le référentiel se présente sous la forme d'un **Système d'Information Géographique** (SIG) permettant :

- de visualiser les entités hydrogéologiques aux 3 niveaux de détail retenus pour le découpage ;
- d'obtenir des informations sur les entités grâce à la base de données associée.

Le système de projection cartographique est le **Lambert 93** (RGF93).

◆ La gestion du référentiel, à savoir:

- la vérification de la cohérence topologique de l'assemblage des entités,
- la mise en évidence et les corrections des anomalies éventuelles de découpage,
- les mises à jour, est assurée grâce à un ensemble de fonctionnalités développées en liaison avec ArcGis (version 9.2) et constituant le "**Modèle de gestion du Référentiel**".

◆ Le découpage des entités est réalisé sur la base des connaissances géologiques et hydrogéologiques actuelles. Des mises à jour (nouvelles entités de niveau 3, modifications des contours) sont donc susceptibles d'être effectuées pour tenir compte de la progression des connaissances.

2.3 LES OBJETS DU RÉFÉRENTIEL

2.3.1 Les entités hydrogéologiques

Une entité hydrogéologique est une partie de l'espace géologique, aquifère ou non aquifère, correspondant à un système physique caractérisé au regard de son état et de ses caractéristiques hydrogéologiques. Une entité hydrogéologique est :

- délimitée à une certaine échelle (un "**niveau**", cf. § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**),
- rattachée à un type de formation géologique (un "**thème**", cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**),
- définie par ses potentialités aquifères (une "**nature**", cf. § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et la présence ou non d'une nappe libre ou captive ou libre puis captive (un "**état**"),
- caractérisée par un type de porosité (un "**milieu**", cf. § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)

Les entités hydrogéologiques peuvent être multi-parties.

Le référentiel, assemblage dans les 3 dimensions d'espace des entités délimitées, peut être considéré comme un "**modèle hydrogéologique**" d'une réalité complexe, accessible à l'aide d'une information disponible à un moment donné et parfois interprétée faute de données suffisantes.

Codification de l'entité

Un code, attribué par le BRGM (arrêté du 26 juillet 2010, SNDE), est affecté à chaque entité. Il est construit avec :

- un champ de 3 chiffres pour une entité de niveau national,
- un champ de 2 lettres à la suite du champ précédent pour désigner une entité de niveau régional contenue dans une entité de niveau national,
- un champ de 2 chiffres à la suite des 2 champs précédents pour désigner une entité de niveau local contenue dans une entité de niveau régional.

Par exemple:

- **098** (entité de niveau national),
- **098AB** (entité de niveau régional),
- **098AB01, 118AC03** (entité de niveau local)

Dénomination de l'entité

En général, le libellé de l'entité hydrogéologique est construit en juxtaposant :

- la lithologie dominante de l'entité,
- son appartenance à un étage stratigraphique,
- sa localisation géographique.

Par exemple :

Sables verts de l'Albien du Bassin Parisien.

Mais ce n'est pas toujours le cas et l'appellation usuelle a été conservée. Par exemple la localisation précède parfois la stratigraphie (la localisation est associée à la lithologie) :

*Sables et Grès de Fontainebleau de l'Oligo-Miocène,
Calcaires de Brie du Rupélien,
Calcaires de l'Orléanais et de Pithiviers de l'Aquitaniens,
Calcaires d'Etampes du Rupélien.*

2.3.2 Les niveaux d'utilisation des entités hydrogéologiques

Trois niveaux d'identification des entités hydrogéologiques sont retenus dans cette nouvelle version du référentiel :

- le **niveau national (NV1)** fournit une représentation nationale des grands ensembles hydrogéologiques dont il montre la distribution spatiale et l'importance en tant que ressource quantitative. C'est le support d'études d'orientation à l'échelle nationale.
La gamme d'échelle d'utilisation cartographique est comprise entre le 1/500 000 et le 1/1 000 000.
- Le **niveau régional (NV2)** fournit une représentation régionale ou par bassin des entités hydrogéologiques (échelle de visualisation de l'ordre du 1/250 000). Il permet de caractériser les systèmes aquifères au regard de leur importance en tant que ressource régionale, de leur vulnérabilité (à la sécheresse, aux pollutions).
- Le **niveau local (NV3)** correspond à la représentation la plus détaillée du référentiel, à une échelle de l'ordre du 1/50 000. Il identifie l'ensemble des entités connues au sein des deux niveaux précédents. Il constitue le support d'études ponctuelles permettant d'améliorer les connaissances hydrogéologiques (carte piézométrique, carte de vulnérabilité, modélisation,...).

Ces niveaux d'utilisation reflètent les besoins très différents des futurs utilisateurs du référentiel. Ils ne définissent pas les échelles de numérisation (précision du contour) mais correspondent à des échelles d'utilisation et de représentation de l'information.

2.3.3 Les "thèmes" des entités hydrogéologiques

Le référentiel hydrogéologique est construit sur la base d'une subdivision du territoire en entités hydrogéologiques rattachées à cinq "thèmes" principaux :

- **thème "Alluvial"** (codé 1) : ensemble des dépôts de plaine alluviale accompagnés des terrasses connectées hydrauliquement avec les cours d'eau,
- **thème "Sédimentaire"** (codé 2) : ensemble des formations peu ou pas déformées, non métamorphisées des bassins sédimentaires,
- **thème "Socle"** (codé 3): formations magmatiques et métamorphiques,
- **thème "Intensément plissé de montagne"** (codé 4) : ensemble de formations géologiques récemment plissées appartenant aux massifs montagneux alpins, pyrénéens, languedociens et jurassiens.
- **thème "Volcanisme"** (codé 5) : volcanisme tertiaire et quaternaire ayant conservé une géométrie, une morphologie et/ou une structure volcanique identifiable,

Le **karst** est considéré comme un attribut applicable aux formations carbonatées des thèmes "sédimentaire" et "intensément plissé".

2.3.4 L'attribut "Nature" des entités hydrogéologiques

Dans le guide méthodologique de 2003, 7 types d'entités hydrogéologiques sont définis (= "Nature" de l'entité) :

- pour le niveau 1: Grand Système Aquifère et Grand Domaine Hydrogéologique,
- pour le niveau 2: Système Aquifère et Domaine Hydrogéologique,
- pour le niveau 3: unité aquifère, unité semi-perméable et unité imperméable.

Un 8^{ième} type d'entité a été ajouté à cette liste : au niveau 1, le Grand Système Multicouches, intégrant sur la verticale une alternance de Systèmes Aquifères et de Domaines.

| | Aquifère | | Peu ou pas aquifère |
|------------------------------|--|--------------------------------|---|
| Niveau national (NV1) | Grand Système Aquifère (GSA) Code = 1 | | Grand Domaine Hydrogéologique (GDH) Code = 2 |
| | Grand Système Multicouche (GSM) Code = 12 | | |
| Niveau régional (NV2) | Système Aquifère Code = 3 | | Domaine Hydrogéologique Code = 4 |
| Niveau local (NV3) | Unité aquifère Code=5 | Unité semi-perméable Code=6 | Unité imperméable Code=7 |

Illustration 2 – Types d'entités hydrogéologiques et codification

• Le Grand Système Aquifère

Le grand système aquifère est un système physique composé d'une ou plusieurs unités aquifères, globalement en liaison hydraulique et qui est circonscrit par des limites litho-stratigraphiques et/ou structurales. Le grand système aquifère est une entité de premier niveau (NV1).

- **Le Grand Domaine Hydrogéologique**

Le grand domaine hydrogéologique est un système physique peu ou pas aquifère. Il peut contenir des unités aquifères mais sans grande extension latérale et isolées dans le massif imperméable. Le grand domaine hydrogéologique est une entité de premier niveau (NV1).

- **Le Système Aquifère**

Le Système Aquifère est une entité hydrogéologique aquifère issue d'une subdivision verticale ou horizontale d'un grand système aquifère ou d'un grand domaine hydrogéologique. La subdivision s'effectue sur, **au moins** l'un des critères suivants : *lithologie, structure, stratigraphie, piézométrie, géochimie, hydraulique*.

La constitution des systèmes est issue de la connaissance à instant donné du milieu souterrain.

Le système aquifère est une entité de niveau régional NV2.

- **Le Domaine Hydrogéologique**

Un domaine hydrogéologique est une entité hydrogéologique peu aquifère issue d'une subdivision verticale ou horizontale d'un grand domaine hydrogéologique ou d'un grand système. La subdivision s'effectue sur, **au moins**, l'un critères suivants : *lithologie, structure, stratigraphie, piézométrie, géochimie, hydraulique*.

Le domaine hydrogéologique est une entité de niveau régional NV2.

- **L'unité aquifère**

L'unité aquifère est un système physique élémentaire présentant des conditions hydrodynamiques homogènes, suffisamment conductrice pour permettre la circulation de l'eau souterraine. Une unité aquifère est une entité hydrogéologique de niveau local présentant une perméabilité moyenne supérieure (ou supposée supérieure) à 10^{-6} m/s présentant des ressources en eau suffisante pour être exploitée.

L'unité aquifère est le résultat du découpage d'un système aquifère ou d'un domaine hydrogéologique (éventuellement directement d'un grand domaine ou d'un grand système aquifère).

- **L'unité semi-perméable**

Une unité semi-perméable est une entité hydrogéologique de niveau local avec une perméabilité moyenne comprise entre 10^{-9} m/s et 10^{-6} m/s. Cette unité peut contenir des ressources en eau mais sa productivité est insuffisante pour que ces ressources puissent être exploitées.

L'unité semi-perméable est le résultat du découpage d'un domaine hydrogéologique ou d'un système aquifère (éventuellement directement d'un grand domaine ou d'un grand système aquifère).

- **L'unité imperméable**

L'unité imperméable est un système physique élémentaire présentant des faibles circulations d'eau. Sa perméabilité moyenne est inférieure à 10^{-9} m/s.

La définition du dictionnaire hydrogéologique français est la suivante : qualifie un milieu théoriquement impénétrable et non traversable par un fluide et en pratique ne laissant passer aucun flux significatif sous un gradient de potentiel hydraulique donné.

L'unité imperméable est le résultat du découpage d'un domaine hydrogéologique ou d'un système aquifère (éventuellement directement d'un grand domaine ou d'un grand système aquifère).

Remarque : les unités du niveau local correspondent à la description la plus fine des entités hydrogéologiques pour le référentiel national.

Liaisons entre les entités

Les liens de filiation (illustration 3) en fonction des niveaux d'agrégation obéissent aux règles suivantes :

- une entité hydrogéologique appartient à une seule nature par niveau ;
- une entité hydrogéologique a toujours une "entité mère" hormis pour le niveau national ;
- une entité hydrogéologique peut avoir de 0 à n "entités filles" hormis pour les unités du niveau local.

2.3.5 L'attribut "Type de milieu" des entités hydrogéologiques

Il s'agit du type de porosité caractérisant majoritairement l'entité. Les différents types retenus sont définis dans le tableau suivant :

| Type de milieu | Code |
|---|-------------|
| Poreux | 1 |
| Fissuré | 2 |
| Karstique | 3 |
| Double porosité : matricielle et de fissures | 4 |
| Double porosité : karstique et de fissures | 5 |
| Double porosité : fractures et fissures | 6 |
| Double porosité : matricielle et de fractures | 7 |
| Double porosité : matricielle et karstique | 8 |
| Inconnu | 0 |

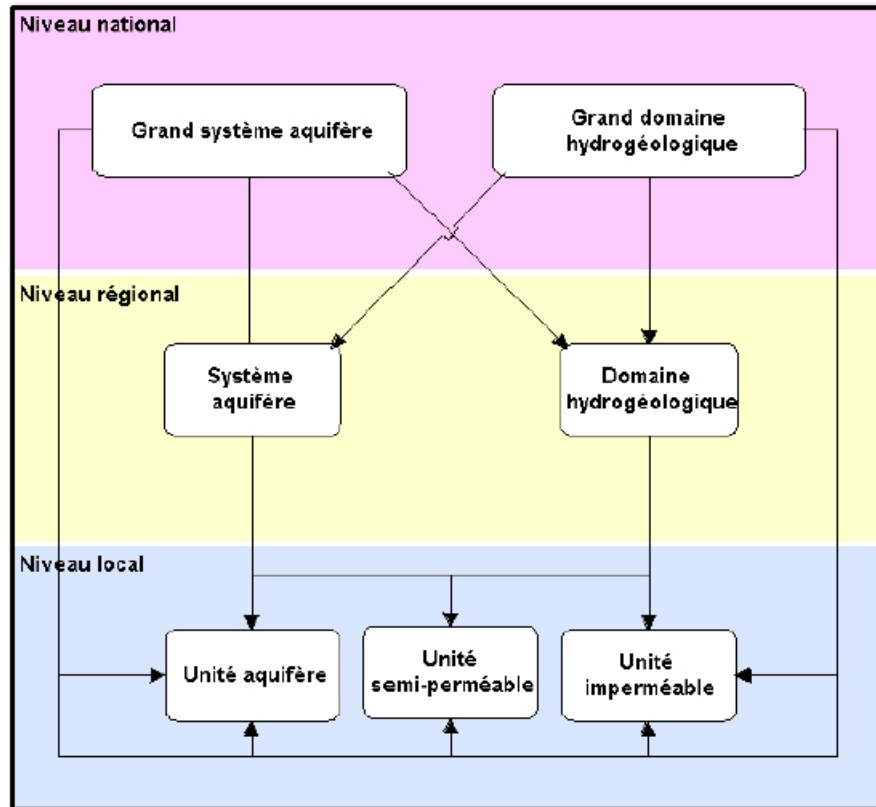


Illustration 3 – Liaisons possibles entre les entités hydrogéologiques

Le Grand Système Multicouches, non représenté sur ce schéma est une alternance sur la verticale de Grands Systèmes Aquifères et de Grands Domaines Hydrogéologiques.

La double porosité de code 4 est attribuée à une entité caractérisée à la fois par une matrice poreuse et par un réseau de fissures ayant tous deux un rôle hydrodynamique important (cas des aquifères de la craie).

La double porosité de code 5 est attribuée à une entité caractérisée à la fois par un réseau karstique et par un réseau de fissures ayant tous deux un rôle hydrodynamique important (cas des "chaînons" calcaires pyrénéens).

La double porosité de code 6 est attribuée à une entité caractérisée à la fois par des fractures et des fissures (cas de certaines entités volcaniques en Martinique).

La double porosité de code 7 est attribuée à une entité caractérisée à la fois par une matrice poreuse et par un réseau de fractures ayant tous deux un rôle hydrodynamique important.

La double porosité de code 8 est attribuée à une entité caractérisée à la fois par une matrice poreuse et par un réseau karstique ayant tous deux un rôle hydrodynamique important.

Remarque

La caractérisation des entités se fait d'abord au niveau 3. **Il ne sera pas toujours possible ou pertinent de caractériser globalement une entité de niveau 2 (et à fortiori de niveau 1) par un attribut unique**, surtout lorsque les entités de niveau 3

constitutives d'un niveau 2 sont de types différents; il en est ainsi du type de milieu (à porosité matricielle, de fissure, karstique, à double porosité) et de l'état de la nappe (libre, captive, ...).

Cela est vrai non seulement pour un niveau 2 résultant de l'assemblage d'entités de niveau 3 de même ordre absolu (dans le même "plan"), mais aussi résultant de l'agrégation d'entités NV3 superposées (d'ordres absolus différents), constituant un multicouches.

2.3.6 L'attribut "Etat" des entités hydrogéologiques

Le champ "Etat" du référentiel précise le statut de la nappe contenue dans les entités aquifères :

- la nappe est captive lorsqu'elle est confinée entre deux terrains peu ou pas perméables (code 1),
- la nappe est libre lorsqu'elle n'est pas limitée vers le haut par des terrains imperméables (code 2),
- la nappe est libre et captive lorsqu'elle est globalement libre ou captive mais comporte respectivement des parties captives ou libres à un ou plusieurs endroits de sa superficie (code 3),
- la nappe est alternativement libre puis captive lorsqu'elle présente des évolutions "libre / captive" au cours du temps (code 4),
- la nappe est semi- captive lorsqu'elle est caractérisée par un régime hydrodynamique intermédiaire entre les régimes captif et libre. Il s'agit généralement d'une entité sous couverture où le toit de l'entité présente des zones de perméabilité (semi-perméable) permettant des transferts des eaux (code 5).

2.3.7 L'attribut "Origine de la construction" des entités hydrogéologiques

Cet attribut permet de savoir comment une entité a été construite. Les cas possibles et les codes associés à cet attribut sont mentionnés dans le tableau suivant :

| Code | Libellé | Définition |
|------|-------------------------------------|--|
| 1 | Carte géologique ou hydrogéologique | L'ensemble des limites de l'entité hydrogéologique ont été créées en réutilisant les contours définis dans une ou plusieurs cartes géologiques ou hydrogéologiques ou documents de synthèse. |
| 2 | Complétude totale | Entité construite pour complétude topologique totale (l'ensemble des limites de l'entité du niveau d'utilisation n sont projetées vers un niveau n+1) pour combler un déficit de connaissance à la création de l'entité. |
| 3 | Complétude partielle | Entité construite pour complétude topologique complémentaire (une partie des limites de l'entité du niveau d'utilisation n sont projetées vers un niveau n+1 par déficit de la connaissance à la création de l'entité. |

| | | |
|---|-------------------------|--|
| 4 | Agrégation par héritage | L'ensemble des limites de l'entité hydrogéologique ont été héritées par agrégation des niveaux les plus fins la constituant. |
|---|-------------------------|--|

2.4 LE TABLEAU MULTI-ECHELLES

Dans un secteur donné, le tableau multi-échelles récapitule tous les types d'entités existant dans le secteur et les superpose verticalement suivant un ordre stratigraphique (Annexe 1). C'est en quelque sorte l'équivalent, au plan hydrogéologique, d'un log géologique synthétique régional. Il constitue le support du découpage projeté aux trois échelles d'identification des entités.

Les entités intégrées dans un tableau multi-échelles le sont après une phase d'analyse des cartes géologiques au 1/50 000, des données recensées dans la zone d'étude (notamment celles des logs géologiques validés) et de différentes sources documentaires.

La construction du référentiel ayant été faite sur 4 ans, par région et parfois par département, de nombreux tableaux multi-échelles ont été construits, ce qui a nécessité un travail de mise en correspondance et d'harmonisation des différents tableaux au fur et à mesure de la progression du référentiel.

Toute entité délimitée se retrouve dans le tableau multi-échelles. Le tableau est triple à raison d'un log hydro-stratigraphique par niveau (NV1, NV2 ou NV3).

Le tableau multi-échelles est l'élément structurant du référentiel et l'outil de base du découpage des entités.

2.5 LE MODÈLE DE REPRÉSENTATION DES ENTITÉS

Ce modèle de représentation a été mis au point dans le cadre de cette phase de construction du référentiel (2006-2009). La conceptualisation ne figure donc pas dans le guide méthodologique national de 2004.

2.5.1 Principes sous-jacents

Le « modèle de gestion du référentiel » a été développé sous ArcGis (actuellement version 9.31) et s'appuie sur un modèle conceptuel de données. Ce modèle conceptuel permet d'exploiter de façon optimale la base de données du référentiel sous ArcGis. La construction du référentiel est guidée par les 5 principes suivants.

1) Organisation des entités en "Entités principales" et "Entités complémentaires"

Les « **Entités principales** » font l'objet d'un traitement topologique qui garantit la cohérence de leur assemblage à trois dimensions (3D).

Les « **Entités complémentaires** » regroupent différents types d'entités qui sont telles qu'elles ne permettent pas de respecter l'homogénéité du référentiel ou qui constituent des cas particuliers difficilement intégrables dans le cadre général du référentiel :

- systèmes alluvionnaires (transverses par rapport aux entités principales),
- formations superficielles, hétérogènes et morcelées,

- altérites cartographiées des zones de socle,
- systèmes karstifiés délimités par des traçages...

Ces entités complémentaires constituent une **surcouche du référentiel**.

Cette structure du référentiel est résumée par l'illustration 4 ci-après.

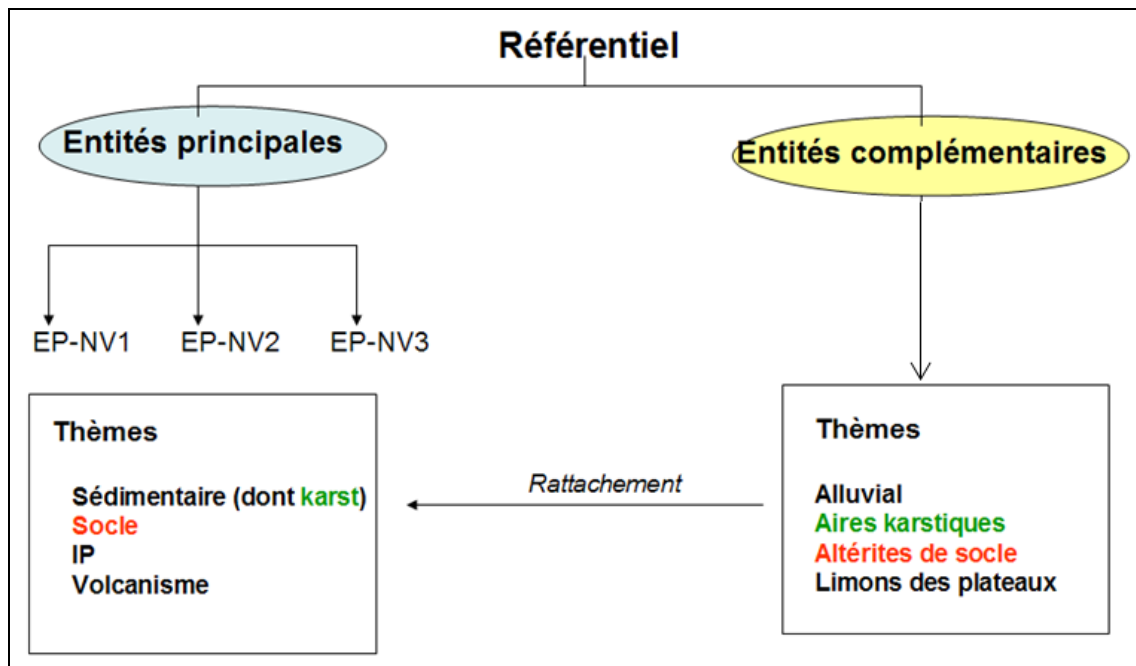


Illustration 4 – Structuration du référentiel : entités principales et complémentaires

2) Ordonnancement vertical des entités en définissant un ordre de superposition

Le modèle de gestion permet de passer d'un ordre dit absolu à un ordre dit relatif (cf. § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

3) Complétude

Couverture totale de l'espace aux niveaux 1 et 2. Au niveau 3, la couverture n'est totale que dans le "projet national" ; dans le bassin Rhône-Méditerranée et Corse, les entités de niveau 3 délimitées dans le cadre de la synthèse hydrogéologique correspondent uniquement aux aquifères.

4) Filiation

Une entité NV3 est rattachée à une entité NV2 qui l'inclut et qui est-elle même rattachée et incluse dans une entité NV1.

5) Héritage

Il découle de 4) : c'est l'héritage des limites (et des attributs si cela est pertinent) du niveau 3 vers le niveau 2 puis vers le niveau 1.

2.5.2 Organisation des entités en 2 ensembles

1) Entités principales

Elles constituent l'essentiel du référentiel. Elles sont :

- différenciées et délimitées suivant les règles du guide méthodologique,

- structurées et assemblées suivant les principes généraux 2 à 5 ci-dessus.

Les fonctionnalités topologiques du modèle de gestion permettent de contrôler la cohérence de l'assemblage 3D de ces entités. Les artefacts de découpage peuvent être mis en évidence et corrigés automatiquement.

2) Entités complémentaires

Elles constituent une « surcouche » du référentiel. Elles regroupent différents types d'entités qui sont telles qu'elles ne permettent pas de respecter l'homogénéité du référentiel ou qui constituent des cas particuliers difficilement intégrables dans le cadre général du référentiel (voir la liste du paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Ces entités peuvent se superposer aux 3 niveaux du découpage du référentiel. Un code commun permet de les rattacher éventuellement aux entités principales dont elles sont issues (exemple « altérites de socle » et « entités socle ») ou sur lesquelles elles reposent.

Une entité principale située sous une entité complémentaire (par exemple des alluvions) sera d'ordre 1 comme une entité affleurante.

2.5.3 Ordre absolu et ordre relatif

Dans la phase de construction du référentiel, un numéro d'ordre est affecté à chaque entité délimitée (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.a**). Cet ordre est dit "absolu" (codé par exemple sous la forme 10, 20, 30, 40,...) et peut correspondre à un âge stratigraphique.

La délimitation des entités conduit à une "pile hydro-stratigraphique" d'entités (le tableau multi-échelles) qui sont ordonnées sur la verticale grâce au numéro d'ordre absolu (par exemple 10, 20, 30,**Erreur ! Source du renvoi introuvable.a**).

Le modèle de gestion du référentiel permet de passer automatiquement du mode de représentation des entités par ordonnancement absolu (illustration 5b) à un mode de représentation des entités par ordonnancement relatif (illustration 5c), **qui est celui de la représentation des entités dans le SIG** et qui correspond à l'ordre réel de superposition des entités dans une coupe verticale qui pourrait être réalisée dans le référentiel.

- Le numéro d'ordre relatif permet d'identifier les différents niveaux de recouvrement d'une entité donnée, entité qui sera par exemple constituée :
- d'un polygone d'ordre relatif 1, c'est-à-dire à l'affleurement,
- d'un polygone d'ordre relatif 2, correspondant au recouvrement de l'entité par une autre entité E_j ,
- d'un polygone d'ordre relatif 3, correspondant au recouvrement de l'entité par une entité E_k , elle même sous une entité E_n ,
- etc.

Remarque: dans l'exemple présenté par l'illustration 5**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, les entités sont constituées d'une partie affleurante et d'une partie sous couverture, réunies lors de la phase de délimitation. **Le modèle de gestion restitue automatiquement les parties sous couverture.**

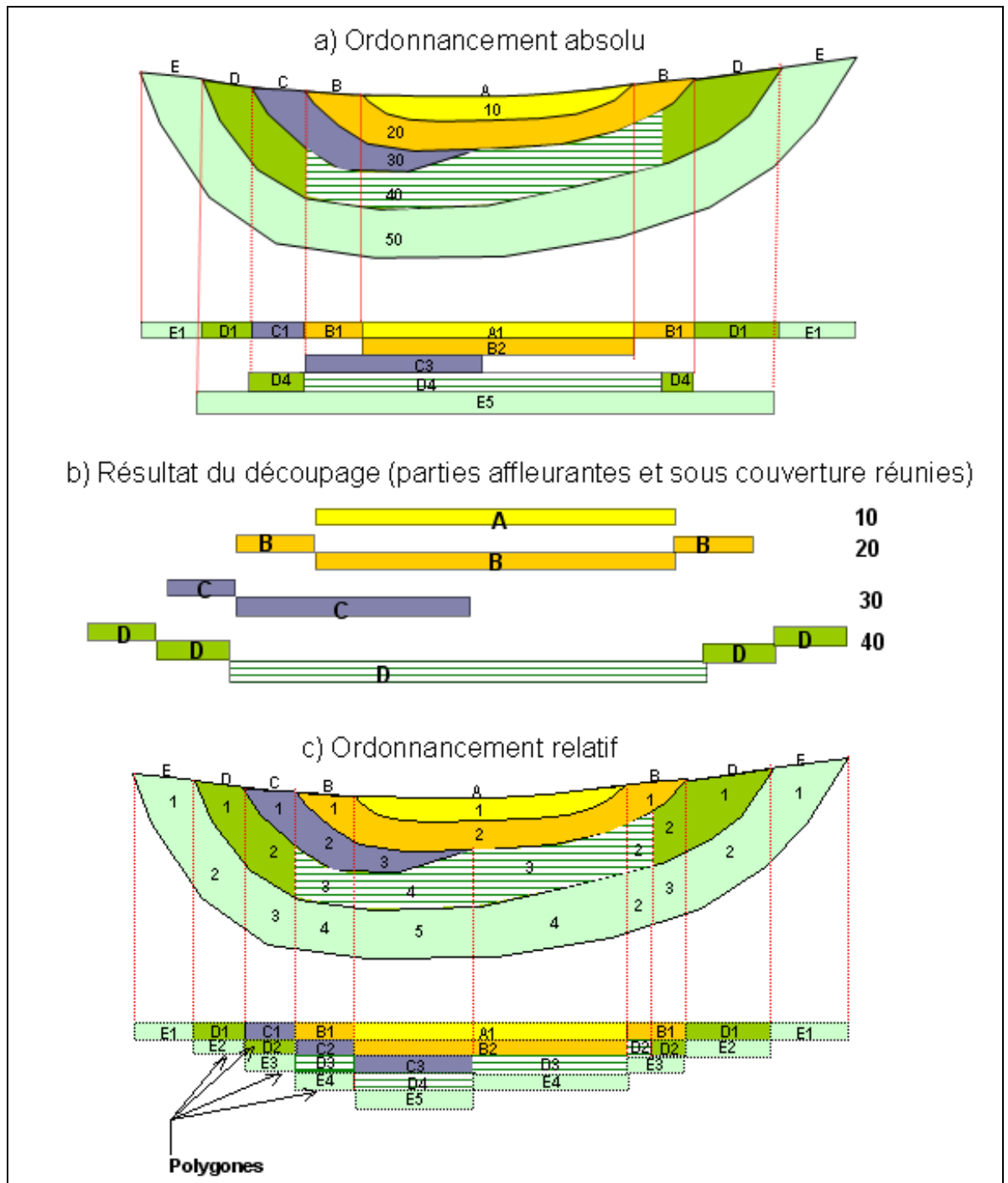


Illustration 5 - Passage d'un ordre absolu à un ordre relatif dans la succession verticale des entités

3 Méthodologie de délimitation des entités et assemblage par le modèle de gestion

3.1 PRINCIPES DIRECTEURS

3.1.1 Homogénéité du découpage

Le découpage doit être homogène sur l'ensemble du territoire. Pour chaque thème, les critères de découpage sont communs à l'ensemble des régions.

L'échelle de travail adoptée pour le découpage des entités est le 1/50 000 (précision des contours des formations géologiques des cartes géologiques au 1/50 000), et ceci quel que soit le niveau d'identification: local (niveau 3, "NV3"), régional (niveau 2, "NV2") et national (niveau 1, "NV1"). Les contours des entités des niveaux 1 et 2 ont donc la même précision que ceux du niveau 3, à savoir le 1/50 000 : il n'y a pas de simplification des contours (lissage) d'un niveau à un autre.

C'est aussi le cas des systèmes alluvionnaires, quel que soit le niveau, contrairement au guide méthodologique de 2003 (cf. références bibliographiques) qui préconisait, pour les niveaux 1 et 2, la suppression des "bras" de largeur inférieure à 200 m.

3.1.2 Emboîtement des niveaux

Les entités du niveau 1 résultent de l'assemblage de celles du niveau 2, ces dernières résultant elles-mêmes d'un regroupement des entités du niveau 3 (illustration 6). Cet assemblage est réalisé à partir du niveau 3 par le modèle de gestion du référentiel, qui contrôle aussi la cohérence de l'ensemble et signale les anomalies éventuelles.

Lorsque les entités de niveau 3 délimitées dans un niveau 2 ne permettent pas de reconstituer en totalité ce niveau 2 (car seules des entités d'intérêt ont été délimitées), le complément "NV2- Σ NV3" est ajouté par le modèle de gestion (cas du bassin Rhône-Méditerranée et Corse). Dans le référentiel, cette entité "virtuelle" est identifiée par l'intermédiaire de l'attribut "Origine" (complétude partielle ou totale, cf. tableau du § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

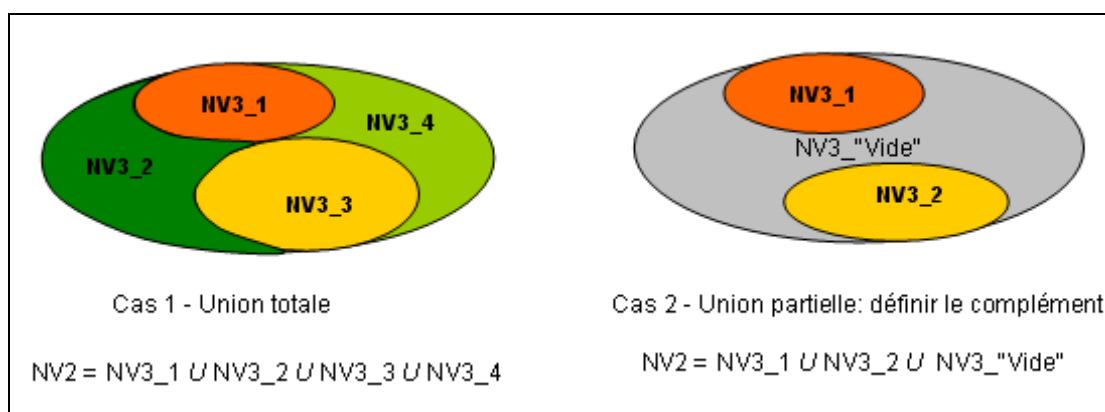


Illustration 6 – Principe de construction d'une entité NV2 à partir d'entités NV3

3.2 PRINCIPALES ÉTAPES DE LA DÉLIMITATION

3.2.1 Identification et cadrage hydrogéologique général

Le cadrage hydrogéologique consiste à identifier les grandes entités hydrogéologiques de niveau national et régional dans le secteur d'étude. Les tests de découpage réalisés lors de la phase méthodologique d'élaboration du référentiel (rapport BRGM RP-53127, 2004) ont permis de dresser une première liste des entités aux niveaux 1 et 2, liste qui a été parfois complétée, voire modifiée, dans la phase de construction du référentiel.

3.2.2 De l'analyse des cartes géologiques au tableau multi-échelles

1) Analyse des cartes géologiques

Le découpage des entités hydrogéologiques **nécessite d'abord un recours aux cartes géologiques au 1/50000**. Lors de la construction du référentiel, celles-ci n'étaient pas toutes harmonisées (les formations géologiques ne sont pas toujours "jointives" d'une carte à une autre et peuvent être identifiées par des noms différents), un important travail d'harmonisation préalable a parfois été nécessaire (Aquitaine, Pays de Loire). **La délimitation proprement dite (création de contours) s'effectue ensuite sur des critères lithologiques et hydrogéologiques.**

2) Constitution de la base de données associée au référentiel

Cette base intègre tous les éléments numérisés nécessaires au travail de délimitation: cartes géologiques (vecteurs et rasters), référentiel hydrographique (BD-Carthage), forages avec logs descriptifs, masses d'eau, version 1 du référentiel,

3) Rattachement des entités hydrogéologiques aux formations géologiques affleurantes

Il s'agit d'établir une correspondance stricte entre ces entités hydrogéologiques et les formations géologiques des cartes au 1/50 000. Très généralement, cette première liste a été revue et complétée.

4) Correspondance entre les formations géologiques décrites dans les "logs géologiques" et les formations des cartes géologiques

Cette étape nécessite l'extraction des logs géologiques de la Banque de Données du Sous-Sol et leur analyse. Elle est nécessaire à la délimitation des entités sous couverture.

La difficulté est de parvenir à une correspondance stricte entre les formations géologiques des cartes et les formations nommées dans les logs géologiques (appellation locale).

Dans les cas d'absence de correspondance stricte, il faut rechercher la solution hydrogéologiquement et stratigraphiquement la plus acceptable.

5) Construction du tableau multi-échelles

Une trentaine de tableaux multi-échelles (TME) ont été construits (par région, parfois par département). Le TME est l'aboutissement des étapes précédentes : il hiérarchise les découpages réalisés aux trois échelles, nationale, régionale et locale.

3.2.3 Individualisation de l'alluvial

Le thème "alluvial" comprend l'ensemble des dépôts de plaine alluviale et le cas échéant les terrasses lorsqu'elles sont connectées hydrauliquement aux cours d'eau.

A l'exception de la plaine alluviale du Rhin, les alluvions sont intégrées dans une couche particulière du modèle de gestion (une "**surcouche**", cf. § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Dans le "projet national", il n'y a pas eu, au stade actuel de développement du référentiel, de différenciation entre parties aquifères et non aquifères. Les systèmes alluvionnaires ont été extraits des cartes géologiques au 1/50 000 et sont maintenues inchangés dans leurs contours quel que soit le niveau (NV1, NV2 ou NV3).

Dans le "projet Rhône-Méditerranée et Corse ", les parties aquifères des alluvions ont été individualisées. Une notion d'enjeu leur est affectée.

Remarques :

Dans le modèle de gestion du référentiel, les entités sous recouvrement alluvionnaire sont donc considérées d'**ordre 1** comme les entités affleurantes.

Les terrasses alluviales dites anciennes, peu aquifères et non connectées aux cours d'eau, ne sont pas prises en compte dans le thème alluvial.

3.2.4 Découpage des entités

Ce travail se fait avec un SIG (MapInfo ou ArcGis), entité par entité, à l'aide des données numérisées intégrées dans le SIG : en particulier les affleurements des formations géologiques, les logs des forages (pour la partie sous couverture), des cartes piézométriques. D'autres documents sont aussi exploités pour préciser les contours en profondeur (synthèses hydrogéologiques, rapports d'études, ...).

Dans le bassin Rhône-Méditerranée, de nombreuses cartes géologiques n'étant pas numérisées lors du démarrage du projet, un important travail de délimitation sur calques a été entrepris.

3.2.5 Passage au modèle de gestion du référentiel

Les tables (MapInfo ou ArcGis) contenant les contours numérisés des entités (une table par entité) sont assemblées par le modèle de gestion du référentiel qui contrôle la cohérence topologique de l'ensemble (pas de recouvrement d'entités de même ordre relatif, pas de lacunes spatiales, ...). Les artefacts manifestes de découpage sont corrigés automatiquement mais des anomalies significatives peuvent être détectées nécessitant une vérification plus poussée et un retour aux tableaux multi-échelles. Plusieurs passages peuvent être nécessaires.

3.2.6 Organigramme

La démarche générale de délimitation des entités est résumée par l'illustration 7.

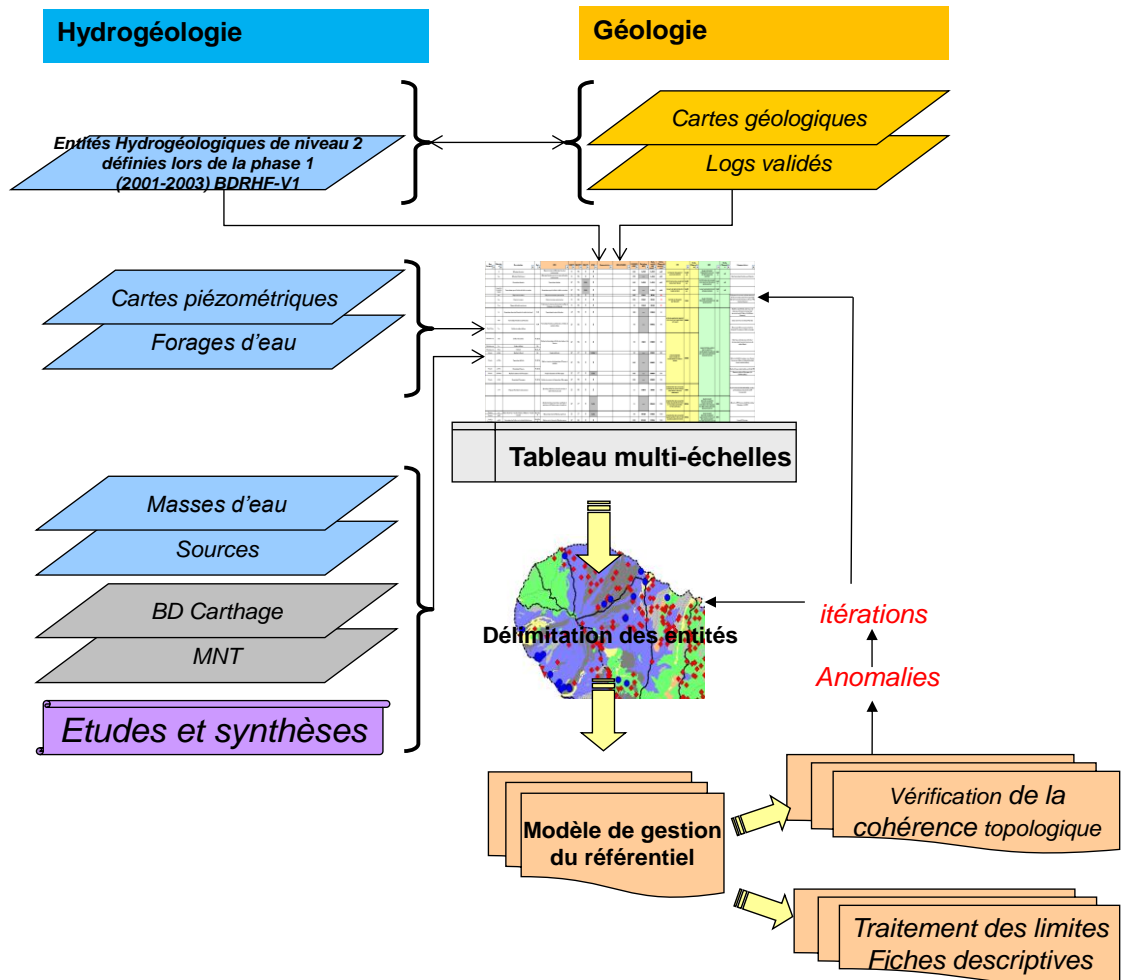


Illustration 7 – Processus de délimitation des entités hydrogéologiques et de contrôle de la cohérence 3D de l'assemblage.

4 Mise en œuvre du découpage

4.1 DONNEES DE REFERENCE

Plusieurs sources d'informations ont été utilisées pour la délimitation des entités des formations sédimentaires :

1. Carte géologique et notices,
 - 2006 - BRGM – Université de la Réunion (2006) – Carte géologique au 1/100 000 – Kit pédagogique de la Réunion ;
 - 1974 - Carte géologique de la France au 1/50 000 - La Réunion. Carte en 4 feuilles et notice explicative, Editions du BRGM ;
2. Travaux de cartographie hydrogéologique
 - Atlas du SDAGE – édition de 1998 (BRGM –Diren – BRL) ;
 - L'eau potable à la Réunion – Mars 1992 – BRGM - 92REU33 ;
 - Atlas hydrogéologique de la Réunion – octobre 1986 – BRGM – 86REU30 ;
3. La Banque du Sous-Sol contenant notamment les informations suivantes :
 - Informations géologiques des descriptions des logs de forages. Toutefois, le contexte volcanique de la Réunion ne permet pas de valoriser aisément cette donnée. Les descriptions lithologiques sont trop peu contrastées pour l'élaboration d'entité géologique verticale. De plus, la variabilité spatiale des structures volcaniques n'autorise pas les corrélations « puits à puits ». En effet, la majeure partie des structures présente des extensions déca à hectométriques, c'est-à-dire trop réduites pour être cartographiables (Illustration 9) ;
 - Distribution spatiale des sources. Cette information permet de délimiter les secteurs caractérisés par une densité d'émergences remarquable. Ces contrastes de densité marquent ponctuellement des secteurs géologiques particuliers, notamment dans un contexte de planèzes (Illustration 10).
4. Informations fournies par les experts de l'hydrogéologie réunionnaise au cours d'entretiens bilatéraux et de groupes de travail. Les personnes rencontrées et ayant participé à la réflexion sont les suivantes :
 - Julien BONNIER (Office de l'eau Réunion)
 - Jacques CHANUT (DEAL – Réunion)
 - Marc CRUCHET (hydrogéologue agréé)
 - Jean-Lambert JOIN (Université de La Réunion)



Illustration 8 -Légende de la carte géologique au 1/100 000 (2006) des .illustrations 9 et 10

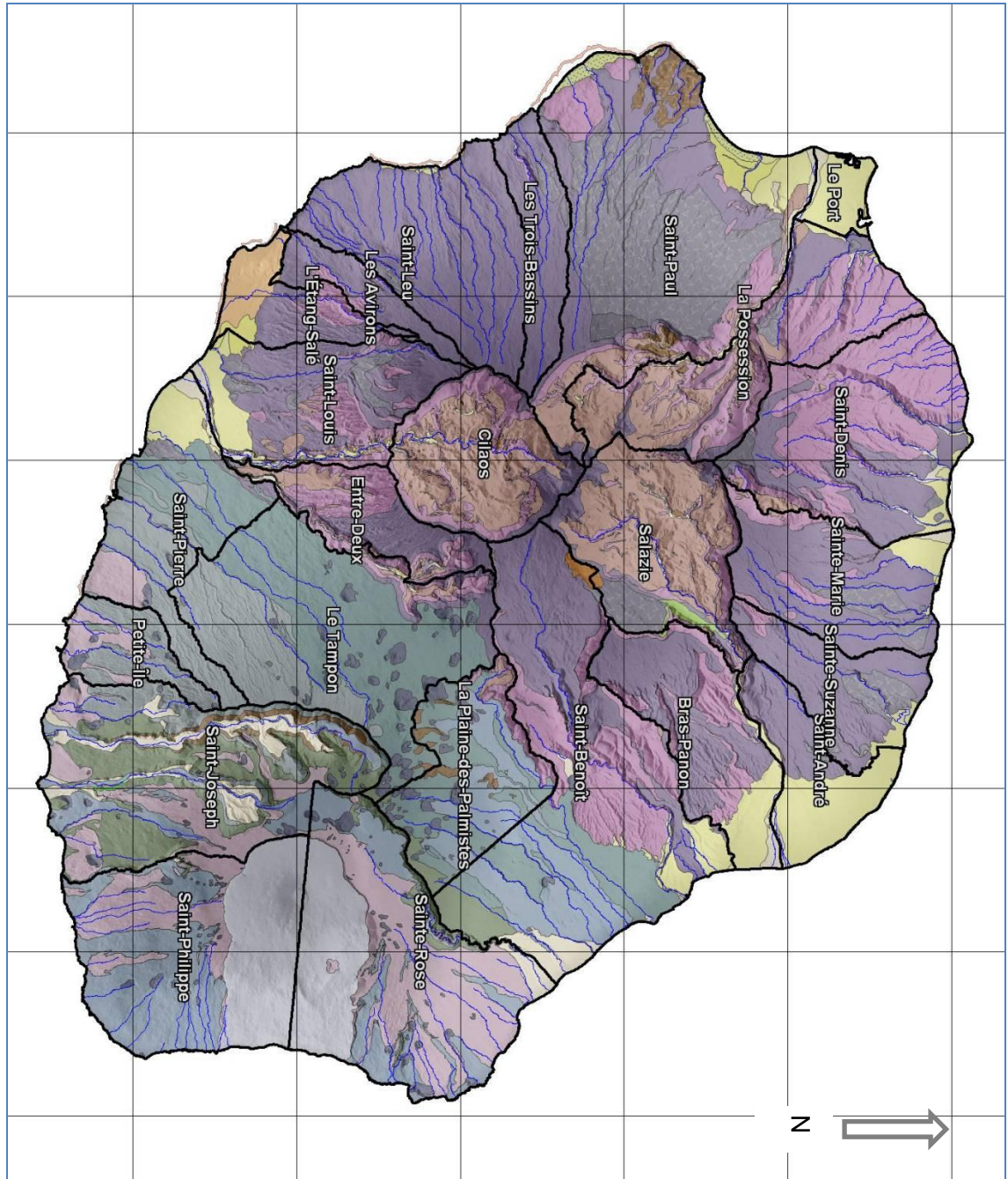


Illustration 9 -Emplacement des communes et du réseau hydrographique sur fond géologique (voir légende Illustration 7).

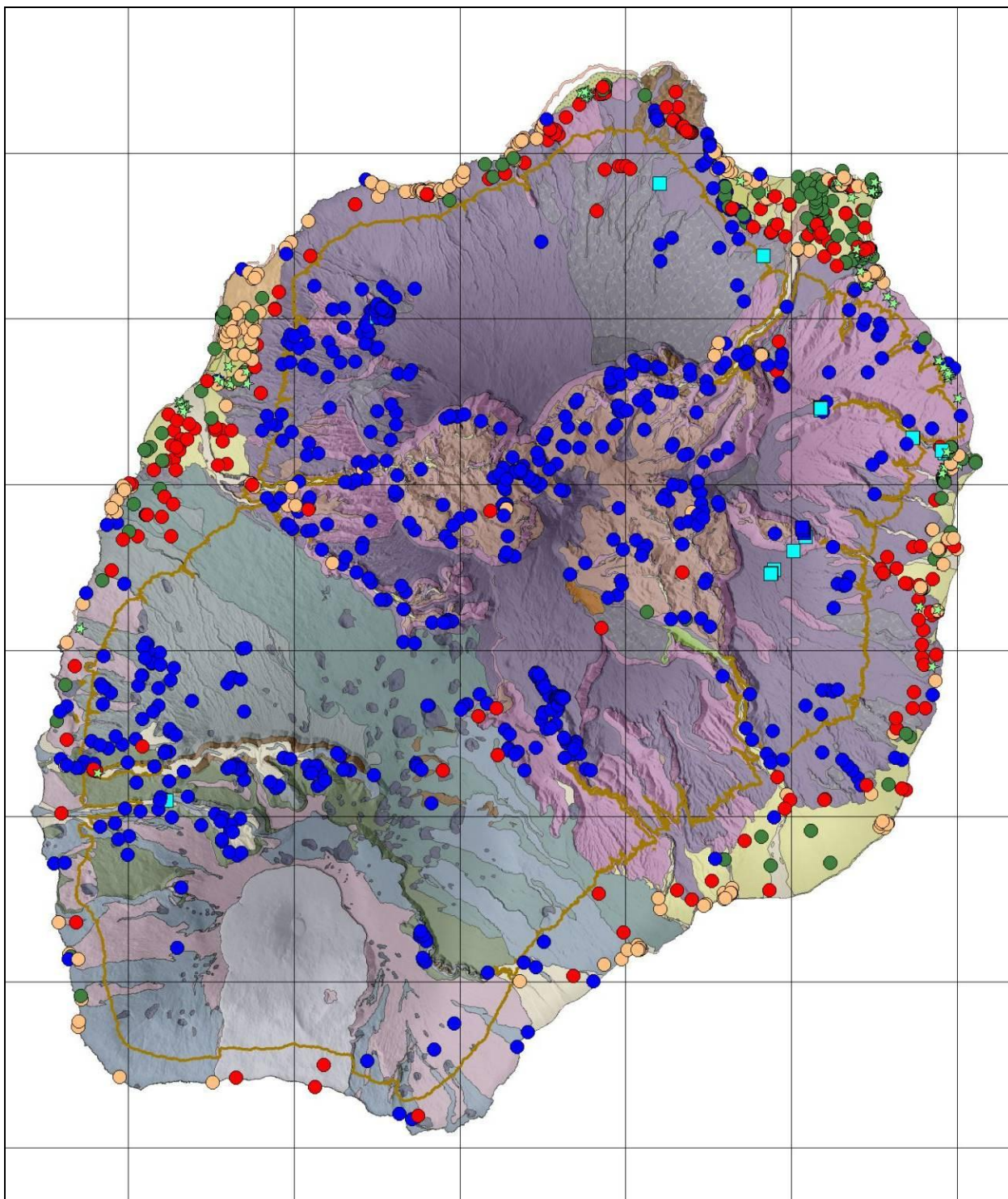


Illustration 10 - Emplacement des sources, forages et puits sur fond géologique (voir légende Illustration 7).

Illustration 11 : Schéma conceptuel hydrogéologique selon le modèle canarien (Join et al., 1998)

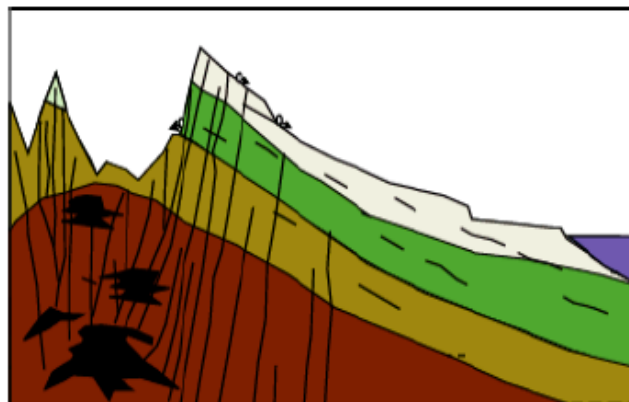
Empilement de coulées basaltiques, scories et cendres formant les flancs de l'édifice volcanique

Ensemble de corps intrusifs (dykes, sills) dont la mise en place est liée à une zone d'injection de lave (rift) et qui « arme » les séries volcaniques en place ce qui augmente leur résistance à l'érosion (formation de crêtes)

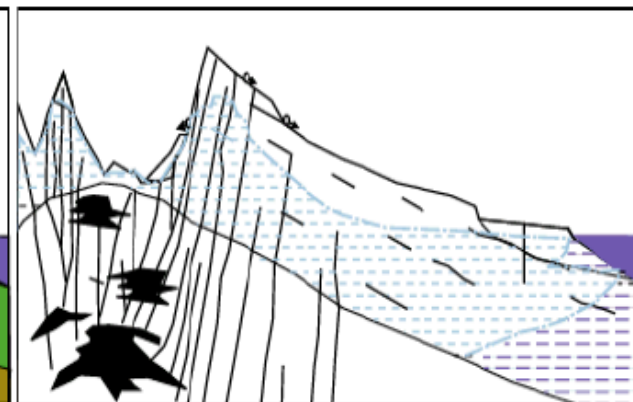
Séries anciennes auto colmatées par hydrothermalisme, en forme de vaste coupole autour des masses de magma intrusif dans le cœur du volcan. Le colmatage est dû au dépôt de minéraux dans les fissures et les pores lié à d'anciennes circulations de fluides.

Ensemble d'intrusions de laves dans les fractures en forme de cône (effondrement de caldeira) et qui correspondent à des zones de glissement ou d'effondrement de grands panneaux des flancs ou du cœur du volcan (en particulier au cœur des cirques). Ces panneaux effondrés, constitués de brèches (formations détritiques), sont très sensibles à l'érosion (coulées de boue, glissements, mouvements de grande ampleur)

Evolution de la perméabilité en profondeur



Développement d'une nappe de base en altitude



Très perméable ← → Imperméable



Eau douce



Eau de mer

4.1.1 Contexte scientifique

La méthodologie nationale de découpage ne peut être directement appliquée au cas de l'île de la Réunion. En effet, il n'existe pas de milieu volcanique jeune (<3 Ma) en métropole et donc son fonctionnement hydraulique spécifique n'a pas été pris en compte.

Les caractéristiques listées ci-dessous dressent un premier bilan des différences notables entre le milieu volcanique insulaire réunionnais et l'hydrogéologie métropolitaine :

1. La construction radiale du volcan bouclier confère une forte hétérogénéité spatiale de la géométrie et des structures géologiques :
 - Cette hétérogénéité est amplifiée par les phénomènes d'érosion et de déstabilisation gravitaire qui ont marqué l'évolution morphologique de l'île ;
 - Les coulées plus récentes masquent les structures anciennes de type paléo-vallées, influençant significativement la distribution des conductivités hydrauliques ;
 - Bien que le réseau hydrographique de surface fournisse des indices sur les écoulements souterrains, ceux-ci peuvent aussi être indépendants, impliquant des limites souterraines indétectables en surface ;
 - La délimitation des bassins versants souterrains est variable en fonction de la profondeur considérée et des charges hydrauliques au moment de l'infiltration des eaux. De même, un secteur amont peut contribuer de manière indifférente à la recharge de différents secteurs aval. La définition d'une limite fixe et unique se heurte donc à une insuffisance des connaissances de la distribution des écoulements souterrains ;
2. La jeunesse des formations volcaniques confère de fortes valeurs de transmissivité aux aquifères (10^{-2} m²/s) et des rabattements très faibles (décimétriques) en cas de pompage ;
3. L'empilement successif de coulées volcaniques décimétriques à décamétriques (scories / lave massive) combiné à la présence ponctuelle de paléosols, confèrent aux aquifères de forts contrastes verticaux de perméabilité. Ce contraste se manifeste par une variation verticale de la distribution des charges hydrauliques. Ainsi, sur un même forage, des charges croissantes sont observées avec l'augmentation de profondeur. La colonne du forage intègre des horizons dont les caractéristiques sont différentes, depuis un caractère libre en sub-surface vers un caractère captif en profondeur. Il n'est toutefois pas envisageable de distinguer ces différents horizons en raison de leur trop faible épaisseur et de leur non-continuité horizontale ;
4. Les systèmes sont marqués par une double porosité (fracture / matrice) et par des phénomènes d'effet piston, matérialisés par la sollicitation de différentes lignes de courant en fonction de la charge hydraulique. Ces propriétés peuvent rappeler le fonctionnement de certains systèmes karstiques ;
5. L'épaisseur de la zone non-saturée atteint plusieurs centaines de mètres localement. L'épaisseur de la zone non-saturée croît avec l'altitude ; elle atteint près de 1000 m dans les Hauts de l'île. Cette zone non-saturée est

composée de terrains volcaniques sains dans sa partie inférieure, mais aussi de formations altérées (profil d'altération de sub-surface / paléosol) atteignant localement quelques dizaines de mètres. Au-delà de l'amortissement des précipitations sur la recharge des eaux souterraines, le rôle hydrodynamique, c'est-à-dire les fonctions de transfert et de stockage, de la zone non-saturée est difficilement quantifiable ;

6. Localement, dans les secteurs des plaines littorales, les processus de recharge des aquifères sont variables en fonction du transport solide en rivière. En effet, des phénomènes de colmatage ou de nettoyage du lit impactent directement sur les relations entre eaux de surface et eaux souterraines ;
7. La stratigraphie couramment employée dans des contextes de milieux poreux ne se révèle pas pertinente pour des aquifères volcaniques. Un même aquifère peut se développer sur différentes formations dont les âges diffèrent significativement. De même, en fonction de l'altération, des formations de même âge et originellement de même nature ne vont pas présenter les mêmes caractéristiques hydrogéologiques.

Au-delà de ces différences intrinsèques, la connaissance de l'hydrogéologie de la Réunion est globalement moindre qu'en métropole. La conséquence directe de "ce retard scientifique" se matérialise par une méconnaissance des processus hydrogéologiques (identification / caractérisation des ressources, modalités de recharge, transfert des solutés...) :

1. Les premières études hydrogéologiques n'ont démarré que depuis une trentaine d'années (le premier forage a été réalisé à la fin des années 70) ;
2. La distribution des forages est très inégale à l'échelle de l'île. La connaissance hydrogéologique est ainsi réduite vers les Hauts de l'île ;
3. Les outils de modélisation déterministe courants (modèles maillés) ne sont pas toujours adaptés au milieu volcanique en raison d'une mauvaise intégration de la zone non-saturée et de l'hétérogénéité des formations volcaniques.

Néanmoins, les connaissances géologiques et hydrogéologiques constituent le socle des critères de découpage des entités.

4.1.2 Méthodologie

La démarche de découpage repose à la fois sur la délimitation des unités de niveau 3 et sur un processus itératif entre les niveaux 2 et les niveaux 3. Le découpage spatial doit rester homogène, notamment en termes d'échelles d'entité. Certains secteurs dont l'isolement hydrogéologique existe n'ont pas été distingués en raison d'une superficie inférieure à 5 km².

Les limites choisies sont détaillées dans les descriptions des entités, mais les règles générales de délimitation utilisées sont présentées ci-après :

- Le trait de côte constitue la limite des aquifères côté mer.

- Comportement piézométrique** sur le domaine littoral : la synthèse des données géologiques et hydrogéologiques de 25 piézomètres suivis en continu a permis de caractériser la variabilité du fonctionnement hydrogéologique en lien avec la géologie et les propriétés de l'aquifère (inertie, réserve, vitesse de transfert). L'analyse globale des paramètres issus des résultats du traitement du signal (effet mémoire, temps de régulation, vitesse de transfert, etc.) s'est révélée positive pour expliquer en partie cette variabilité, bien que la longueur des chroniques soit souvent insuffisante pour caractériser de manière fiable l'inertie des systèmes aquifères. La figure ci-dessous (Illustration 12), extraite de l'annexe 3, présente une analyse en composantes principales des paramètres principaux déterminés par traitement du signal. Ceci a conduit à différencier ou non le comportement de certains piézomètres. Sur cette base, la séparation ou le regroupement des entités hydrogéologiques a été préconisé pour le niveau local NV3. Cette étude fonctionnelle est détaillée en Annexe 3.

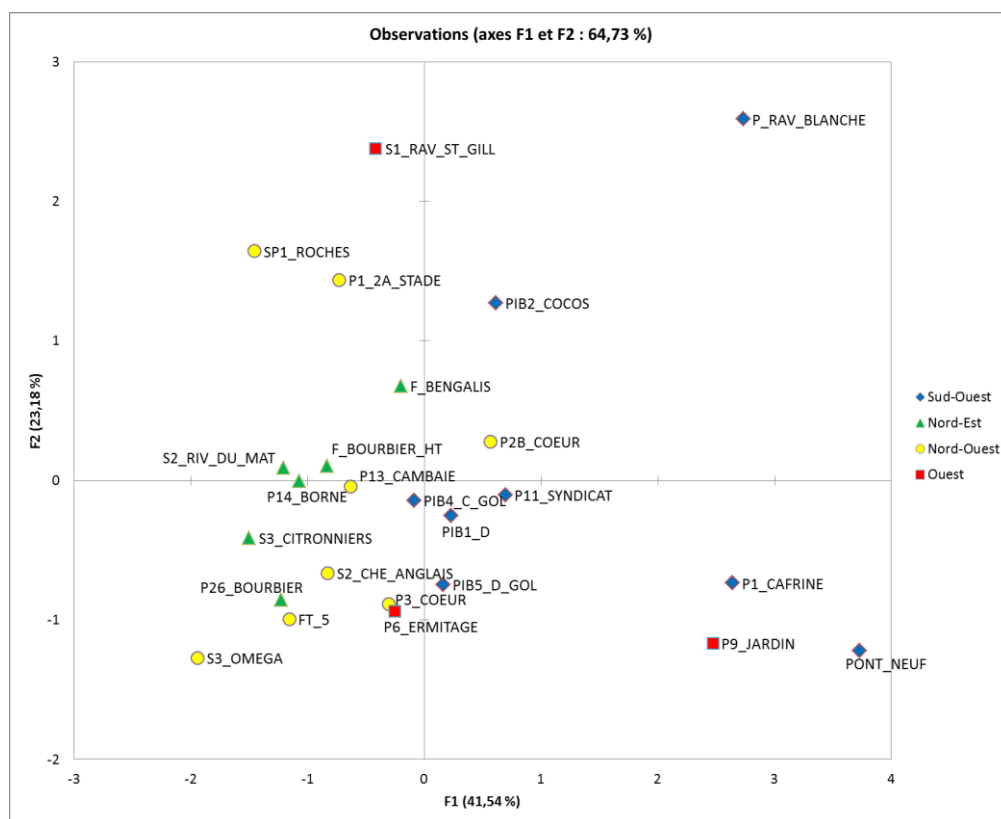


Illustration 12: ACP avec représentation des points par secteurs géographiques

- Sur le plan de la connaissance, le domaine littoral est relativement connu par de nombreux forages qui sont surtout présents jusqu'à l'altitude de 200 m NGR (92 % des forages). Dans le découpage des entités, la limite 200 m NGR, sera considérée comme une **limite de connaissance** séparant le domaine littoral du domaine de transition sur la quasi-totalité de La Réunion. Cette limite présentant un certain arbitraire, la courbe des 200 m NGR a été lissée et les remontées dans les vallées ont été tronquées.
- Délimitation des cirques sur le plan hydrogéologique : dans les trois cirques, de nombreuses sources émergent à la base des remparts (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Elles sont alimentées par les planètes de l'extérieur des

cirques et doivent donc y être rattachées. La distinction avec les sources superficielles ayant leur bassin d'alimentation à l'intérieur des cirques n'est pas toujours aisée. La limite des entités hydrogéologiques des cirques résultent alors d'un compromis entre :

- la rupture de la pente au niveau rempart / base du cirque ,
- les contours géologiques entre les coulées basaltiques et les dépôts de glissement ou de coulées de débris du cirque,
- les sources : position relative entre elles et par rapport aux contours géologiques,
- les sources thermo-minérales sont rattachées aux cirques.
- Les ravines importantes comme celle de la Rivière de l'Est sont considérées comme des limites. En effet, elles constituent des entailles très profondes dont la base est déconnectée de la nappe. Lorsque l'entaille, suffisamment profonde, recoupe un aquifère sommital, des sources apparaissent au sein des remparts (sources de la Rivière de l'Est par exemple).

4.1.3 Élaboration du tableau multi-échelles

Ce tableau récapitule toutes les entités existant dans la zone d'étude. À La Réunion, selon le modèle de Join, on admet la continuité hydraulique, même si elle est très hétérogène. Cependant, cette continuité n'empêche pas de distinguer trois secteurs : sommital, de transition et littoral. Le groupe de travail a choisi un découpage vertical de ces trois secteurs, c'est-à-dire **sans** recouvrement entre eux. Seules les six entités surcroupe recouvrent d'autres entités. Toutes les autres se juxtaposent. Dans ces conditions, le tableau multi-échelle est simplifié. Il intègre les niveaux d'identification 2 et 3 ; le niveau 1 correspond à La Réunion dans son ensemble. Au total, il a été identifié :

- 39 unités de niveau local,
- 15 systèmes régionaux,
- 6 entités classées en surcrouches.

Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Délimitation des entités hydrogéologiques de la Réunion

| NV2 | | | | | NV3 | | | | | | | | |
|--------------------|-------------|--|------------|--------|--------|------------|--------------------|---|--|------------|--------|--------|------------|
| ORDRE D'APPARITION | CODE ENTITÉ | Libellé entité niveau_2 | theme_geol | nature | milieu | etat_hydro | ORDRE D'APPARITION | CODE ENTITÉ | Libellé_niveau_3 | theme_geol | nature | milieu | etat_hydro |
| - | 974SC | Système aquifère sur-couche | | | | | - | 974SC01 | Unité aquifère alluviale de la rivière du Mât | 1 | 5 | 1 | 2 |
| - | | | | | | | 974SC02 | Unité aquifère superficielle du Télélave Les Makes | 5 | 5 | 4 | 4 | |
| - | | | | | | | 974SC03 | Unité aquifère superficielle Saint-Joseph | 5 | 5 | 4 | 4 | |
| - | | | | | | | 974SC04 | Unité aquifère superficielle de Dos d'âne | 5 | 5 | 4 | 4 | |
| - | | | | | | | 974SC05 | Unité aquifère superficielle de la nappe des sables | 1 | 5 | 1 | 2 | |
| - | | | | | | | 974SC06 | Unité aquifère superficielle de l'anse des cascades | 5 | 5 | 4 | 4 | |
| 10 | 974AA | Système aquifère Planèze Nord | 5 | 3 | 4 | 4 | 10 | 974AA01 | Unité aquifère littorale de St Denis Ste Marie Ste Suzanne St André | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AA02 | Unité aquifère sommitale et de transition de St Denis Ste Marie Ste Suzanne St | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 10 | 974AB | Système aquifère de Bras-Panon St Benoît | 5 | 3 | 4 | 4 | 10 | 974AB01 | Unité aquifère littorale de Bras Panon St Benoît | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AB02 | Unité aquifère du volcan bouclier ancien de Bras-Panon - Saint-Benoit | 5 | 6 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AB03 | Unité aquifère sommitale du Mazerin | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AB04 | Unité aquifère du paléocirque de Bébour Bélouve | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AB05 | Unité aquifère perché de l'Ilet Patience | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 10 | 974AC | Système aquifère de Cilaos-cirque | 5 | 3 | 4 | 4 | 10 | 974AC01 | Unité aquifère volcano-détritique de Cilaos | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 10 | 974AE | Système aquifère de la planèze Est | 5 | 3 | 4 | 4 | 10 | 974AE01 | Unité aquifère littorale de la planèze Est | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AE02 | Unité aquifère sommitale et de transition de la planèze Est | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AE03 | Unité aquifère du paléocirque de la Plaine des Palmistes | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 10 | 974AF | Système aquifère de Ste Rose St Philippe St Joseph | 5 | 3 | 4 | 4 | 10 | 974AF01 | Unité aquifère littorale de Ste Rose St Philippe St Joseph | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AF02 | Unité aquifère sommitale et de transition de Ste Rose St Philippe St Joseph | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 10 | 974AG | Système aquifère des Makes Cocos Gol | 5 | 3 | 4 | 4 | 10 | 974AG01 | Unité aquifère littorale de la plaine des Cocos | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AG02 | Unité aquifère littorale de la plaine du Gol | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AG03 | Unité aquifère sommitale et de transition des Makes | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 10 | 974AH | Système aquifère de la planèze Sud | 5 | 3 | 4 | 4 | 10 | 974AH01 | Unité aquifère littorale de Petite Ile St Pierre | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AH02 | Unité aquifère sommitale et de transition de Petite Ile - St Pierre | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 10 | 974AJ | Système aquifère de St Gilles | 5 | 3 | 4 | 4 | 10 | 974AJ01 | Unité aquifère littorale de St Gilles | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AJ02 | Unité aquifère sommitale et de transition de St Gilles | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 10 | 974AL | Système aquifère de La Montagne | 5 | 3 | 4 | 4 | 10 | 974AL01 | Unité aquifère littorale de La Montagne | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AL02 | Unité aquifère sommitale et de transition de La Montagne | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 10 | 974AM | Système aquifère de Mafate - cirque | 5 | 3 | 4 | 4 | 10 | 974AM01 | Unité aquifère volcano-détritique de Mafate | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 10 | 974AP | Système aquifère de Saint-Paul La Possession | 5 | 3 | 4 | 4 | 10 | 974AP01 | Unité aquifère littorale de l'Etang St Paul Plaine des Galets | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AP02 | Unité aquifère sommitale et de transition de St Paul | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AP03 | Unité aquifère sommitale et de transition de Ste Thérèse | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 10 | 974AS | Système aquifère de Salazie - cirque | 5 | 3 | 4 | 4 | 10 | 974AS01 | Unité aquifère volcano-détritique de Salazie | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 10 | 974AT | Système aquifère de Pierrefonds Ravine Blanche | 5 | 3 | 4 | 4 | 10 | 974AT01 | Unité aquifère littorale de Pierrefonds | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AT02 | Unité aquifère sommitale et de transition du Tampon | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AT03 | Unité aquifère de l'Entre-Deux | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 10 | 974AW | Système aquifère de la planèze Ouest | 5 | 3 | 4 | 4 | 10 | 974AW01 | Unité aquifère littorale de l'Etang Salé | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AW02 | Unité aquifère littorale de la planèze Ouest | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | | | | | 10 | 974AW03 | Unité aquifère sommitale et de transition de la planèze Ouest | 5 | 5 | 4 | 4 |

4.2 DECOUPAGE DES ENTITES

Le découpage des entités est présenté sur les Illustration 13 à Illustration 16, à la fin du paragraphe §4.2.

4.2.1 Niveau 1

Sur le plan géologique, on différencie à La Réunion les deux massifs volcaniques : celui du Piton des Neiges et celui de la Fournaise. Sur le plan hydrogéologique, malgré des différences sur le plan hydrochimique et hydraulique, il a été choisi de ne conserver qu'une seule entité de niveau "national" (niveau 1) dont la référence est "974". Une des raisons est que le système aquifère du Tampon – Saint-Pierre – Entre-Deux s'étend sur les deux massifs.

4.2.2 Système aquifère du Nord (974AA)

Géographiquement, le système aquifère du Nord s'étend sur la plaine Nord et la plaine littorale entre Saint Denis et Saint André. Il est limité au sud par les cirques de Mafate et de Salazie. A l'ouest, la séparation est matérialisée par la ravine profonde de la rivière Saint Denis.

Au niveau 3, une unité sommitale est identifiée pour la plaine du Nord (974AA02). La partie sommitale a été localement reconnue lors du creusement de la galerie de Salazie amont. La source du Chaudron révèle également la présence d'eau souterraine dans la partie sommitale. La séparation entre la partie littorale et la partie sommitale est la courbe 200 m NGR.

A l'est, sur la partie côtière, la séparation avec le système aquifère de Bras-Panon a été placée au niveau de l'ancien lit de la rivière du Mât. L'unité aquifère de Saint-Denis (974AA01) est ainsi placée en aval de la plaine Nord (974AA02) qui l'alimente. L'extension de cette entité est confortée par l'analyse en composantes principales présentée en annexe 3.

Les piézomètres de la partie littorale sont relativement resserrés sur l'analyse en composantes principales (ACP) : ceci indique une relative homogénéité du fonctionnement hydrogéologique quelle que soit la géologie.

4.2.3 Système aquifère de La Montagne (974AL)

Ce système aquifère regroupe l'unité aquifère sommitale de La Montagne (974AL02) et l'unité aquifère littorale de La Montagne (974AL01). Cette plaine est la plus ancienne de l'île. A l'ouest, la ravine des Lataniers marque la séparation supposée (pas de piézométrie disponible) entre La Montagne et le Port. A l'est, la rivière Saint-Denis sépare le système aquifère de La Montagne de celui du Nord. L'unité aquifère littorale de La Montagne (974AL01) est très étroite ; c'est sur cette unité que se trouve le forage de la Chaloupe.

4.2.4 Système aquifère de Bras-Panon (974AB)

Le système aquifère de Bras-Panon est délimité par les cirques de Salazie (principalement) et de Cilaos au nord et à l'ouest. La bordure au sud-est est une limite géologique entre les massifs du Piton des neiges et de la Fournaise.

Au niveau 3, la limite entre l'unité aquifère littorale de Bras Panon St Benoit et l'unité aquifère du volcan bouclier ancien de Bras-Panon - Saint-Benoit (974AB01 et 974AB02) est placée à 200 m NGR.

Les aquifères sommitaux ont fait l'objet d'études dont les résultats ont été repris pour leur délimitation.

- Unité aquifère du paléocirque Bébou-Bélouve (974AB04) : elle s'étend sur le plateau de Bébou-Bélouve qui est drainé par deux zones d'émergences majeures dans la rivière des Marsoins. La première à 140 m sous la surface du plateau et la seconde, avec des débits plus importants, à 300 m sous la même surface. Elles correspondraient a priori à deux aquifères distincts dont les substratum se situent à environ 150 m de dénivelé. Ces deux aquifères et leur substratum hydrogéologique sont constitués des formations de la phase IV.
- Unité aquifère sommitale de Mazerin (974AB03) s'étendant sur le Plateau Mazerin et la Plaine des Lianes : cette unité est délimitée à l'ouest par le rempart dominant le plateau de Bélouve, au sud par celui dominant le plateau de Bébou, au nord-ouest par le Bras de Caverne, au nord par les remparts de Bras des Lianes et à l'est par l'amincissement ou la disparition des formations de phase IV. D'après la répartition des émergences, cette unité est drainée vers l'est.
- Unité aquifère perché de l'Ilet Patience (974AB05) : elle englobe le massif de l'Ilet Patience et le lac de Grand Etang. Elle est limitée au nord-ouest par la rivière de Bras Cabot et la rivière des Marsoins et au sud est par la Plaine des Palmistes. L'aquifère circule au sein des formations basaltiques de la phase II.

4.2.5 Système aquifère de la planèze Est (974AE)

Ce système appartient au massif de la Fournaise. Il est limité au NW par la limite géologique entre les deux massifs (Piton des Neiges et Fournaise). Au sud-est, la limite est morphologique et est constituée par l'entaille profonde de la Rivière de l'Est. En partie amont (à l'ouest), la limite est la crête topographique entre les versants Saint-Benoît et Tampon.

Au niveau 3, la limite entre les unités littorale et sommitale (974AE01 et 974AE02) est placée à 200 m NGR.

L'unité aquifère du paléocirque de la Plaine des Palmistes (974AE03) est délimitée, au nord et à l'est, par un rempart abrupt qui la sépare de la Plaines des Cafres dominant 600 m plus haut. A l'ouest, se trouve l'unité aquifère de l'Ilet Patience. La plaine des Palmistes occupe une dépression formée par érosion il y a 450 000 ans, puis comblée par des coulées de laves récentes issues de la Plaine des Cafres et de la Fournaise.

L'unité aquifère sommitale et de transition de la planèze Est (974AE02) est bordée par la ligne de crête avec la partie ouest de l'île, la rivière de l'Est, la cote 200 m NGR et la plaine des palmistes au nord-ouest.

4.2.6 Système aquifère de Ste Rose St Philippe St Joseph (974AF)

Ce système aquifère s'étend sur le massif de la Fournaise, dans la zone comprise entre les rivières de l'Est et des Remparts, marquée par des escarpements de plusieurs centaines de mètres de haut. Les précipitations y sont élevées variant de 2 à 12 m en fonction de l'altitude. Les infiltrations vers les nappes ont été estimées à 68 m³/s (Barcelo, 1996).

Le modèle conceptuel de l'aquifère est identique à celui du massif du Piton des Neiges. Les formations géologiques plus récentes sont cependant plus perméables. L'unité aquifère sommitale et de transition de Ste Rose St Philippe St Joseph

(974AF02) est en partie drainée par des sources : celles de la rive droite de la rivière de l'Est et celles qui émergent sur le flanc SW ; elles sont logiquement à l'intérieur de cette unité. En l'absence de forages, ces sources sont le seul élément visible de la présence d'une nappe.

L'unité aquifère littorale Ste Rose St Philippe St Joseph (974AF01) n'est reconnue que par 5 forages sur un linéaire côtier d'une cinquantaine de kilomètres. Les sources de l'Anse des Cascades ont été jugées suffisamment importantes par leur débit pour former une unité en surcouche (974SC06).

La limite entre les deux entités de niveau 3 (974AF02 et 974AF01) est placée à 200 m NGR.

4.2.7 Système aquifère de la planèze Sud (974AH)

Ce système aquifère s'étend sur les formations de la Fournaise entre la rivière des Remparts et la ravine d'Abord. Cette ravine constitue une limite de qualité des eaux souterraines : au forage de l'Hopital, la conductivité est de l'ordre de 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et à l'ouest, de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Forage d'Abord).

On distingue au niveau 3, l'unité aquifère littorale de Petite Ile St Pierre de l'unité aquifère sommitale et de transition de Petite Ile - St Pierre séparées à la cote 200 m NGR. L'unité aquifère Saint Joseph est placée en surcouche sur 974AH02.

4.2.8 Système aquifère de Pierrefonds Ravine Blanche (974AT)

Le système aquifère de Pierrefonds Ravine Blanche regroupe l'unité aquifère littorale de Pierrefonds (974AT01) et celles qui participent à son alimentation par l'amont. Il est limité par le cirque de Cilaos le long du Domitille, le plateau de Bébour, la crête topographique entre Le Tampon (à l'ouest) et la Plaine des Palmistes (à l'est).

Il comprend à la fois des formations du Piton des Neiges et de la Fournaise :

- 974AT02 : la planèze du Tampon avec :
 - (1) au SE, des formations relativement anciennes appartenant au massif de la Fournaise (coulées basaltiques $\beta 4$) ;
 - (2) au NW, des coulées basaltiques récentes du Massif de la Fournaise ($\beta 7$) ;
 - (3) coulées pyroclastiques (tufs) de la phase IV du Piton des Neiges.
- 974AT03 : le Dimitille formé d'océanites (coulées $\beta 1$) et de coulées de basaltes, hawaïtes, mugéarites ($\beta 2$) du Piton des Neiges.

Le système 974AT correspond à une zone d'écoulement majoritairement orientée vers le SW.

L'unité 974AT02 contient le bassin d'alimentation des deux principales sources de La Réunion (Pont du Diable et Hirondelles).

4.2.9 Système aquifère des Makes Cocos Gol (974AG)

Le système aquifère des Makes Cocos Gol est situé à l'ouest du débouché du cirque de Cilaos. Il contient deux unités aquifères très productives :

- 974AG01 : Unité aquifère littorale de la plaine des Cocos.

- 974AG02 : unité aquifère du Gol limitée latéralement par la ravine du Gol et des tufs volcaniques vers l'unité aquifère de Pierrefonds et par la ravine Sèche marquant une différence de conductivité avec le secteur d'Etang-Salé. Le groupe des 2 piézomètres PIB4C et PIB5D a un fonctionnement homogène.

En amont, l'unité aquifère sommitale et de transition des Makes (974AG03) alimentent ces unités littorales. Une unité en surcouche (Unité aquifère superficielle du Tévelave Les Makes) y est placée.

4.2.10 Système aquifère de la planèze ouest (974AW)

A l'échelle de La Réunion, la planèze du Piton des Neiges orientée vers l'ouest, est relativement homogène sur le plan de la géologie en surface et de la morphologie ; elle constitue le système aquifère de l'ouest. Elle est située à l'ouest des cirques de Mafate et de Cilaos. Sur le plan hydrogéologique, une limite a été placée au niveau des brèches de Saint Gilles, au nord.

Au niveau 3, le système 974AW se subdivise en :

- 974AW01 : unité aquifère littorale de l'Etang Salé. Vis-à-vis de l'unité du Gol, l'ACP (Annexe 3) montre que le fonctionnement (à Pont-Neuf) y est différent de celui du groupe des ouvrages du Gol (PIB4C et PIB5D).
- 974AW02 : unité aquifère littorale de la planèze ouest, entre Etang-Salé et Saint Gilles : cette nappe est exploitée par quelques forages et une intrusion saline y a été identifiée.
- 974AW03 : une unité sommitale et de transition : Il y a très peu d'informations hydrogéologiques (forage ou source) pour la caractériser.

4.2.11 Système aquifère de St Gilles (974AJ)

La délimitation de ce système est justifiée par la présence des brèches de Saint Gilles.

L'unité littorale 974AJ01 est constituée par les brèches de Saint-Gilles : c'est une unité semi-perméable dans laquelle on observe quelques petites sources.

L'entité (974AJ02) au-dessus des brèches de Saint-Gilles correspond au bassin versant susceptible d'alimenter les sources de la ravine Saint-Gilles ; les limites de ce bassin versant restent néanmoins mal délimitées. Le piézomètre S1 de la ravine Saint-Gilles présente un fonctionnement atypique très inertiel (Annexe 3).

4.2.12 Système aquifère de Saint-Paul La Possession (974AP)

Le système aquifère de Saint-Paul La Possession comprend l'unité aquifère littorale de l'Etang St Paul Plaine des Galets (974AP01) (ressource stratégique) et les planèzes qui l'alimentent.

L'entité 974AP01 contient un aquifère multi-couche dans lequel il a semblé préférable de ne pas distinguer les différentes couches entre lesquelles il existe des liaisons hydrauliques sur certaines zones. La connaissance a été jugée insuffisante pour distinguer plusieurs aquifères. Il est à noter qu'on observe cependant une grande variabilité de l'inertie et des propriétés hydrauliques entre les entités alluvionnaires et basaltiques (Annexe 3).

Les planèzes au nord et au sud du débouché de Mafate sont distinguées :

- L'unité aquifère sommitale et de transition de St Paul (974AP02) au sud du débouché de Mafate, l'unité aquifère sommitale et de transition de Ste Thérèse (974AP03) de la planèze au nord du débouché de Mafate et dominant la commune du Port.

4.2.13 Les systèmes aquifères des cirques (974AS, 974AC, 974AM)

La présence de nombreuses sources, même avec des débits limités, a conduit à classer les cirques en systèmes aquifères.

Les critères de délimitation des cirques au pied des remparts sont les mêmes pour les trois cirques.

La limite géologique au niveau des remparts des différents cirques correspond à l'extrémité des formations géologiques des planèzes suite aux éboulements, glissements de terrain et érosion du côté des cirques. La délimitation hydrogéologique a été placée au bas des remparts de manière à intégrer les sources de bas de rempart, dans les planèzes qui constituent leur réservoir. L'origine précise (planèze ou cirque) de l'eau de la plupart des sources est souvent inconnue. Aussi, sur le plan de la réalisation, on a tenu compte (1) de la position des sources, (2) de la rupture de pente en surface et (3) de la carte géologique (limite des formations à proximité des sources).

Les séparations entre les trois cirques sont des reliefs hauts et étroits. La limite est la ligne de crête.

Les extrémités aval des cirques sont différentes et ont été traitées de la manière suivante :

- Salazie (974AS01) : l'entité est tracée jusqu'au seuil géologique proche de la nationale 2.
- Cilaos (974AC01) : les caractéristiques de l'eau pompée au forage des Aloes sont proches de celles de l'aquifère de Pierrefonds. La limite a donc été placée en amont de ce forage .
- Mafate (974AM01) : la limite a été fixée sur des critères hydrologiques sur la base des jaugeages différentiels sur la rivière des Galets réalisés par l'Office de l'eau : l'unité aquifère de Mafate se termine au cap Lebot quand le débit de la rivière des Galets diminue à cause des infiltrations vers la nappe des Galets.

4.2.14 Les unités "surcouche" (Illustration 15)

Six unités aquifères ont été classées en " surcouche".

4.2.14.1 Unité aquifère de la rivière du Mât (974SC01)

Les alluvions de la rivière du Mât ont été classées en unité aquifère en raison de leur extension (14 km²) permettant d'individualiser un aquifère. Ces alluvions reposent sur un substratum argileux qui forme écran avec les formations sous-jacentes de la plaine alluviale. Cette unité s'étend légèrement au-delà de la zone des alluvions de la carte géologique pour prendre en compte des ouvrages hors de cette zone, mais cependant représentatifs de la nappe alluviale.

Les alluvions de la plaine des Galets n'ont pas été définies comme unités alluviales à La Réunion à cause de leur extension considérée comme trop faible ou de leur fonctionnement confondu avec les aquifères sous-jacents ou voisins.

4.2.14.2 Unités aquifères des Makes-Tévelave (974SC02)

Le secteur des Makes et du Tévelave forme deux petits paléocirques creusés dans les phases II remplis ensuite par des coulées plus récentes des phases III et IV. L'érosion des formations superficielles (les coulées de basalte β_2 des séries différenciées) ont été érodées et permettent, aux limites d'affleurement, l'émergence de sources relativement nombreuses par rapport au reste du territoire. Ce sont des sources à petits débits correspondant à un aquifère superficiel. L'unité aquifère a été délimitée à sa base par les sources, puis par leur bassin versant jusqu'à la crête des remparts de Cilaos.

4.2.14.3 Unité aquifère de Saint-Joseph (974SC03)

A la faveur d'entailles dans les planèzes, le secteur en amont de Saint-Joseph présente de nombreuses sources. Leur débit est limité et n'est pas toujours stable en cours d'année : elles correspondent comme aux Makes-Tévelave à un aquifère superficiel. L'unité est délimitée par les sources et par leur bassin versant supposé vers l'amont jusqu'aux remparts de la rivière des Remparts.

4.2.14.4 Unité aquifère superficielle de Dos d'âne (974SC04)

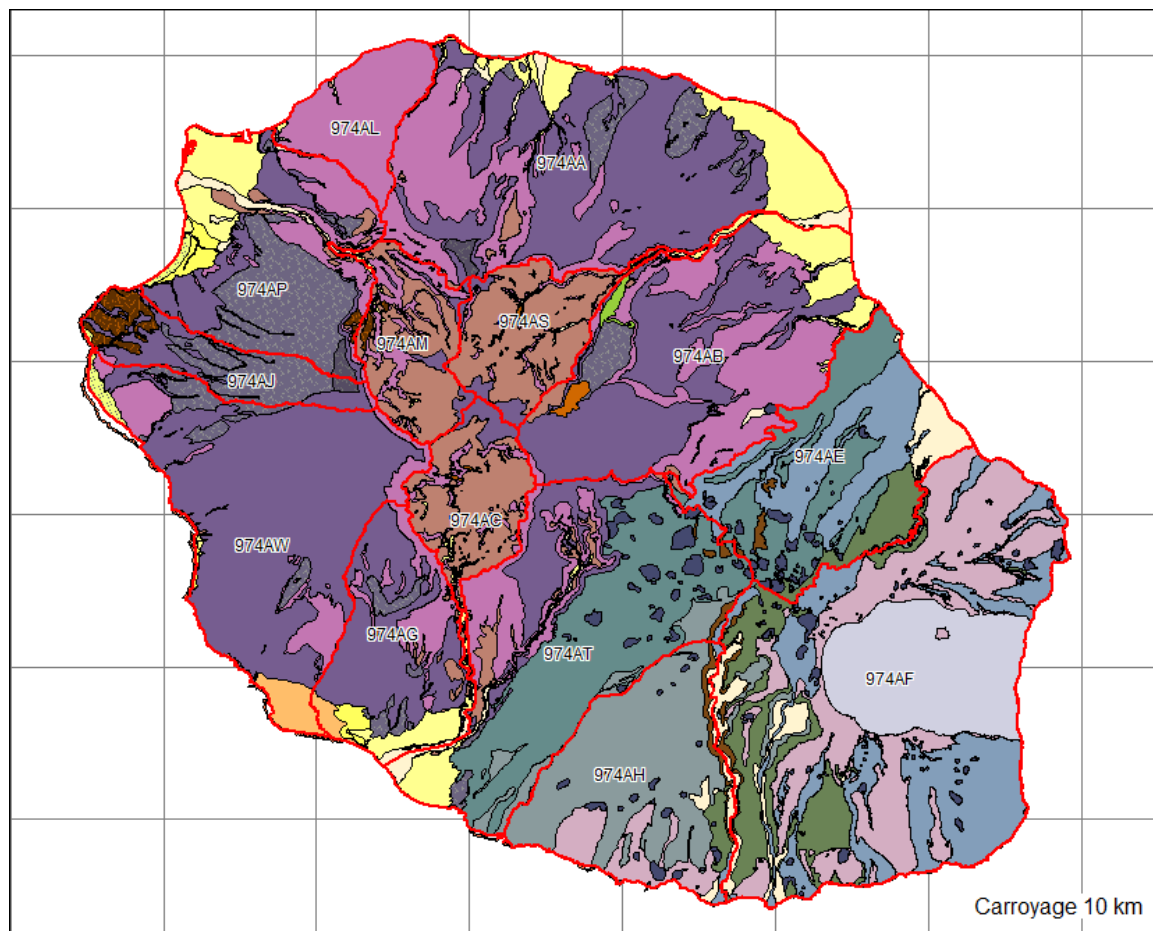
Le plateau de Dos d'âne appartient au massif du Piton des Neiges. Son altitude est approximativement de 1000 m NGR. Le bassin de Dos d'âne correspond à un amphithéâtre d'érosion régressive rempli de matériaux détritiques. Une nappe libre siège dans ces formations. Cette nappe soutient la ravine Marquet à l'étiage.

4.2.14.5 Unité aquifère superficielle de la nappe des sables (974SC05)

Entre l'Ermitage et Trois-Bassins, le littoral est bordé de plusieurs récifs à l'arrière desquels se sont individualisées plusieurs petites plaines de sables coralliens. Ces dépôts sédimentaires sont le siège d'une nappe libre d'une puissance de 5 à 10 m, en partie alimentée par des flux souterrains issus des formations volcaniques.

4.2.14.6 Unité aquifère superficielle de l'anse des cascades (974SC06)

Les nombreuses sources à débit soutenu de l'anse des cascades indiquent la présence d'un aquifère. Elles émergent de coulées de basalte qui se sont écoulées dans une légère dépression, tapissée de cendres formant le substratum de l'aquifère. L'extension du bassin versant n'est pas connue, même approximativement en l'état des connaissances actuel. Pour cette raison, les contours de cette entité ont été tracés autour de la zone d'émergence.



| CODE ENTITÉ | Libellé_niveau_2 |
|-------------|--|
| 974AA | Système aquifère de la planèze Nord |
| 974AB | Système aquifère de Bras-Panon St Benoit |
| 974AC | Système aquifère de Cilaos - Cirque |
| 974AE | Système aquifère de la planèze Est |
| 974AF | Système aquifère de Ste Rose St Philippe St Joseph |
| 974AG | Système aquifère des Makes Cocos Gol |
| 974AH | Système aquifère de la planèze Sud |
| 974AJ | Système aquifère de St Gilles |
| 974AL | Système aquifère de La Montagne |
| 974AM | Système aquifère de Mafate - cirque |
| 974AP | Système aquifère de Saint-Paul La Possession |
| 974AS | Système aquifère de Salazie - cirque |
| 974AT | Système aquifère de Pierrefonds Ravine Blanche |
| 974AW | Système aquifère de la planèze Ouest |

Illustration 13 : Carte des entités de niveau 2.

Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Délimitation des entités hydrogéologiques de la Réunion

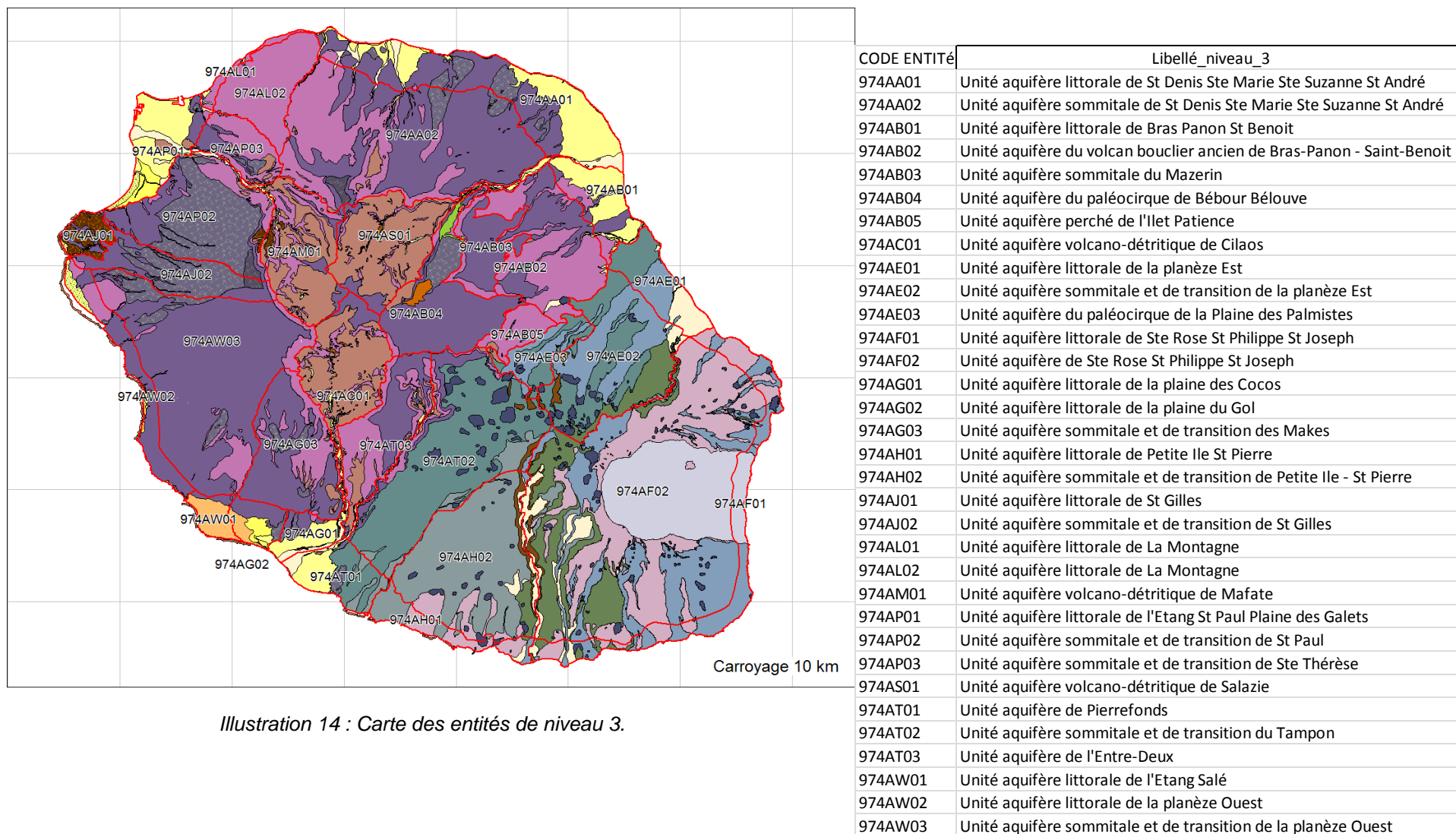


Illustration 14 : Carte des entités de niveau 3.

Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Délimitation des entités hydrogéologiques de la Réunion

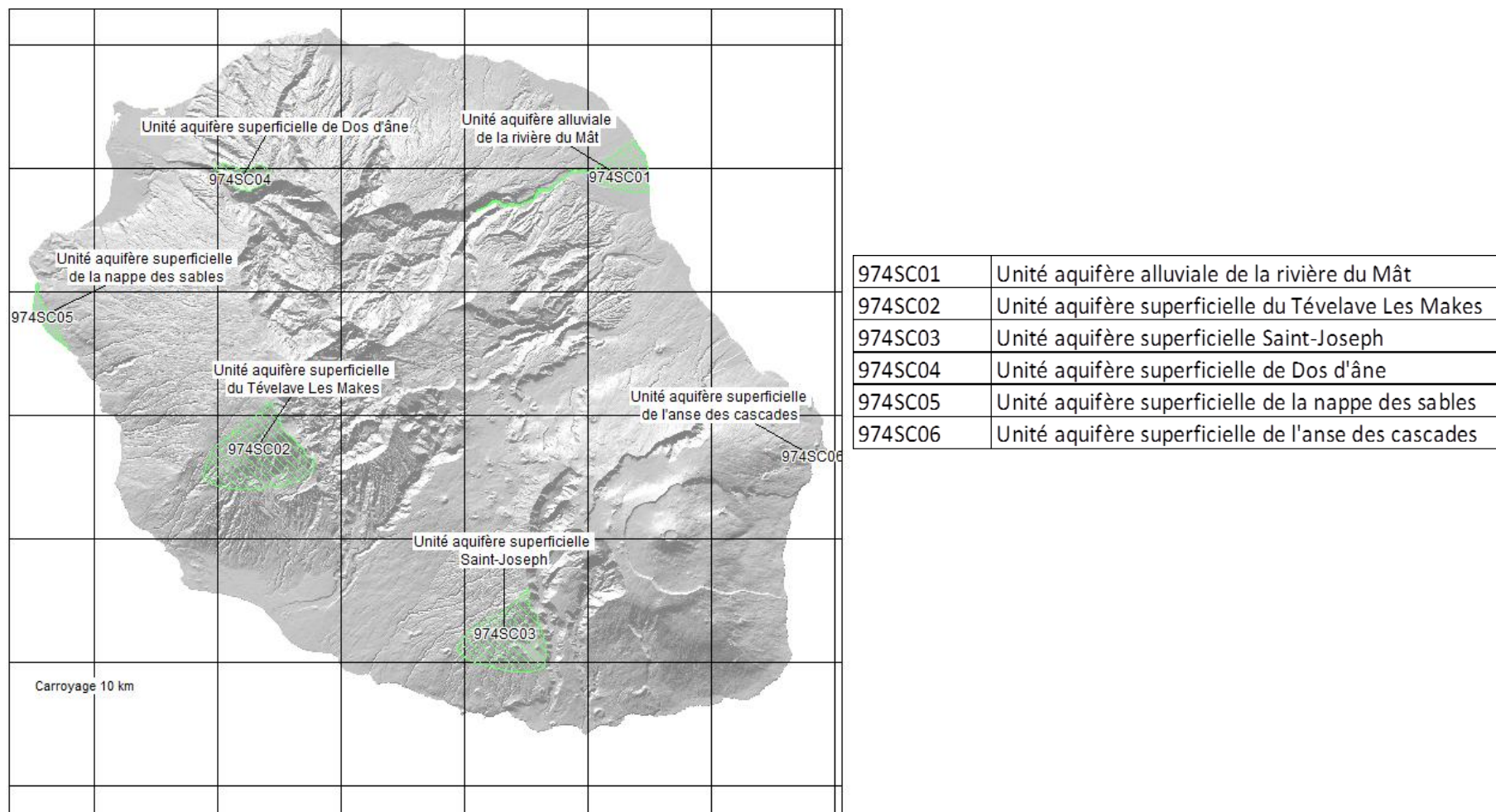


Illustration 15 : Les six unités classées en surcouche.

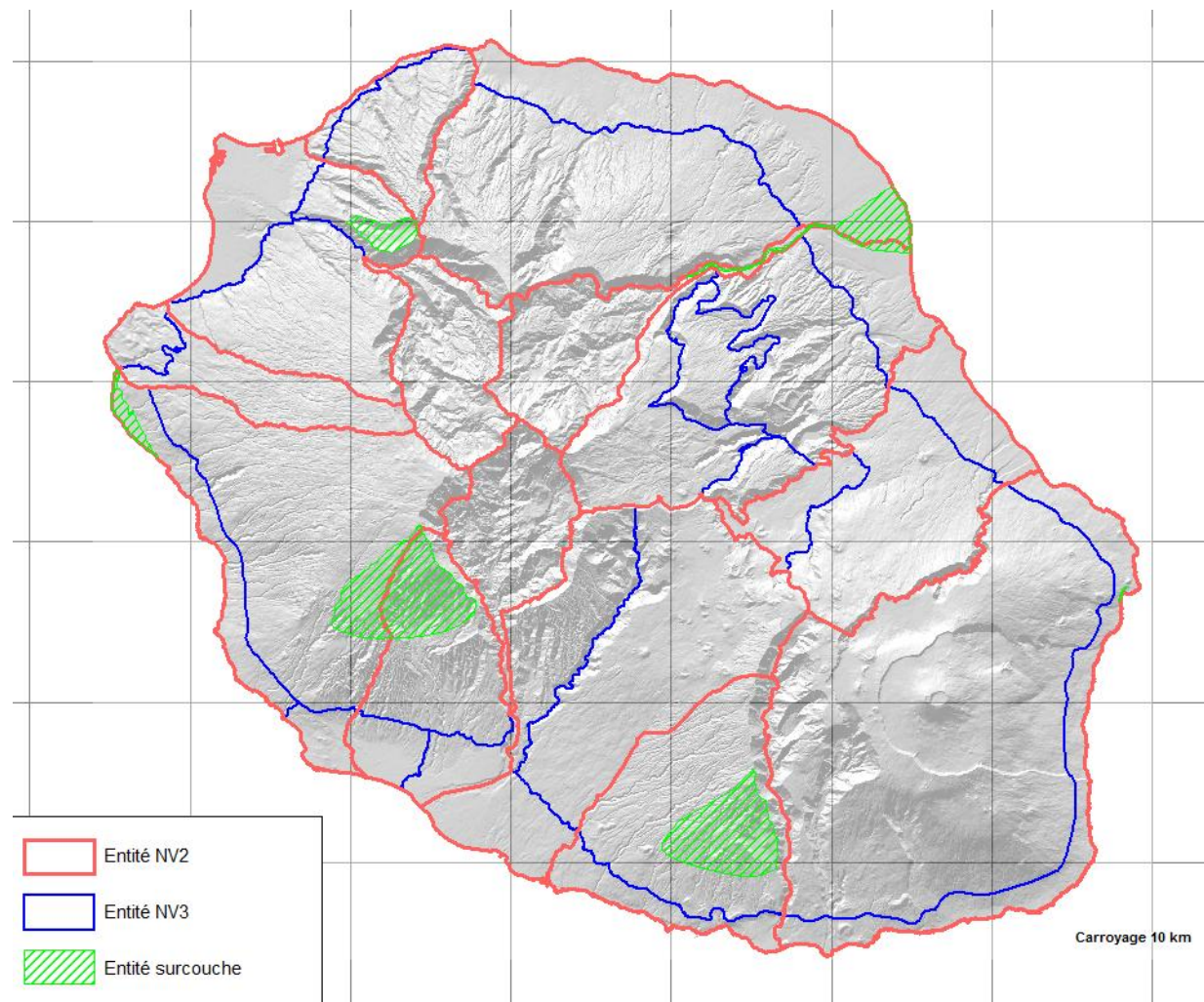


Illustration 16: Superposition des entités de niveau 2 et 3 avec les surcouches .

5 Limites des entités

5.1 LIMITES HYDRAULIQUES

Les limites latérales entre une entité et ses voisines sont représentées uniquement pour les polygones d'ordre 1 du niveau local (NV3). Elles sont caractérisées par un attribut associé aux arcs qui les composent.

Les limites entre entités (polylignes) sont extraites automatiquement par le modèle de gestion du référentiel et intégrées dans la géodatabase du référentiel (couche polylignes).

Comme pour la caractérisation des entités, et pour les mêmes raisons, les limites sont qualifiées uniquement au niveau 3.

Les différents types de limites prévus par le guide méthodologique de 2003 sont présentés par l'illustration 17.

5.2 NATURE DES CONTACTS ENTRE ENTITES

Une alternative possible à la qualification hydrodynamique d'une limite (ce n'est ni toujours possible, faute d'information, ni évident sachant qu'un « arc limite » peut lui même être subdivisé en limites de plusieurs types) consiste à définir plutôt **la nature des contacts entre entités**. (aquifère/aquifère, aquifère/domaine...).

La recherche de la nature des contacts peut en effet se faire **automatiquement** à l'aide du modèle de gestion à partir de la table des polygones élémentaires de niveau 3 construits par le modèle de gestion.

Si l'on convient de ne distinguer à ce niveau 3 que les aquifères (notation A) et les domaines (notation D) regroupant unités semi-perméables et unités imperméables et si l'on s'intéresse aux contacts d'un polygone élémentaire avec ses voisins latéraux (4 possibilités théoriques : AA, AD, DD, DA) et immédiatement sous-jacents (4 possibilités aussi), on obtient alors 16 combinaisons possibles de nature de contact (en fait, certaines sont bien sûr équivalentes en termes hydrodynamiques), par exemple:

$$\frac{A/A}{A/D}, \frac{A/D}{A/D}, \frac{D/D}{A/A}, \dots$$

Par ailleurs, à une nature de contact, il est possible dans certains cas de rattacher un type de limite (exemples fournis dans le tableau de l'illustration 18).

Dans cette première version du référentiel seule la nature des contacts a été intégrée à la géodatabase.

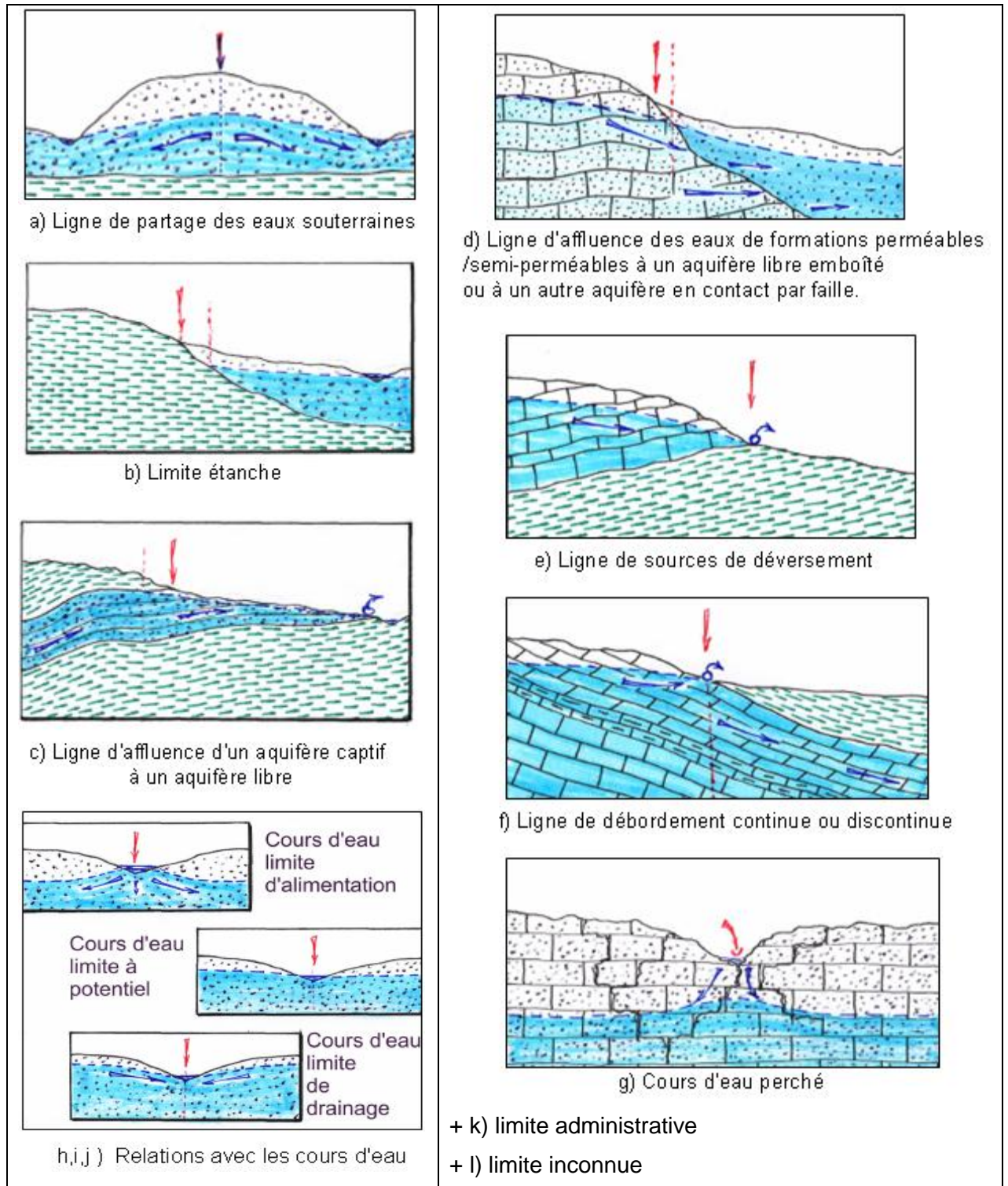


Illustration 17 - Types de limites possibles entre entités.

| Nature des contacts | Type de limite possible (guide méthodologique) |
|-----------------------|---|
| Aquifère sur aquifère | Ligne d'affluence des eaux de formations perméables ou semi-perméables à un aquifère libre emboîté ou à un autre aquifère en contact par faille (cas d) |
| Aquifère / aquifère | Ligne de partage des eaux souterraines (cas a) = Limite à flux nul |
| Aquifère/ domaine | Limite « étanche » (cas b) = Limite à flux nul |
| Aquifère sur domaine | Limite « étanche » (cas b) = Limite à flux nul Ligne de sources de déversement (cas e) |
| Aquifère sous domaine | Ligne d'affluence d'un aquifère captif à un aquifère libre (cas c) Généralisable en « Limite de recouvrement » (pouvant coïncider avec la limite de captivité). Cela ne préjuge pas du sens d'écoulement. |
| Domaine sur aquifère | Ligne de débordement continue ou discontinue (cas f) |
| Domaine / Domaine | Cas particulier de deux formations peu perméables en contact (limite « étanche ») |

Illustration 18 - Correspondances entre nature des contacts et limites hydrauliques.

6 Outil de construction du référentiel

L'assemblage des entités, après numérisation des contours, a été réalisé à l'aide d'un outil développé sous ArcGis et appelé « **modèle de construction du référentiel** ». Ce modèle contrôle aussi la cohérence topologique de l'assemblage 3D et détecte les anomalies.

Tous les assemblages régionaux ont été traités avec ce modèle de construction. Après traitements, une géodatabase est construite avec un « menu utilisateur » facilitant la visualisation des contours des entités aux différents niveaux du référentiel, la visualisation des différents ordres relatifs et permettant un contrôle supplémentaire du découpage réalisé.

6.1 GÉODATABASE

Il s'agit d'une géodatabase ArcGis (version 9.31). Elle contient la table des polygones représentant les « **Entités principales** » et la table des polygones représentant les limites des entités d'ordre 1 (pour les entités NV3 uniquement).

Ces deux tables (**RHF_Polygones relatifs** et **RHF_Limites**) sont rangées dans un « jeu de classes d'entités » (dans le langage ArcGis) appelé « **GEOMETRIE** » (Illustration 19).

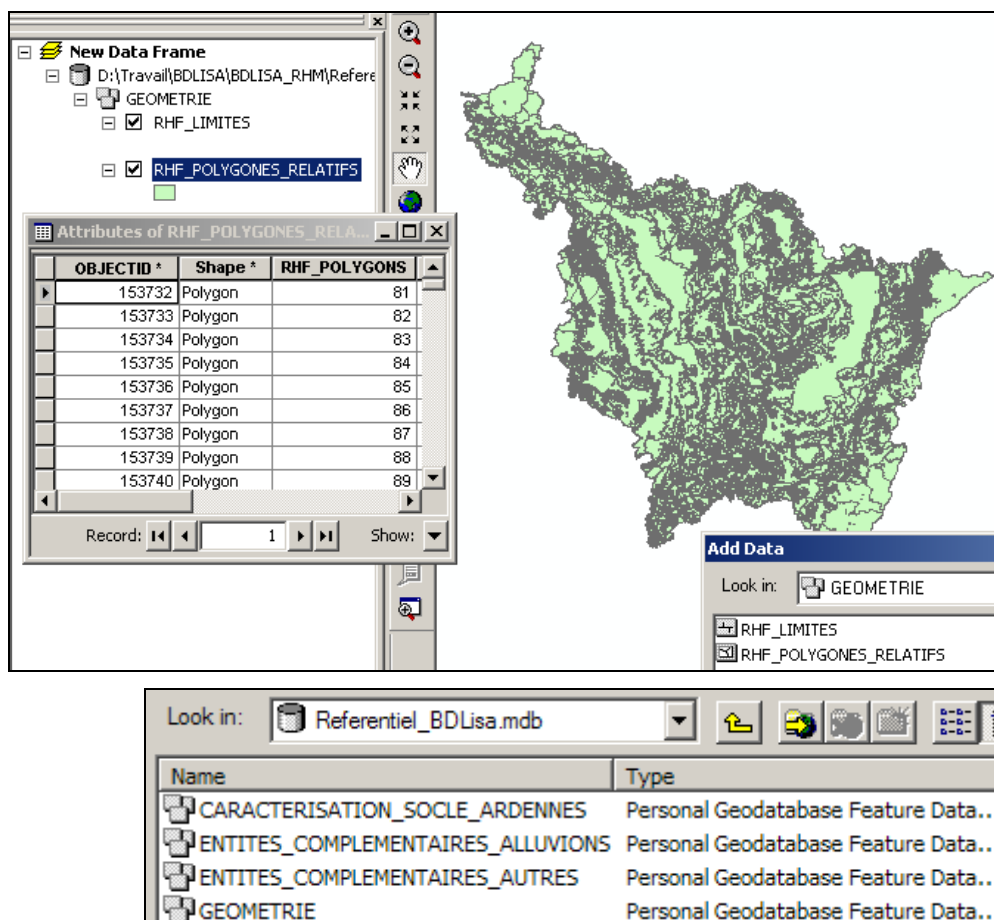


Illustration 19 - Accès à la géodatabase du référentiel par ArcMap.

Outre les « Entités principales », la géodatabase comprend :

- les « **Entités complémentaires** » (partie inférieure de l'illustration 19) scindées en deux classes, pour séparer les systèmes alluvionnaires des autres « entités complémentaires » (disjointes, morcelées et/ou locales) ;
 - la caractérisation lithologique des entités du socle des Ardennes.
- Elle contient aussi d'autres tables, sans géométrie associée (BDRHF_Table_Murs, BDRHF_Table_Toits, BDRHF_Table_Ordres,...Illustration 20).

| CHAMP * | CODE * | VALEUR |
|------------|--------|---|
| 2 CONTACT | DAAA | Aquifère-Domaine/Aquifère-Aquifère |
| 3 CONTACT | DAAD | Aquifère-Domaine/Aquifère-Domaine |
| 4 CONTACT | DADA | Aquifère-Domaine/Aquifère-Domaine |
| 5 CONTACT | DADD | Aquifère-Domaine/Domaine-Domaine |
| 6 CONTACT | DD | Domaine-Domaine/Domaine-Domaine |
| 7 CONTACT | DDAA | Domaine-Domaine/Aquifère-Aquifère |
| 8 CONTACT | DDAD | Domaine-Domaine/Aquifère-Domaine |
| 9 CONTACT | DDDA | Domaine-Domaine/Aquifère-Domaine |
| 10 CONTACT | DDDD | Domaine-Domaine/Domaine-Domaine |
| 11 ETAT | 1 | Nappe captive |
| 12 ETAT | 2 | Nappe libre |
| 13 ETAT | 3 | Nappe libre et captive |
| 14 ETAT | 4 | Alternativement libre puis captive |
| 15 LIMITE | A | Ligne de partage des eaux souterraines |
| 16 LIMITE | B | Limite étanche |
| 17 LIMITE | C | Ligne d'affluence d'un aquifère captif à un |
| 18 LIMITE | D | Ligne d'affluence des eaux de formations |
| 19 LIMITE | E | Ligne de sources de déversement |
| 20 LIMITE | F | Ligne de débordement continue ou discon |

Illustration 20 - Tables non géométriques de la géodatabase.

La structure de la géodatabase est conforme à celle d'un Système de Gestion de Base de Données Relationnelle (SGBDR). Son exploitation est facilitée par une boîte à outils pilotée par un menu général (Illustration 20).

Illustration 21 - Interface utilisateur de la géodatabase.

L'illustration 22 présente un exemple de sélection d'entité effectuée à partir du menu de l'illustration 21 ci-dessus (« Représenter l'entité par son emprise »).

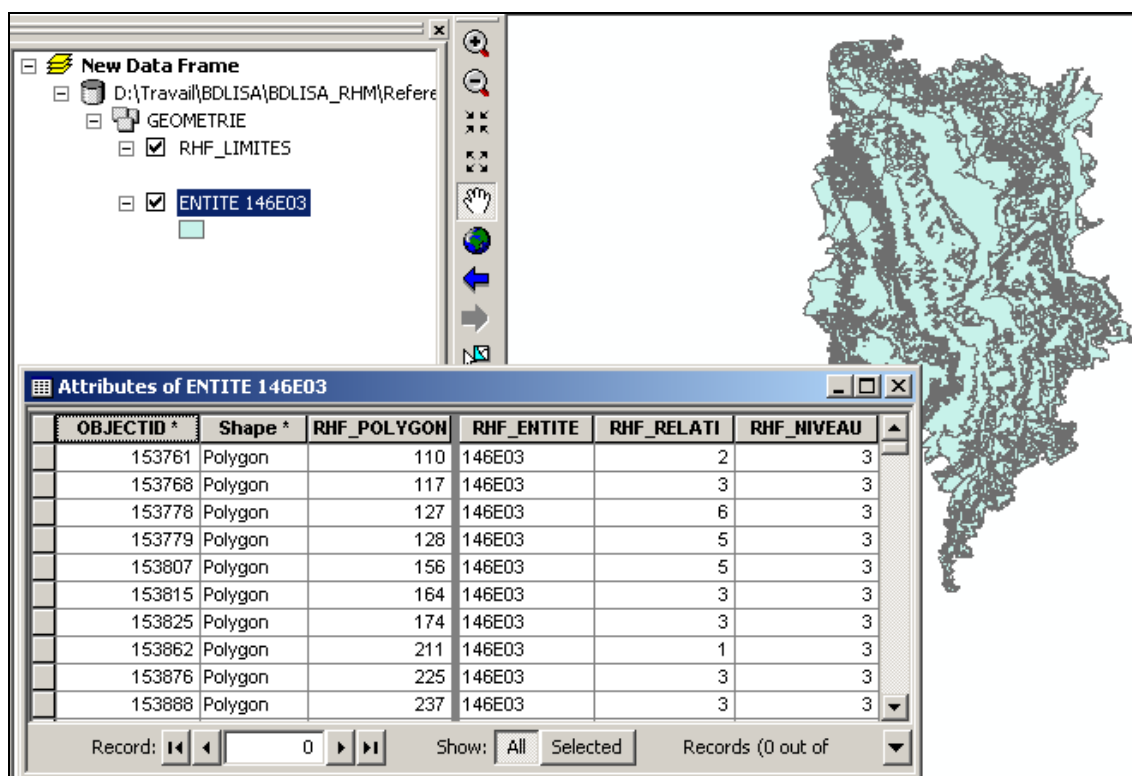
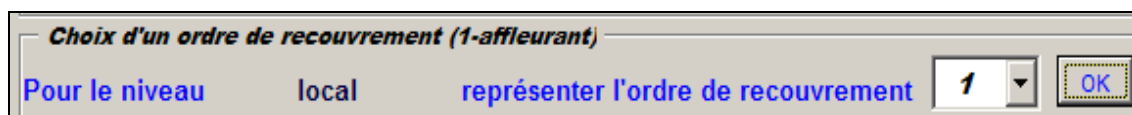


Illustration 22 - Exemple de sélection d'une entité de niveau 3 via le menu général.

La table attributaire correspondante contient le numéro d'ordre relatif de chaque polygone constitutif de l'entité, ce qui permet de représenter celle-ci en affectant une couleur à chaque numéro d'ordre et de connaître ainsi le nombre d'entités situées au-dessus d'elle, des affleurements jusqu'à sa limite d'extension en profondeur (Illustration 22).

Il est aussi possible de sélectionner des entités d'un niveau donné (NV1, NV2, NV3) et d'un certain ordre :



L'illustration 23 présente une vue des entités de niveau 3 et d'ordre 1 (une couleur est affectée à chaque entité).

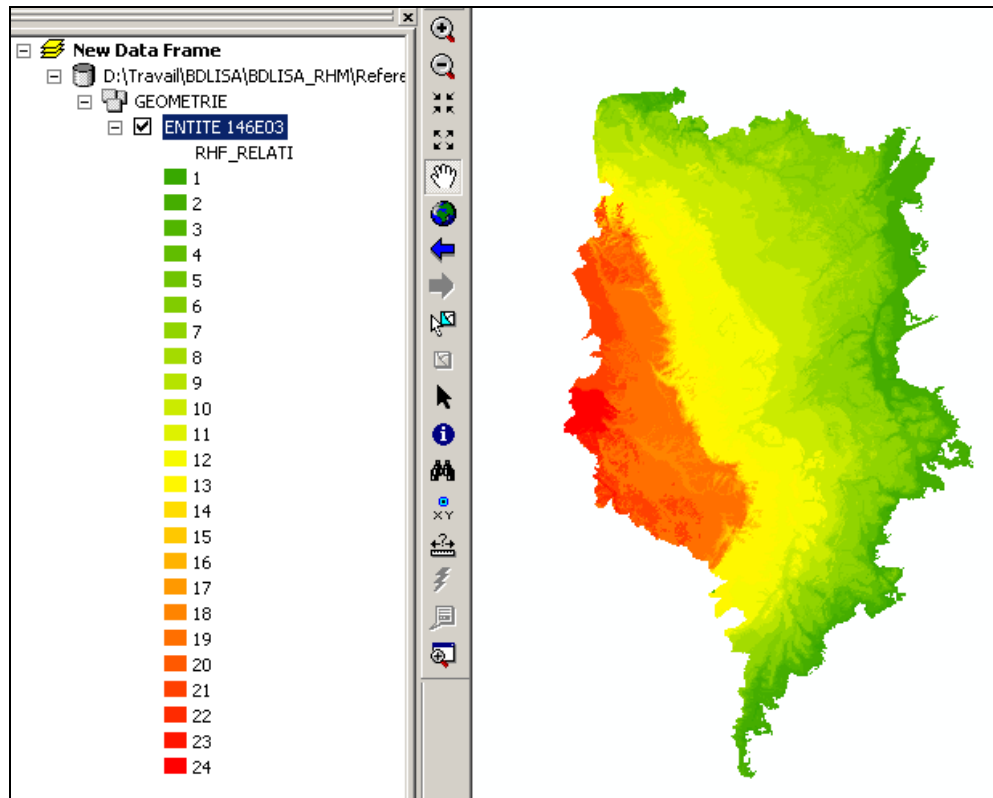


Illustration 23 - Cartographie d'une entité de niveau 3 avec ses ordres de recouvrement (ordres relatifs).

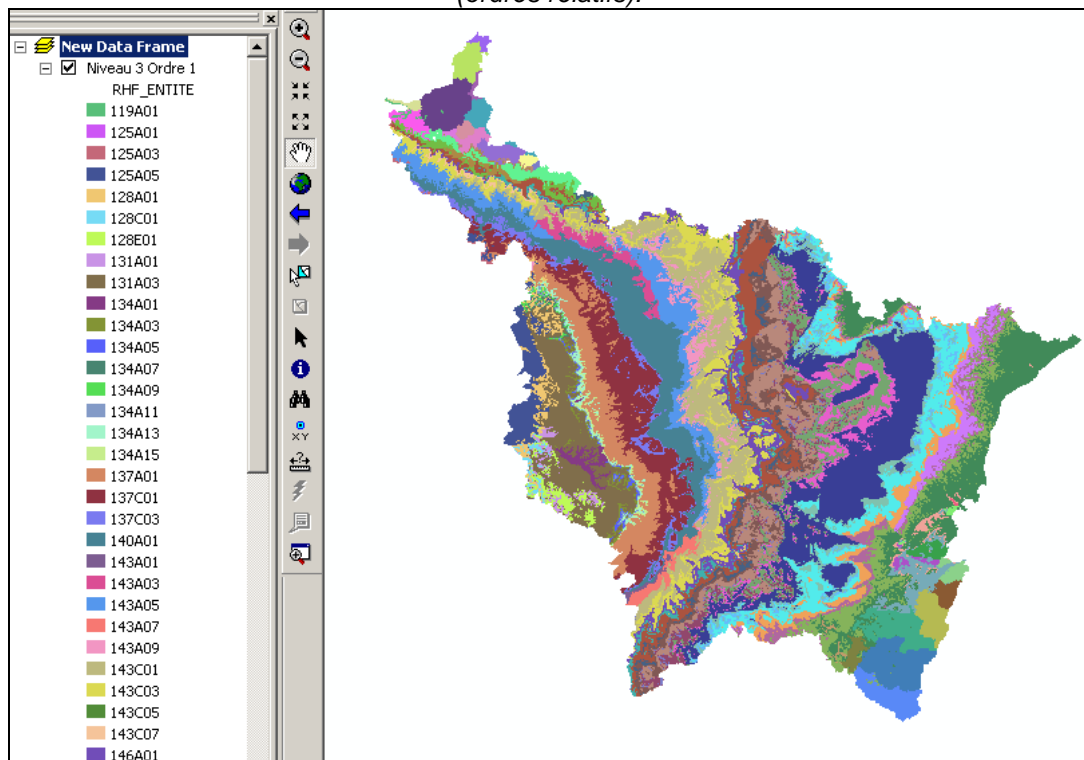


Illustration 24 - Exemple de sélection (entités de niveau 3 et d'ordre 1).

Limites et table de la nature des contacts

Elles sont aussi accessibles par le menu général. La table des limites contient l'identifiant des limites (champ ID_LIMITES) et l'identification des polygones situés de part et d'autre d'une limite (champs P_GAUCHE et P_DROIT).

Cette table contient aussi la nature des contacts entre entités (Illustration 25).

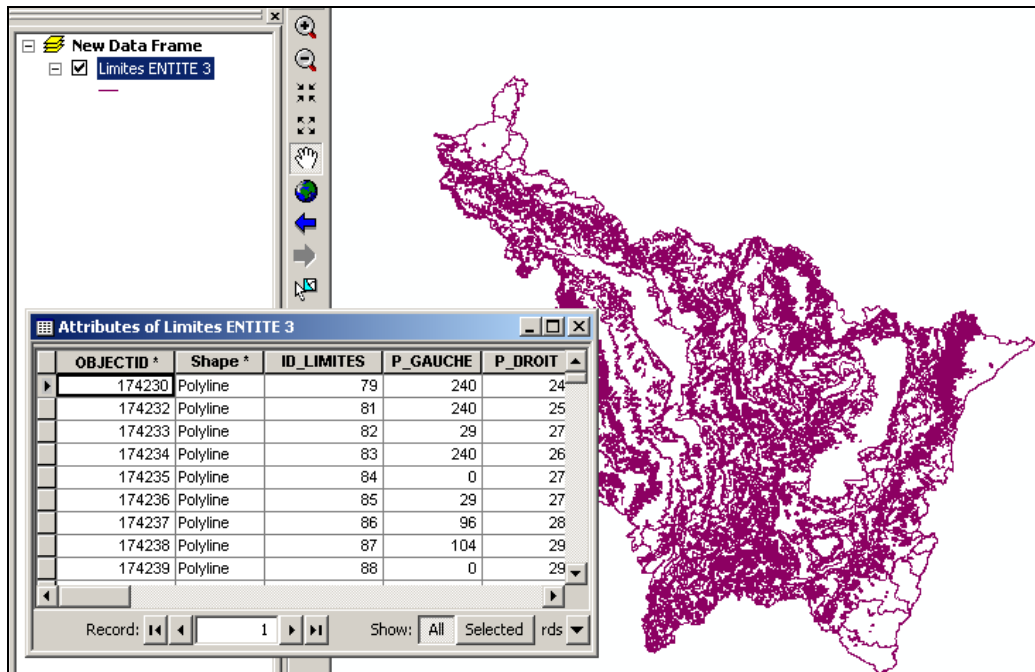


Illustration 25 - Tables des limites : identifiants des limites d'entités.

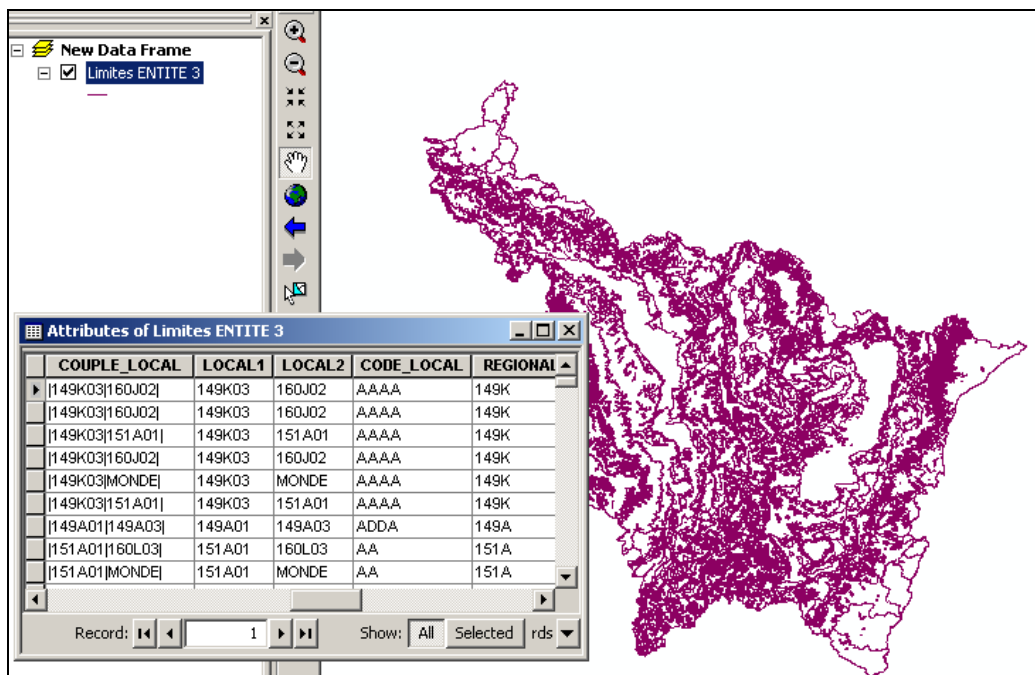


Illustration 26 - Table des limites : natures des contacts entre entités.

6.2 FICHES D'ANALYSE DES ENTITÉS

Le modèle de construction permet d'éditer automatiquement (Illustration 27) pour chaque entité une fiche au format pdf permettant d'analyser les « relations » de l'entité avec ses voisines et de vérifier la cohérence de l'assemblage 3D effectué par le modèle de construction.

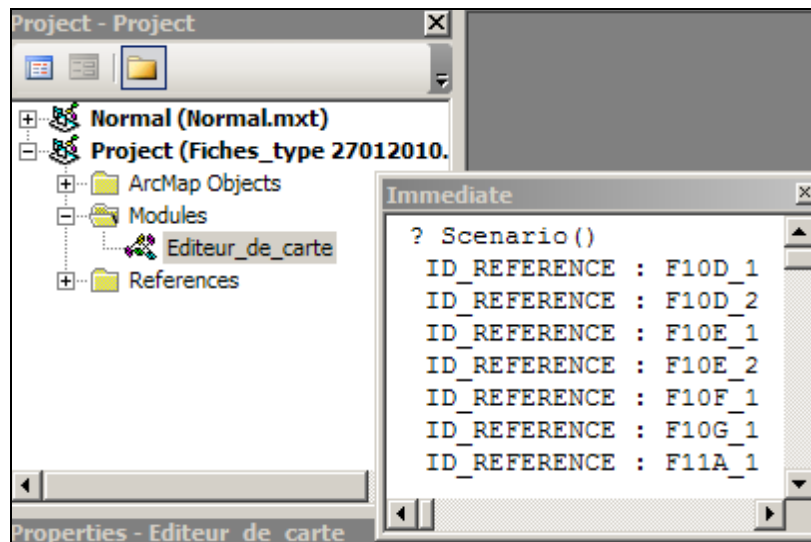


Illustration 27 - Éditeur de cartes du modèle de construction du référentiel.

Une fiche d'analyse est constituée de plusieurs blocs d'informations. Les Illustration 28 et Illustration 29 fournissent un exemple pour une entité de niveau 3 (« Calcaires à *Productylioceras*, Marnes à *Zeilleria* et Calcaires ocreux du Lias inférieur », du bassin Rhin-Meuse).

Sur la partie droite de la fiche Illustration 28), l'entité est représentée par une gamme de couleurs qui permet de la repérer verticalement dans la succession des couches qui la recouvrent, chaque couleur correspondant à un ordre de recouvrement.

La carte du haut de la fiche (Illustration 29) représente l'emprise de l'entité de niveau 2 (et celle de niveau 1) à laquelle appartient l'entité de niveau 3

Remarque : une entité NV2 pouvant être uniquement le regroupement sur une verticale d'entités NV3 sus-jacentes ou sous-jacentes d'extension moindre, l'emprise NV2 peut être identique à l'emprise NV3 (il en est de même pour l'emprise NV1).

La superficie des parties affleurantes (ordre 1) et des parties sous recouvrement (ordre 2, ordre 3...), en % de la superficie totale de l'entité, est fournie dans le bloc intitulé « *Ordre / Part %* » à gauche de cette carte.

Les blocs intitulés « *Toit* » et « *Mur* » listent les entités situées directement au-dessus de l'entité considérée (les « toits ») ainsi que les entités situées directement au-dessous (les « murs »), avec en vis-à-vis les superficies des entités constituant ces toits et murs.

Le bloc intitulé « *Limites affleurantes de long. > 1 km* » fournit la liste des entités mitoyennes de l'entité considérée (à l'ordre 1), la nature des contacts et la longueur (en km) de chaque tronçon de limite partagée.

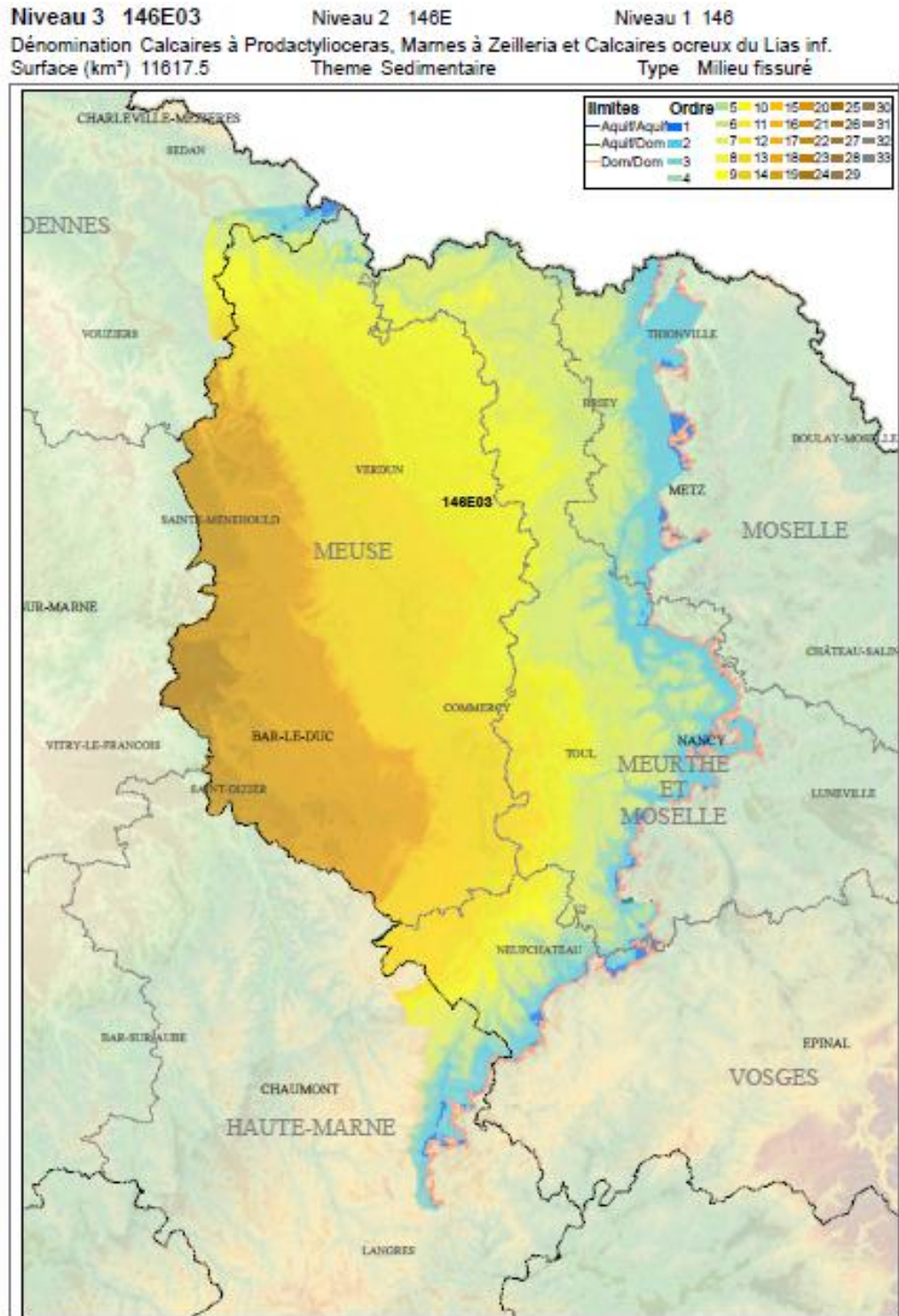


Illustration 28 - Exemple de fiche d'analyse d'une entité (partie gauche).

Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Délimitation des entités hydrogéologiques de la Réunion

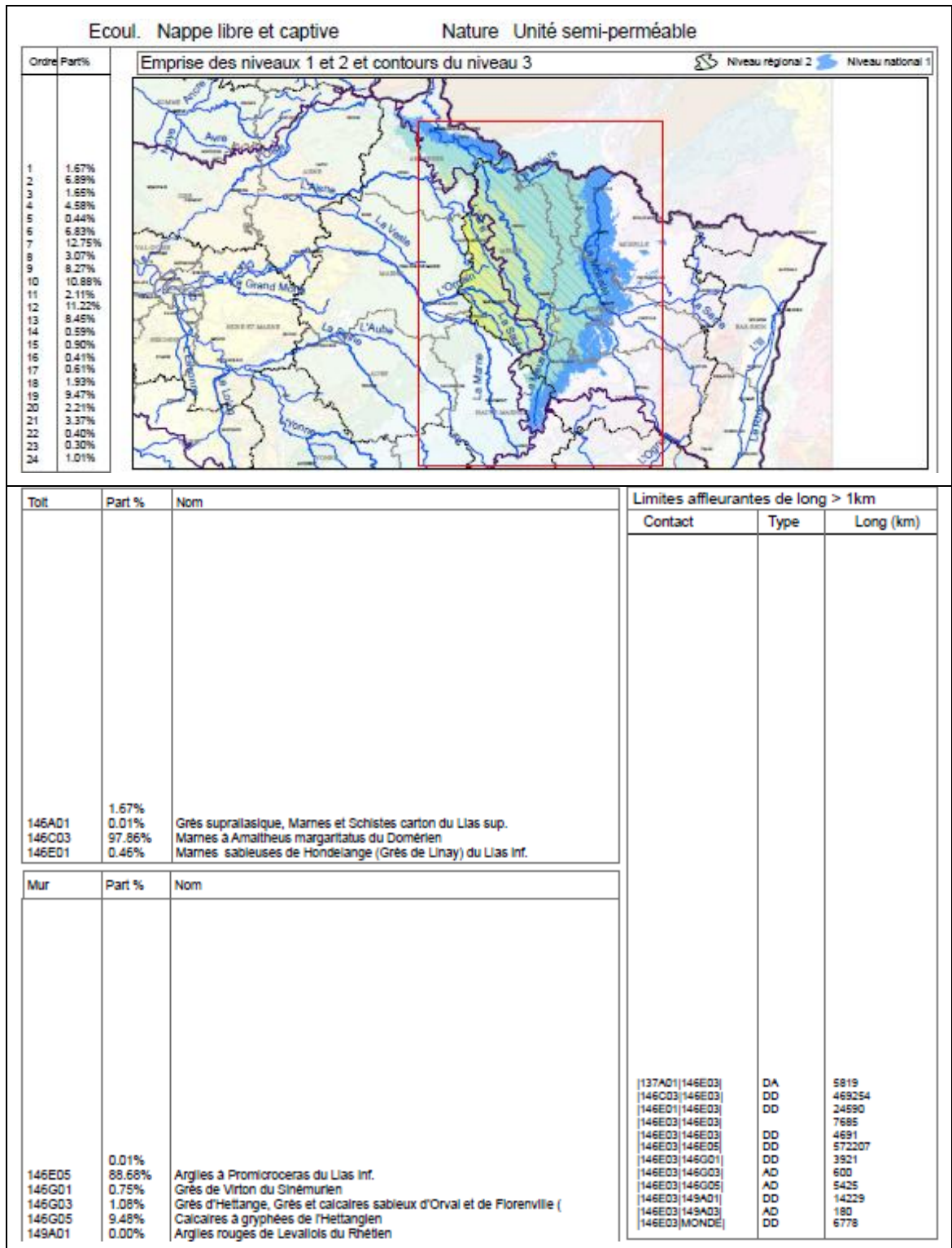


Illustration 29 : Exemple de fiche d'analyse d'une entité (partie droite)

7 Conclusion

Le travail réalisé à La Réunion dans le cadre du programme de construction du Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA a permis d'identifier et de délimiter :

- 39 unités aquifères ou semi-perméables de niveau local (Niveau 3),
- 15 systèmes aquifères de niveau régional (Niveau 2),
- 1 grand système aquifère national (Niveau 1) correspondant à La Réunion dans son ensemble,
- 6 surcouches.

Le découpage repose sur l'état des connaissances actuel. Il est donc susceptible d'évoluer à l'avenir en fonction de l'actualisation des connaissances et notamment au programme de forages de reconnaissance qui pourrait être réalisé.

Les données du référentiel BDLISA V0 peuvent être téléchargées et exportées depuis le site du Sandre (Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau) : <http://www.sandre.eaufrance.fr/>.

8 Bibliographie

Rapports de fin de phase 1

Petit V., Hanot F., Pointet T. (2003) – Référentiel hydrogéologique BD RHF. Guide méthodologique de découpage des entités. Rapport BRGM RP-52261-FR.

Petit V. (2004) – BDRHF - Découpage préalable et global. CDROM des documents. Présentation du contenu. Rapport BRGM/RP-53127-FR.

SANDRE (2004) – Description des données sur le référentiel hydrogéologique. Version 08 du 03/05/2004.

Aunay B., Geneviev M., Ladouche B., Maréchal J.-C. (2010) - Analyse fonctionnelle par traitement du signal et approche hydrochimique des aquifères du nord de la Réunion. BRGM/RP-57955-FR. 190 p.

Aunay B., Dewandel B., Ladouche B., Oliva Z., Saussol P. (2012) – Identification des modalités d'exploitation des ressources en eau souterraines du domaine d'altitude de l'Est de la Réunion – Phase 3 (secteur des Plaines). Rapport final, BRGM/RP-59245-FR.

Armines (1994) – Etude par modèle mathématique de l'aquifère inférieur de la région de St-André. Rapport Armines - Combes P. & Ledoux E. 27 p.

Billard G. (1974) - Carte géologique de la France au 1/50 000 - La Réunion. Carte en 4 feuilles et notice explicative, Editions du BRGM

BRGM – Université de la Réunion (2006) – Carte géologique au 1/100 000 – Kit pédagogique de la Réunion

BRGM –Diren – BRL (1998) - Atlas du SDAGE – édition de 1998

BRGM (1992) - L'eau potable à la Réunion — BRGM 92REU33

BRGM (1986) - Atlas hydrogéologique de la Réunion – octobre 1986 – BRGM 86REU30

Box, G.E.P. et Jenkins, G.M. (1974) - Time Series Analysis: Forecasting and Control. Holden-Day, San Francisco, Calif., 575 pp.

Cornaton F., Park Y. J., Normani S., Sudicky E. A., Sykes J. F. (2008) - Use of Groundwater Lifetime Expectancy for the Performance Assessment of a Deep Geologic Waste Repository : Theory, Illustrations, and Implications; Water Resources Research, 44, W04406, doi :10.1029/2007WR006208

Dewandel, B. , (in press) – Ré-interprétation des pompages d'essai réalisés dans la formation volcanique de la Plaine du Gol, La Réunion – BRGM/RP-XXXXX-FR. XX p.

Jenkins, G.M. et Watts, D.G. (1968) - Spectral Analysis and Its Applications. Holden-Day, San Francisco, Calif., 525 pp.

Ladouche B., Frissant, N., Mouvet, C., Feder, F., et Petit, V. (2006) – Etude de la zone non saturée sur le site de La Mare, commune de Sainte-Marie (La Réunion). Phase 2 – BRGM/RP-54419-FR. 95 p.

Lee, J.Y., et Lee, K.K. (2000) - Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 229 : 190–201.

Mangin, A. (1975) - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doct., Université de Dijon, Dijon (Ann. Spéleol., 1974 29(3): 283--332; 1974 29(4): 495--601; 1975 30(1): 21--124).

Mangin, A. (1984) - Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology*, 67:25-43.

Office de l'eau (2000) – Nappes stratégiques. Atlas du SDAGE. Comité de Bassin de la Réunion. Edition de juin 2000

Pinault, J.-L. (2001) - Manuel utilisateur de TEMPO. Logiciel de traitement et de modélisation des séries temporelles en hydrogéologie et en hydrogéochimie. Rapport BRGM/RP-51459-FR, 233p.

Seguin J.J., Mardhel V., avec la collaboration de **Schomburgk S.** (2013) - Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA, version 0 Présentation du référentiel, principes de construction et mise en œuvre. Rapport final. BRGM/RP-62261-FR. 154 p., 57 ill., 2 ann., 1 DVD.

Vaudour K. et Aunay B. (2009) - Identification des Ressources Stratégiques en Eau Souterraine pour la satisfaction des besoins AEP - Modifications de la note technique NT 2009-67 suite au CoPil du 09/09/2009, de la note technique NT 2009-79 suite au CoPil du 06/10/09 et de la note technique NT 2009-81 suite aux remarques du CoPil du 14/10/2009. Note Technique BRGM/SGR/REU du 15 octobre 2009 – NT 2009-89, Appui à la Police de l'eau

**Annexe 1 –
Tableau Multi-échelles et tableau de
correspondance avec les premiers codes
régionaux**

Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Délimitation des entités hydrogéologiques de la Réunion

| Niveau local: N1 | | | | | | | | | | Niveau régional: N2 | | | | | | | | | | Niveau national: N3 | | | | | | | | | |
|------------------|---|------------|------------|----------|------------|------------|-----------|------------|---|---------------------|------------|--|------------|------------|--|------------|---------------|--|--|---------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| RHF_ENTITE | RHF_DENOMINATION | RHF_ABSOLU | RHF_NIVEAU | RHF_ETAT | RHF_NATURE | RHF_MILIEU | RHF_THEME | RHF_ENTITE | RHF_DENOMINATION | RHF_NATURE | RHF_ENTITE | RHF_DENOMINATION | RHF_NATURE | RHF_ENTITE | RHF_DENOMINATION | RHF_NATURE | N1_RHF_NATURE | | | | | | | | | | | | |
| 97AA01 | Formations volcaniques du littoral de Saint-Denis-Saintes-Maries-Sainte-Suzanne-Saint-Jacques | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AA | Formations volcaniques de la plaine Nord | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AA02 | Formations volcaniques sommitales de Saint-Denis-Saintes-Maries-Sainte-Suzanne-Saint-Jacques | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AA | Formations volcaniques de la plaine Nord | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AA03 | Formations volcaniques du littoral de Bras-Panon, Saint-Benoit | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AB | Formations volcaniques de Bras-Panon, Saint-Benoit | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AB02 | Formations volcaniques du volcan bouclier ancien de Bras-Panon - Saint-Benoit | 10 | 3 | 3 | 6 | 6 | 5 | 97AB | Formations volcaniques de Bras-Panon, Saint-Benoit | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AB03 | Évolutions volcaniques sommitales du Mbastrin | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AB | Formations volcaniques de Bras-Panon, Saint-Benoit | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AB04 | Formations volcaniques du paléocône de Belcour-Balouze | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AB | Formations volcaniques de Bras-Panon, Saint-Benoit | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AB05 | Formations volcano-détritiques de l'île Patience | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AC | Formations volcaniques de Bras-Panon, Saint-Benoit | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AC01 | Formations volcano-détritiques de Cilaos | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AC | Formations volcaniques du cirque de Cilaos | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AG01 | Formations volcaniques du littoral de la plaine des Cocos | 10 | 3 | 2 | 5 | 6 | 5 | 97AG | Formations volcaniques des Makiès-Cocos-Gol | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AG02 | Formations volcaniques du littoral de la plaine du Gol | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AG | Formations volcaniques des Makiès-Cocos-Gol | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AG03 | Formations volcaniques sommitales et de transition des Makiès | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AG | Formations volcaniques des Makiès-Cocos-Gol | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AD01 | Formations volcaniques du littoral de Saint-Gilles | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AU | Formations volcaniques de Saint-Gilles | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AD02 | Formations volcaniques sommitales et de transition de Saint-Gilles | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AU | Formations volcaniques de Saint-Gilles | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AD03 | Formations volcaniques du littoral de La Montagne | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AL | Formations volcaniques de La Montagne | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AM01 | Formations volcano-détritiques de Mafate | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AM | Formations volcaniques du cirque de Mafate | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AP01 | Formations volcaniques du littoral de l'Etang-Saint-Paul plaine des caillots | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AP | Formations volcaniques de Saint-Paul, La Possession | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AP02 | Formations volcaniques sommitales et de transition de Saint-Paul | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AP | Formations volcaniques de Saint-Paul, La Possession | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AP03 | Formations volcaniques sommitales et de transition de Sainte-Thérèse | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AP | Formations volcaniques de Saint-Paul, La Possession | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AS01 | Formations volcano-détritiques de Salazie | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AS | Formations volcaniques du cirque de Salazie | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AW01 | Formations volcaniques du littoral de l'Etang-Silé | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AW | Formations volcaniques de la plaine Ouest | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AW02 | Formations volcaniques du littoral de la plaine Ouest | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AW | Formations volcaniques de la plaine Ouest | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AW03 | Formations volcaniques sommitales et de transition de la plaine Ouest | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AW | Formations volcaniques de la plaine Ouest | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AE01 | Formations volcaniques du littoral de la plaine Est | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AE | Formations volcaniques de la plaine Est | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AE02 | Formations volcaniques sommitales et de transition de la plaine Est | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AE | Formations volcaniques de la plaine Est | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AE03 | Formations volcaniques du paléocône de la Plaine des Palmistes | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AE | Formations volcaniques de la plaine Est | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AP01 | Formations volcaniques du littoral de Sainte-Rose-Saint-Philippe-Saint-Joseph | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AP | Formations volcaniques de Sainte-Rose-Saint-Philippe-Saint-Joseph | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AR02 | Formations volcaniques de Sainte-Rose-Saint-Philippe-Saint-Joseph | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AR | Formations volcaniques de Sainte-Rose-Saint-Philippe-Saint-Joseph | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AP01 | Formations volcaniques du littoral de Petite-Île-Saint-Pierre | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AH | Formations volcaniques de Sainte-Rose-Saint-Philippe-Saint-Joseph | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AH02 | Formations volcaniques sommitales et de transition de Petite-Île-Saint-Pierre | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AH | Formations volcaniques de la plaine Sud | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AT01 | Formations volcaniques de Pierrefonds | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AT | Formations volcaniques de la plaine Sud | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AT02 | Formations volcaniques sommitales et de transition du ravinon | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AT | Formations volcaniques de Pierrefonds-Ravinon-Blanche | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 97AT03 | Formations volcaniques de l'Entre-Deux | 10 | 3 | 3 | 5 | 6 | 5 | 97AT | Formations volcaniques de Pierrefonds-Ravinon-Blanche | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 3 | 97A | Grand système aquifère volcanique de l'île de la Réunion | 1 | | | | | | | | | | | | | |

Annexe 2 - Lexique de caractérisation des entités

. Caractérisation des entités

Dans le référentiel une entité sera caractérisée par les attributs suivants :

- **l'ordre d'apparition absolu** de l'entité, qui est l'ordre du tableau multi-échelles ;
- **le thème d'appartenance de l'entité**, parmi 5 possibilités (cf. tableau) ;
- **la nature** de l'entité, parmi 7 possibilités (cf. tableau ci-dessous) ;
- **le type de milieu caractérisant l'entité**: poreux, fissuré, karstique, double porosité ;
- **l'état hydrodynamique de la nappe** contenue dans le réservoir: libre, captive, libre et captive, alternativement libre et captive.

| Notation Theme | Code | Libellé | Définition |
|---------------------------|-------------|---------------------------------|--|
| ALL | 1 | Alluvial | Ensemble des dépôts de plaine alluviale accompagnés des terrasses connectées hydrauliquement avec les cours d'eau. |
| SED | 2 | Sédimentaire | Ensemble des formations peu ou pas déformées, non métamorphisées des bassins sédimentaires. |
| SOC | 3 | Socle | Formations magmatiques et métamorphiques. |
| IPM | 4 | Intensément plissés de montagne | Ensemble de formations géologiques récemment plissées appartenant aux massifs montagneux alpins, pyrénéens, languedociens et jurassiens. |
| VOL | 5 | Volcanisme | Volcanisme tertiaire et quaternaire ayant conservé une géométrie, une morphologie et/ou une structure volcanique identifiable. |

Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Délimitation des entités hydrogéologiques de la Réunion

| Notation Nature | Code | Libellé | Définition |
|-----------------|------|-------------------------|---|
| SA | 3 | Système aquifère | Un système aquifère est une entité hydrogéologique aquifère issue d'une subdivision verticale ou horizontale d'un grand système aquifère ou d'un grand domaine hydrogéologique. La subdivision s'effectue sur, au moins l'un des critères suivants : - lithologie, - structurale - stratigraphie - piézométrie - géochimique – hydraulique. La constitution des systèmes est issue de la connaissance à un instant donné du milieu souterrain. Le système aquifère est une entité de second niveau. |
| DH | 4 | Domaine hydrogéologique | Un domaine hydrogéologique est une entité hydrogéologique peu aquifère issue d'une subdivision verticale ou horizontale d'un grand domaine hydrogéologique ou d'un grand système. La subdivision s'effectue sur, au moins l'un des critères suivants : -lithologie, - structurale - stratigraphie - piézométrie - géochimique – hydraulique. Le domaine hydrogéologique est une entité du second niveau. |
| SA DH UA | 5 | Unité aquifère | L'unité aquifère est un système physique élémentaire présentant des conditions hydrodynamiques homogènes, suffisamment conductrices pour permettre la circulation de l'eau souterraine. Une unité aquifère est une entité hydrogéologique de niveau d'utilisation local présentant une perméabilité moyenne réputée supérieure à 10 ⁻⁶ m/s présentant des ressources en eau suffisante pour être exploitée. L'unité aquifère est une entité du 3ème niveau et elle correspond à la description la plus fine des entités hydrogéologiques pour le référentiel national. Ce concept résulte du découpage des domaines hydrogéologiques et des systèmes aquifères (éventuellement directement des grands domaines et des grands systèmes aquifères). |
| USP | 6 | Unité semi-perméable | Une unité semi-perméable est une entité hydrogéologique de niveau d'utilisation local présentant une perméabilité moyenne réputée comprise entre 10 ⁻⁹ m/s et 10 ⁻⁶ m/s et/ou présentant des ressources en eau mais de productivité insuffisante pour être exploitées. L'unité semi-perméable est une entité du 3ième niveau et elle correspond à la description la plus fine des entités hydrogéologiques pour le référentiel national. Ce concept résulte du découpage des domaines hydrogéologique et des systèmes aquifères (éventuellement directement des grands domaines et des grands systèmes aquifères). |
| UIP | 7 | Unité imperméable | L'unité imperméable est un système physique élémentaire présentant des faibles circulations d'eau. Une unité imperméable est une entité hydrogéologique présentant une perméabilité moyenne réputée inférieure à 10 ⁻⁹ m/s. « Qualifie un milieu théoriquement impénétrable et non traversable par un fluide et en pratique ne laissant passer aucun flux significatif sous un gradient de potentiel hydraulique donné" » [Dictionnaire Hydrogéologique Français] L'unité imperméable est une entité du 3ème niveau et elle correspond à la description la plus fine des entités hydrogéologiques pour le référentiel national. Ce concept résulte du découpage des domaines hydrogéologiques et des systèmes aquifères (éventuellement directement des grands domaines et des grands systèmes aquifères). |

| Notation | Code | Libellé | Définition |
|----------|------|---------|------------|
|----------|------|---------|------------|

Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Délimitation des entités hydrogéologiques de la Réunion

| Milieu | | | |
|--------|---|--|--|
| PM | 1 | Milieu poreux | Milieu doté d'une porosité significative |
| PF | 2 | Milieu fissuré | Milieu discontinu affecté de surfaces de séparation, ne traversant pas le massif rendu perméable. |
| PK | 3 | Milieu karstique | Milieu caractérisé par la présence dominante de roches carbonatées, par la rareté des écoulements superficiels, la présence de formes karstiques et par des sources à débit important. |
| DP | 4 | Double porosité : matricielle et de fissures | Milieu caractérisé à la fois par une matrice poreuse et par un réseau de fissures ayant tous deux un rôle hydrodynamique important. |
| DP | 5 | Double porosité : Karstique /fissures | Milieu caractérisé à la fois par un réseau karstique et par un réseau de fissures ayant tous deux un rôle hydrodynamique important. |
| DP | 6 | Double porosité : de fractures et/ou de fissures | Milieu caractérisé à la fois par un réseau de fractures et/ou par un réseau de fissures ayant tous deux un rôle hydrodynamique important. |
| DP | 7 | Double porosité : matricielle et de fractures | Milieu caractérisé à la fois par une matrice poreuse et par un réseau de fractures ayant tous deux un rôle hydrodynamique important. |
| DP | 8 | Double porosité : matricielle et karstique | Milieu caractérisé à la fois par une matrice poreuse et par un réseau de karstique ayant tous deux un rôle hydrodynamique important. |

| Notation Etat | Code | Libellé | Définition |
|---------------|------|---|---|
| C | 1 | Entité hydrogéologique à nappe captive | Une entité hydrogéologique est captive lorsqu'elle est confinée entre deux terrains peut ou pas perméables. |
| L | 2 | Entité hydrogéologique à nappe libre | Une entité hydrogéologique est libre lorsqu'elle n'est pas limitée vers le haut par des terrains imperméables. |
| LC ALC | 3 | Entité hydrogéologique à parties libres et captives | Une entité hydrogéologique est libre et captive lorsqu'elle est globalement libre ou captive mais comporte respectivement des parties captives ou libres à un ou plusieurs endroits de sa superficie. |

Annexe 3 - Etude fonctionnelle des aquifères littoraux de La Réunion

Sommaire de l'annexe

| | |
|--|-----------|
| 1. Etude fonctionnelle des aquifères littoraux de La Réunion | 79 |
| 1.1. METHODOLOGIE | 79 |
| 1.1.1. Généralité sur l'étude fonctionnelle des aquifères par les analyses corrélatoire et spectrale | 79 |
| 1.1.2. Pondération des chroniques de pluie | 81 |
| 1.1.3. Données à disposition | 81 |
| 1.2. VARIABILITE DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE..... | 86 |
| 1.2.1. Réactivité des aquifères | 86 |
| 1.2.2. Variabilité de la réponse hydrogéologique..... | 87 |
| 1.3. ETUDE GLOBALE | 89 |
| 1.4. ETUDE « CAS PAR CAS » POUR L'AIDE AU DECOUPAGE DES ENTITES. | 91 |
| 1.5. CONCLUSION SUR L'APPLICATION DU TRAITEMENT DU SIGNAL SUR LES DONNEES PIEZOMETRIQUES A LA REUNION | 93 |

Liste des illustrations

| | |
|--|----|
| Illustration 1. Exemple de fonction d'autocorrélation du niveau piézométrique journalier. | 80 |
| Illustration 2. Exemple de densité spectrale de puissance DSP du niveau piézométrique journalier. | 80 |
| Illustration 3. Exemple de fonction de corrélation croisée pluie et niveau piézométrique journaliers | 81 |
| Illustration 4. Carte géologique de la Réunion indiquant les secteurs d'étude et le nom des piézomètres sélectionnés. La terminologie des piézomètres est celle utilisée par l'Office de l'eau. | 83 |
| Illustration 5 – Caractéristiques des piézomètres. | 84 |
| Illustration 6 – Caractéristiques des pluviomètres utilisés pour la pondération des précipitations. Les chiffres représentent les coefficients de fonctions de pondération définis par le logiciel Tempo. | 85 |
| Illustration 7 – Réactivité des aquifères après un épisode pluvieux | 87 |
| Illustration 8 – Classification des piézomètres d'après l'allure des corrélogrammes croisés | 88 |
| Illustration 9 – Récapitulatif des résultats du traitement du signal | 89 |
| Illustration 10 – ACP sur les données de traitement du signal. Les deux graphiques du bas mettent en évidence les 5 classes de corrélogrammes croisés (A, B, C, D, et E) à gauche, et les 4 secteurs géographiques étudiés (NO, NE, SO, O) à droite. | 90 |
| Illustration 11 – Libellé des observations de l'ACP sur les données de traitement du signal | 93 |

1. Etude fonctionnelle des aquifères littoraux de La Réunion

1.1. METHODOLOGIE

1.1.1. Généralité sur l'étude fonctionnelle des aquifères par les analyses corrélatoire et spectrale

Les analyses corrélatoire et spectrale s'inscrivent dans le cadre de l'approche dite fonctionnelle de l'étude des hydrosystèmes et se basent sur les techniques de l'analyse statistiques des séries chronologiques (Jenkins et Watts, 1968 ; Box and Jenkins, 1974 ; Mangin 1975).

Le principe de base de ces méthodes est d'assimiler le système aquifère à un filtre qui laisse plus ou moins passer l'information contenue dans un signal d'entrée. Dans cette approche, l'aquifère est assimilé à une « boîte noire » dont la pluie et la piézométrie, par exemple, représentent respectivement l'entrée et la sortie. Les chroniques des signaux d'entrée et de sortie peuvent être traitées séparément dans le domaine temporel (analyse corrélatoire), ou dans le domaine fréquentiel (analyse spectrale). **L'intérêt des méthodes corrélatoires et spectrales est de mettre en évidence les phénomènes structurés influençant l'évolution temporelle des chroniques de mesure.**

L'analyse corrélatoire simple qui traduit la dépendance dans le temps des événements affectant la chronique, selon des intervalles de temps de plus en plus grand, permet de tester le caractère répétitif des séries temporelles et leurs éventuelles natures cycliques (Illustration 1). Le degré de ressemblance d'une série avec la même série décalée dans le temps est déterminé à l'aide de la fonction d'autocorrélation définie comme la valeur de la corrélation linéaire entre les valeurs des deux séries. Sur les chroniques de piézométrie par exemple, cette analyse permet de caractériser « l'effet mémoire » de l'aquifère qui traduit la dépendance dans le temps des valeurs piézométriques en présentant une décroissance plus ou moins rapide de la corrélation. En d'autre terme, l'effet mémoire est directement lié à l'inertie du système ; l'effet mémoire étant d'autant plus grand que le filtrage introduit par le système est important. **Pour comparer plusieurs fonctions d'autocorrélation, on peut définir l'effet mémoire comme le nombre de jour (« Lag ») nécessaire pour que la fonction d'autocorrélation (r_k) atteigne une valeur seuil.** Suite à plusieurs tests, un seuil de 0,4 a été choisi (Illustration 1).

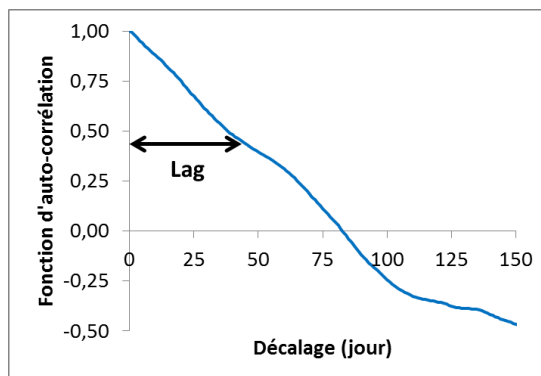


Illustration 30. Exemple de fonction d'autocorrélation du niveau piézométrique journalier.

L'analyse spectrale simple (densité spectrale de puissance DSP) permet d'identifier les différentes composantes de la variance totale en fonction de la fréquence (Illustration 2). En d'autre terme, la densité spectrale de puissance permet de caractériser i) les tendances du système à long terme, ii) les phénomènes périodiques saisonniers, et iii) les phénomènes purement aléatoires assimilables au bruit de fond. D'un point de vu mathématique, la densité spectrale de puissance est déterminée par la transformée de Fourier du corrélogramme simple (Box et Jenkins, 1974).

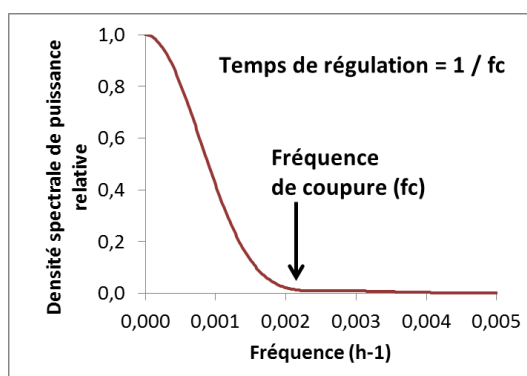


Illustration 31. Exemple de densité spectrale de puissance DSP du niveau piézométrique journalier.

Les spectres traduisent le même phénomène que la fonction d'autocorrélation et montrent que cet effet mémoire correspond à un filtrage des hautes fréquences au profit des basses fréquences. Il est, par conséquent, possible d'interpréter cette mémoire comme étant due au stockage d'un certain volume d'eau au moment des épisodes pluvieux, le déstockage apparaissant beaucoup plus tard (Mangin, 1984). Cet effet serait donc directement lié à l'importance des réserves. Les spectres permettent, en outre, dans le cas de systèmes ayant une relation entrée-sortie de type causal (pluie-piézométrie par ex.), de déterminer le temps de régulation qui exprime la durée d'influence de l'entrée du système. **Le temps de régulation est défini comme l'inverse de la fréquence de coupure f_c à partir de laquelle l'information peut être**

considérée comme négligeable avec de très faibles valeurs de DSP (Illustration 2). Nous avons déterminé f_c pour une valeur de DSP égale à 1%.

L'analyse corrélatoire croisée permet l'étude de la relation entrée-sortie et fournit une image approchée de la réponse impulsionnelle du système par le corrélogramme croisé (Illustration 3). Le **délai** qui est égal au décalage obtenu pour le maximum de corrélation (r_{max}) entre les deux séries détermine le temps de réponse du système. La surface de la fonction de corrélation croisée pour un $r(k)$ positif ($Aire_{r>0}$) donne une indication de l'amplitude de la relation entre le signal d'entrée et le signal de sortie.

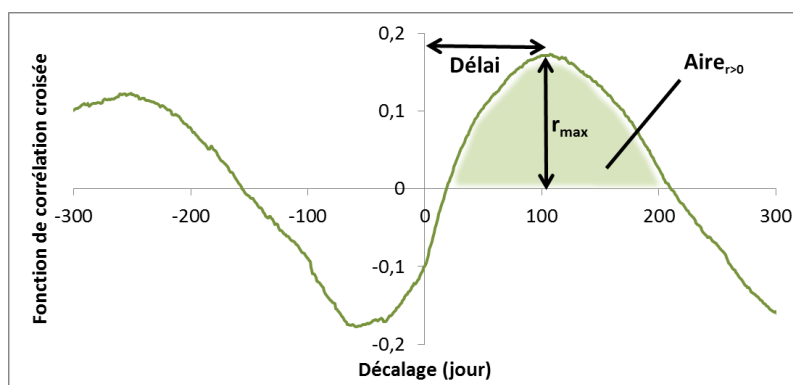


Illustration 32. Exemple de fonction de corrélation croisée pluie et niveau piézométrique journaliers

1.1.2. Pondération des chroniques de pluie

La pondération des chroniques de pluie permet d'optimiser une combinaison linéaire de plusieurs chroniques issues de stations différentes pour expliquer au mieux un niveau piézométrique. Lorsque plusieurs chroniques de pluie existent, plusieurs combinaisons linéaires peuvent être formées. Les poids associés aux différentes chroniques de pluie sont calculés de telle sorte que la combinaison linéaire fournissant la meilleure corrélation croisée avec la chronique piézométrique est retenue.

Les analyses corrélatoire et spectrale, ainsi que la pondération des pluies ont été réalisés à l'aide du **logiciel TEMPO développé au BRGM (Pinault, 2001)**. Les calculs ont été réalisés au pas de temps journalier.

1.1.3. Données à disposition

8.1.1.1 Piézométrie

Dans les zones où il existe peu d'informations pour aider au découpage d'entités hydrogéologiques, 25 piézomètres ont été sélectionnés sur la base de données de

l'Office de l'Eau Réunion (Illustration 4). De manière plus spécifique, l'objectif est de lever les incertitudes sur l'hydrogéologie :

- des formations fluvio-volcaniques au sud-ouest (Plaine du Gol), du Nord-Est (secteur du Port), et du Nord-Est (plaine du Mât) ;
- du secteur Saint-Pierre / Saint-Joseph (contraste en termes de propriétés hydrodynamiques) ;
- de la plaine Ouest.

Le critère de sélection des forages est celui d'un suivi automatique en continu. Ce critère est indispensable pour l'application des techniques de traitement du signal.

La longueur des chroniques n'a pas été prise comme critère de sélection des forages : l'observation des données piézométriques sur la Réunion est très récente et l'on dispose donc de peu d'historique. Les quantités calculées (r_{\max} , temps de régulation, etc.) seront donc entachées d'imprécisions sur les séries d'observations de longueur insuffisante.

L'illustration 5 présente les principales caractéristiques des séries piézométriques sélectionnées. Les ouvrages recoupent les différentes formations géologiques du massif du Piton des Neige : coulées basaltiques, brèches d'avalanches de débris et alluvions.

8.1.1.2 Pluie

Les données de pluie (Météo France) utilisées sont issues de 18 pluviomètres sélectionnés dans le but de prendre en compte la variabilité des précipitations sur le pourtour de l'île, ainsi que le gradient des précipitations lié à l'altitude. En effet, des études précédentes sur le secteur nord de l'île de La Réunion ont mis en évidence l'influence des pluies d'altitude sur la réponse piézométrique au niveau du littoral (Ladouche et al., 2006 ; Aunay et al., 2010). Chaque piézomètre utilisé dans cette étude est donc encadré par au moins trois pluviomètres dont l'un est situé à moins de 200 m NGR et un autre à plus de 200 m NGR.

Les poids respectifs des différents sites pluviométriques calculés pour chaque piézomètre considéré sont présentés dans l'illustration 6. Pour 10 piézomètres sur 25, la contribution des pluies d'altitude correspond à plus de 30 % de la pluie totale. Ces résultats confirment bien que, pour certains piézomètres, une part importante des variations piézométriques observées dans les ouvrages est liée à la recharge d'altitude. Dans ce contexte, on ne peut donc pas exclure la contribution d'un flux d'eau en provenance des versants au fonctionnement de la zone littorale.

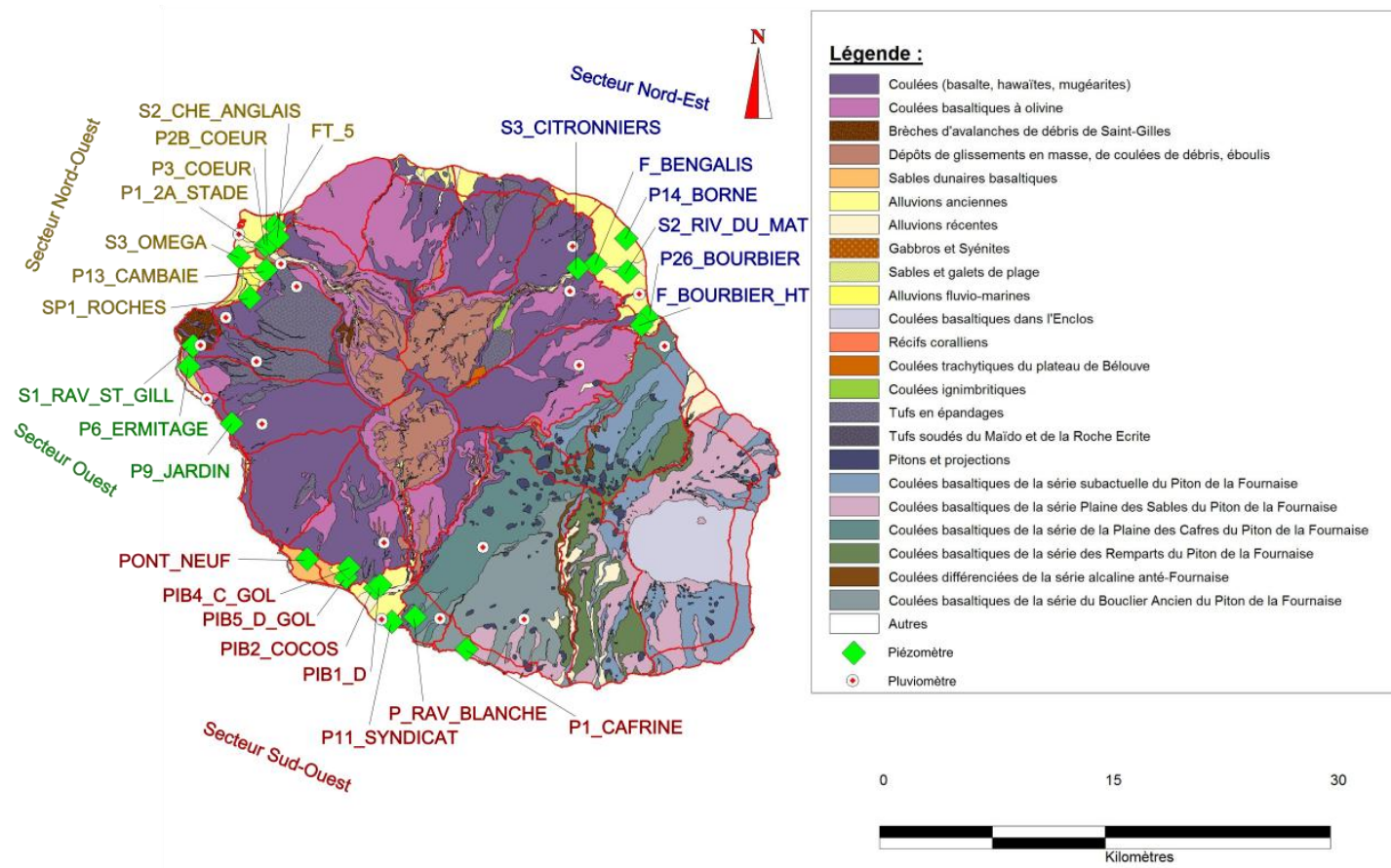


Illustration 33. Carte géologique de la Réunion indiquant les secteurs d'étude et le nom des piézomètres sélectionnés. La terminologie des piézomètres est celle utilisée par l'Office de l'eau.

Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Année 4. Délimitation des entités hydrogéologiques de la Réunion. Annexe 2.

| Nom selon BD Office de l'Eau | Dénomination de l'ouvrage | Caractéristiques de l'ouvrage | | Géologie dominante sur la hauteur crépinée | | Chroniques de mesure | | | Prof. piézométrique | | | |
|------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------|---|-----------------|-------------------------|------------|------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | Code bss | Alt. (m NGR) | Prof. (m) | Litho- logie | Stratigraphie | Début | Fin | Durée (an) | Min. (m) | Moy. (m) | Max. (m) |
| PONT_NEUF | 12283X0066 | | 60 | 120 | β | Phase-III | 01/09/2010 | 15/09/2011 | 1,0 | 58,26 | 58,07 | 57,91 |
| PIB4_C_GOL | 12287X0114 | | 20 | 100 | β | Phase-II | 01/01/2009 | 15/09/2011 | 2,7 | 16,34 | 16,15 | 16,01 |
| PIB5_D_GOL | 12287X0117 | | 5 | 90 | β | Phase-III | 07/10/2010 | 15/09/2011 | 0,9 | 1,66 | 1,45 | 1,23 |
| PIB2_COCOS | 12288X0047 | | 54 | 64 | β | Phase-III | 01/01/2009 | 12/10/2011 | 2,8 | 47,53 | 46,60 | 45,31 |
| P11_SYNDICAT | 12288X0078 | | 22 | 120 | β | Phase-IV / Phase-III | 14/06/2006 | 15/09/2011 | 5,3 | 20,95 | 20,71 | 20,33 |
| PIB1_D | 12288X0194 | | 65 | 150 | β | ? | 01/11/2010 | 12/10/2011 | 0,9 | 59,52 | 59,29 | 59,10 |
| P_RAV_BLANCHE | 12288X0089 | | 61 | 200 | β | ? | 02/09/2004 | 15/09/2011 | 7,0 | 55,94 | 55,52 | 55,05 |
| P1_CAFRINE | 12295X0040 | | 92 | 150 | β | Phase-III | 31/12/2008 | 13/10/2011 | 2,8 | 90,94 | 90,75 | 90,56 |
| F_BENGALIS | 12272X0064 | | 108 | 198 | All / β | All / ? | 01/01/2009 | 24/06/2010 | 1,5 | 91,99 | 89,49 | 88,29 |
| S3_CITRONNIERS | 12272X0070 | | 146 | 40 | All | All | 01/01/2009 | 08/09/2011 | 2,7 | 14,09 | 11,20 | 5,80 |
| P14_BORNE | 12273X0009 | | 23 | 133 | All / β | All / Phase-III | 01/01/2009 | 08/09/2011 | 2,7 | 13,72 | 13,47 | 13,21 |
| S2_RIV_DU_MAT | 12273X0014 | | 40 | 30 | All | All | 01/01/2009 | 08/09/2011 | 2,7 | 40,34 | 14,64 | 9,33 |
| P26_BOURBIER | 12277X0072 | | 35 | 136 | All / β | All / ? | 01/01/2009 | 08/09/2011 | 2,7 | 22,36 | 21,42 | 18,61 |
| F_BOURBIER_HT | 12277X0073 | | 82 | 130 | All / β | All / ? | 01/01/2009 | 08/09/2011 | 2,7 | 49,87 | 48,35 | 45,69 |
| SP1_ROCHES | 12262X0176 | | 9 | 20 | β | Phase-IV | 15/02/1994 | 05/10/2011 | 17,6 | 7,03 | 6,68 | 5,72 |
| P13_CAMBAIE | 12262X0170 | | 67 | 140 | All / β | All / Phase-IV | 27/07/2006 | 11/09/2011 | 5,1 | 64,52 | 64,23 | 63,46 |
| S2_CHE_ANGLAIS | 12262X0053 | | 60 | 131 | β | Phase-II | 01/10/2009 | 14/09/2011 | 2,0 | 58,00 | 57,85 | 57,38 |
| FT_5 | 12262X0064 | | 31 | 47 | All | All | 10/08/2010 | 14/09/2011 | 1,1 | 29,06 | 28,92 | 28,58 |
| S3_OMEGA | 12262X0162 | | 5 | 20 | All | All | 07/07/2010 | 14/09/2011 | 1,2 | 4,31 | 3,95 | 2,42 |
| P1_2A_STADE | 12262X0172 | | 80 | 64 | All | All | 01/01/2009 | 25/09/2011 | 2,7 | 56,97 | 37,47 | 37,21 |
| P3_COEUR | 12262X0174 | | 81 | 155 | β | Phase-II | 01/01/2010 | 19/09/2011 | 1,7 | 78,36 | 78,20 | 77,75 |
| P2B_COEUR | 12262X0337 | | 81 | 115 | All | All | 01/01/2009 | 18/09/2011 | 2,7 | 77,64 | 75,03 | 74,80 |
| S1_RAV_ST_GILL | 12265X0024 | | 61 | 120 | Br. | Phase-II | 01/01/2008 | 01/09/2011 | 3,7 | 39,15 | 38,93 | 38,57 |
| P6_ERMITAGE | 12265X0027 | | 2 | 50 | All / β | All / Phase-IV | 01/01/2009 | 15/09/2011 | 2,7 | 1,72 | 1,52 | 1,08 |
| P9_JARDIN | 12266X0081 | | 74 | 116 | β | Phase-II | 01/01/2009 | 17/05/2011 | 2,4 | 75,54 | 73,52 | 73,27 |

* All = alluvions ; β = basalte ; Br. = brèches

Illustration 34 – Caractéristiques des piézomètres.

Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Année 4. Délimitation des entités hydrogéologiques de la Réunion. Annexe 2.

| N° Insee | 97416463 | 97414431 | 97416465 | 97422465 | 97405420 | 97410202 | 97402240 | 97410250 | 97409240 | 97410238 | 97415511 | 97415516 | 97407520 | 97415520 | 97413520 | 97415550 | 97415541 | 97415590 |
|------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------------|-----------------|-------------|---------------|----------------------|----------------------------|----------|-----------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------|
| Nom Réduit | PIERRE FONDS- AERO | GOL_HT S_CIRA D | LIGNE- PARADI S - CIRAD | LE TAMPON - CIRAD | PITON- BLOC - CIRAD | BEAUVA LLON | BELLEV UE_BRA S_PANO N | TAKAMA KA-12 | MENCIO L | ST- BENOIT | ST_PAU L CIRAD | BDN-ST- PAUL - CIRAD | LE PORT | PLT_CAI LLOU | COLIMA CONS - CIRAD | ERMITA GE_CIR AD | TAN- ROUGE - CIRAD | PTE_3_B ASSINS |
| Altitude (m NGR) | 21 | 365 | 156 | 860 | 813 | 16 | 480 | 552 | 181 | 43 | 186 | 595 | 9 | 242 | 798 | 147 | 750 | 5 |
| NOM Piezo | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PONT_NEUF | 1 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| PIB4_C_GOL | 1 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| PIB5_D_GOL | 0,95 | 0,05 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| PIB2_COCOS | 0,67 | 0 | 0,33 | 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| P11_SYNDICAT | 0,67 | 0,33 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| P_RAV_BLANCHE | 0 | 0,67 | 0,33 | 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| PIB1_D | 0,3 | 0,08 | 0,62 | 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| P1_CAFRINE | | | 0,61 | 0,39 | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| F_BENGALIS | | | | | | 0,57 | 0 | 0 | 0 | 0,43 | | | | | | | | |
| S3_CITRONNIERS | | | | | | 0,11 | 0,2 | 0,05 | 0,42 | 0,22 | | | | | | | | |
| P14_BORNE | | | | | | 0,43 | 0 | 0 | 0,57 | 0 | | | | | | | | |
| S2_RIV_DU_MAT | | | | | | 0,33 | 0,22 | 0 | 0,44 | 0 | | | | | | | | |
| P26_BOURBIER | | | | | | 0 | 0,08 | 0,07 | 0,3 | 0,55 | | | | | | | | |
| F_BOURBIER_HT | | | | | | 0 | 0,1 | 0,16 | 0,28 | 0,47 | | | | | | | | |
| S2_CHE_ANGLAIS | | | | | | | | | | | 0,57 | 0,43 | 0 | 0 | | | | |
| FT_5 | | | | | | | | | | | 0,53 | 0,47 | 0 | 0 | | | | |
| S3_OMEGA | | | | | | | | | | | 0,31 | 0,69 | 0 | 0 | | | | |
| P13_CAMBAIE | | | | | | | | | | | 0,18 | 0,79 | 0 | 0,03 | | | | |
| P1_2A_STADE | | | | | | | | | | | 1 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| P3_COEUR | | | | | | | | | | | 0,31 | 0,69 | 0 | 0 | | | | |
| SP1_ROCHES | | | | | | | | | | | 0 | 0,89 | 0 | 0,11 | | | | |
| P2B_COEUR | | | | | | | | | | | 1 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| S1_RAV_ST_GILL | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0,53 | 0 | 0,47 |
| P6_ERMITAGE | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 1 | 0 | 0 |
| P9_JARDIN | | | | | | | | | | | | | | | 0,31 | 0 | 0 | 0,69 |

Illustration 35 – Caractéristiques des pluviomètres utilisés pour la pondération des précipitations. Les chiffres représentent les coefficients de fonctions de pondération définis par le logiciel Tempo.

1.2. VARIABILITE DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE

L'étude des corrélogrammes simples et spectres simples des chroniques piézométriques permettent respectivement de qualifier la nature inertielle des aquifères et de quantifier le filtrage des pluies. Ces indicateurs donnent une estimation de la réactivité des aquifères suite à un événement pluvieux.

L'étude des corrélogrammes croisés pluie et piézométrie permet d'étudier la réponse des aquifères à la recharge par les précipitations et permet en outre de qualifier la dynamique de transfert à travers la zone non saturée (ZNS) des systèmes.

1.2.1. Réactivité des aquifères

Pour un système donné, un faible effet mémoire (défini par le *Lag*) associé à un court temps de régulation signifie que les montées de nappe sont rapides après une pluie (Lee et Lee, 2000). Dans le cas de secteurs géographiques à perméabilité élevée, l'épaisseur de la ZNS joue un rôle important sur le filtrage du signal pluie et donc sur l'effet mémoire et le temps de régulation. S'affranchir de l'influence de l'épaisseur de la ZNS permet de mieux évaluer le comportement dans chaque formation géologique et de les comparer entre elles.

L'illustration 7 présente *ZNS/Temps de régulation* en fonction de *ZNS/Lag* (avec ZNS = profondeur piézométrique moyenne). Sur ce graphique, les piézomètres les moins réactifs sont ceux qui se situent en haut à gauche avec un fort effet mémoire, et un fort filtrage du signal pluie, et ce indépendamment de l'effet tampon de la zone non saturée. La variabilité de la réactivité des aquifères est alors principalement due à la structure et aux propriétés du réservoir. Globalement, les points s'alignent en échelle Log-Log, mettant en évidence une assez bonne relation entre les propriétés de filtrage de l'aquifère et l'effet mémoire du système. Une analogie avec les aquifères karstiques permet d'interpréter ce phénomène comme étant engendré par l'état des réserves dans l'aquifère (Mangin, 1984) : plus le stockage est important, et plus l'effet mémoire et le rôle de filtre de l'aquifère est élevé.

En comparant les différentes formations géologiques, on observe une assez forte variabilité de la réactivité des aquifères. Néanmoins, deux aspects sont distingués. Premièrement, la réactivité dans les basaltes semble être décroissante avec l'âge des formations géologique (K phase II < K phase III < K phase IV). Ainsi, cette tendance pourrait être notamment liée à l'état d'altération des formations. Deuxièmement, les forages recoupant des alluvions (uniquement, ou avec des intercalations de coulées basaltiques) ont une réactivité que l'on peut qualifier de moyenne en comparaison aux valeurs extrêmes rencontrées sur les forages ne recoupant que des basaltes. Ceci indique que le fonctionnement hydrogéologique des alluvions semble prédominer pour les forages mixtes alluvions/basaltes.

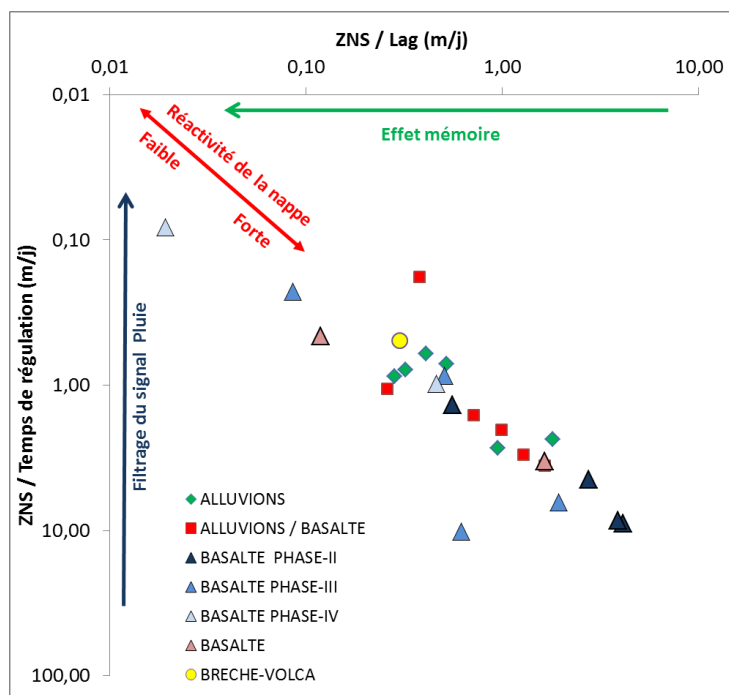


Illustration 36 – Réactivité des aquifères après un épisode pluvieux

1.2.2. Variabilité de la réponse hydrogéologique

L'allure des corrélogrammes croisés pluie et piézométrie dépend de la structure du système et des processus de recharge de l'aquifère. Elle permet donc de caractériser la réponse hydrogéologique. Afin de comparer les réponses, les différents piézomètres sont regroupés dans 5 classes de corrélogramme à allure similaire Illustration 8 :

- La classe A présente les piézomètres qui réagissent nerveusement : le *délai* est de 2 à 5 jours pour un pic très resserré (amplitude comprise entre 0,3 et 0.5). Ces piézomètres peuvent également présenter un second pic plusieurs jours après. Toutefois, celui-ci n'est pas pris en compte, dans le sens où son amplitude est nettement plus faible que le pic principal ;
- La classe B présente les piézomètres qui réagissent avec un effet retard comparé à la classe A : le *délai* est de 20 à 35 jours avec un pic bien marqué (amplitude ≈ 0.3) ;
- La classe C présente les piézomètres à réponse tamponnée : le *délai* est de 100 à 120 jours avec un pic très atténué (amplitude ≈ 0.2) ;
- La classe D présente les piézomètres pour lesquels les corrélogrammes pluie / piézométrie ne rentrent dans aucune des trois premières catégories. Sans qu'une relation formelle puisse être établie, il est nécessaire de noter que tous ces piézomètres sont par ailleurs localisés à proximité de secteur marqués par de forts prélèvements en eau souterraine ;
- La classe E présente les piézomètres non corrélés avec la pluie. La charge hydraulique de ces piézomètres est fortement influencée par les effets de

marée (altitude piézométrique de seulement quelques mètres NGR). Ce phénomène ne s'observe que pour les piézomètres à forte transmissivité.

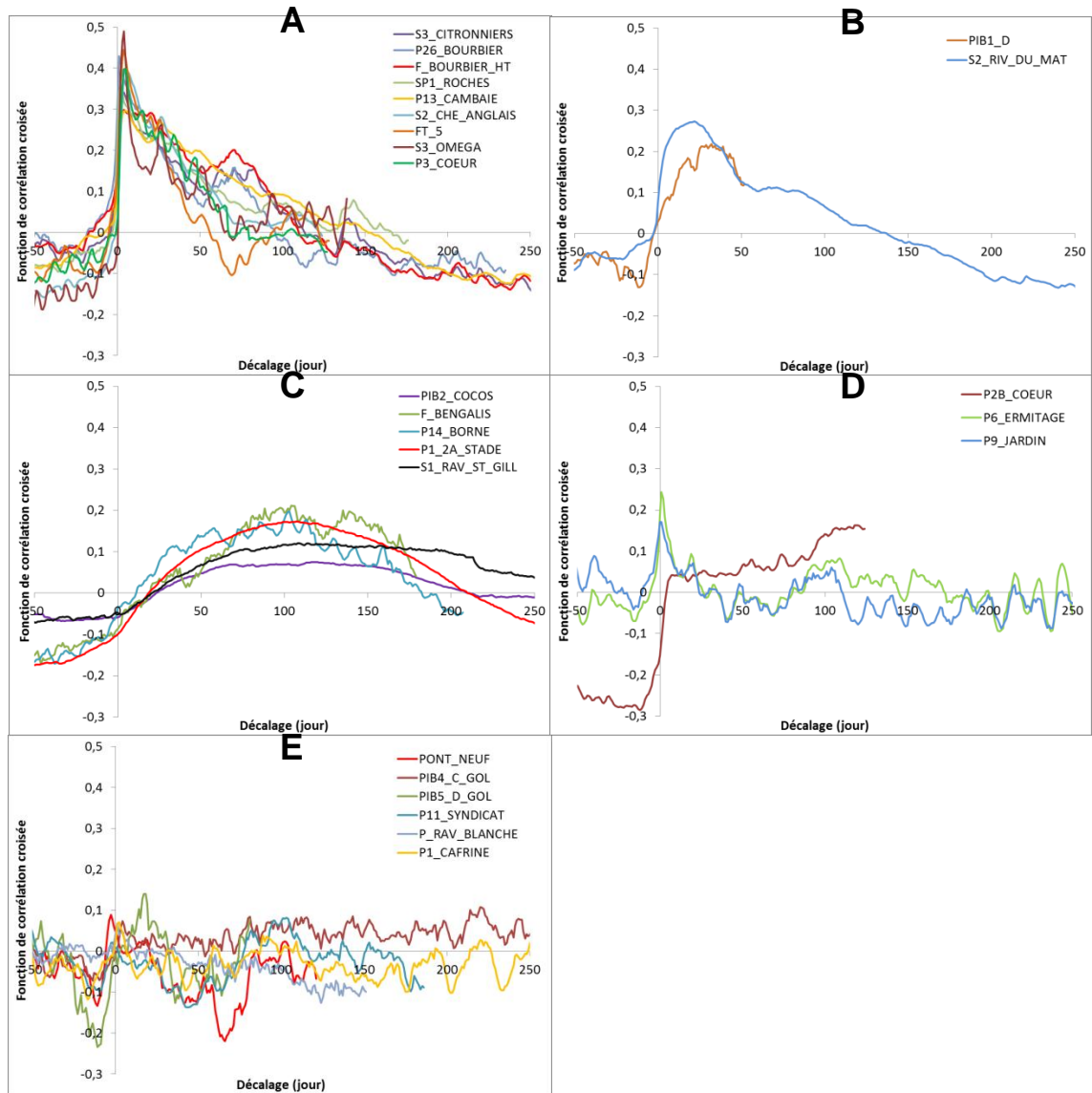


Illustration 37 – Classification des piézomètres d'après l'allure des corrélogrammes croisés

Pour chaque piézomètre, les différents paramètres suivants ont été déterminés : Temps de régulation, Lag, r_{max} , Délai, Aire (illustration 3). Ils sont synthétisés dans l'illustration 9. Leur analyse est présentée dans la section suivante.

| Piezomètre | Alt. | ZNS ^a | Temps de | Lag | r_{max} | Délai | Aire | ZNS / | ZNS / | Vitesse de |
|------------|------|------------------|----------|-----|-----------|-------|------|-------|-------|------------|
|------------|------|------------------|----------|-----|-----------|-------|------|-------|-------|------------|

Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Année 4. Délimitation des entités hydrogéologiques de la Réunion. Annexe 2.

| | (m NGR) | (m) | régulation (j) | (j) | (-) | (j) | (-) | Lag (m/j) | Temps de rég. (m/j) | transfert ^b (m/j) |
|----------------|---------|------|-------------------|--------------------|------|-----|------|--------------|---------------------------|---------------------------------|
| PONT_NEUF | 60 | 58,1 | 9,1 | 30 | 0,05 | 1 | 0,3 | 1,9 | 6,4 | 116,1 |
| PIB4_C_GOL | 20 | 16,2 | 11,8 | 29 | 0,11 | 220 | 9,9 | 0,6 | 1,4 | 0,1 |
| PIB5_D_GOL | 5 | 1,5 | 6,4 | 17 | 0,14 | 17 | 1,6 | 0,1 | 0,2 | 0,1 |
| PIB2_COCOS | 54 | 46,6 | 53,9 | 92 | 0,07 | 118 | 9,6 | 0,5 | 0,9 | 0,4 |
| P11_SYNDICAT | 22 | 20,7 | 21,3 | 45 | 0,08 | 103 | 1,7 | 0,5 | 1,0 | 0,2 |
| PIB1_D | 65 | 59,3 | 17,8 | 36 | 0,22 | 32 | 8,3 | 1,6 | 3,3 | 1,9 |
| P_RAV_BLANCHE | 61 | 55,5 | 120,5 | 469 | 0,07 | 1 | 0,4 | 0,1 | 0,5 | 55,5 |
| P1_CAFRINE | 92 | 90,7 | 8,9 | 147 | 0,07 | 2 | 0,3 | 0,6 | 10,2 | 45,4 |
| F_BENGALIS | 108 | 89,5 | 29,7 | 70 | 0,21 | 104 | 20,6 | 1,3 | 3,0 | 0,9 |
| S3_CITRONNIERS | 146 | 11,2 | 14,3 | 35 | 0,34 | 4 | 16,9 | 0,3 | 0,8 | 2,8 |
| P14_BORNE | 23 | 13,5 | 12,7 | 52 | 0,20 | 103 | 18,5 | 0,3 | 1,1 | 0,1 |
| S2_RIV_DU_MAT | 40 | 14,6 | 24,1 | 36 | 0,27 | 22 | 17,1 | 0,4 | 0,6 | 0,7 |
| P26_BOURBIER | 35 | 21,4 | 13,4 | 30 | 0,43 | 1 | 15,3 | 0,7 | 1,6 | 21,4 |
| F_BOURBIER_HT | 82 | 48,3 | 23,8 | 49 | 0,30 | 4 | 20,0 | 1,0 | 2,0 | 12,1 |
| SP1_ROCHES | 9 | 6,7 | 81,9 | 1 000 ^c | 0,36 | 2 | 17,6 | 0,0 | 0,1 | 3,3 |
| P13_CAMBAIE | 67 | 64,2 | 18,0 | 39 | 0,30 | 5 | 20,2 | 1,6 | 3,6 | 12,8 |
| S2_CHE_ANGLAIS | 60 | 57,9 | 13,0 | 21 | 0,40 | 5 | 15,4 | 2,8 | 4,5 | 11,6 |
| FT_5 | 31 | 28,9 | 12,3 | 16 | 0,44 | 4 | 10,8 | 1,8 | 2,3 | 7,2 |
| S3_OMEGA | 5 | 3,9 | 4,6 | 14 | 0,49 | 4 | 12,6 | 0,3 | 0,9 | 1,0 |
| P1_2A_STADE | 80 | 37,5 | 52,5 | 72 | 0,17 | 107 | 21,3 | 0,5 | 0,7 | 0,4 |
| P3_COEUR | 81 | 78,2 | 8,7 | 19 | 0,40 | 5 | 12,9 | 4,1 | 9,0 | 15,6 |
| P2B_COEUR | 81 | 75,0 | 27,7 | 79 | 0,16 | 119 | 9,6 | 0,9 | 2,7 | 0,6 |
| S1_RAV_ST_GILL | 61 | 38,9 | 78,8 | 130 | 0,12 | 109 | 21,2 | 0,3 | 0,5 | 0,4 |
| P6_ERMITAGE | 2 | 1,5 | 8,4 | 4 | 0,24 | 1 | 2,3 | 0,4 | 0,2 | 1,5 |
| P9_JARDIN | 74 | 73,5 | 8,6 | 19 | 0,17 | 1 | 1,8 | 3,9 | 8,5 | 73,5 |

^a ZNS = épaisseur de la Zone Non Saturée définie comme la profondeur piézométrique moyenne

^b Vitesse de transfert = ZNS / Délai

^c Valeur fictive car sur les données disponibles le corrélogramme simple n'atteint pas la valeur $r=0,4$

Illustration 38 – Récapitulatif des résultats du traitement du signal

1.3. ETUDE GLOBALE

L'étude globale incluant l'ensemble des piézomètres et les données pluviométriques permet de caractériser la variabilité du fonctionnement hydrogéologique d'une grande partie des aquifères de l'île de La Réunion. L'illustration 10 présente une analyse en composantes principales (ACP¹) des paramètres principaux déterminés par traitement du signal : l'épaisseur de la ZNS, le Temps de Régulation, le maximum de corrélation r_{max} , l'Aire, et la Vitesse de transfert (= ZNS / Délai).

¹ Pour une méthodologie détaillée de l'ACP, voir le rapport de C. Duby et S. Robin (www.agroparistech.fr/IMG/pdf/ACP2006.pdf) : « L'ACP fait partie du groupe des méthodes descriptives multidimensionnelles appelées méthodes factorielles... Les représentations des variables permettent d'étudier les structures de liaisons linéaires sur l'ensemble des variables considérées. Ainsi, on cherchera si l'on peut distinguer des groupes dans l'ensemble des unités en regardant quelles sont les unités qui se ressemblent, celles qui se distinguent des autres, etc. Pour les variables, on cherchera quelles sont celles qui sont très corrélées entre elles, celles qui, au contraire ne sont pas corrélées aux autres, etc. »

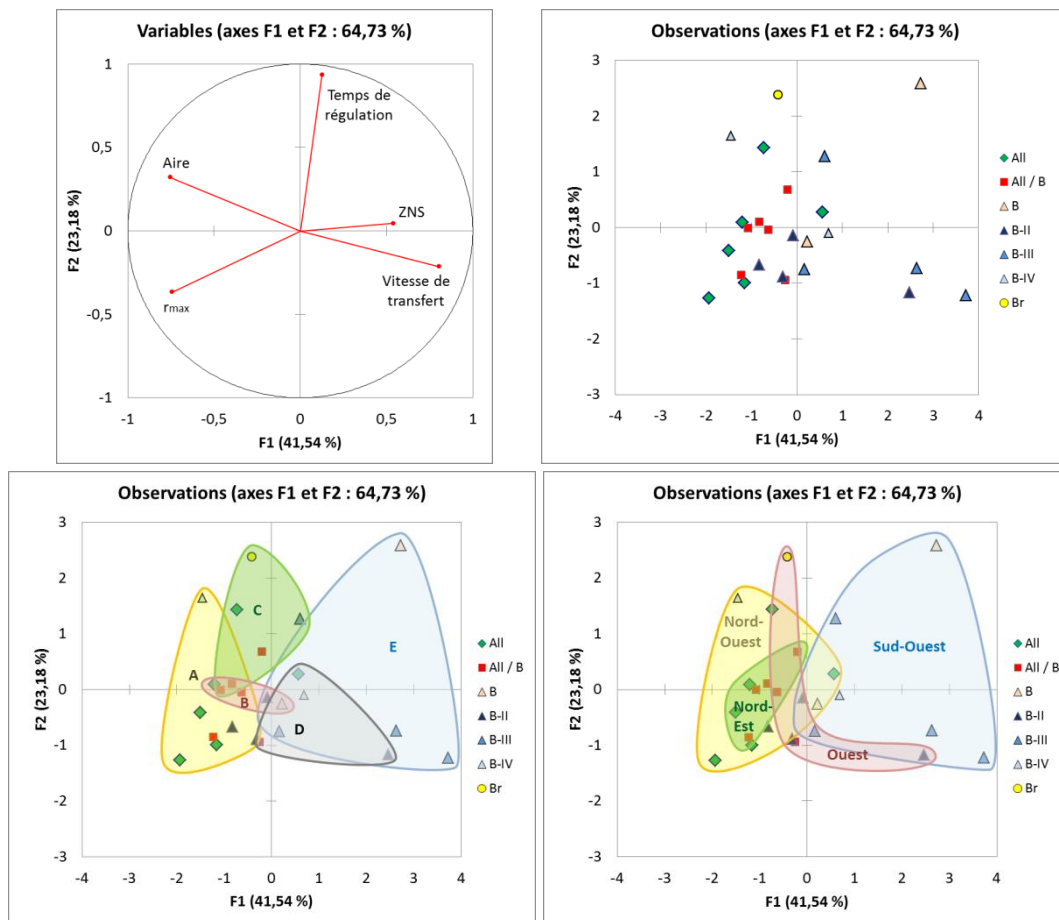


Illustration 39 – ACP sur les données de traitement du signal. Les deux graphiques du bas mettent en évidence les 5 classes de corrélogrammes croisés (A, B, C, D, et E) à gauche, et les 4 secteurs géographiques étudiés (NO, NE, SO, O) à droite.

Concernant les variables, l'interprétation suivante est proposée :

- La vitesse de transfert dans la ZNS et le temps de régulation sont respectivement les variables qui contribuent le plus aux facteurs 1 et 2 (qui contribuent à eux deux à près de 65% de l'inertie) ;
- On observe une opposition entre r_{\max} et ZNS qui montre l'effet tampon de la ZNS sur la réponse hydrogéologique : plus la ZNS est grande, et plus le signal pluie est atténué (c.a.d r_{\max} diminue) ;
- On observe une opposition entre le groupe des variables Aire et r_{\max} , et la variable Vitesse de transfert. Ceci montre que les aquifères ayant une vitesse de recharge élevée sont également ceux qui ont de grandes réserves supposées. En effet, si l'on considère que l'Aire définit l'amplitude de la corrélation Pluie et Piézométrie, elle renseigne alors sur le niveau de filtrage des pluies. On considère ici qu'une forte réserve supposée - associée à une

porosité efficace élevée - va atténuer le signal pluie, et donc réduire les paramètres r_{max} et Aire. Ainsi, sur l'axe 1, les aquifères situés à droite sont ceux pour lesquels les propriétés hydrauliques sont les meilleurs (vitesse de recharge élevée et réserves supposées importantes).

Concernant les observations, l'interprétation est la suivante :

- le facteur 1 permet de différencier le fonctionnement des deux grandes familles des alluvions et des basaltes ;
- Les alluvions ont de faibles propriétés hydrauliques (faibles réserves et faible vitesse de transfert) ;
- Les basaltes ont une plus grande variabilité dans leur fonctionnement, mais ont des propriétés globalement plus intéressantes au niveau hydraulique ;
- Les piézomètres qui recoupent les deux types de formations présentent un fonctionnement principalement contrôlé par les alluvions ;
- Le forage dans les brèches d'avalanches de débris présente une très forte inertie expliquée par la faible perméabilité de ce type de formation (secteur ravine St-Gilles).

La superposition de l'étendue des classes de corrélogrammes sur le graphique des observations de l'ACP (Illustration 10) met en évidence un fonctionnement peu individualisé pour les classes A, B et C, et cela quelle que soit la géologie. Par contre, les piézomètres principalement influencés par les marées (non corrélés avec la Pluie - classe E) se localisent principalement au sein des basaltes.

La superposition des secteurs géographiques sur le même graphique (Illustration 10) montre :

- Au Nord-Est (secteur Ste Suzanne – St Benoît), une relative homogénéité des piézomètres, qui tend à justifier une certaine continuité des aquifères quelle que soit la géologie ;
- Au Nord-Ouest (secteur du Port), une forte variabilité de l'inertie et des propriétés hydrauliques qui tend à justifier une compartimentation des aquifères dans les dépôts alluvionnaires et basaltiques (aquifère multicouches) ;
- A l'Ouest, (secteur St Gilles – St Leu), une forte variabilité sur ce secteur qui comprend également des avalanches de débris ;
- Au Sud-Ouest (secteur Etang Salé, Plaine du Gol, St Pierre), une très forte variabilité dans les coulées basaltiques, mais qui peut également être due à l'absence de corrélation entre pluie et piézo (classe E). Les variations de ces piézomètres très transmissifs sont principalement contrôlées par les marées (résultats intermédiaires du projet HydroGol – Cofinancement : BRGM – Office de l'eau – CG974 - DEAL).

1.4. ETUDE « CAS PAR CAS » POUR L'AIDE AU DECOUPAGE DES ENTITES

Chaque secteur est étudié sur la base de l'analyse détaillée des observations de l'ACP présentée précédemment (Illustration 11).

Secteur Sud-Ouest : Le fonctionnement apparaît très différent entre PONT_NEUF (974AF02) et le groupe des deux piézomètres PIB_4C et PIB5D (974AF01).

⇒ **Préconisation** : sur la base du traitement du signal, la séparation entre 974AF01 et 974AF02 doit être maintenue.

Secteur Nord-Est : les piézomètres sont relativement resserrés sur l'ACP, ce qui montre une relative homogénéité du fonctionnement hydrogéologique quelle que soit la géologie.

⇒ **Préconisation** : sur la base du traitement du signal, on peut considérer une continuité des aquifères dans ce secteur entre alluvions et basaltes. La séparation au sein de l'unité 974AA02 n'apparaît donc pas utile.

Secteur Nord-Ouest (Le Port) : On observe une forte variabilité de l'inertie et des propriétés hydrauliques quelle que soit la géologie

⇒ **Préconisation** : sur la base du traitement du signal, on peut considérer une compartimentation des aquifères alluvionnaires et basaltiques dans l'aquifère de Saint-Paul (aquifères multi-couches). Cependant, la connaissance hydrogéologique du secteur n'est pas suffisante pour subdiviser cette entité.

Secteur Ouest : Le piézomètre S1_RAV_ST_GILLES dans les brèches d'avalanches de débris présente un fonctionnement assez atypique très inertiel qui justifie pleinement la séparation des deux entités (974AH01 et 974AH03).

⇒ **Préconisation** : sur la base du traitement du signal, la séparation entre 974AH01 et 974AH03 doit être maintenue.

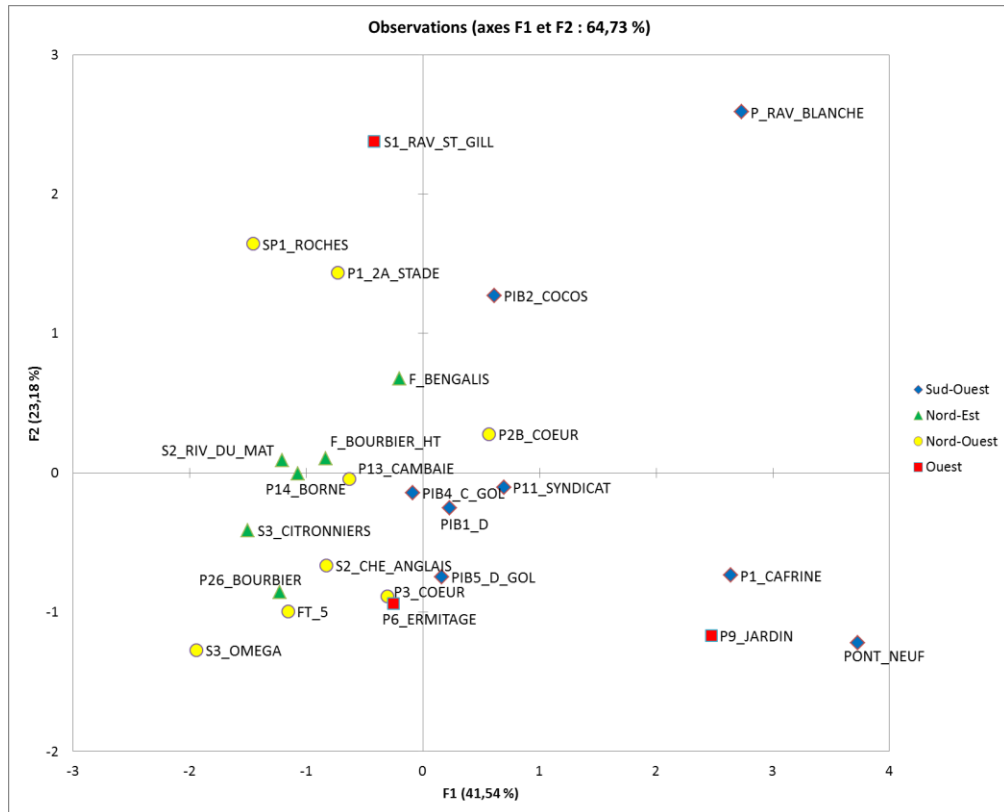


Illustration 40 – Libellé des observations de l'ACP sur les données de traitement du signal

1.5. CONCLUSION SUR L'APPLICATION DU TRAITEMENT DU SIGNAL SUR LES DONNEES PIEZOMETRIQUES A LA REUNION

L'objectif de ce chapitre sur l'application des techniques de traitement du signal sur les chroniques piézométriques à La Réunion avait pour but de « rationaliser » les réflexions menées sur le découpage des entités hydrogéologiques. Plus concrètement, il s'agissait d'apporter des éléments pour mieux comprendre la variabilité spatiale du fonctionnement hydrogéologique sur divers secteurs à l'échelle de l'île.

La synthèse des données géologiques et hydrogéologiques de 25 piézomètres suivi en continu a permis de caractériser la variabilité du fonctionnement hydrogéologique en lien avec la géologie et les propriétés de l'aquifère (inertie, réserve, vitesse de transfert). L'analyse globale des paramètres issus des résultats du traitement du signal (effet mémoire, temps de régulation, vitesse de transfert, etc.) s'est révélée positive pour expliquer en partie cette variabilité. Ceci a conduit à différencier ou non le comportement de certains piézomètres. Sur cette base, la séparation ou le regroupement des entités hydrogéologiques a été préconisé.

Cependant, la validité des résultats issus de cette analyse systémique est liée au nombre et à la qualité de données disponibles (nombre de piézomètres et longueur des chroniques de mesures). Sur les 25 piézomètres suivis en continu, 20 piézomètres ont moins de 3 ans de chroniques et 5 piézomètres ont à peine 1 an de suivi. Les résultats sur l'inertie des nappes captées par ces piézomètres sont à prendre avec précaution.

Il est donc recommandé à la suite de cette étude de compléter le réseau piézométrique suivi en continu pour affiner les résultats présentés dans cette étude, et mieux caractériser les sous-ensembles hydrogéologiques homogènes. Ceci est d'autant plus important pour aider au découpage BD-LISA en milieux hétérogènes.



Centre scientifique et technique BRGM Réunion

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

5, rue Sainte-Anne,
B.P. 906
97478 SAINT DENIS CEDEX
Tél. : 02 62 21 22 14