

Le phénomène d'intrusion saline à La Réunion : état des connaissances et synthèse des données disponibles

Rapport « final »

BRGM/RP-54330-FR
Décembre 2005

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2005 05EAUD16

N. Frissant, C. René-Corail
Collaboration de J. Bonnier et Y. De La Torre

Vérificateur :

Original signé par
Vincent Petit

Approbateur :

Original signé par
Philippe Roubichou

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : intrusion saline, biseau salé, contexte volcanique insulaire, La Réunion, hydrogéologie

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

Frissant N., René-Corail C., coll. Bonnier J. et De La Torre Y. (2005) - Le phénomène d'intrusion saline à La Réunion : état des connaissances et synthèse des données disponibles. Rapport BRGM/RP-54330-FR, 64 p., 27 ill., 4 tabl.

© BRGM, 2005, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le Département de La Réunion et la DIREN ont sollicité le BRGM pour réaliser dans le cadre de ses actions de Service public une étude hydrogéologique relative aux intrusions salines à La Réunion. Elle a été cofinancée par le Département de La Réunion (Convention DID 01-05 en date du 3 février 2005), par la DIREN (convention en date du 30 novembre 2005) et par la dotation de Service public du BRGM.

L'étude a pour objectifs :

- de faire une synthèse des connaissances sur les phénomènes d'intrusion saline dans des milieux similaires à celui de La Réunion ;
- d'établir un inventaire des ouvrages et des zones menacées par les intrusions salines à La Réunion ;
- d'établir des relations entre les intrusions salines et d'une part la caractérisation physique du milieu et d'autre part le mode de gestion des ouvrages exploités.

Les intrusions salines sont fréquentes dans les aquifères côtiers et limitent leur exploitation. Ces phénomènes sont régis par les lois de l'hydrodynamique et de la diffusion moléculaire qui sont bien connues, mais qui peuvent néanmoins conduire à des configurations complexes engendrées par l'hétérogénéité du milieu naturel.

L'identification et la cartographie du biseau salé sont des éléments importants pour l'évaluation des ressources exploitables. A cette fin, il existe plusieurs méthodes : suivi piézométrique, géophysiques de surface, diagraphies de forage, analyses chimiques et isotopique et modélisations hydrodynamiques. Ces méthodes sont complémentaires mais la pertinence de leur mise en œuvre doit être appréhendée au cas par cas.

Ces mêmes approches peuvent être utilisées comme dispositif d'alerte afin de suivre la progression du biseau salé liée à une exploitation excessive ou inadéquate des aquifères côtiers.

Des techniques existent pour limiter les intrusions salines. Elles déclinent sous différentes formes le principe de barrage souterrain (barrage hydraulique, mécanique ou biologique).

L'inventaire des ouvrages soumis aux intrusions salines a permis d'identifier huit ouvrages recoupant l'interface entre l'eau douce et l'eau salée, treize ouvrages où une intrusion saline est fortement soupçonnée et vingt ouvrages où une intrusion saline est possible.

Toutes les communes de la côte Ouest de La Réunion sont soumises à l'aléa intrusion saline. Quatre communes sont plus touchées que les autres : les communes du Port, de Saint-Paul, de Trois-Bassins et de Saint-Louis. L'augmentation de la minéralisation des eaux est plus générale et concerne également les communes de la micro-région Nord. Les intrusions salines peuvent être dues à des surexploitations chroniques de la nappe (Saint-Louis, Sainte-Marie), à la faible recharge des aquifères (Trois-Bassins, Petite-Île) ou au captage d'aquifère naturellement saumâtre (Le Port).

Bien qu'ayant un impact indéniable sur les intrusions salines, la morphologie du littoral ne semble pas être un des paramètres les plus influents. Les deux éléments déterminants sont la répartition des précipitations (et donc la recharge des aquifères) et les modalités d'exploitation des aquifères :

- 88 % des ouvrages susceptibles d'être influencés par le biseau salé (biseau salé recoupé, intrusion saline fortement soupçonnée et intrusion saline possible) sont localisés sur une zone où la hauteur de précipitation est inférieure à un mètre par an, et un seul ouvrage (2% du total) est soupçonné d'être perturbé par des intrusions salines dans la zone où la hauteur des précipitations annuelle est supérieure à deux mètres ;
- la surexploitation des aquifères entraîne le rabattement des niveaux piézométriques qui favorise les intrusions salines et les variations brutales de débit accroissent l'épaisseur de la zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée par « effet piston ».

Des études spécifiques sont nécessaires pour rationaliser l'exploitation des aquifères les plus sensibles aux intrusions salines : Le Port, Trois-Bassins et L'Étang-Salé / Saint-Louis. Ces études formuleront des recommandations en termes de modalité d'exploitation de la ressource en eau souterraine et de mise en œuvre du programme de surveillance du biseau salé. Ces études seront fondées sur une bonne caractérisation de la géologie et de l'hydrogéologie des aquifères, sur la valorisation des données d'exploitation (chronique au pas de temps journalier de débit d'exhaure, de niveau piézométrique et de conductivité électrique, coupe technique de forage : position des crépines, aquifère isolé), sur les approches géophysiques entreprises pour localiser le biseau salé et sur la connaissance du milieu par les exploitants.

L'aquifère de Pierrefonds n'est à ce jour pas contaminé par les intrusions salines. Cependant, afin d'éviter une dégradation de cette ressource par des modalités d'exploitations inappropriées, il conviendrait de mettre en place un dispositif de suivi de la qualité de ces eaux souterraines. Une bonne caractérisation du comportement des intrusions salines avant la mise en exploitation de cet aquifère permettrait d'avoir un indicateur de l'état initial du milieu et d'assurer une meilleure compréhension des mécanismes régissant les intrusions salines sur la zone.

Sommaire

1. Objet de l'étude.....	11
2. Etat des connaissances.....	12
2.1. PRESENTATION GENERALE DE L'HYDROGEOLOGIE DE LA REUNION	12
2.1.1. Grands ensembles de l'Île de La Réunion	12
2.1.2. Hydrogéologie du domaine littoral.....	15
2.1.3. Hydrogéologie du domaine d'altitude	15
2.2. METHODES DE CARACTERISATION ET DE LOCALISATION DU PHENOMENE D'INTRUSION SALINE	16
2.2.1. Approche piézométrique	17
L'approche hydrostatique : principe de Ghygen-Herzberg	17
Les approches hydrodynamiques	19
Limites d'application des schémas théoriques et limites de validités	22
2.2.2. Approche géophysique	24
Méthode de prospection électrique.....	24
Méthodes magnétotellurique et électromagnétique	25
Méthodes de diagraphies géophysiques	26
Conclusions.....	27
2.2.3. Approche géochimique	27
Localisation par analyses chimiques.....	27
Les analyses isotopiques	28
Localisation par surveillance de la salinité dans les eaux superficielles	28
Conclusions.....	28
2.2.4. Approche numérique par modélisation hydrodynamique	28
Exemple de modélisation numérique : l'archipel d'Hawaii	29
Conclusions.....	31

2.3. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES PARAMETRES INFLUENÇANT LES INTRUSIONS SALINES.....	32
2.3.1. Géométrie du biseau salé dans les aquifères multicouches	32
Aquifères multicouches homogènes.....	32
Aquifères multicouches à charges différentes	33
Aquifères multicouches hétérogènes	34
Conclusions.....	35
2.3.2. Influence de l'exploitation des nappes sur le biseau salé.....	35
Influence du régime d'exploitation de la nappe	35
Influence du type d'ouvrage d'exploitation	36
Conclusions.....	36
2.3.3. Influence de la morphologie du littoral sur le biseau salé	37
2.3.4. Retour à l'équilibre et méthodes de lutte contre les intrusions salines	37
3. Les intrusions salines à La Réunion	39
3.1. IDENTIFICATION DES OUVRAGES CONCERNES PAR LES INTRUSIONS SALINES	39
3.1.1. Méthode d'identification	39
3.1.2. Paramètres influençant les intrusions salines.....	49
Influence des précipitations	49
Influence des modalités d'exploitation.....	49
Influence de la morphologie du littoral.....	49
Influence du contexte géologique	50
3.1.3. Zones soumises aux intrusions salines.....	50
Sainte-Marie.....	51
Le Port.....	52
Saint-Paul.....	55
Trois-Bassins	55
Saint-Louis (Plaine du Gol)	55

Saint-Pierre (Pierrefonds)	57
Secteur de Petite-Île.....	58
Saint-Philippe	59
4. Conclusions et recommandations	60
5. Bibliographie.....	63

Liste des illustrations

Illustration 1 : Schéma conceptuel des entités hydrogéologiques de La Réunion (atlas hydrogéologique de La Réunion 1986 modifié)	13
Illustration 2 : Cadre morphostructural des émergences des nappes d'altitude (Join, 1991)	16
Illustration 3 : Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Herzberg.....	17
Illustration 4 : Coupe perpendiculaire dans un aquifère insulaire	18
Illustration 5 : Coupe perpendiculaire au littoral selon le modèle conceptuel de Glover.....	19
Illustration 6 : Coupe perpendiculaire au littoral selon le modèle de Cooper	20
Illustration 7 : les différentes charges hydrauliques du schéma de LUSCZINSKI	21
Illustration 8 : Modèle hydrogéologique conceptuel des îles Hawaii	30
Illustration 9 : Configuration du biseau salé du sud-ouest de l'île d'Oahu (amélioration par Voss du schéma de Souza et Voss 1987).....	31
Illustration 10 : Géométrie du biseau salé dans un aquifère multicouche homogène.	33
Illustration 11 : Géométrie d'un biseau salé dans un aquifère multicouches à charges différentes	34
Illustration 12 : Exemple de géométrie d'un biseau salé dans un aquifère multicouches hétérogène.	35
Illustration 13 : Influence d'un pompage sur le biseau salé à partir du schéma théorique de Ghyben- Hertzberg	36
Illustration 14 : Logigramme de la méthode d'identification des ouvrages soumis aux intrusions salines	41
Illustration 15 : localisation des ouvrages soumis aux intrusions salines.....	44
Illustration 16 : localisation des ouvrages dont la minéralisation est en augmentation	45
Illustration 17 : Précipitations et intrusions salines	46
Illustration 18 : Morphologie côtière et intrusion saline	47
Illustration 19 : synthèse des données relatives aux intrusions salines	48
Illustration 20 : Répartition des ouvrages soumis aux intrusions salines par commune.....	50

Illustration 21 : Répartition des intrusions salines par niveau d'aléa et par commune	51
Illustration 22 : Evolution de la conductivité électrique et des teneurs en chlorure dans les eaux du forage G2 gillot (indice BSS 12271X0058).....	52
Illustration 23 : Coupes hydrogéologiques transversale et longitudinale du secteur de la Plaine des Galets	53
Illustration 24 : Évolution temporelle de la conductivité électrique dans les eaux d'exhaure du forage F1 Mounien qui capte la nappe moyenne et la nappe profonde saumâtre (indice BSS 12262X0087)	54
Illustration 25 : Localisation des ouvrages soumis aux intrusions salines sur la commune du Port	54
Illustration 26 : Évolution de la conductivité électrique dans les puits A, B, C du Go (données Saphir)	56
Illustration 27 : Mise en évidence du biseau salé par diagraphie de conductivité électrique dans le piézomètre Syndicat à Saint-Pierre (12288X0078).....	58

Liste des tableaux

Tableau 1 : résistivité en fonction de la nature lithologique.....	24
Tableau 2 : Composition chimique de l'eau de mer, d'eaux souterraines non soumise et soumise aux intrusions salines et soumise à un excédent azoté.	39
Tableau 3 : Récapitulatif des données relatives aux ouvrages soumis aux intrusions salines classés par niveau de salinité.....	42
Tableau 4 : Récapitulatif des données relatives aux ouvrages soumis aux intrusions salines classés par commune	43

1. Objet de l'étude

La préservation et l'amélioration de la qualité des eaux sont parmi les objectifs majeurs définis dans le SDAGE de La Réunion. L'une des problématiques récurrentes dans la gestion des eaux des aquifères littoraux est la présence d'un biseau salé, marquant l'interface entre les eaux douces continentales et l'océan.

Une bonne connaissance de l'état actuel de la situation à l'échelle de l'île constitue une base incontournable à des études plus poussées des phénomènes dynamiques associés aux relations entre les aquifères et le milieu marin. Cet état des connaissances constitue un indicateur qui pourra être utilisé pour différentes études ultérieures portant par exemple sur les effets imputables au changement climatique ou à l'intensification de l'exploitation des eaux souterraines du domaine littoral.

L'étude a pour objectifs :

- de réaliser une synthèse des connaissances sur les phénomènes d'intrusion saline dans des milieux similaires à celui de La Réunion ;
- d'établir un inventaire des ouvrages et des zones menacées par les intrusions salines à La Réunion ;
- de caractériser les relations entre les intrusions salines et d'une part la caractérisation physique du milieu et d'autre part le mode de gestion des ouvrages exploités.

Le rapport synthétise l'état des connaissances sur les intrusions salines, fournit l'inventaire des ouvrages dont l'exploitation est perturbée par le biseau salé, établit des relations entre les phénomènes d'intrusion saline et le contexte local et présente les zones de La Réunion les plus touchées par les intrusions salines.

2. Etat des connaissances

2.1. PRESENTATION GENERALE DE L'HYDROGEOLOGIE DE LA REUNION

2.1.1. Grands ensembles de l'île de La Réunion

Join (1991) distingue, du point de vue hydrogéologique, deux principales zones sur l'île (Illustration 1) :

1. un « domaine littoral » caractérisé par un « complexe aquifère de base » qui contient une « nappe de base » en équilibre avec le biseau salé et les nappes alluviales (en équilibre ou non avec le biseau salé). Ce domaine est assez bien connu grâce aux forages ;
2. un « domaine d'altitude » contenant des nappes perchées et des nappes soupçonnées d'être parfois en relation hydraulique avec la nappe de base. Ce domaine est surtout connu grâce aux sources qui en émergent.

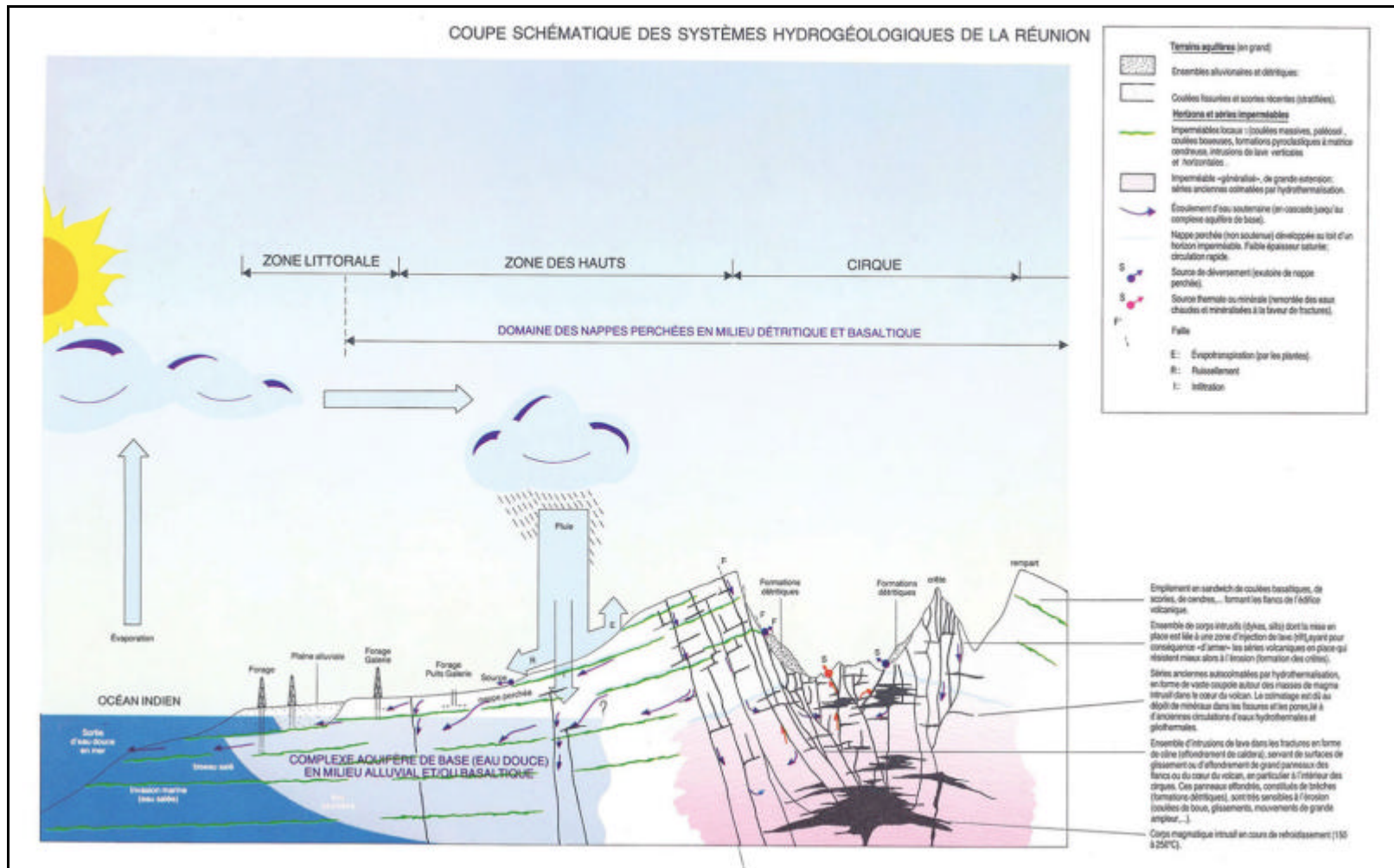


Illustration 1 : Schéma conceptuel des entités hydrogéologiques de La Réunion (atlas hydrogéologique de La Réunion 1986 modifié)

2.1.2. Hydrogéologie du domaine littoral

D'après Coudray (2003), le littoral réunionnais est constitué :

- de falaises entaillant les planèzes formées par l'empilement de coulées de lave volcanique et de scories ;
- de plaines littorales constituées de dépôts détritiques alluviaux, et parfois marins.

Le complexe aquifère de base s'étend de façon plus ou moins continue au sein de différentes formations géologiques. Ces nappes sont caractérisées par des gradients piézométriques faibles (entre 0,2 et 3,2 %), des zones d'émergences en mer et un équilibre hydrodynamique avec les eaux salées. La continuité de ces nappes vers l'intérieur de l'île reste encore hypothétique.

Les complexes fluvio-deltaïques construits à l'embouchure des principales rivières (rivière du Mât, rivière de l'Est) renferment une ou plusieurs nappes superposées (les plus profondes étant captives). Les eaux de la nappe de base sont moyennement à faiblement minéralisées (conductivité électrique comprise entre 50 et 1000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et de faciès hydrogénocarbonaté calcique ou magnésien.

2.1.3. Hydrogéologie du domaine d'altitude

Les systèmes hydrogéologiques des domaines d'altitude et de l'intérieur de l'île sont moins bien connus que les domaines littoraux. Cependant, l'existence de nombreuses émergences met en évidence la présence de circulations souterraines dans les parties hautes de l'île.

Join (1991) distingue trois types de sources (Illustration 2) :

- les sources superficielles sont les plus nombreuses. Elles apparaissent dans les terrains de subsurface profondément altérés (source d'altérite) ou dans les ravines, au contact de coulées de lave imperméables avec des alluvions récentes ou des niveaux scoriacés (source d'inféoflux) susjacentes ;
- les sources intermédiaires sont localisées dans les versants abrupts. Elles peuvent constituer des alignements horizontaux de sources ou être chenalisées à la base de paléovallées mises à nu par l'érosion ;
- les sources profondes sont rares. Elles sont situées au pied des têtes de ravines les plus encaissées de l'île. Leurs débits sont bien supérieurs à celui des sources superficielles et intermédiaires. Ces sources appartiennent au domaine profond.

Les aquifères profonds et la nappe de base littorale seraient en continuité hydraulique et formeraient un aquifère volcanique généralisé à l'échelle de l'île (Join, 1991). L'augmentation rapide du gradient piézométrique de la nappe de base vers le centre du massif, jusqu'à des altitudes supérieures à 1000 m (altitude des sources profondes et des forages de la Plaine des Palmistes), s'expliquerait par la diminution de la perméabilité vers l'intérieur du massif, l'augmentation de l'infiltration due à la forte pluviométrie en altitude et la diminution de la section perpendiculaire à l'écoulement de l'amont vers l'aval (Coudray, 2003).

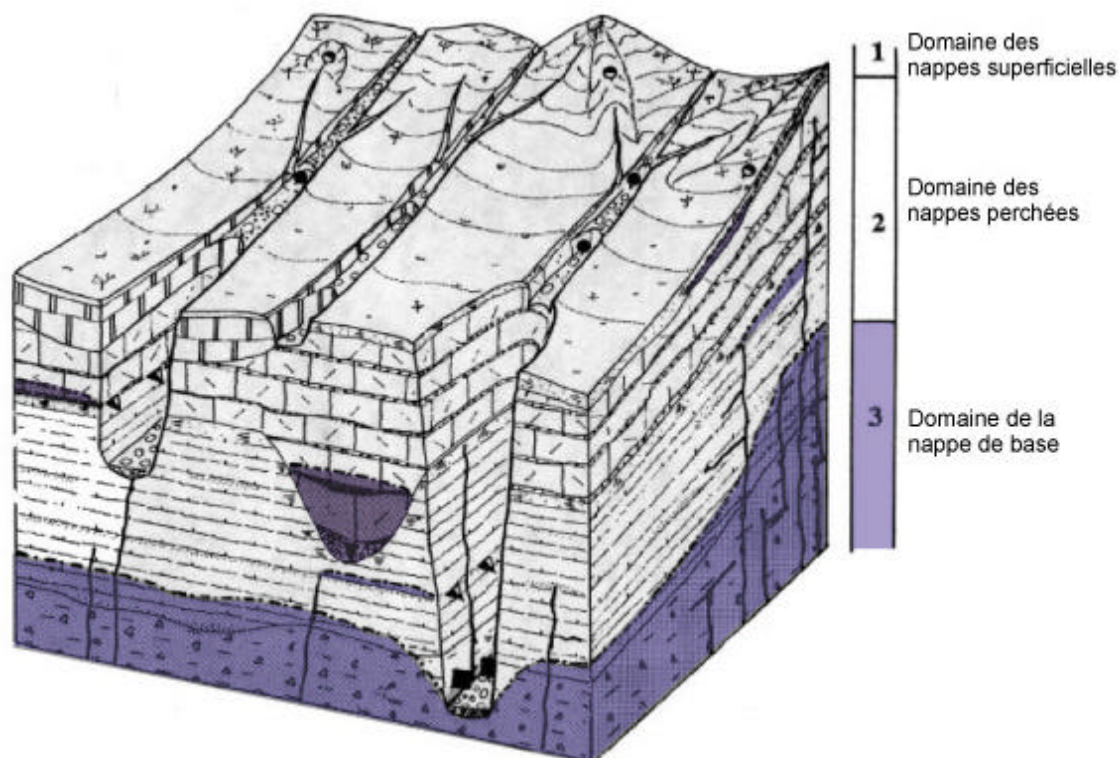


Illustration 2 : Cadre morphostructural des émergences des nappes d'altitude (Join, 1991)

2.2. METHODES DE CARACTERISATION ET DE LOCALISATION DU PHENOMENE D'INTRUSION SALINE

Dans les zones littorales, les nappes souterraines d'eau douce sont en contact avec l'eau salée d'origine marine qui envahit plus ou moins les formations géologiques côtières.

L'eau douce « flottant » sur l'eau salée et le niveau piézométrique s'élevant vers l'intérieur des terres, de manière générale et en première approximation donnée par l'équilibre hydrostatique, l'intrusion d'eau salée a la forme d'un biseau plongeant vers l'intérieur des terres, appelé communément le biseau salé. En réalité, le contact de ces eaux de densité différente est régi plus précisément par les lois d'équilibre hydrodynamiques et par les phénomènes de diffusion qui s'inscrivent obligatoirement dans le contexte géomorphologique, lithologique et hydrologique propre à chaque région.

L'exploitation des nappes littorales influe considérablement sur la position et la forme de la zone de contact que constitue l'interface eau douce / eau salée, et réciproquement l'évolution de cette interface peut nuire à l'exploitation des eaux souterraines côtières, du fait de la dégradation possible (par augmentation de la salinité) de la qualité de l'eau prélevée.

Plusieurs approches ont été tentées pour décrire la géométrie de l'interface entre l'eau douce et l'eau salée :

- approche piézométrique ;
- approche géophysique ;
- approche géochimique ;
- approche numérique par modélisation hydrodynamique.

2.2.1. Approche piézométrique

L'approche hydrostatique : principe de Ghyben-Herzberg

Ce principe propose une relation simple pour déterminer la forme et la position théorique du biseau salé à partir des densités et des pressions relatives (Illustration 3).

Les hypothèses permettant d'appliquer cette formulation sont les suivantes :

- les deux fluides ne sont pas miscibles ;
- les deux fluides sont en équilibre hydrostatique dans un milieu homogène et poreux, dans un aquifère unique ;
- leur contact est supposé être représenté par une interface nette.

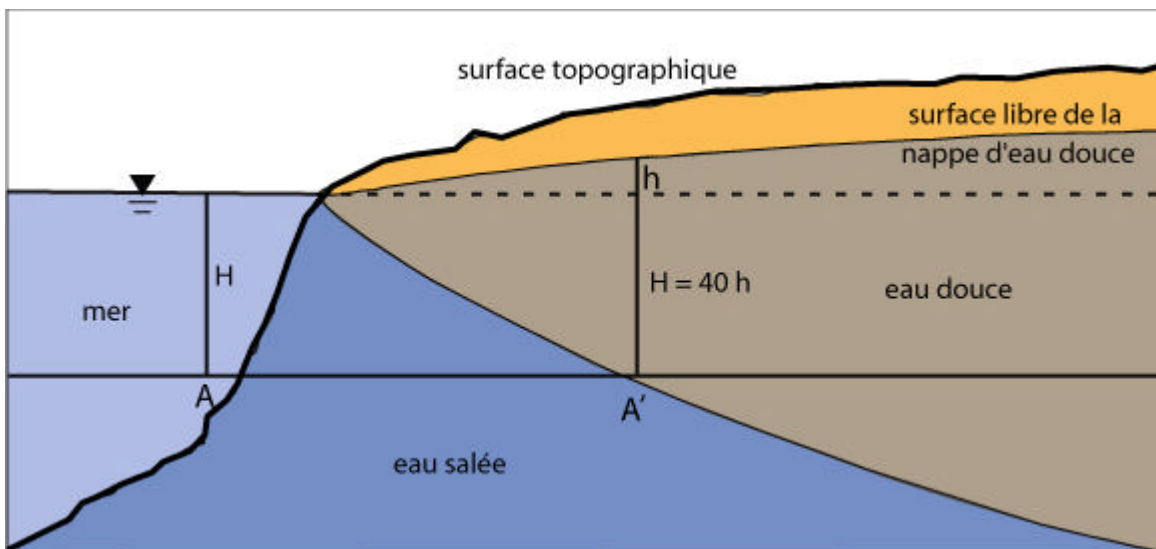


Illustration 3 : Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Herzberg

Sur une ligne horizontale AA', l'égalité des pressions de l'eau salée et de l'eau douce s'écrit :

$$H \cdot d_s = (H + h) \cdot d$$

Avec d_s la masse volumique de l'eau salée
 d la masse volumique de l'eau douce
 h la hauteur d'eau douce au-dessus du niveau de la mer en un point A
 H la hauteur de l'interface

Si d est égal à 1, on a :

$$H \cdot (d_s - 1) = h$$

et

$$H = \frac{h}{d_s - 1}^2$$

La masse volumique de l'eau de mer varie en fonction de sa salinité. Pour une concentration équivalente de Na Cl de 36 g/l, elle est égale à 1,025. Cette valeur représente la moyenne de salinité des mers et des océans.

Aussi, si $d_s = 1,025$, on a :

$$H = \frac{h}{0,025} = 40h$$

Cela signifie qu'en un point quelconque de la nappe, l'interface eau douce/eau salée se situe sous le niveau de la mer à une profondeur égale à 40 fois l'élévation du niveau de la nappe au-dessus du niveau de la mer.

Ce schéma peut s'appliquer aux îles, avec la nappe d'eau douce qui se présente sous la forme d'une lentille (Illustration 4).

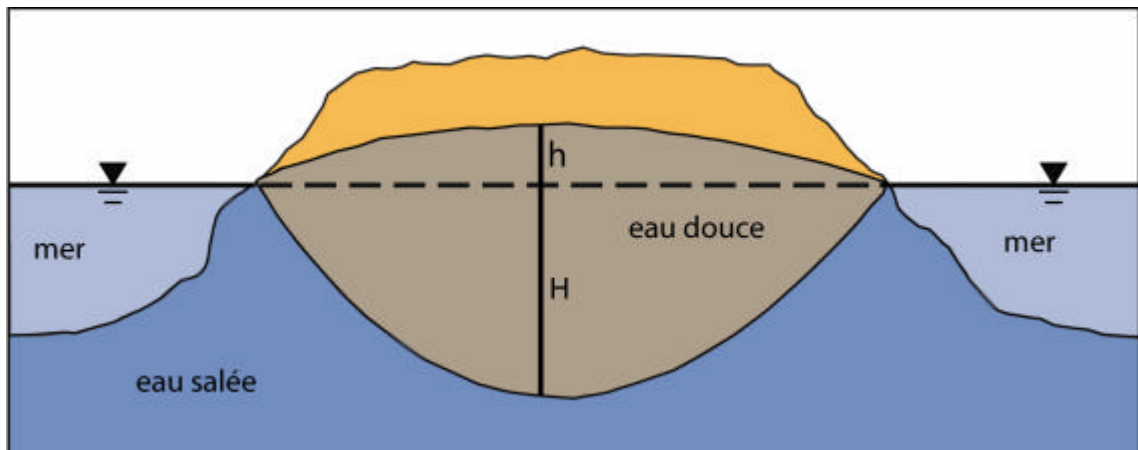


Illustration 4 : Coupe perpendiculaire dans un aquifère insulaire

Cependant, si elles donnent une première approximation de la position du biseau salé, les hypothèses du principe de Ghyben-Herzberg ne sont pas réalistes pour les raisons suivantes :

- les fluides, l'eau douce et l'eau salée, sont miscibles ;
- ces fluides sont soumis à des mouvements hydrodynamiques ;
- les écoulements de la nappe ne sont pas pris en compte ;
- et un aquifère est rarement homogène et unique.

Les approches hydrodynamiques

L'amélioration du principe de Ghyben-Herzberg par les approches hydrodynamiques rend plus réaliste la description géométrique de l'interface eau douce – eau salée en fonction du niveau piézométrique de la nappe.

- **a) Approche hydrodynamique de GLOVER**

Glover (1959) a établi une équation pour déterminer la distance à la côte de l'exutoire en mer de l'eau douce pour une nappe littorale captive limitée par un toit imperméable horizontal et en contact avec un front salé (Illustration 5).

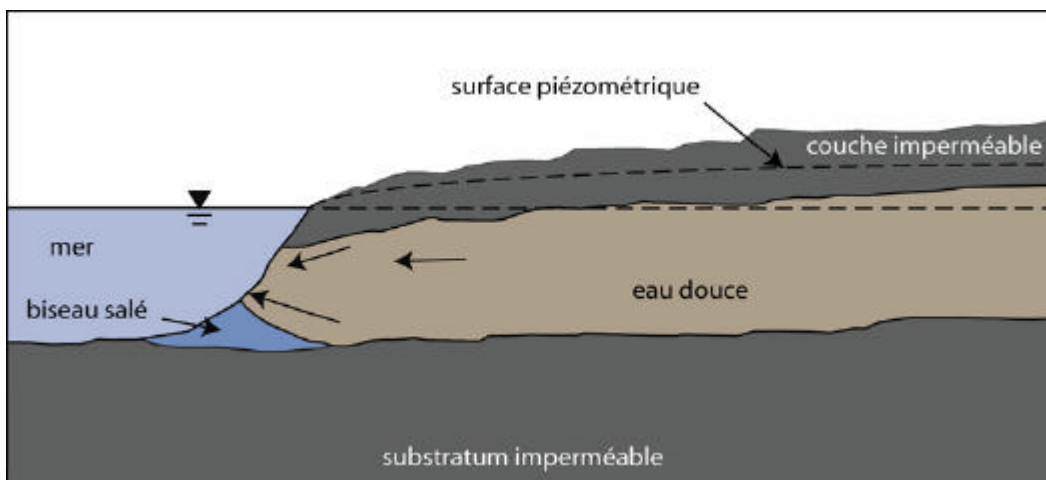


Illustration 5 : Coupe perpendiculaire au littoral selon le modèle conceptuel de Glover

A partir de l'expression d'un potentiel de vitesse F :

$$\Phi = \frac{d_s - d_d}{d_d} Kh$$

et de l'utilisation de variables complexes, y^2 et x_0 , il est déduit l'équation de l'interface :

$$y^2 = \frac{2Qx}{K \left(\frac{d_s - d_d}{d_d} \right)} + \frac{Q^2}{K^2 \left(\frac{d_s - d_d}{d_d} \right)^2}$$

puis la longueur (distance à la côte) de l'exutoire en mer de l'eau douce :

$$x_0 = \frac{Q}{2K \left(\frac{d_s - d_d}{d_d} \right)}$$

avec Q le débit de la nappe par unité de longueur

K le coefficient de perméabilité

- **b) Hypothèse de COOPER**

Les schémas présentés précédemment considèrent l'immiscibilité de l'eau douce et de l'eau salée et l'état statique de l'eau salée.

Cooper (1959) a pris en compte la miscibilité des deux fluides en introduisant l'existence d'une zone de diffusion dans laquelle l'eau de mer circule et se dilue (Illustration 6).

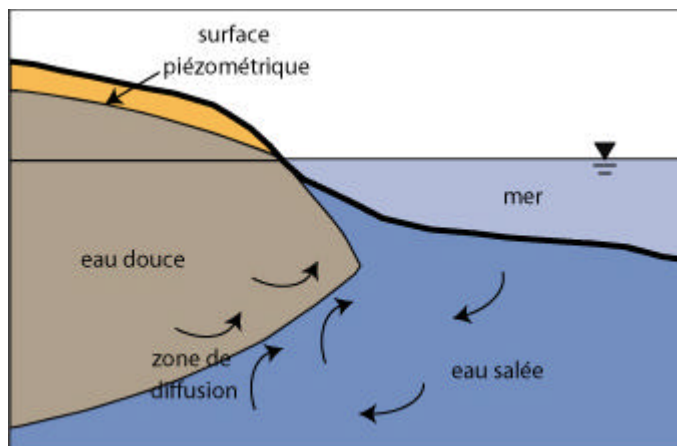


Illustration 6 : Coupe perpendiculaire au littoral selon le modèle de Cooper

La présence de cette zone de dispersion ou de diffusion a été vérifiée sur de nombreux sites.

- **c) Approche hydrodynamique de LUSCZYNSKI**

La théorie de Lusczynski tient également compte de la possibilité de mélange de l'eau douce et de l'eau salée et aussi de l'existence d'une zone de transition à salinité progressivement variable entre la salinité de l'eau douce et celle de l'eau de mer.

Dans ce modèle, trois notions différentes de charges d'eau en un point interviennent. Ces trois charges seraient mesurées par rapport au niveau de la mer dans des piézomètres (Illustration 7) :

- « la charge d'eau ponctuelle » représente le niveau d'une colonne d'eau de densité équivalente à celle de l'eau présente en ce point en équilibrant la pression en ce point ;
- « la charge d'eau douce » représente le niveau d'une colonne d'eau douce équilibrant la pression en ce point ;
- « la charge d'eau réelle environnante » représente le niveau d'une colonne d'eau dans laquelle la répartition verticale de la densité serait identique à celle de l'eau contenue dans le terrain environnant et équilibrant la pression en ce point. La répartition verticale de la densité de l'eau dans la colonne d'eau induit une répartition verticale de la salinité de celle-ci.

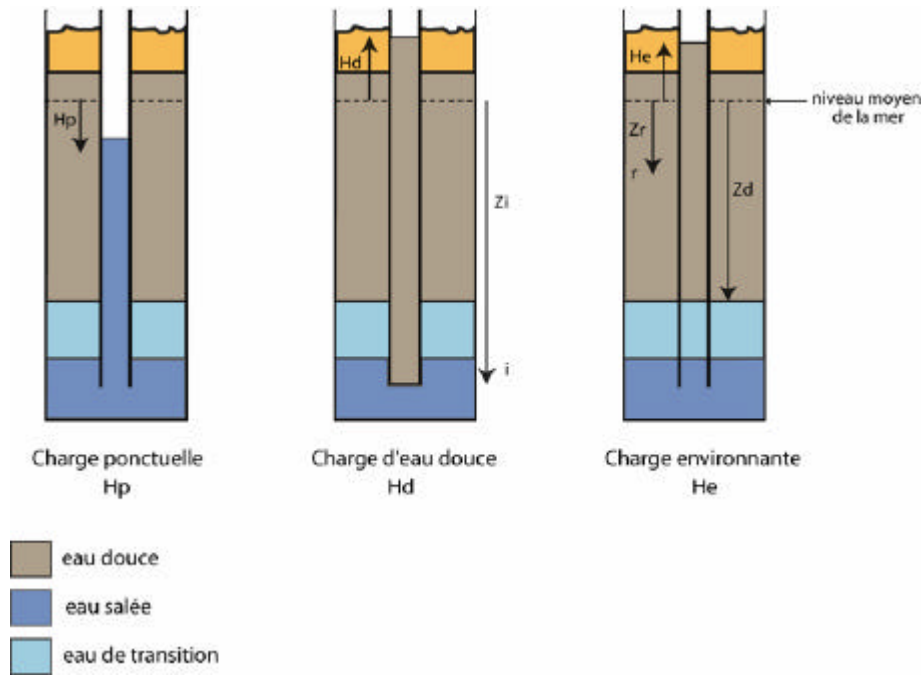


Illustration 7 : les différentes charges hydrauliques du schéma de LUSCZINSKI

La pression en un point i peut s'écrire :

$$P_i = \mathbf{r}_i \cdot g(H_p - Z_i) \quad (1)$$

$$P_i = \mathbf{r}_d \cdot g(H_d - Z_i) \quad (2)$$

$$P_i = \mathbf{r}_d \cdot g(H_e - Z_r) + \mathbf{r}_a \cdot g(Z_r - Z_i) \quad (3)$$

avec \mathbf{r}_i la masse volumique de l'eau au point i

\mathbf{r}_d la masse volumique de l'eau douce

\mathbf{r}_a la masse volumique moyenne de l'eau entre r et i , r étant un point quelconque de côte Z_r dans l'eau douce

en égalant les équations (1) et (3), :

$$\mathbf{r}_i \cdot g(H_p - Z_i) = \mathbf{r}_d \cdot g(H_e - Z_r) + \mathbf{r}_a \cdot g(Z_r - Z_i) \quad (4)$$

ou :

$$\mathbf{r}_i \cdot (H_p - Z_i) = \mathbf{r}_d \cdot (H_e - Z_r) + \mathbf{r}_a \cdot (Z_r - Z_i) \quad (5)$$

et

$$\mathbf{r}_d H_e = \mathbf{r}_i H_p - Z_i(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_a) - Z_r(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_d) \quad (6)$$

En appliquant cette relation (6) en un point dans l'eau douce (symbolisé par l'indice 1) puis en un point dans l'eau salée (symbolisé par l'indice 2) tel que $Z_r = Z_d$ avec Z_d représentant la côte de l'interface de l'eau douce avec l'eau de transition, il est obtenu :

$$\mathbf{r}_1 H_{e1} = \mathbf{r}_1 H_{p1} \quad (7)$$

et

$$\mathbf{r}_1 H_{e2} = \mathbf{r}_2 H_{p2} - Z_2(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_a) - Z_d(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_1) \quad (8)$$

soit h , le gradient vertical de charge entre les points 1 et 2 si il est posé :

$$h = H_{e1} - H_{e2} \quad (9)$$

il est obtenu par soustraction des équations (7) et (8) :

$$\mathbf{r}_1 \cdot h = \mathbf{r}_1 H_{p1} - \mathbf{r}_2 H_{p2} + Z_2(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_a) - Z_d(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_1) \quad (10)$$

ainsi, à la côte Z_d de l'interface eau douce/eau de transition :

$$Z_d = \frac{1}{(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_1)} [\mathbf{r}_2 H_{p2} - \mathbf{r}_1 H_{p1} + \mathbf{r}_1 \cdot h - Z_2(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_a)] \quad (11)$$

Limites d'application des schémas théoriques et limites de validités

Les différentes approches permettent de calculer la profondeur de l'interface en considérant des schémas théoriques plus ou moins simplificateurs.

- Approche hydrostatique

La formule de Ghyben-Herzberg déterminant la profondeur de l'interface nette théorique est donnée en un point par la relation :

$$H = \frac{h}{d_s - d_d}$$

Avec h la côte (au-dessus du niveau de la mer) du niveau d'eau douce

d_s la masse volumique de l'eau salée

d_d la masse volumique de l'eau douce

L'utilisation de cette forme nécessite de connaître :

- les masses volumiques de l'eau douce et de l'eau de mer ;
- le niveau piézométrique d'eau douce ce qui implique l'existence d'un piézomètre foré, correctement nivelé et crépiné dans l'eau douce.

Cette approche qui ne prend en compte ni l'écoulement des eaux souterraines, ni l'existence de la zone de mélange eau douce - eau salée est fortement simplificatrice. Cependant, elle offre l'avantage d'apporter des ordres de grandeur sur la profondeur à laquelle se trouve le biseau salé à partir des seules données piézométriques. Son utilisation peut être utile pour localiser rapidement les zones susceptibles d'être très vulnérables aux intrusions salines.

- Approches hydrodynamiques

a) Le modèle de Glover s'applique aux nappes en charge avec un toit horizontal en utilisant l'équation de surface suivante :

$$y^2 = \frac{2Qx}{K \left(\frac{d_s - d_d}{d_d} \right)} + \frac{Q^2}{K^2 \left(\frac{d_s - d_d}{d_d} \right)^2}$$

Cette formule permet de calculer la profondeur y (sous le niveau de la mer) de l'interface en fonction de la distance x à la côte. Il est alors nécessaire de connaître :

- la perméabilité de l'aquifère K ;
- l'estimation du débit de la nappe par unité de largeur, ce qui implique l'existence de deux piézomètres alignés dans le sens de l'écoulement de manière à calculer le gradient hydraulique pour utiliser la formule de Darcy.

L'approche de Glover prend en compte l'écoulement des eaux souterraines mais ignore l'existence de la zone de mélange eau douce - eau salée. Cette approche est plus réaliste que celle de Ghyben-Herzberg, mais présente l'inconvénient de s'appliquer uniquement aux nappes captives. De plus l'utilisation de ce modèle impose de connaître le débit de la nappe. Hors celui-ci est calculé, entre autre, à partir de l'épaisseur de la nappe, donnée qui dépend elle-même de la profondeur de l'interface eau douce – eau salée. Le débit peut également être calculé en amont du biseau salé en considérant la profondeur du substratum hydrogéologique ci qui impose de connaître l'extension maximale du biseau salé. L'application de ce modèle pour la localisation du biseau salé ne peut se concevoir que couplé à d'autres approches.

b) Le modèle de Luszczinski donne une représentation plus exacte de la réalité puisqu'il prend en compte la présence de la zone de transition entre l'eau douce et l'eau salée. Cependant, cette méthode se base sur l'utilisation de trois piézomètres, l'un dans l'eau salée, l'un dans l'eau douce et le dernier traversant l'ensemble de la zone de transition avec la particularité d'être rempli d'eau de densité progressivement variable et égale à celle de l'eau de l'aquifère environnant. La connaissance de la répartition de densité, pour déterminer le début de la zone de transition, implique la connaissance de la forme du biseau salé, cette information étant précisément celle qui est recherchée. Luszczinski avait développé ce modèle pour calculer le champ de vitesses dans la zone de dispersion et non pour déterminer le positionnement du biseau salé.

- Conclusions

L'utilisation exclusive des schémas théoriques présentés ci-dessus pour localiser l'interface théorique présentent un intérêt pratique limité. La possible existence d'une épaisse zone de transition entre l'eau douce et l'eau salée peut rendre peu pertinente la détermination d'une interface nette théorique et le modèle prenant en compte l'existence de cette interface diffuse implique que l'on connaisse déjà la distribution des salinités ou des densités. Les schémas conceptuels présentés permettent de comprendre le phénomène des intrusions salines et de calculer en première approximation la profondeur du biseau salé mais ne sont pas suffisants pour le cartographe à eux seuls. Il existe des méthodes directes qui permettent de déterminer sa localisation. L'utilisation couplée des approches piézométriques et géophysiques peut donner de meilleurs résultats.

2.2.2. Approche géophysique

Différentes méthodes de prospection géophysique permettent de déterminer la résistivité des terrains en fonction de la profondeur à partir de la surface du sol. Les résultats des campagnes de prospection sont généralement visualisés par la construction de coupes verticales montrant des horizons affectés de différentes valeurs de résistivité. Ces valeurs de résistivités sont fonction de la nature lithologique des terrains et de la résistivité des eaux qui y sont contenues. Aussi, pour un terrain de composition lithologique homogène, les différences de résistivités sont dues aux différences de résistivité des eaux contenues, elle-même dépendant des différences de salinité de ces eaux. La structure du sous-sol étant rarement homogène, il est nécessaire de connaître la géométrie des structures géologiques afin de la prendre en compte pour l'interprétation des résultats.

La résistivité de l'eau est fonction de la concentration totale en sels dissous, de la composition chimique et de la température de l'eau. A l'aide des tables de conversion conductivité/salinité, il est possible de transformer les coupes de résistivité en coupes de salinité de l'eau et de localiser les intrusions salines ainsi que la zone de transition à salinité variable dans les aquifères littoraux.

Méthode de prospection électrique

2.2.2. .1 Sondages électriques

Un courant électrique est envoyé dans le sol à travers deux électrodes A et B. La différence de potentiel engendrée est mesurée entre deux autres électrodes M et N. La profondeur d'investigation dépendant de la distance entre les électrodes A et B, la longueur AB est progressivement augmentée puis au-delà d'une certaine longueur AB, il convient d'augmenter également la longueur MN. A chaque valeur de l'écartement des électrodes A et B est associée une résistivité apparente. Ces résistivités apparentes sont ensuite comparées aux valeurs du Tableau 1 pour les associer à des lithologies.

Nature lithologique	Résistivité W.m
Marnes	0,5 à 100
Argiles (eau douce)	10 à 100
Argiles (eau salée)	1 à 10
Schistes	50 à 1000
Calcaires	100 à 5000
Grès	60 à 10000
Quartzites	20000
Granites	300 à 15000
Roches éruptives compactes	500 à 20000
Roches éruptives altérés	50 à 500
Alluvions, sables, graviers	100 à 1000
Sols argileux	10 à 20
Sables et graviers saturés d'eau douce	50 à 500
Sables et graviers saturés d'eau salée	0,5 à 5

Tableau 1 : résistivité en fonction de la nature lithologique

Les principales difficultés d'interprétation des sondages électriques proviennent des phénomènes d'équivalence ou de disparition de couche marquante. Sur une courbe de sondage électrique, une couche marque le tracé :

- par sa conductance longitudinale si elle est plus conductrice que les couches encaissantes ;
- par sa résistance transversale si elle est plus résistante que les courbes encaissantes.

De ce fait, des couches de résistivité et d'épaisseur différente peuvent marquer le tracé de façon à peu près équivalente si leurs conductances longitudinales ou leurs résistivités transversales sont égales. De même, une couche mince de résistivité intermédiaire entre celles des couches l'entourant n'est pratiquement pas décelable. De ces deux phénomènes, il résulte une certaine imprécision sur l'interprétation d'un sondage électrique. Pour pallier ces difficultés, il convient d'appliquer à la recherche des biseaux salés, les recommandations générales des méthodes géophysiques, en particulier en effectuant :

- un sondage électrique à l'aplomb d'un forage dont la coupe lithologique est connue, de manière à effectuer un calage pour l'interprétation ;
- plusieurs sondages et de privilégier l'interprétation de chaque sondage non pas isolément, mais en tenant compte des sondages voisins.

- **Profils de résistivité**

La réalisation d'un profil de résistivité nécessite de déplacer un dispositif quadripôle ABMN de longueur constante suivant un profil rectiligne et d'effectuer des mesures au niveau de stations régulièrement espacées. Cette technique est appelée « méthode du traîné ». La technique dit « du rectangle » qui consiste à déplacer uniquement les stations M et N est utilisée pour avoir une grande profondeur d'investigation.

Un profil de résistivité donne les variations latérales de résistivité apparente pour une certaine profondeur d'investigation. Ces profils mettent en évidence les variations d'épaisseur de couches ou leurs variations de résistivité vraie. Leur interprétation se fait par comparaison avec des profils théoriques, cependant, l'interprétation sera plus fiable si des forages dont la coupe lithologique est connue sont implantés à l'aplomb du profil.

- **Cartes de résistivité**

Les cartes de résistivité sont construites à partir de l'interpolation des résultats de profils de résistivité ou de sondages électriques.

Méthodes magnétotellurique et électromagnétique

- **Méthode magnétotellurique**

Cette méthode consiste à mesurer en fonction de différentes fréquences, la composante horizontale du champ tellurique (champ électrique terrestre naturel) et la composante perpendiculaire du champ magnétique associé. La résistivité apparente est fonction de ces trois paramètres, avec une augmentation de la profondeur d'investigation lorsque la fréquence diminue.

Les courbes de la résistivité apparente en fonction de la fréquence sont ensuite interprétées à l'aide d'abaques ou de logiciels afin de déterminer les résistivités vraies des différentes couches.

Cette méthode permet d'éviter de trop grandes longueurs de ligne pour des investigations profondes.

- **Méthode électromagnétique**

Son principe est le suivant : un émetteur est parcouru par un courant électrique alternatif produit par un champ magnétique et engendre par les courants induits dans les couches du sous-sol, un champ magnétique secondaire. Le champ total est détecté par le courant qu'il induit dans un récepteur.

La profondeur d'investigation est à la fois fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur, ainsi que de la fréquence du courant inducteur. Elle est en général de l'ordre de 0,5 à 1,5 fois la distance émetteur/récepteur.

Méthodes de diagraphies géophysiques

Les diagraphies géophysiques sont des mesures de paramètres physiques effectuées dans des forages. La sonde de mesure est descendue à une vitesse constante et faible dans le forage. Elle enregistre de manière continue un ou simultanément plusieurs paramètres physiques, qui permettront de caractériser les différentes couches du sous-sol.

Les diagraphies électriques classiques, soniques et thermiques doivent obligatoirement s'effectuer dans des ouvrages non tubés ou non crépinés, c'est à dire :

- soit dans la boue de forage, juste après la foration, pour des ouvrages nouveaux devant être tubés et crépinés par la suite,
- soit dans l'eau pour des forages en trou nu, les parois étant suffisamment consolidées pour ne pas nécessiter de tubage ou de crépine.

Les diagraphies radioactives, de résistivité par induction, de conductivité de l'eau peuvent être effectuées sur un forage tubé ou crépiné. Les diagraphies de résistivité par induction nécessitent que l'ouvrage soit équipé de tubage ou de crépine PVC.

- **Diagraphies électriques classiques ou carottages électriques**

Les diagraphies électriques permettent de déterminer les variations de résistivités des formations géologiques traversées par le forage. Tout comme les sondages électriques, elles peuvent renseigner sur la salinité de l'eau de l'aquifère. Dans les formations meubles, ces diagraphies présentent un intérêt limité pour l'étude du biseau salé car l'exécution de ces diagraphies n'est possible qu'à la suite de la foration. Cette méthode ne permet donc pas de suivre l'évolution du biseau salé dans le temps.

La diagraphie de polarisation spontanée (PS) peut être pratiquée en même temps que les diagraphies de résistivité dans les forages en boue. Elle permet de mesurer la différence de salinité entre la boue du forage et l'eau de l'aquifère.

- **Diagraphie de résistivité par induction**

La diagraphie de résistivité par induction consiste à injecter un courant électrique alternatif constant dans une sonde équipée d'une bobine. Celle-ci crée un champ magnétique dans les terrains environnants. Les courants induits par ce champ, créent un champ magnétique alternatif qui produit un signal dans une bobine réceptrice. La valeur du signal est

proportionnelle à la résistivité des terrains. Cette diagraphie peut être effectuée sur des forages équipés d'un tubage ou d'une crépine électriquement résistante (en PVC, par exemple). Cette technique présente un intérêt certain pour l'étude des biseaux salés puisqu'elle permet des mesures périodiques dans les piézomètres existants tubés et crépinés.

- **Diagraphies de conductivité électrique de l'eau**

Cette technique consiste à mesurer directement la conductivité électrique de l'eau contenue dans le forage ou le piézomètre. Ce type de diagraphie, aussi appelée log de conductivité électrique, est couramment utilisé pour l'étude de la salinité des nappes et en particulier pour le contrôle des biseaux salés. La mesure de résistivité doit être couplée à une mesure de température de l'eau pour corriger l'influence de cette dernière sur les valeurs de résistivité.

Pour que le profil vertical de conductivité enregistrée dans l'eau de l'ouvrage représente celui de la conductivité de l'eau contenue dans les formations encaissantes, les quatre principales conditions suivantes doivent être remplies :

- l'ouvrage doit être crépiné sur toute sa hauteur, ou sur la totalité de la formation aquifère ;
- les mesures ne peuvent être faites qu'après une longue période de repos suite à la réalisation de l'ouvrage, de manière à ce que la salinité de l'eau de l'ouvrage se mette en équilibre avec celle du terrain ;
- la sonde de mesure doit être descendue très lentement dans l'eau du forage de manière à ne pas brasser et mélanger les eaux ;
- la formation aquifère doit être homogène, c'est à dire qu'elle doit avoir une variation de pression hydrostatique normale en fonction de la profondeur. Sinon, la présence du forage crépiné modifiera la répartition originale des charges hydrauliques et le profil de résistivité de l'eau du forage ne correspondra plus à celui de l'eau du terrain à l'origine.

Conclusions

La géophysique est un outil extrêmement puissant pour la localisation du biseau salé, cependant il convient de garder à l'esprit que la connaissance précise de la structure géologique est souvent nécessaire à l'interprétation des résultats obtenus par cette approche pour la localisation du biseau salé. L'existence à l'aplomb des investigations géophysiques, de forages dont la coupe lithologique est disponible, permet de caler ou de valider l'interprétation géophysique. L'hétérogénéité géologique de l'île de La Réunion rend souvent difficile l'interprétation des résultats obtenus par géophysique.

2.2.3. Approche géochimique

Localisation par analyses chimiques

L'analyse chimique complète d'un échantillon en laboratoire est la méthode la plus précise pour connaître la salinité exacte d'une eau. La concentration totale en sels dissous est obtenue par le dosage séparé de chaque élément (ion) et également par la pesée du résidu sec de l'échantillon chauffé à 118°C.

Les analyses chimiques sont le plus souvent effectuées sur des échantillons d'eau provenant de puits ou de forages d'exploitation, afin de contrôler périodiquement la qualité de l'eau et le maintien de son aptitude à l'utilisation en cours.

Dans les aquifères littoraux, la salinité mesurée résulte du mélange d'eaux de toutes les zones sollicitées par le pompage. Cette mesure ne peut pas être attribuée à une position et à une profondeur. Cependant, sans donner la position précise du biseau salé, ces résultats

permettront de déceler un début d'invasion des eaux marines, en particulier avec un suivi dans le temps.

La localisation du biseau salé à l'aide d'analyses chimiques est envisageable si l'on dispose d'un réseau de puits d'observations ou de piézomètres, donc sans pompage, dans lesquels on peut prélever des échantillons d'eau à différentes profondeurs, à condition que la répartition de l'eau dans le piézomètre soit représentative de l'eau de l'aquifère pour toutes les profondeurs.

La précision de la localisation du biseau salé et de la configuration de la zone de transition sera fonction du nombre de puits d'observation et du nombre d'échantillons.

De façon analogue à la méthode des profils verticaux de conductivité électrique, la méthode des analyses chimiques implique que la répartition en profondeur de la salinité de l'eau dans le forage soit la même que celle de l'eau contenue dans le terrain environnant. Pour cela, il faut que le forage soit crépiné sur toute l'épaisseur de l'aquifère et que celui-ci soit homogène et non constitué de plusieurs couches à charges hydrauliques différentes.

Comparativement aux diagraphies de conductivité ou de résistivité par induction, cette méthode est d'une mise en œuvre plus lourde (échantillonnage + analyses). L'intérêt réside, non pas dans la localisation du biseau salé mais dans l'identification de l'origine de la salinité qui n'est pas forcément unique. Ainsi la nappe saumâtre de la Plaine des Galets a peut être une signature chimique différente de celle du biseau salé.

Les analyses isotopiques

Ce type d'analyse peut permettre d'identifier les mécanismes d'acquisition de la salinité des nappes littorales. Si l'intrusion d'eaux salines est l'une des causes de la salinité des aquifères côtiers, d'autres mécanismes peuvent aussi en être à l'origine ; le lessivage des sols par les eaux d'infiltration ou la concentration des sels dissous par évaporation.

Localisation par surveillance de la salinité dans les eaux superficielles

La pénétration des eaux marines dans les eaux superficielles des embouchures des fleuves et des rivières peut induire également une augmentation de la salinité des eaux souterraines associées.

Cette répercussion est d'autant plus forte que le degré de liaison hydraulique, entre les eaux superficielles et les eaux souterraines, est fort. Cela arrive notamment lorsque le fond et les berges des cours d'eau ne sont pas colmatées par des formations limoneuses ou argileuses.

La localisation de la pénétration d'eau salée dans les eaux superficielles peut être obtenue par l'installation de sondes de conductivité. Cette méthode est réservée à la mise en place d'un dispositif d'alerte légèrement au-delà de la zone déjà connue de pénétration maximale de l'eau salée.

Conclusions

L'utilisation de la géochimie peut s'avérer utile pour déterminer l'origine de la minéralisation d'eau fortement chargée quand celle-ci peut avoir plusieurs origines.

2.2.4. Approche numérique par modélisation hydrodynamique

Les outils de modélisation hydrodynamique permettent de concevoir des modèles de localisation du biseau salé et de simuler sa réaction à différents scénarii d'exploitation, de protection ou d'évolution climatique.

Les logiciels de modélisation hydrodynamique capable de prendre en compte l'interface entre l'eau douce et l'eau salée sont de deux types :

- ceux calculant la position d'une interface théorique nette entre l'eau douce et l'eau salée, sans prendre en compte l'existence d'une zone de transition ;
- ceux prenant en compte l'existence d'une zone de transition à salinité et densité variable.

Avec ses options « diphasique » et « densité variable », le logiciel MARTHE du BRGM peut prendre en compte ou pas, l'existence de cette zone de mélange.

La modélisation numérique des phénomènes hydrodynamiques des intrusions saline est l'approche qui demande le plus grand nombre de données initiales. Par conséquent cette méthode est d'autant plus pertinente qu'elle est couplée avec les autres types d'investigation qui permettent de caractériser :

- la géométrie de l'aquifère (géophysique, coupe lithologique de forage, conditions aux limites) ;
- les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (pompage d'essais, mesure des variations du niveau piézométrique, bilan hydrologique sur bassin versant) ;
- la localisation ponctuelle du biseau salé (piézomètre recoupant l'interface entre l'eau douce et l'eau salée, géophysique).

Exemple de modélisation numérique : l'archipel d'Hawaii

Compte tenu de la jeunesse de ses formations volcaniques et de son climat tropical, certaines îles de l'archipel d'Hawaii se rapprochent du contexte géologique et hydrogéologique de La Réunion.

En 1983, Mac Donald proposent un modèle hydrogéologique conceptuel des îles Hawaii faisant appel à trois types d'aquifères (Illustration 8) :

- un aquifère de base **Nb** en équilibre avec l'eau de mer et de gradient hydraulique faible,
- un aquifère confiné **Nd** entre les dykes, qui relaie le précédent à l'intérieur des terres,
- un (ou des) aquifère(s) perché(s) **Np** reposant(s) sur des formations moins perméables.

Le modèle conceptuel retenu suppose que l'aquifère de base **Nb** est cantonné à une auréole de quelques kilomètres de largeur le long du littoral.

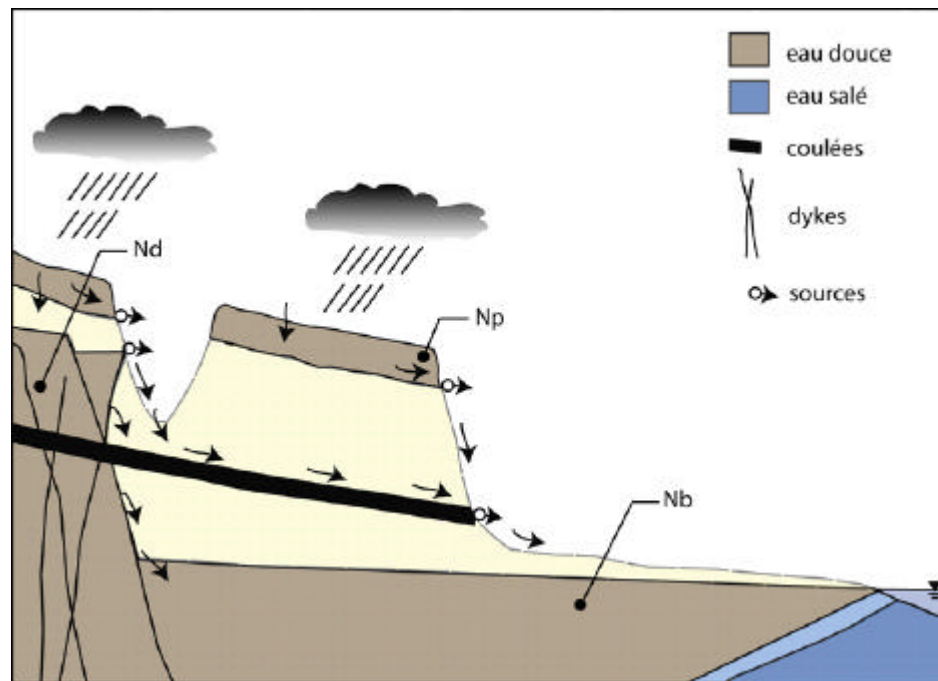


Illustration 8 :: Modèle hydrogéologique conceptuel des îles Hawaï

2.2.4. .1 Contexte de la réalisation du modèle numérique pour l'île d'Oahu

L'île d'Oahu (Hawaï) a fait l'objet de travaux de modélisations numériques par le service géologique national américain (U.S Geological Survey). Des modèles bidimensionnels et tridimensionnels ont été élaborés pour simuler au sein d'un aquifère basaltique côtier des écoulements souterrains d'eau douce en présence d'intrusion saline. Ces études ont permis d'identifier les paramètres qui contrôlent la distribution de la zone de mélange d'eau douce et d'eau salée dans les formations détritiques.

La fiabilité de ces modèles repose sur l'existence :

- de chroniques piézométriques s'étalant de 1880 (début de l'exploitation des eaux souterraines) à nos jours ;
- de nombreux ouvrages de suivi recoupant l'interface entre l'eau douce et l'eau salée.

L'aquifère basaltique du sud d'Oahu a été particulièrement étudié (Voss - Souza, 1987 et OKI et al. 1997). Le littoral y est caractérisé par la présence d'une formation géologique composée d'un mélange hétérogène de roches volcaniques et de dépôts sédimentaires marins et/ou alluviaux connue sous le nom de «Caprock». Cette formation peu perméable constitue un frein à l'écoulement des eaux souterraines en mer et met localement les nappes contenues dans l'aquifère basaltique en captivité (Illustration 9).

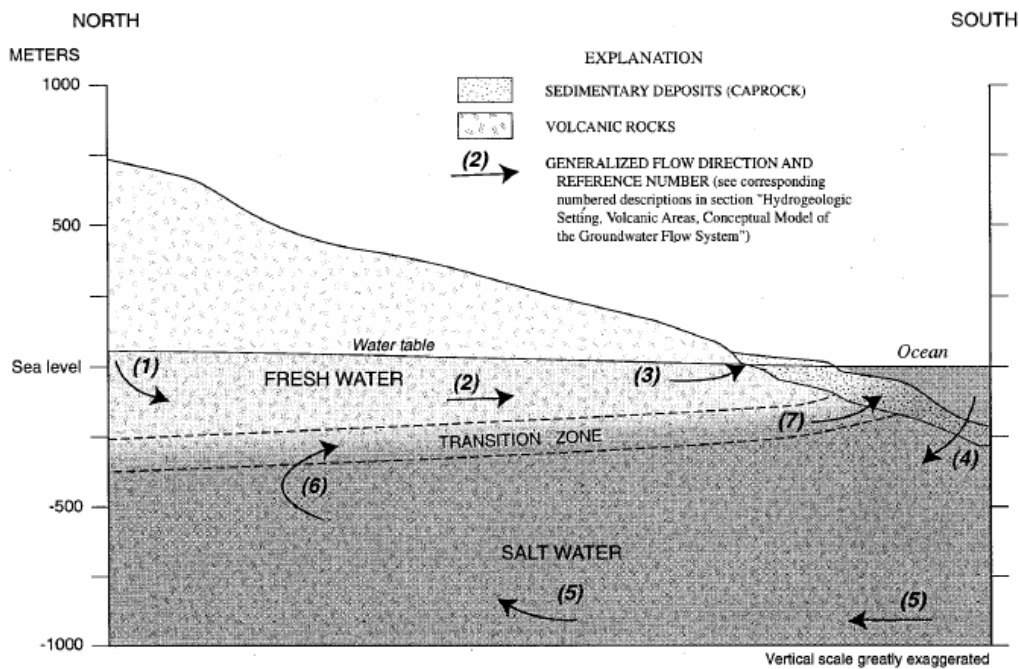


Illustration 9 : Configuration du biseau salé du sud-ouest de l'île d'Oahu (amélioration par Voss du schéma de Souza et Voss 1987)

Selon ce schéma, la circulation des eaux souterraines de la zone d'étude fonctionne de la façon suivante :

1. alimentation des nappes par infiltration des précipitations et des eaux d'irrigation ;
2. écoulement des eaux souterraines de l'amont vers la mer ;
3. frein à l'écoulement en mer et mise en captivité des aquifères volcaniques par les dépôts sédimentaires peu perméables ;
4. protection de la partie supérieure des aquifères vis-à-vis des intrusions salines par les dépôts sédimentaires peu perméables ;
5. intrusions salines profondes possibles en l'absence de dépôts sédimentaires peu perméables ;
6. mélange des eaux douces et des eaux marines au sein d'une zone de transition ;
7. écoulement d'une partie des eaux de la zone de transition vers l'aval.

Les modélisations ont mis en évidence le rôle primordial de la perméabilité des formations détritiques littorales (Caprock) dans les phénomènes d'intrusions salines.

Conclusions

La modélisation hydrodynamique des aquifères est un outil sophistiqué et puissant qui doit être élaboré en fonction des questions posées. Nulle modélisation hydrodynamique ne pourra être définitive et utilisée pour faire face à l'ensemble des problématiques qui peuvent apparaître sur un système aquifère. La fiabilité des modèles hydrodynamiques est directement liée à celle des paramètres spatio-temporels caractérisant le milieu.

L'intérêt de la construction d'un modèle hydrogéologique ne réside pas seulement dans les résultats des simulations *sensu stricto* :

- la construction du modèle permet de structurer le raisonnement hydrogéologique. Tous les paramètres géométriques, hydrodynamiques et géologiques devant être définis, le

modélisateur ne peut s'affranchir d'un passage en revue systématique de ceux-ci et d'un questionnement sur leur représentativité et leur fiabilité ;

- cette démarche permet de mettre en évidence les lacunes de connaissance qui pourront éventuellement faire l'objet de travaux spécifiques pour les combler;
- Les phases de calage et de simulation permettent de valider ou de rejeter des hypothèses émises au cours de la réalisation du modèle hydrogéologique ;
- les tests de sensibilités réalisés sur le modèle permettent d'identifier les paramètres dont la fiabilité détermine celle des résultats des simulations. Ainsi les tests de sensibilité du modèle peuvent amener à implanter et suivre des piézomètres en certains points plutôt qu'en d'autres pour optimiser le réseau de suivi afin d'améliorer la représentativité du modèle hydrogéologique.

Une fois un modèle calé et jugé représentatif du milieu naturel, il est possible de l'utiliser pour simuler différents scénarii d'exploitation (réaction du biseau salé aux augmentations des débits de pompage), de variations climatiques (réaction du biseau salé face aux déficits pluviométrique ou face à la hausse du niveau marin) ou de modification du milieu naturel (imperméabilisation du milieu, injection d'eau, etc.).

2.3. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES PARAMETRES INFLUENÇANT LES INTRUSIONS SALINES

2.3.1. Géométrie du biseau salé dans les aquifères multicouches

Les approches basées sur les schémas théoriques présentés dans le premier chapitre du présent rapport s'appliquent à des aquifères monocouches homogènes, cas peu fréquent en milieu volcanique insulaire où les systèmes aquifères sont généralement multicouches hétérogènes. Les schémas théoriques sont fortement modifiés par :

- la complexité des structures aquifères : variations d'épaisseur, paléo relief, disparition latérale, etc. ;
- l'hétérogénéité lithologique et celle des champs de perméabilité associée ;
- l'influence des marées favorisant le développement de la zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée par « effet piston » ;
- les brutales fluctuations d'alimentation des aquifères côtiers (fortes pluies et variations du débit des fleuves) favorisant le développement de la zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée par « effet piston ».

La description non quantitative du comportement des intrusions salines dans les aquifères multicouches est complexe. Trois cas sont traités dans ce chapitre :

- les aquifères multicouches homogènes ;
- les aquifères multicouches à charges différentes ;
- les aquifères multicouches hétérogènes.

Aquifères multicouches homogènes

L'interface entre l'eau douce et l'eau salée peut se prolonger de façon régulière d'un aquifère à l'autre si les conditions suivantes sont remplies (Illustration 10) :

- tous les aquifères sont en communication hydraulique directe avec l'eau de mer ;
- les paramètres hydrodynamiques des aquifères sont relativement homogènes ;
- la variation verticale du potentiel hydraulique reste faible d'un aquifère à l'autre.

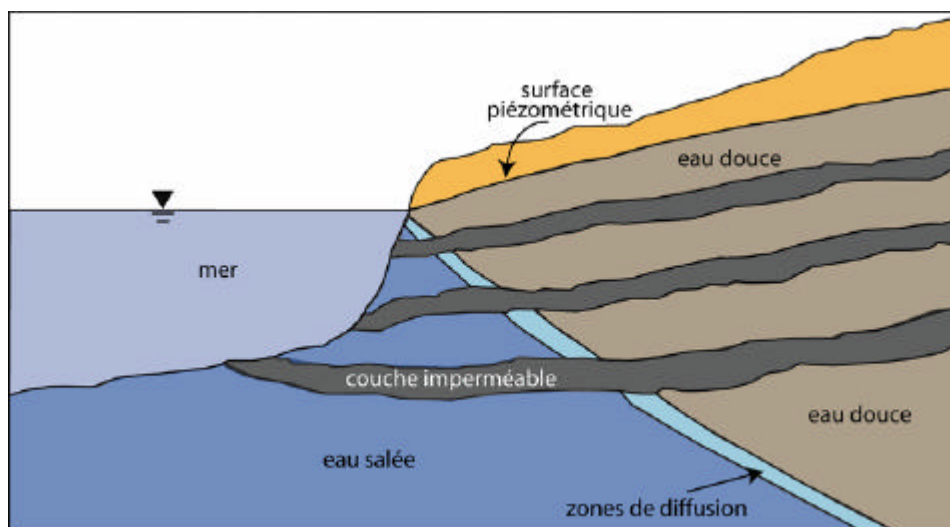


Illustration 10 : Géométrie du biseau salé dans un aquifère multicouche homogène.

Ce cas reste rare dans la réalité, les potentiels hydrauliques, ou niveaux piézométriques des différents aquifères étant la plupart du temps notablement différents, à cause notamment de la mise en charge des aquifères situés sous les formations imperméables.

Aquifères multicouches à charges différentes

L'interface entre l'eau douce et l'eau salée peut se prolonger de façon irrégulière d'un aquifère à l'autre et l'épaisseur de la zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée peut être variable d'un aquifère à l'autre si les conditions suivantes sont remplies (Illustration 11) :

- tous les aquifères sont en communication hydraulique directe avec l'eau de mer ;
- les potentiels hydrauliques des différents aquifères sont croissants avec la profondeur des aquifères, ce qui a pour effet de repousser les interfaces entre l'eau douce et l'eau salée vers la mer ;
- les paramètres hydrodynamiques sont homogènes au sein de chaque aquifère. La géométrie des zones de mélange est alors régulière ;
- les paramètres hydrodynamiques sont différents d'un aquifère à l'autre. Les zones de mélange ont des épaisseurs différentes d'un aquifère à l'autre.

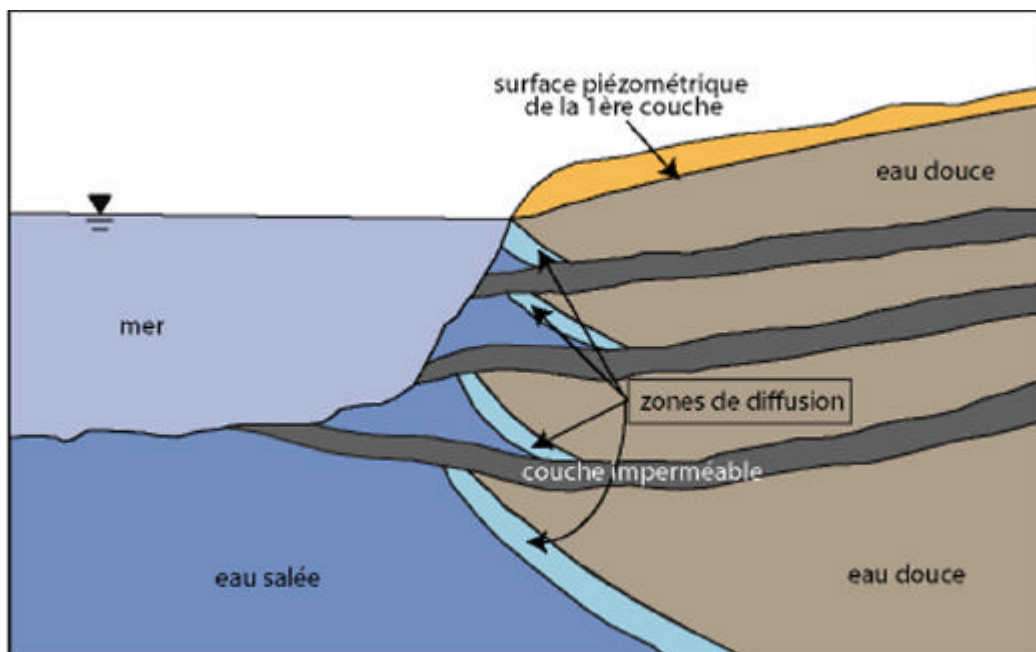


Illustration 11 : Géométrie d'un biseau salé dans un aquifère multicouches à charges différentes

Ces hypothèses sont simplificatrices puisqu'en réalité, il peut exister une forte hétérogénéité des paramètres hydrodynamiques à l'intérieur d'une même couche.

Aquifères multicouches hétérogènes

L'interface entre l'eau douce et l'eau salée peut se prolonger de façon irrégulière d'un aquifère à l'autre et l'épaisseur de la zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée peut être variable d'un aquifère à l'autre et au sein d'un même aquifère si les conditions suivantes sont remplies (Illustration 12) :

- tous les aquifères sont en communication hydraulique directe avec l'eau de mer ;
- les potentiels hydrauliques des différents aquifères sont croissants avec la profondeur des aquifères, ce qui a pour effet de repousser les interfaces entre l'eau douce et l'eau salée vers la mer ;
- les paramètres hydrodynamiques sont hétérogènes au sein de chaque aquifère. La géométrie des zones de mélange est alors irrégulière ;
- les paramètres hydrodynamiques sont différents d'un aquifère à l'autre. Les zones de mélange ont des épaisseurs différentes d'un aquifère à l'autre.

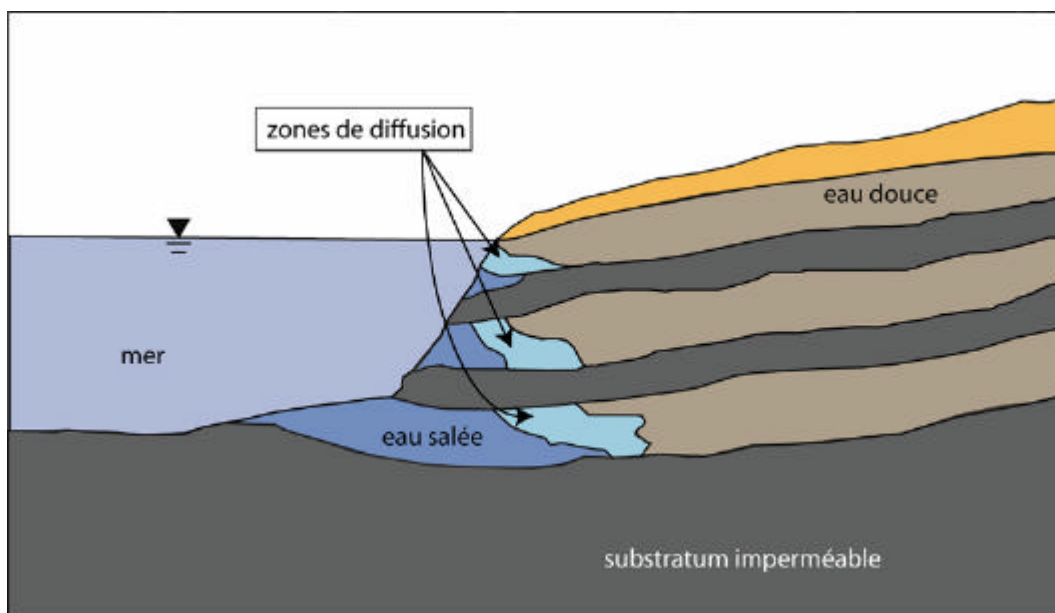


Illustration 12 : Exemple de géométrie d'un biseau salé dans un aquifère multicouches hétérogène.

Conclusions

Ces schémas, qui pourraient être plus complexifiés encore, mettent en évidence la difficulté à caractériser la géométrie du biseau salé en milieu volcanique insulaire où les systèmes aquifères sont multicouches et hétérogènes. Ils permettent également de concevoir que la zone de transition entre l'eau douce et l'eau salée n'est pas unique le long d'une verticale et que des ressources en eaux douces peuvent être situées sous un biseau salé. Cependant, ces ressources pourraient s'avérer fortement vulnérables aux intrusions salines et non pérennes si les débits d'alimentation de ces aquifères profonds ne compensaient pas totalement les débits d'exploitation des forages qui y seraient implantés.

2.3.2. Influence de l'exploitation des nappes sur le biseau salé

Dans ce chapitre, le biseau salé désigne la zone envahie par l'eau marine, quelque soit sa forme et en y incluant la zone de transition à salinité variable (zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée).

Influence du régime d'exploitation de la nappe

Par leurs modifications des niveaux piézométriques, l'exploitation des forages modifie la profondeur et la forme initiale du biseau salé. Le schéma théorique de Ghyben-Herzberg permet de représenter en première approximation l'effet d'un pompage sur le biseau salé dans un milieu homogène (Illustration 13). Un rabattement du niveau piézométrique de 1 m entraîne, selon ce modèle simplificateur, une remontée de 40 m de l'interface entre l'eau douce et l'eau salée (voir chapitre 2.2.1.1). L'impact d'un pompage dans un aquifère multicouche est plus complexe à représenter et à comprendre car il dépend également de la position des crépines dans le forage, de la qualité de l'isolation (cimentation) entre les nappes et des phénomènes de drainance au travers des horizons moins perméables.

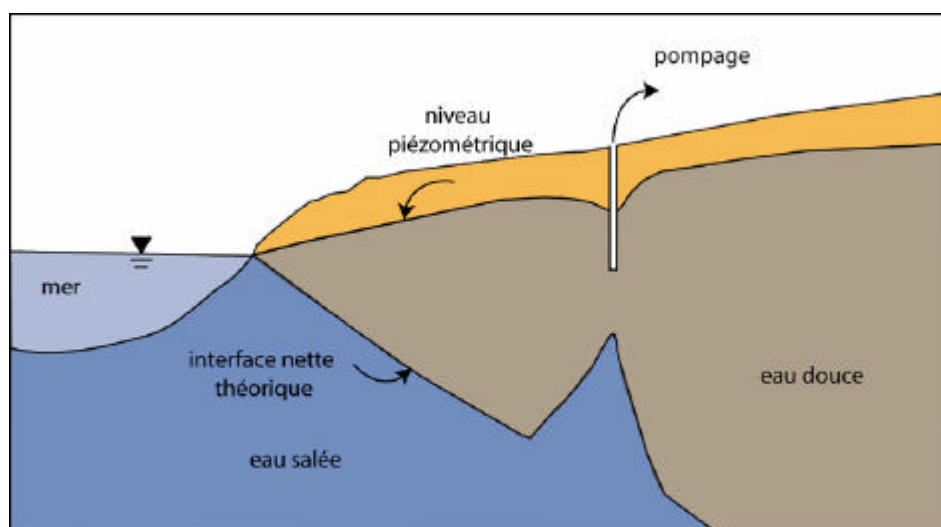


Illustration 13 : Influence d'un pompage sur le biseau salé à partir du schéma théorique de Ghyben-Hertzberg

Le régime d'exploitation appliqué est susceptible d'accélérer ou de ralentir le processus de contamination de la nappe par l'eau salée. Ainsi, la multiplication des arrêts et reprises de pompage sont des facteurs qui peuvent favoriser la contamination marine par un mécanisme similaire à l'effet piston sur la nappe (Daesslé et Join, 1987).

La réduction du débit de pompage d'un forage surexploité et contaminé par une intrusion saline n'est pas accompagnée d'une décroissance immédiate et totale de la salinité. Bien que réversible, le phénomène d'invasion marine au sein des aquifères côtiers est plus rapide dans le sens de la contamination que dans celui de la décontamination du milieu.

Influence du type d'ouvrage d'exploitation

La nature de l'ouvrage de captage des eaux souterraines a un impact sur la survenance des intrusions salines. A débit d'exhaure égal, l'exploitation d'un aquifère par forage engendre un rabattement du niveau piézométrique supérieur à celui créé par le pompage dans un puits rayonnant grâce à l'action d'écroulement de la nappe de ce dernier. Ainsi, en milieu côtier, l'exploitation par puits rayonnant limite les risques liés aux remontées du biseau salé.

Conclusions

L'exploitation des aquifères côtiers par pompage a un impact sur l'occurrence des intrusions salines. Les variations de débits d'exploitation des forages doivent être minimisées pour éviter d'occasionner de brutales fluctuations du niveau piézométrique qui favorisent le développement de la zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée par « effet piston ». La réalisation de puits rayonnant ou de champ captant doit être privilégiée par rapport à celle de forage pour l'exploitation des aquifères littoraux vulnérables aux intrusions salines. L'augmentation de la salinité des eaux souterraines est réversible mais est plus rapide dans le sens de la contamination que dans celui de décontamination du milieu, aussi, il convient de surveiller les évolutions de salinité (conductivité électrique de l'eau et teneur en chlorure) dans les eaux des ouvrages exploités pour optimiser leur gestion.

Le recul du biseau salé est également favorisé par la recharge de la nappe par les précipitations ou les pertes des rivières mais avec plus ou moins de retard entre l'épisode pluvieux et la remontée du niveau de la surface piézométrique

2.3.3. Influence de la morphologie du littoral sur le biseau salé

La morphologie du littoral a un impact sur la vulnérabilité des aquifères côtiers aux intrusions salines :

Les falaises littorales favoriseraient les intrusions salines, l'énergie de la houle et des marées n'étant pas atténuée avant leur déferlement sur la côte.

A contrario, les plages sableuses ou de galet et les récifs coralliens protégeraient partiellement les aquifères des intrusions salines en absorbant une partie de l'énergie de la houle et des marées.

La perméabilité des matériaux constituant la bordure littorale est également un facteur déterminant. A Hawaï, Voss et Souza (1987) ont mis en évidence le rôle bénéfique des dépôts sédimentaire peu perméable vis-à-vis des intrusions saline. Ce même constat a été fait sur les les dépôts sédimentaires qui protègent les aquifères côtiers aux débouchés des ravines sèches de la côte ouest de La Réunion.

La mise en captivité des aquifères littoraux qui émergent au delà de la ligne de rivage rehausse le niveau piézométrique et rende l'aquifère moins vulnérable aux intrusions salines.

2.3.4. Retour à l'équilibre et méthodes de lutte contre les intrusions salines

L'augmentation de la salinité des eaux souterraines est réversible mais est plus rapide dans le sens de la contamination que dans celui de décontamination du milieu. Le recul du biseau salé est favorisé par la réduction des pompages d'exploitation des forages mais également par la recharge de la nappe par les précipitations ou les pertes des rivières. La décroissance de la salinité dans les eaux de l'aquifère n'est alors pas immédiate, il existe un décalage entre les infiltrations et la remontée du niveau piézométrique et entre ce dernier et le recul du biseau salé.

En cas de grave contamination saline dans des zones où les besoins en eau sont élevés, il est possible de mettre en oeuvre des techniques dont le but est d'isoler l'aquifère exploité du biseau salé.

- Barrage hydraulique par recharge artificielle (Salt water intrusion barrier wells)
Barrage hydraulique formé par injection d'eau douce dans des ouvrages recoupant l'aquifère. Cette solution a été mise en place aux Etats-Unis pour lutter contre les intrusions salines, en particulier dans l'État de Californie comptant 307 barrages hydrauliques de ce type. *Source : United States Environmental Protection Agency.*
- Murs de boue (Slurry walls)
Barrières de subsurface (jusqu'à 60 m de profondeur) permettant de réduire ou de stopper les circulations d'eau souterraines. Des tranchées sont creusés jusqu'à atteindre un substratum imperméable puis remplis avec un mélange de terre, d'argile (bentonite) et d'eau. L'ensemble des tranchées forment un filtre vertical.
- Murs de pile de feuilles (Sheet pile walls)
Variante de la méthode des murs de boue, ce type de mur vertical imperméable est réalisé en entassant des feuilles de polyéthylène de très haute densité. Les espaces entre les feuilles sont remplis par une substance étanche afin de garantir une surface imperméable. Cette méthode est très coûteuse et se limite à des profondeurs maximales de 20 m. *Source : United States Environmental Protection Agency.*
- Rideau de mortier (Grout curtain)
La méthode du rideau de mortier repose sur le même principe que les murs de boues mais la boue est injectée directement dans le sol plutôt que de remplir des tranchées.

La boue, confectionnée à base de bentonite, est injectée en pression dans le sol afin de remplir au maximum les espaces poreux du sol. Cette technique a l'avantage de pouvoir être utilisée à toutes les profondeurs.

- Injection de coulis (Jet grouting)
Semblable à la méthode précédente, cette technique est appliquée pour les sols difficilement injectables. La déstructuration du sol par injection sous très haute pression d'un jet de coulis à base de ciment forme un mélange sol-ciment imperméable.
- Mélange du sous sol *in situ* (Deep soil mixing)
Pour imperméabiliser une tranche vertical de sol, on mélange « in situ » le sol avec des d'autres matériaux (*voir annexe 2*).
- Barrière biologique (Biological barrier walls)
Cette technique est encore au stade expérimental. Des souches de bactéries sont mises en place dans le sol afin qu'en colonisant la zone, elles construisent des murs imperméables.
- Barrages sur les cours d'eau pour éviter la remontée d'eau salée dans l'estuaire.

Les techniques de barrière hydraulique par injection d'eau douce, les murs de boue et les murs de piles de feuilles sont éventuellement réversibles. Par contre, les autres méthodes : le rideau de mortier, l'injection de coulis à très haute pression, le mélange en profondeur de sols et la barrière biologique sont difficilement réversibles une fois mis en place.

3. Les intrusions salines à La Réunion

3.1. IDENTIFICATION DES OUVRAGES CONCERNES PAR LES INTRUSIONS SALINES

3.1.1. Méthode d'identification

Le Tableau 2 récapitule la composition chimique de quatre types d'eau : l'eau de mer, une eau souterraine non influencée par l'eau de mer, une eau souterraine soumise aux intrusions salines et une eau souterraine contaminée par des nitrates. La conductivité électrique ainsi que la teneur en chlorure sont de bons marqueurs de l'influence d'une intrusion saline.

	Eau de mer à 25°C	Eau souterraine sans contamination marine (Forage Chemin Sévère)	Eau souterraine avec contamination marine (Forage F2 Gillot)	Eau souterraine avec contamination azotée (Forage coco 1)
Conductivité électrique ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	30 000	80	802	493
pH	8,22	8,24	8	7,53
Na (mg.l^{-1})	11019,5	4,6	62,8	52,4
K (mg.l^{-1})	408,42	1,5	2,54	3,3
Cl (mg.l^{-1})	19805,1	5,6	209,06	31,5
SO ₄ (mg.l^{-1})	2775,35	1,3	27,48	34,94
NO ₃ (mg.l^{-1})	0,297	0,8	6,1	34,44
NO ₂ (mg.l^{-1})	0,02	0,01	0	0,02
NH ₄ (mg.l^{-1})	0,03	0	0	0,01
Fe (mg.l^{-1})	0,002 (dissous)	30 (total)		10 (total)
Mn (mg.l^{-1})	0,0002	0	0	0
Al (mg.l^{-1})	0,002	0,06		0,04

Tableau 2 : Composition chimique de l'eau de mer, d'eaux souterraines non soumise et soumise aux intrusions salines et soumise à une excédent azoté.

L'identification des ouvrages contaminés par des intrusions salines a été réalisée sur la base des données existantes. Des démarches ont été entreprises pour recueillir les données d'exploitations des fermiers (SAPHIR, CGE, CISE), des industriels (usine sucrière), du Laboratoire des Sciences de la Terre de l'Université de La Réunion, des services de l'État (DRASS, DAF, DDE, DIREN, DRIRE), des services techniques des communes de Saint-Denis et de Sainte-Rose, de la direction du service de l'eau du Département, de l'Office de l'eau de La Réunion (OLE) de la Banque de Données du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM. Deux types d'ouvrages ont été retenus : ceux dont les eaux souterraines présentent des conductivités électriques supérieures à $500 \mu\text{S.cm}^{-1}$ et ceux dont la teneur en nitrate est supérieure à 200mg.l^{-1} . Quarante et

un ouvrages ont été identifiés par ce premier tri. Les ouvrages identifiés proviennent des bases de données Sise-Eaux de la DRASS, de l'Office de l'Eau (OLE), de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM, de la SAPHIR et de l'usine sucrière de Saint-Louis (Illustration 14). Ces ouvrages sont dans leur très grande majorité situés dans les micro-régions Ouest et Sud.

Un second tri a permis de répartir les ouvrages en trois classes :

- Ouvrage recoupant le biseau salé

Ces ouvrages sont caractérisés par des eaux dont la valeur de conductivité électrique est supérieure à $10\,000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Les diagraphies de conductivité électrique réalisées sur ces ouvrages permettent d'identifier l'épaisseur de l'aquifère, celle de la zone de mélange et la profondeur à laquelle est recoupé le biseau salé. Huit ouvrages recoupant le biseau salé ont été identifiés : deux à Saint-Paul, deux à Trois-Bassins, deux à Saint-Pierre, un à Petite-Île et un à saint-Joseph. A l'exception du forage P21 de Saint-Paul (indice BSS 12262x0188), tous ces ouvrages sont des piézomètres.

- Ouvrage fortement soupçonné d'être influencé par les intrusions salines

Ces ouvrages sont caractérisés par des eaux dont la valeur de conductivité électrique est supérieure à $1000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ou dont la teneur en chlorure est supérieure à $200\ \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Ils n'ont pas recoupé l'interface entre l'eau douce et l'eau salée, mais les valeurs de conductivité électrique de leurs eaux sont largement supérieures à celles des eaux souterraines non influencées par les intrusions salines (valeur avoisinant les $200\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Ces ouvrages sont au nombre de treize : un à Sainte-Marie, trois au Port, trois à Saint-Paul, deux à Saint-Leu, un aux Aviron, un à Etang-Salé, un à Saint-Louis et un à Petite-Île.

- Ouvrage pour lesquels l'influence des intrusions salines est possible

Ces ouvrages sont caractérisés par des eaux dont la valeur de la conductivité électrique est comprise entre 500 et $1000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Ils n'ont pas recoupé l'interface entre l'eau douce et l'eau salée, mais les valeurs de conductivité électrique de leurs eaux sont supérieures à celles des eaux souterraines non influencées par les intrusions salines (valeurs comprises entre 80 et $200\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

Cette démarche a permis d'identifier à partir des données issues de l'ensemble des ouvrages de l'île huit ouvrages ayant recoupés le biseau salé, treize ouvrages à fortement soupçonnés d'être influencés par des intrusions salines et vingt ouvrages sur lesquels une influence des intrusions salines est possible.

L'ensemble de la démarche est schématisée sur l'illustration 14 et les principales valeurs utilisées pour la réalisation de cette classification sont données dans les Tableau 3 et Tableau 4 (deux présentations pour faciliter la lecture : par niveau d'identification du biseau salé et par commune). Les données ont été reportées sur un fond cartographique (Illustration 15, Illustration 16, Illustration 17). Le fichier contenant les informations sur les intrusions salines ayant été utilisé pour réaliser ces cartes est fourni au format Map Info dans le cédérom associé au rapport. Les données disponibles n'étant pas synchrones, il n'a pas été possible de réaliser de cartographie de l'intrusion saline sur la base des conductivités électriques des eaux de forage.

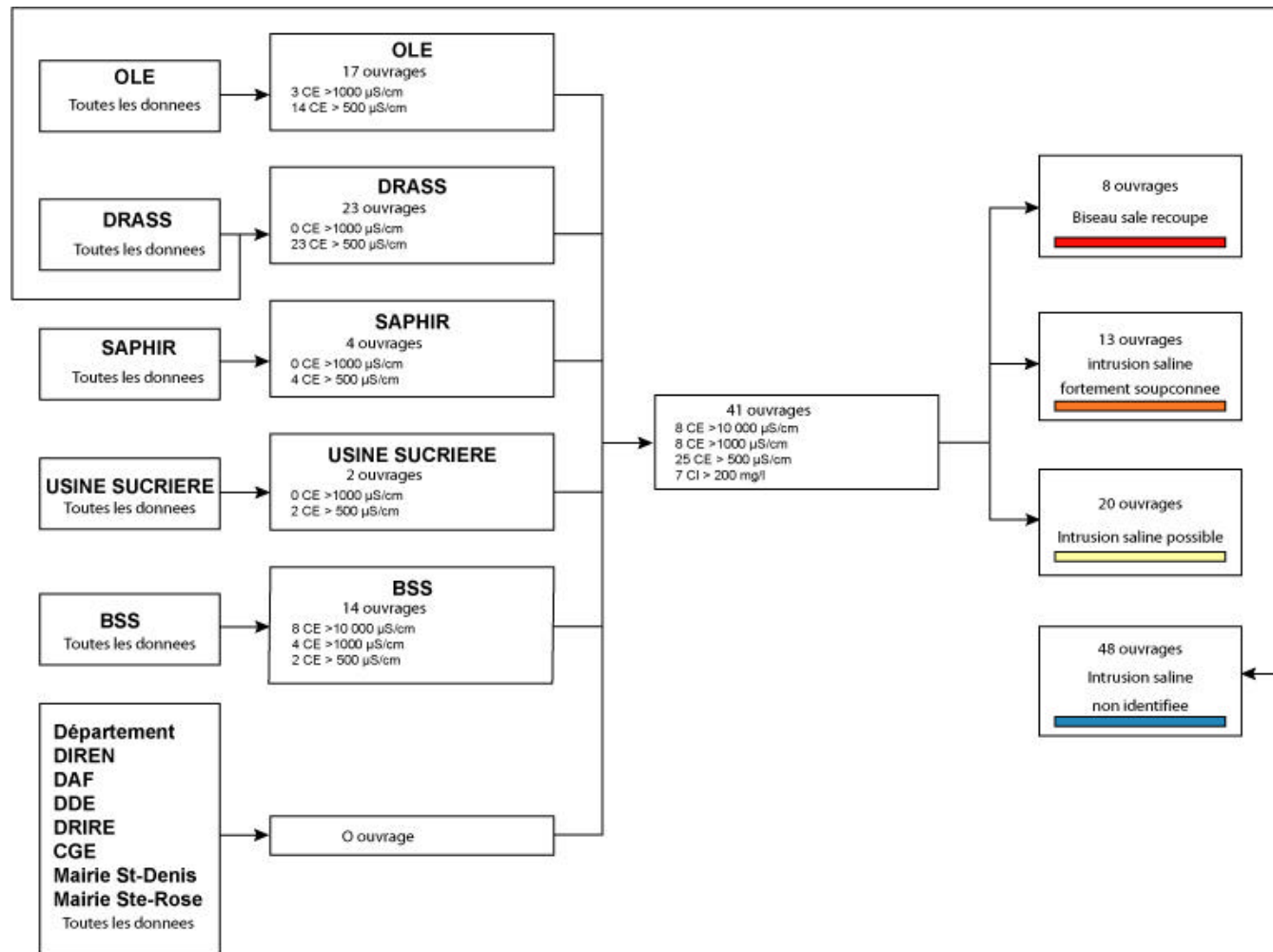


Illustration 14 : Logigramme de la méthode d'identification des ouvrages soumis aux intrusions salines

	Commune	indice bss	nom de l'ouvrage	Conductivité électrique en $\mu\text{S}/\text{cm}$	[CL-] > 200 mg.L-1	Conductivité électrique croissante	Conductivité électrique minimale ($\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$)	Conductivité électrique maximale ($\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$)	date	altitude interface eau douce / eau salée (m NGR)	altitude maximum de la salinite (m NGR)
Biseau salé recoupé	Saint-Paul	12262x0188	Forage P21	CE > 10 000	-	-	2000	36000	1995	- 57	-
	Saint-Paul	12265x0027	Piezometre P6 l'Ermitage	CE > 10 000	-	-	580	16200	1989	- 41	-
	Trois Bassins	12266x0081	Piezometre Ravine Fond Jardin	CE > 10 000	-	-	111	11100	1989	- 20	-
	Trois Bassins	12266x0080	Piezometre P5 Grande Ravine	CE > 10 000	-	-	185	38500	1989	- 33	-
	Saint-Pierre	12295x0040	Piezometre La Cafrine	CE > 10 000	-	-	1800	18250	1988	- 38	-
	Saint-Pierre	12288x0078	Piezometre Syndicat	CE > 10 000	-	-	350	9615	1989	- 22	-
	Petite-Ile	12295x0045	Piezometre Ravine du Pont	CE > 10 000	-	-	1600	20000	1990	- 25	-
	Saint-Joseph	12296x0066	Piezometre Manapany	CE > 10 000	-	-	1030	11360	1990	- 22.25	-
Intrusion saline fortement soupçonnée	Sainte-Marie	12271x0058	F2 Gillot	CE > 500	x	x	-	-	-	-	-
	Le Port	12262x0174	Piezometre P3 chemin des Anglais (nappe inf.)	CE > 1000	-	-	2910	3470	1992	-	- 60
	Le Port	12262x0087	F1 Mounien	CE > 1000	x	x	-	-	-	-	-
	Le Port	12262x0135	F2	CE > 1000	x	-	-	-	-	-	-
	Saint-Paul	12262x0176	Piezometre SP1 Tour des Roches	CE > 1000	-	-	420	1670	1991	-	- 7
	Saint-Paul	12265x0054	FRH9	CE > 500	x	-	-	-	-	-	-
	Saint-Paul	12266x0056	Forage Trou d'eau / la saline	CE > 500	x	-	-	-	-	-	-
	Saint-Leu	12282x0047	Piezometre Chemin Surprise	CE > 1000	-	-	939	3080	1989	-	- 25
	Saint-Leu	12266x0078	Forage Fond Petit Louis	CE > 1000	-	x	-	-	-	-	-
	Les Avirons	12283x0060	Forage Brulé	CE > 500	x	x	-	-	-	-	-
	Etang-Salé	12283x0058	Forage Ravine sèche ou Pacifique	CE > 500	x	x	-	-	-	-	-
	Saint-Louis	12287x0064	Puits du Gol C	CE > 1000	-	x	-	-	-	-	-
	Petite-Ile	12295x0035	Forage Grand Bois	CE > 1000	-	-	-	1670	1988	-	-
	Intrusion saline possible	La Possession	12263x0044	Puits de la ravine à Marquet	CE > 500	-	x	-	-	-	-
Le Port		12262x0168	F5	CE > 500	-	x	-	-	-	-	-
Le Port		12262x0048	F4	CE > 500	-	-	-	-	-	-	-
Le Port		12262x0175	F6	CE > 500	-	-	-	-	-	-	-
Saint-Louis		12287x0062	Puits du Gol B	CE > 500	-	x	-	-	-	-	-
Saint-Louis		12287x0061	Puits du Gol A	CE > 500	-	x	-	-	-	-	-
Saint-Pierre		12288x0045	Forage la Salette	CE > 500	-	-	-	-	-	-	-
Saint-Philippe		12297x0013	Puits du Baril	CE > 500	-	x	-	-	-	-	-
Le Port		12262x0046	Puits EDF	CE > 500	-	x	-	-	-	-	-
Saint-Paul		12262x0089	F5 bis chemin Saint-Paul	CE > 500	-	-	-	-	-	-	-
Saint-Paul		12262x0166	F5 ter trois chemins	CE > 500	-	-	-	-	-	-	-
Saint-Paul		12265x0025	F1 Les Filaos Hermitage	CE > 500	-	-	-	-	-	-	-
Trois Bassins		12266x0079	Forage fond jardin	CE > 500	-	-	601	-	-	-	-
Trois Bassins		12266x0070	Puits Grande ravine (rive gauche)	CE > 500	-	x	-	-	-	-	-
Trois Bassins		12266x0036	Puits Grande ravine (rive droite)	CE > 500	-	x	-	-	-	-	-
Saint-Leu		12266x0053	Forage petite ravine	CE > 500	-	x	-	-	-	-	-
Etang-Salé		12287x0040	Forage Marengo	CE > 500	-	x	-	-	-	-	-
Saint-Louis		12287x0035	Puits du Gol (SR)	CE > 500	-	-	-	-	-	-	-
Saint-Louis		12287x0038	Puits de Bois de Nêfles (SR)	CE > 500	-	-	-	-	-	-	-
Saint-Joseph		12296x0067	Forage les Goyaves	CE > 500	-	-	671	-	-	-	-

Tableau 3 : Récapitulatif des données relatives aux ouvrages soumis aux intrusions salines classés par niveau de salinité

Commune	Degré de pénétration du biseau salé	indice bss	nom de l'ouvrage	Conductivité électrique en $\mu\text{S}/\text{cm}$	[CL-] > 200 mg.L-1	Conductivité électrique croissante	Conductivité électrique minimale ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Conductivité électrique maximale ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	date	altitude interface eau douce / eau salée (m NGR)	altitude maximum de la salinite (m NGR)
Sainte-Marie	Intrusion saline fortement soupçonnée	12271x0058	F2 Gillot	CE > 500	x	x	-	-	-	-	-
La Possession	Intrusion saline possible	12263x0044	Puits de la ravine à Marquet	CE > 500	-	x	-	-	-	-	-
Le Port	Intrusion saline fortement soupçonnée	12262x0174	Piezo P3 chemin des Anglais (nappe inf.)	CE > 1000	-	-	2910	3470	1992	-	-60
		12262x0087	F1 Mounien	CE > 1000	x	x	-	-	-	-	-
			12262x0135	F2	CE > 1000	x	-	-	-	-	-
			12262x0168	F5	CE > 500	-	x	-	-	-	-
			12262x0048	F4	CE > 500	-	-	-	-	-	-
			12262x0175	F6	CE > 500	-	-	-	-	-	-
Saint-Paul	Intrusion saline possible	12262x0046	Puits EDF	CE > 500	-	x	-	-	-	-	-
	Biseau salé recoupé	12262x0188	Forage P21	CE > 10 000	-	-	2000	36000	1995	-57	-
		12265x0027	Piezometre P6 l'Ermitage	CE > 10 000	-	-	580	16200	1989	-41	-
	Intrusion saline fortement soupçonnée	12262x0176	Piezometre SP1 Tour des Roches	CE > 1000	-	-	420	1670	1991	-	-7
		12265x0054	FRH9	CE > 500	x	-	-	-	-	-	-
			12266x0056	Forage Trou d'eau / la saline	CE > 500	x	-	-	-	-	-
			12262x0089	F5 bis chemin Saint-Paul	CE > 500	-	-	-	-	-	-
			12262x0166	F5 ter trois chemins	CE > 500	-	-	-	-	-	-
	Intrusion saline possible	12265x0025	F1 Les Filaos Hermitage	CE > 500	-	-	-	-	-	-	
Trois Bassins	Biseau salé recoupé	12266x0081	Piezometre Ravine Fond Jardin	CE > 10 000	-	-	111	11100	1989	-20	-
		12266x0080	Piezometre P5 Grande Ravine	CE > 10 000	-	-	185	38500	1989	-33	-
			12266x0079	Forage fond jardin	CE > 500	-	-	601	-	-	-
		Intrusion saline possible	12266x0070	Puits Grande ravine (rive gauche)	CE > 500	-	x	-	-	-	-
Saint-Leu	Intrusion saline fortement soupçonnée	12266x0036	Puits Grande ravine (rive droite)	CE > 500	-	x	-	-	-	-	-
		12282x0047	Piezometre Chemin Surprise	CE > 1000	-	-	939	3080	1989	-	-25
		Intrusion saline possible	12266x0078	Forage Fond Petit Louis	CE > 1000	-	x	-	-	-	-
Les Avirons	Intrusion saline fortement soupçonnée	12266x0053	Forage petite ravine	CE > 500	-	x	-	-	-	-	-
		12283x0060	Forage Brulé	CE > 500	x	x	-	-	-	-	-
Etang-Salé	Intrusion saline fortement soupçonnée	12283x0058	Forage Ravine sèche ou Pacifique	CE > 500	x	x	-	-	-	-	-
		12287x0040	Forage Marengo	CE > 500	-	x	-	-	-	-	-
Saint-Louis	Intrusion saline fortement soupçonnée	12287x0064	Puits du Gol C	CE > 1000	-	x	-	-	-	-	-
		12287x0062	Puits du Gol B	CE > 500	-	x	-	-	-	-	-
			12287x0061	Puits du Gol A	CE > 500	-	x	-	-	-	-
			12287x0035	Puits du Gol (SR)	CE > 500	-	-	-	-	-	-
	Intrusion saline possible	12287x0038	Puits de Bois de Nêfles (SR)	CE > 500	-	-	-	-	-	-	
Saint-Pierre	Biseau salé recoupé	12295x0040	Piezometre La Cafrine	CE > 10 000	-	-	1800	18250	1988	-38	-
		12288x0078	Piezometre Syndicat	CE > 10 000	-	-	350	9615	1989	-22	-
		Intrusion saline possible	12288x0045	Forage la Salette	CE > 500	-	-	-	-	-	-
Petite-Ile	Biseau salé recoupé	12295x0045	Piezometre Ravine du Pont	CE > 10 000	-	-	1600	20000	1990	-25	-
		12295x0035	Forage Grand Bois	CE > 1000	-	-	-	1670	1988	-	-
Saint-Joseph	Biseau salé recoupé	12296x0066	Piezometre Manapany	CE > 10 000	-	-	1030	11360	1990	-22.25	-
		12296x0067	Forage les Govaves	CE > 500	-	-	671	-	-	-	-
Saint-Philippe	Intrusion saline possible	12297x0013	Puits du Baril	CE > 500	-	x	-	-	-	-	

Tableau 4 : Récapitulatif des données relatives aux ouvrages soumis aux intrusions salines classés par commune

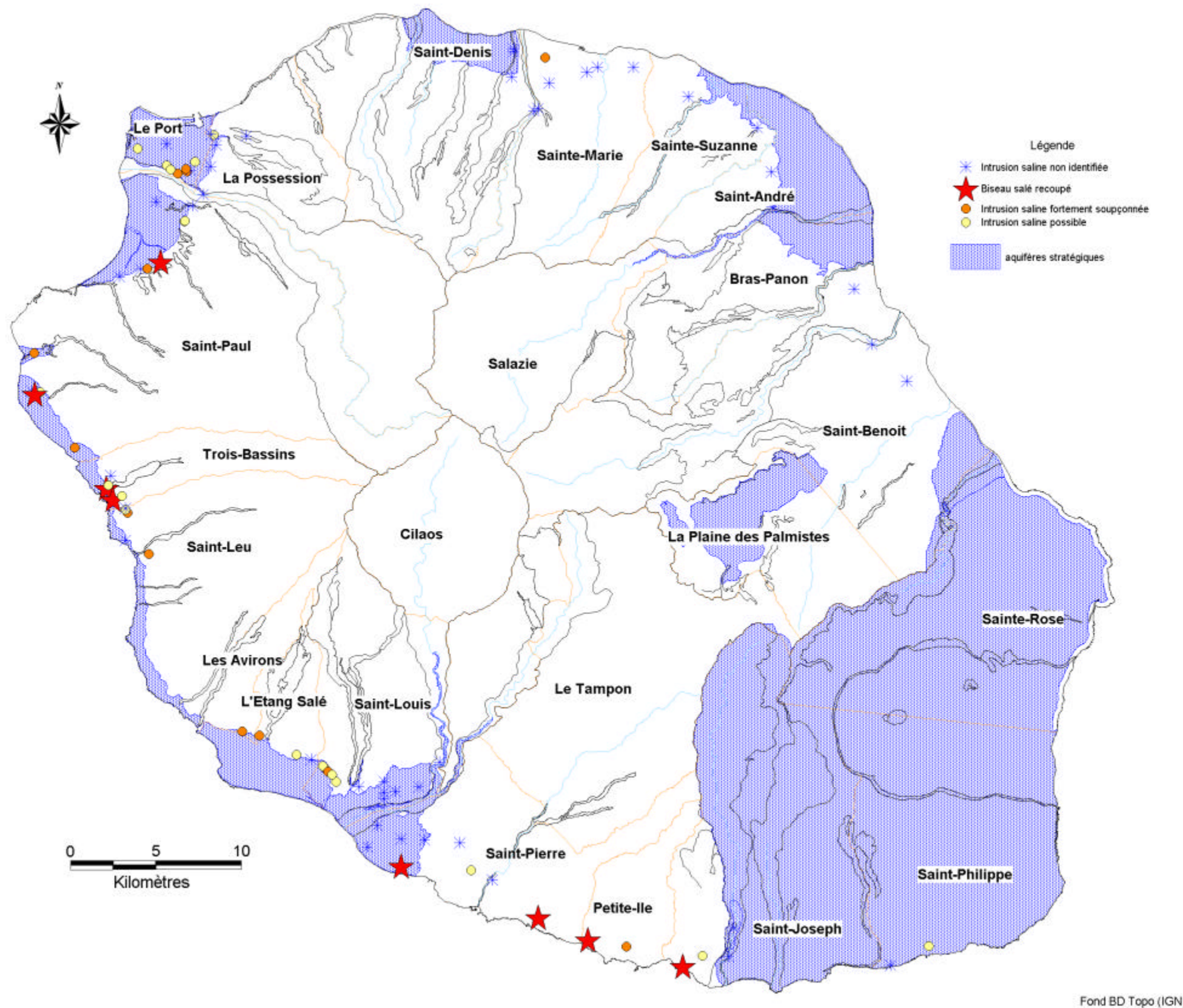


Illustration 15 : localisation des ouvrages soumis aux intrusions salines

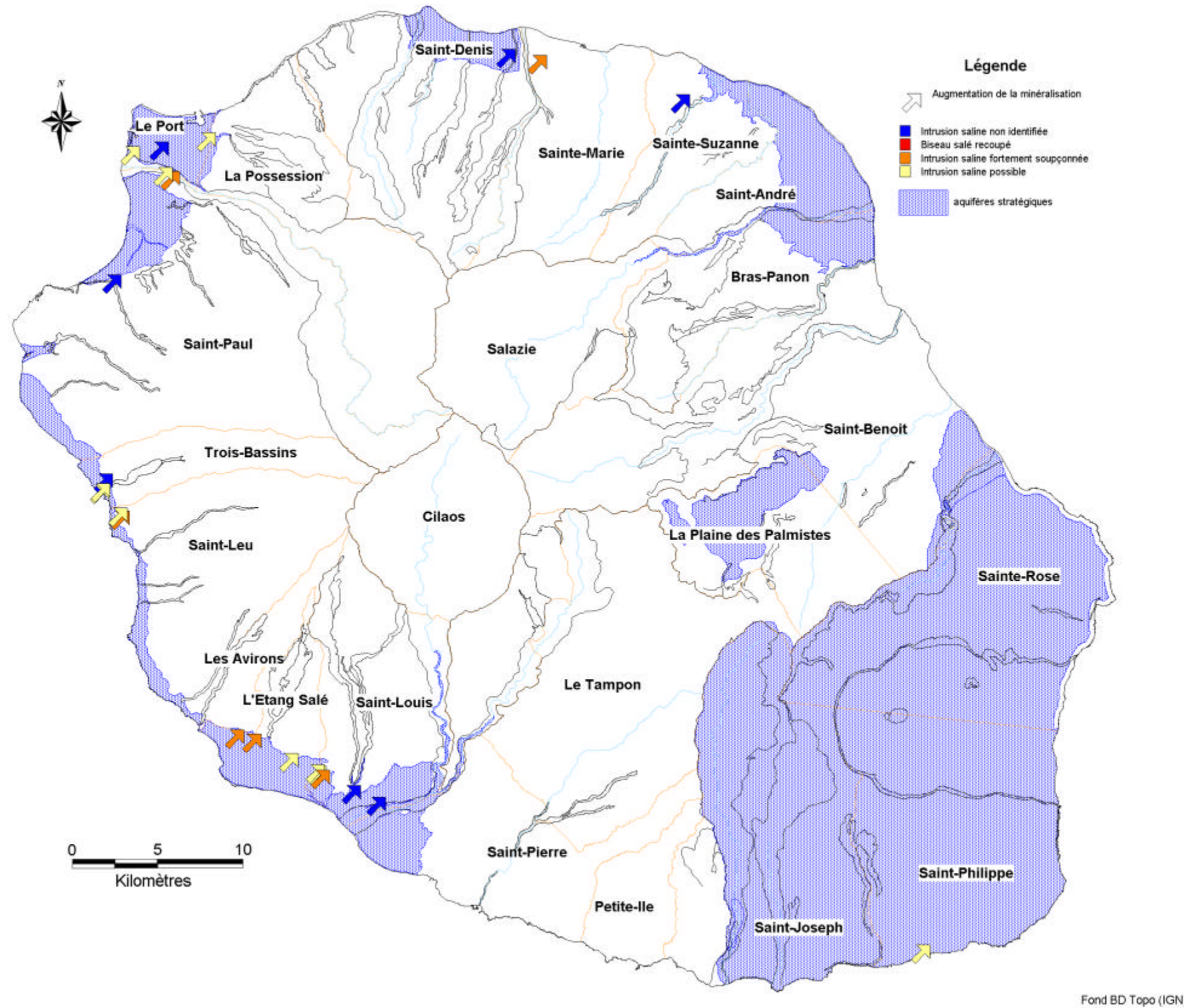


Illustration 16 : localisation des ouvrages dont la minéralisation est en augmentation

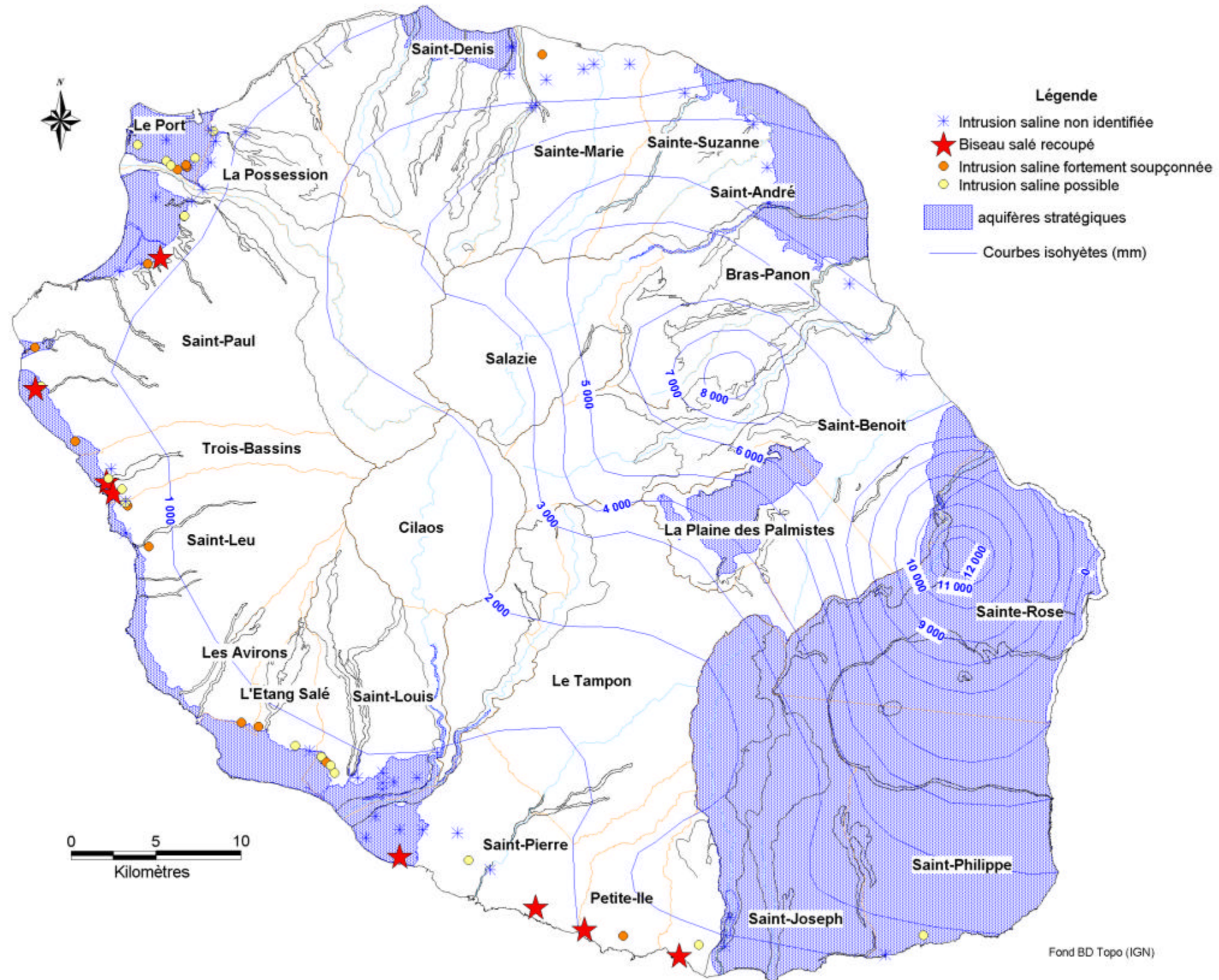


Illustration 17 : Précipitations et intrusions salines

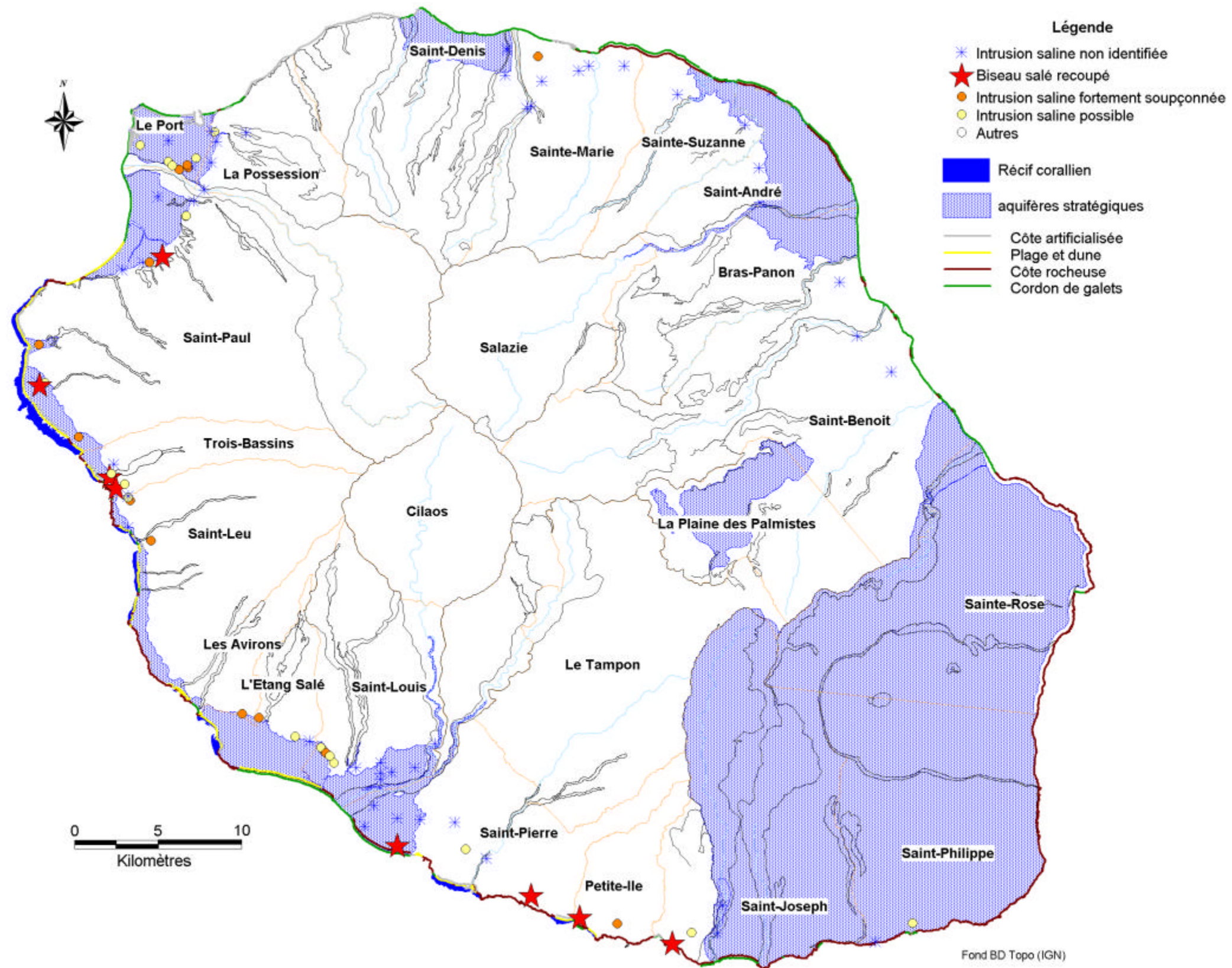


Illustration 18 : Morphologie côtière et intrusion saline

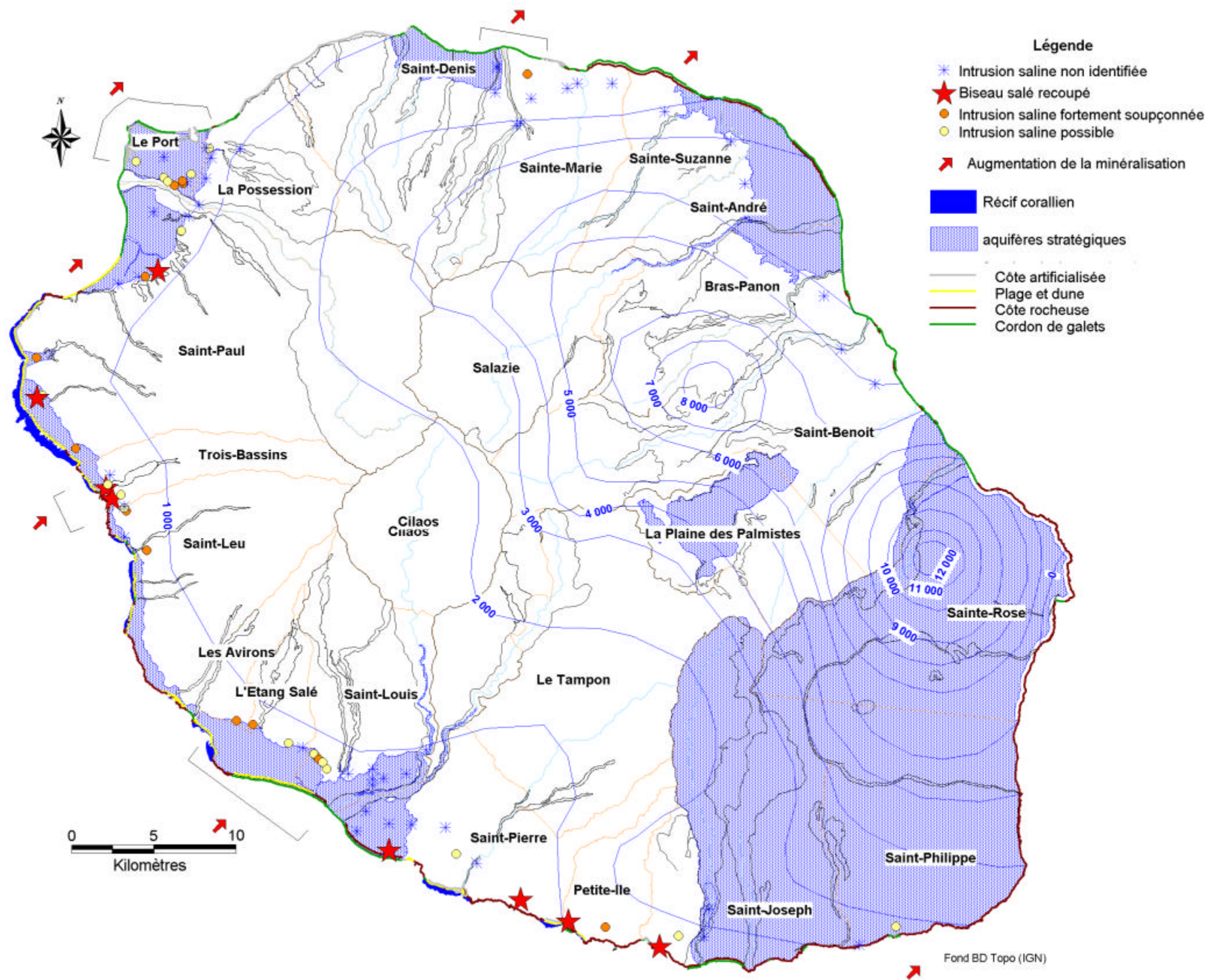


Illustration 19 : synthèse des données relatives aux intrusions salines

3.1.2. Paramètres influençant les intrusions salines

Influence des précipitations

L'illustration 19 met en évidence le rôle déterminant de la répartition des précipitations sur les phénomènes d'intrusions salines. 88 % des ouvrages susceptibles d'être influencés par le biseau salé (biseau salé recoupé, intrusion saline fortement soupçonnée et intrusion saline possible) sont localisés sur une zone où la hauteur de précipitation est inférieure à un mètre par an, et un seul ouvrage (2% du total) est soupçonné d'être perturbé par des intrusions salines dans la zone où la hauteur des précipitations annuelle est supérieure à deux mètres.

Sur la côte Est de La Réunion, les aquifères bénéficient d'une recharge par les précipitations suffisante pour repousser le biseau salé en mer malgré l'exploitation des nappes. Sur la côte Ouest de La Réunion, la recharge des aquifères exploités est trop faible pour s'opposer aux intrusions salines.

Influence des modalités d'exploitation

Les données d'exploitations n'étant pas centralisées, il n'a pas été possible de les prendre formellement en considération dans le cadre de cette étude. Cependant, sur la base des connaissances du contexte réunionnais par les hydrogéologues de la DAF, de l'Office de l'eau et du BRGM, l'influence des modalités d'exploitation sur les intrusions salines semble indéniable. La surexploitation des aquifères (pompage excessif par rapport à la recharge et au stock de l'aquifère : Sainte-Marie, Saint-Louis) ou des fortes variations de débit d'exploitation (Saint-Louis) contribuent nettement aux invasions marines dans les aquifères côtiers et au développement de la zone de mélange entre les eaux douces et les eaux salées.

Influence de la morphologie du littoral

La morphologie du littoral de La Réunion a été définie par l'étude BRGM « synthèse morpho dynamique des littoraux de La Réunion (De La Torre, 2004). Le littoral a été découpé en quatre classes : côte artificialisée, plage et dune, côte rocheuse et cordon de galets (Illustration 18). Des huit ouvrages recoupant le biseau salé, cinq sont situés à l'arrière d'une côte rocheuse, contexte réputé favorable aux intrusions salines. Cependant l'essentiel des ouvrages identifiés comme étant susceptibles de subir l'influence des intrusions salines est localisé à l'arrière d'une côte non rocheuse.

Les ouvrages implantés à l'arrière des récifs coralliens sont dans la plupart des cas soupçonnés d'être soumis aux intrusions salines et un de ces ouvrages a recoupé le biseau salé.

Bien qu'ayant un impact indéniable sur les intrusions salines, la morphologie du littoral ne semble pas être un des paramètres les plus influents.

Influence du contexte géologique

L'influence du contexte géologique n'a pas été clairement mise en évidence dans le cadre de cette étude. Des intrusions salines sont soupçonnées dans des contextes détritiques (Le Port) et des contextes volcaniques (Sainte-Marie, Petite-Ile).

3.1.3. Zones soumises aux intrusions salines

Les communes de la façade Ouest de La Réunion sont les plus soumises à l'aléa intrusion saline (Illustration 19, Illustration 20, Illustration 21). Parmi celles-ci quatre communes sont plus touchées que les autres : Le Port, Saint-Paul, Trois Bassin et Saint-Louis. Un seul ouvrage est perturbé par les intrusions salines sur la commune de Sainte-Marie pourtant située sur la façade Est de La Réunion. Les principaux secteurs où les intrusions salines sont mises en évidence sont repris un à un et l'origine des pénétrations marines est identifiée.

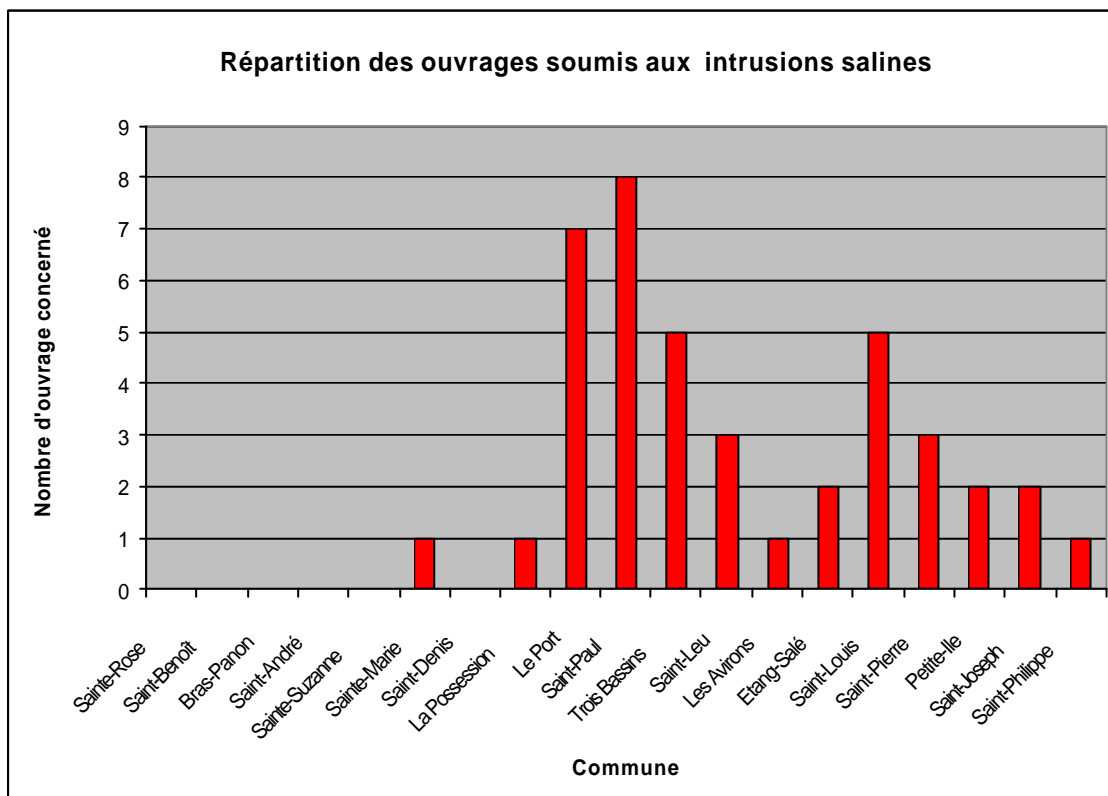


Illustration 20 : Répartition des ouvrages soumis aux intrusions salines par commune

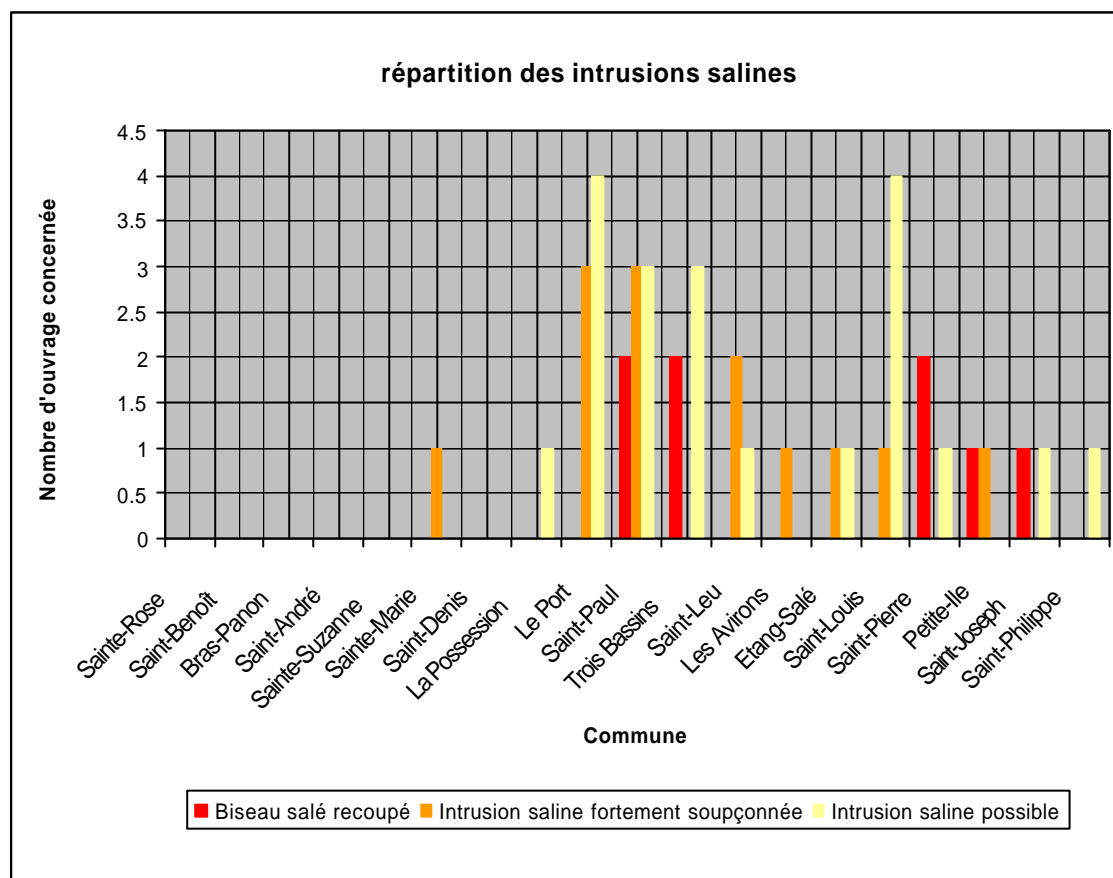


Illustration 21 : Répartition des intrusions salines par niveau d'aléa et par commune

Sainte-Marie

La minéralisation totale et notamment la teneur en chlorure des eaux du forage F2 Gillot (indice BSS 12271 X0058) à Sainte-Marie ont brutalement augmentées en janvier 2001 (Illustration 22). Les débits d'exploitation n'étant pas centralisés, il n'a pas été possible de les prendre en compte formellement dans le cadre de cette étude, cependant il semblerait (communication orale de la DAF) que le débit d'exploitation ait été fortement augmenté en janvier 2001. A cette même période, le cyclone Dina a frappé l'île de La Réunion.

Conclusion : il est possible que ces deux facteurs combinés soient responsable de l'augmentation de la minéralisation au forage F2 Gillot. Les intrusions salines auraient bénéficié de l'énergie de la houle cyclonique déferlant sur la côte où le niveau piézométrique était excessivement rabattu par le pompage F2 de Gillot. En l'absence de chronique de débit d'exploitation disponible il n'est pas possible de se prononcer sur les causes des variations de minéralisation observées dans les eaux du forage depuis janvier 2001.

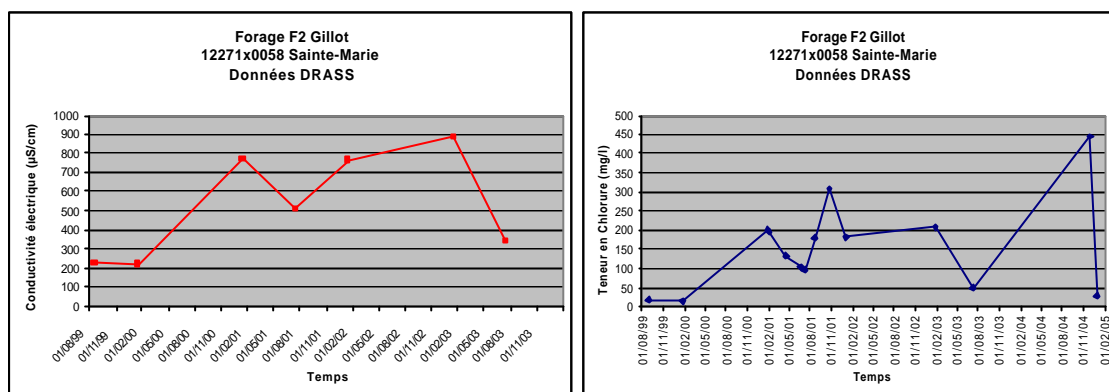


Illustration 22 : Evolution de la conductivité électrique et des teneurs en chlorure dans les eaux du forage G2 gillot (indice BSS 12271X0058)

Le Port

La plaine des Galets comporte trois aquifères superposés (Illustration 23) :

- une nappe supérieure libre s'étend de part et d'autre de la rivière des Galets sur plusieurs centaines de mètres de distance et alimente l'aquifère sous-jacent. Elle est sollicitée pour l'eau potable et pour l'industrie (EDF) ;
- une nappe moyenne constitue l'aquifère principal et couvre l'ensemble du secteur de la Plaine des Galets. Elle est exploitée pour l'eau potable et les prélèvements qui y sont fait représentent l'essentiel du débit total pompé dans les aquifères de la Plaine des Galets ;
- une nappe inférieure dont les eaux sont naturellement saumâtres. Elle est située en dessous de l'aquifère principal à partir de 125 m de profondeur.

Le Port est l'une des communes les plus touchée par l'augmentation de la salinité des eaux souterraines. L'influence d'intrusions salines est fortement soupçonnée sur trois ouvrages (Tableau 4) et possible sur quatre ouvrages. Les eaux de trois ouvrages sont sujettes à une augmentation de leur minéralisation totale (Illustration 24). Ces forages ne sont pas ceux situés en bordure du rivage (Illustration 25).

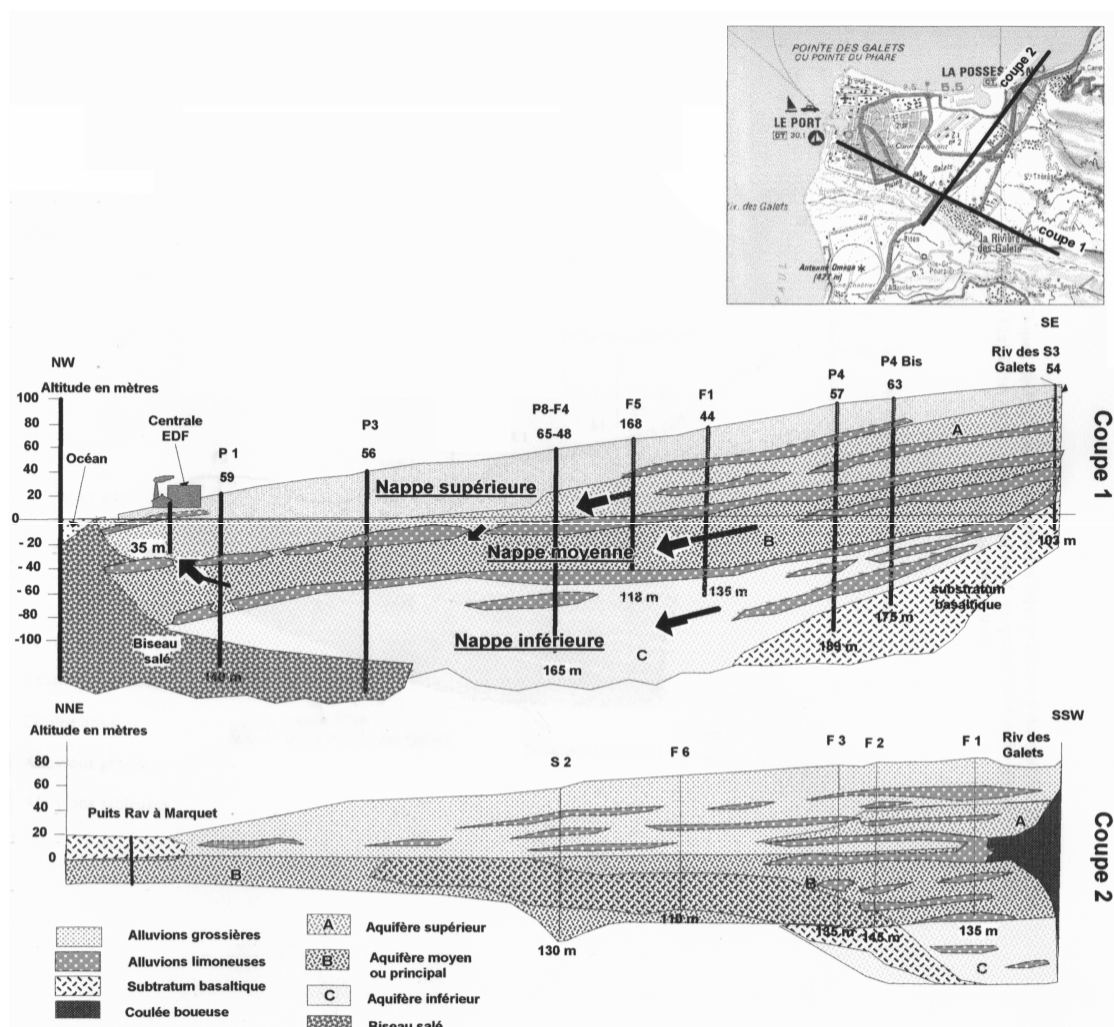


Illustration 23 : Coupes hydrogéologiques transversale et longitudinale du secteur de la Plaine des Galets

Plusieurs forages en exploitation captent à la fois la nappe principale et dans une moindre mesure la nappe inférieure d'eau saumâtre : forage F1 Mounien (indice BSS 12262X0087), forage F2 (indice BSS 12262X0135), forage F3 (indice BSS 12262X0136), forage F4 (indice BSS 12262X0048). La qualité des eaux d'exhaure était initialement acceptable grâce à la dilution des eaux saumâtres par les eaux de l'aquifère principal. Mais l'accroissement du débit de pompage sur la plaine des Galets entraîne un rabattement de la nappe moyenne qui rend possible la contamination par drainance (au travers d'horizon moins perméable et directement au sein des forages) de la nappe moyenne par les eaux saumâtres: forage F5 (indice BSS 12262X0168) influencé par les forages F1 Mounien (indice BSS 12262X0087) et F4 (indice BSS 12262X0048).

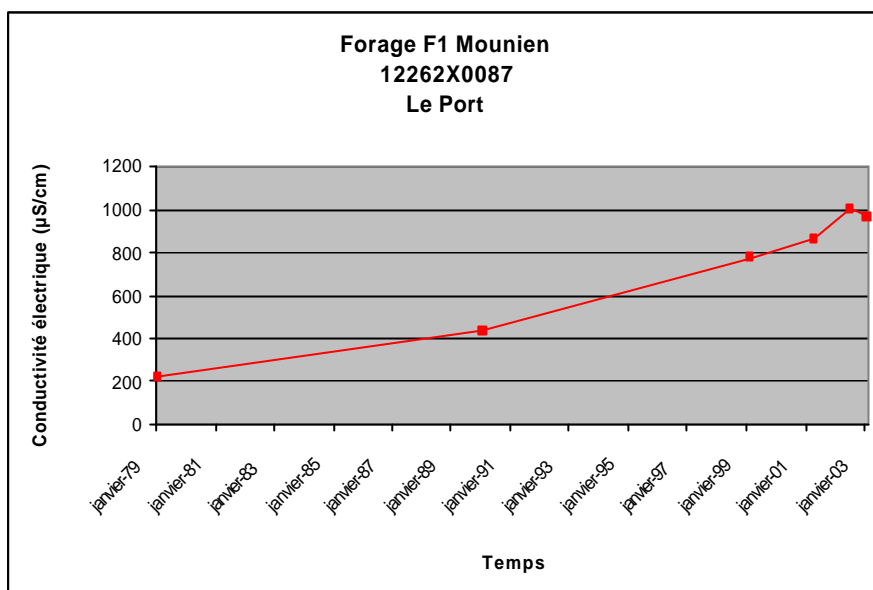


Illustration 24 : Évolution temporelle de la conductivité électrique dans les eaux d'exhaure du forage F1 Mounien qui capte la nappe moyenne et la nappe profonde saumâtre (indice BSS 12262X0087)



Illustration 25 : Localisation des ouvrages soumis aux intrusions salines sur la commune du Port

Conclusion : les phénomènes d'intrusions salines de la commune du Port sont particuliers et ne résultent pas directement de la pénétration du biseau salé dans l'aquifère exploité (nappe moyenne). Les problèmes de salinité des eaux d'exhaure sont dus à la présence d'eau naturellement saumâtre dans la nappe inférieure. Plusieurs forages captent ces eaux directement, en même temps que la nappe moyenne. La nappe moyenne est peu à peu contaminée par une remontée par drainage des eaux saumâtres de la nappe inférieure due à un rabattement de la nappe moyenne.

Saint-Paul

Le biseau salé a été recoupé par deux ouvrages. L'influence d'intrusions salines est fortement soupçonnée sur trois ouvrages et possible sur trois ouvrages (Tableau 4).

Le forage P21 - chemin tour des Roches - (indice BSS 12262X0188) a recoupé l'interface entre l'eau douce et l'eau salée à - 57 m NGR. La nappe d'eau douce épaisse d'une cinquantaine de mètre repose sur le biseau salé. La minéralisation de l'eau des sources du Moulin (2 m NGR) (indice BSS 12262X0150 et 12262X0008) qui sont situées dans le même secteur est très élevée (jusqu'à plus de 2600 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

Le biseau salé a été recoupé par le piézomètre P6 l'Ermitage (indice BSS 12265X0027) à la profondeur de - 25m NGR.

Conclusion : les nappes de la façade Ouest de l'île étant peu alimentées et relativement peu épaisses (voir chapitre 2.2.1 sur la relation entre la piézométrie et profondeur de l'interface entre eau douce et l'eau salée), le biseau salé pénètre profondément dans les terres. Les remontées très localisées d'eau fortement minéralisée des sources du Moulin ne sont à notre connaissance pas expliquées à ce jour.

Trois-Bassins

Le biseau salé a été recoupé par deux piézomètres. L'influence d'intrusions salines est possible sur trois ouvrages (Tableau 4).

Le biseau salé a été recoupé par le piézomètre Ravine Fond Jardin (indice BSS 12266x0081) à - 20 m NGR, et par le piézomètre P5 Grande Ravine (indice BSS 12266x0080) à - 33 m NGR. Le substratum de la nappe côtière est le biseau salé.

Conclusion : les nappes de la façade Ouest de l'île étant peu alimentées et relativement peu épaisses (voir chapitre 2.2.1 sur la relation entre la piézométrie et profondeur de l'interface entre eau douce et l'eau salée), le biseau salé pénètre profondément dans les terres.

Saint-Louis (Plaine du Gol)

La commune de Saint-Louis est, avec la commune du Port, celle pour laquelle les intrusions salines sont les plus préoccupantes. Le biseau salé n'y a pas été recoupé, mais l'influence d'intrusions salines est fortement soupçonnée sur un ouvrage et possible sur quatre ouvrages (Tableau 4).

Les puits A, B et C du Gol sont les plus touchés par les phénomènes d'intrusions salines (indices BSS 12287X0061, 12287X0062, 12287X0064) (Illustration 26).

Les contraintes d'exploitation (besoin en eau variable, variation de la ressource en eau superficielle disponible) entraînent des variations brutales des débits de pompage de ces trois ouvrages. Les débits d'exploitations peuvent varier de 306 à 918 m³.h⁻¹ pour le puits A et de 306 à 612 m³.h⁻¹ pour les puits B et C. La conductivité électrique des eaux est considérée comme « normale » quand sa valeur oscille autour de 400 µS.cm⁻¹, une alerte est déclenchée quand la conductivité électrique de l'eau atteint 800 µS.cm⁻¹ et le pompage est arrêté quand la conductivité électrique de l'eau atteint 1000 µS.cm⁻¹. Le pompage reprend quand la conductivité électrique de l'eau est redescendue à une valeur voisine de 400 µS.cm⁻¹. En cas d'augmentation de la conductivité électrique des eaux, le débit instantané des pompages diminuerait au profit d'un allongement de la durée journalière d'exploitation. Les variations de conductivités électriques des eaux seraient plus nettes depuis la mise en service du puits de l'usine du Gol (indice BSS 12287X0035) (communication orale de la SAPHIR).

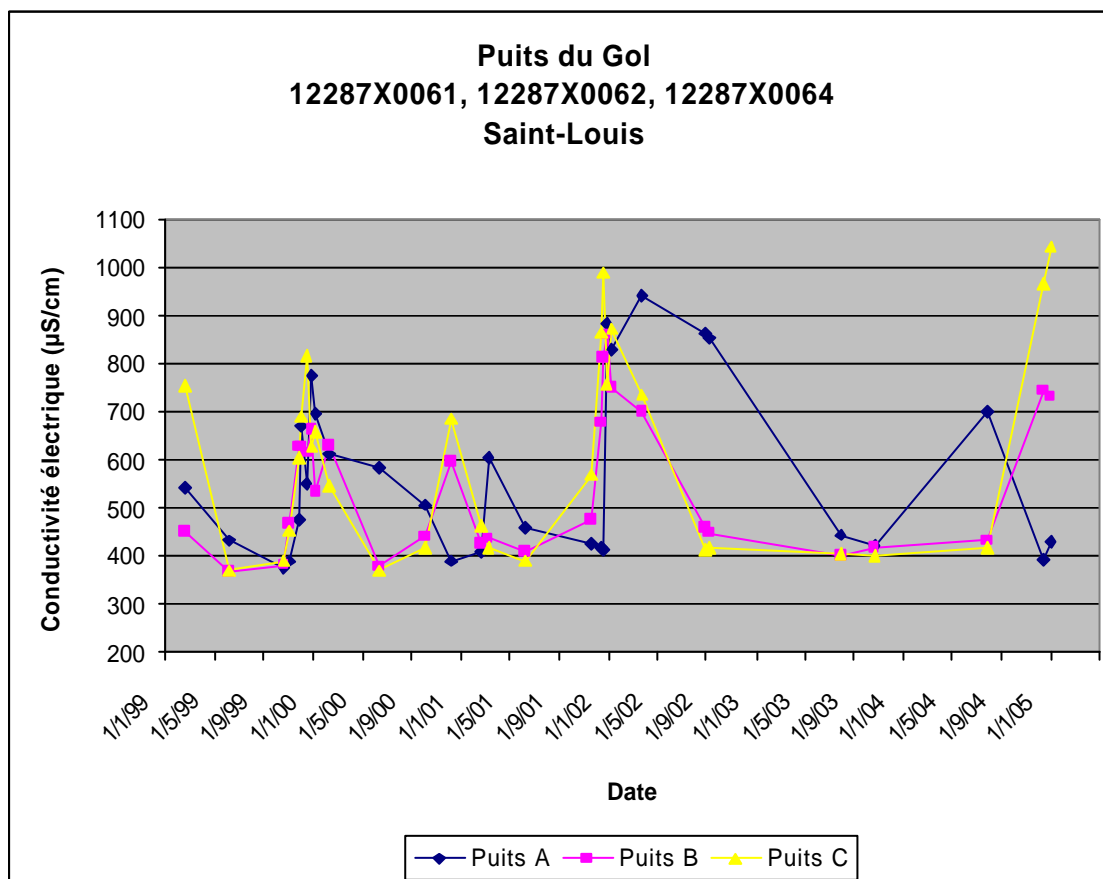


Illustration 26 : Évolution de la conductivité électrique dans les puits A, B, C du Go (données Saphir)

Conclusion : Les informations fournies par la SAPHIR mettent en évidence que les limites d'exploitation journalière de la nappe sont atteintes quand l'ensemble des ouvrages de la zone fonctionnent simultanément.

Les variations de débit de pompage accroissent l'épaisseur de la zone de mélange entre les eaux douces et les eaux salées par « effet piston ». La linéarisation journalière du débit d'exploitation qui est pratiquée par la SAPHIR en cas d'augmentation de la conductivité électrique est un bon moyen pour limiter les intrusions salines, mais les débits exploités provoquent des intrusions salines dans l'aquifère.

La conductivité électrique de l'eau dépasse le seuil des $1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pendant l'exploitation et ne repasse sous celui des $500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ qu'après plusieurs mois d'exploitation moins intense. Le mode de gestion de ces pompages dégrade la ressource en eau souterraine une partie de l'année.

La dégradation de la nappe sera de plus en plus irréversible et finira par atteindre un stade où la restauration de la qualité de la nappe ne sera envisageable qu'à long terme. Une connaissance détaillée du secteur est nécessaire pour formuler des recommandations d'exploitation de "type durable" plus précises que celles énoncées dans ce rapport.

Saint-Pierre (Pierrefonds)

Un piézomètre a recoupé le biseau salé sur la zone de Pierrefonds sur la commune de Saint-Pierre. L'interface entre l'eau douce et l'eau salée a été recoupée à - 22 m NGR au piézomètre Syndicat (indice BSS 12288X0078). La zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée est située entre 38 et 48 m de profondeur. La nappe d'eau douce « flottant » sur le biseau salé mesure 16 m d'épaisseur (Illustration 27).

Conclusion : la nappe stratégique de Pierrefonds n'est pas exploitée mais des projets d'implantation de forage sont en cours. La diagraphie de conductivité électrique réalisée sur le piézomètre Syndicat (indice BSS 12288X0078) montre que la nappe d'eau douce surnageant au dessus du biseau salé peut être de dimension modeste (16 m). Le débit d'exploitation initial devra être justifié et son impact prévisionnel fourni avant d'accorder une autorisation. Par la suite, l'exploitation de cet aquifère devra être soumise à une surveillance adaptée au contexte et sa production ajustée aux contraintes de la protection de l'aquifère.

**Piézomètre Syndicat
12288X0078
Saint-Pierre**

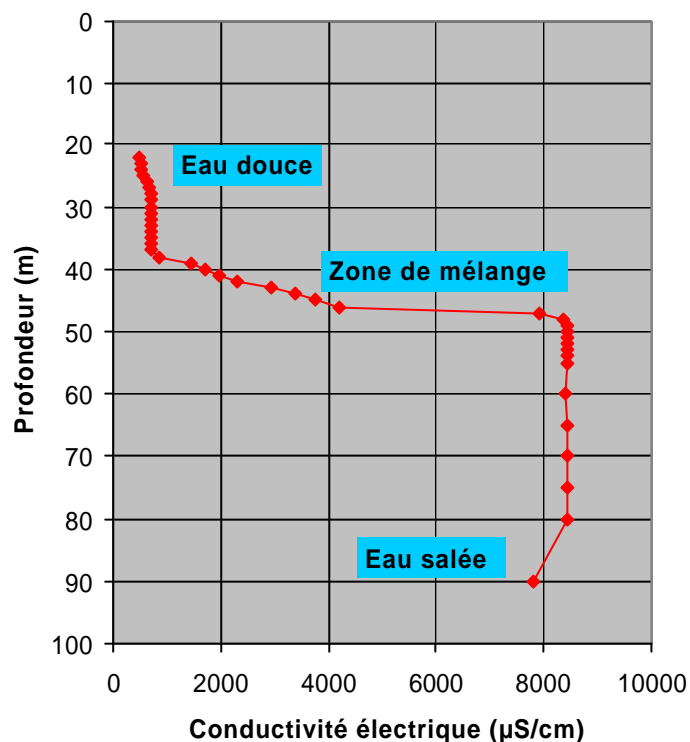


Illustration 27 : Mise en évidence du biseau salé par diagraphie de conductivité électrique dans le piézomètre Syndicat à Saint-Pierre (12288X0078)

Secteur de Petite-Île

Le biseau salé a été recoupé par trois ouvrages autour de la commune de Petite-Île et une intrusion saline est possible sur un ouvrage de la commune (tableau 3).

Le biseau salé est recoupé au piézomètre La Cafrine – commune de Saint-Pierre - (indice BSS 12295X0040) à -38 m NGR, au piézomètre Ravine du Pont – commune de Petite-Île - (indice BSS 12295X0045) à -25 m NGR et au piézomètre Manapany – commune de Saint-Joseph – (indice BSS 12296X0066) à -22 m NGR.

Conclusion : conformément aux études hydrogéologiques réalisées sur le secteur de Petite-Île qui mettent en évidence le faible potentiel en eau souterraine, la recharge des aquifères n'est pas suffisante pour faire face à la vulnérabilité des aquifères côtiers aux intrusions salines (côte rocheuse soumise à la houle).

Saint-Philippe

La commune de Saint-Philippe a connu des problèmes d'intrusions salines sur le puits du Baril (indice BSS 12297X0013) situé à proximité du rivage. L'implantation d'un nouveau forage d'exploitation a permis de réduire les débits d'exhaure du puits du Baril et de repousser le biseau salé.

4. Conclusions et recommandations

Les phénomènes d'intrusions salines sont fréquents dans les aquifères côtiers. Ils sont régis par les lois de l'hydrodynamique et de la diffusion moléculaire bien connues, mais peuvent néanmoins conduire à des configurations complexes dues à l'hétérogénéité des conditions géologiques et hydrogéologiques. Fréquemment, les venues d'eau salée limitent les possibilités d'exploitation des aquifères côtiers.

L'identification et la cartographie du biseau salé sont des éléments importants pour l'évaluation des ressources en eaux souterraines exploitables. Pour cette connaissance du biseau salé, plusieurs méthodes sont disponibles : suivi piézométrique, méthodes géophysiques de surface, diagraphies de forage, analyses chimiques et isotopiques et modélisations hydrodynamiques. Ces méthodes sont complémentaires, mais la pertinence de leur mise en œuvre doit être appréhendée au cas par cas.

Ces mêmes approches peuvent être utilisées comme dispositif d'alerte afin de suivre la progression du biseau salé liée à une exploitation excessive ou inadéquate des aquifères côtiers.

Des techniques existent pour limiter les intrusions salines. Elles déclinent sous différentes formes le principe de barrage souterrain (barrage hydraulique, mécanique ou biologique).

L'inventaire des ouvrages soumis aux intrusions salines a permis d'identifier huit ouvrages recoupant l'interface entre l'eau douce et l'eau salée, treize ouvrages où une intrusion saline est fortement soupçonnée et vingt ouvrages où une intrusion saline est possible.

Toutes les communes de la côte Ouest de La Réunion sont soumises à l'aléa intrusion saline. Quatre communes sont plus touchées que les autres : les communes du Port, de Saint-Paul, de Trois-Bassins et de Saint-Louis. L'augmentation de la minéralisation des eaux est plus générale et concerne également les communes de la micro-région Nord. Les intrusions salines peuvent être dues à des surexploitations chroniques de la nappe (Saint-Louis, Sainte-Marie), à la faible recharge des aquifères (Trois-Bassins, Petite-Île) ou au captage d'aquifère naturellement saumâtre (Le Port).

Bien qu'ayant un impact indéniable sur les intrusions salines, la morphologie du littoral ne semble pas être un des paramètres les plus influents. Les deux éléments déterminants sont la répartition des précipitations (et donc la recharge des aquifères) et les modalités d'exploitation des aquifères :

- 88 % des ouvrages susceptibles d'être influencés par le biseau salé (biseau salé recoupé, intrusion saline fortement soupçonnée et intrusion saline possible) sont localisés sur une zone où la hauteur de précipitation est inférieure à un mètre par an, et un seul ouvrage (2% du total) est soupçonné d'être perturbé par des

5. Bibliographie

BAUER G. (1996) – Reevaluation of the groundwater resources and sustainable yield of the Ewa caprock aquifer : final report, State of Hawaii, Department of Land and Natural Resources. Commission on Water Resource management, 57 pp

BILLARD Guy (1975) - Carte géologique de la France : La Réunion. Quatre feuilles + notice de 40 p., BRGM

Comité de Bassin de La Réunion (2001) - Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux de la Réunion (SDAGE)..2 vol., 281 et 81p + annexes et 17 cartes,

COOPER H.H. (1959) - A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer. *Journal of Geophysical Research* 64, 461–467.

COUDRAY J. (2003) – Gestion intégrée des eaux à La Réunion : vision d'ensemble et problèmes clefs. *Géologues*. N°137. 69-77 pp

DAESSLE M. et J.M. GANDOLFI (1987) - Reconnaissance du biseau salé par géophysique électrique optimisation de l'implantation du forage de Pierrefonds-littoral (commune de Saint Pierre). Rapport BRGM 87 REU 28

DAESSLE M., MAUROUX B., MATHIEU F., MIEHE JM., VACHETTE Ch. (1992) - Acquisition de données hydrogéologiques complémentaires sur la plaine des Galets : Approche de l'extension des aquifères dans les plateaux basaltiques et de la position de biseau salé par prospection géophysique audio magnétotellurique (AMT). Rapport BRGM R 34580

DAESSLE M. et JOIN J.-L. (1988) - Cliché de salinité des nappes souterraines de la côte Ouest de l'île de La Réunion. Rapport BRGM 88 REU 05

DAUM J.R., avec la collaboration de BAKALOWICZ M., CHERY L., LONGIN G., (1996) – Méthodes et moyens de contrôles des biseaux salés dans les aquifères littoraux. Rapport BRGM/RP-38847-FR, 77p., 27 fig., 5 tabl.

DE LA TORRE Y. (2004) - Synthèse morphodynamique des littoraux de la Réunion, état des lieux et tendances d'évolution à l'échelle de l'île. BRGM/RP-53307-FR, 93 p., 59 ill., 6 ann.

DOMINGUEZ, CUSTODIO (1992) - Seawater intrusion in the NE of the Campo de Dalías carbonate aquifer, Almería, SE Spain. Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE) Madrid.

GLOVER R.E. (1959) - The pattern of freshwater flow in a coastal aquifer. *J. Geophys. Res.* 64:439-475.

Hydroexpert (2000) – PDRE. Bilan et synthèse hydrogéologique de quinze années de recherche - Rapport RP0H018

JOIN J.L., COUDRAY J., POMME J.B. et DAESSLE M. (1987) – Comportement hydrodynamique d'une nappe côtière à l'arrière d'un lagon (La Réunion – commune de Saint Paul). Rapport BRGM 87 REU 24.

JOIN J-L. (1991) - Caractérisation hydrogéologique du milieu volcanique insulaire. Le Piton des Neiges. Île de La Réunion. Thèse de doctorat. Université de la Réunion Département des Sciences de la Terre. Université Montpellier II. 187 p. + ann.

MAC DONALD G., ABBOTT A., PETERSON F. (1983) - Volcanoes in the sea, the geology of Hawaii – University of Hawaii press, 517pp.

OKI, D.S., (1997) - Geohydrology and numerical simulation of the ground-water flow system of Molokai, Hawaii: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 97-4176, 62 p.

OLE (1999 à 2004) - Annuaire hydrologique (Cédérom)

PETIT V. et al. pour les synthèses régionales (1996) - Les aquifères littoraux en France métropolitaine. Rapport BRGM/RP-39298-FR. 120 p. 36 Illustrations, 1 annexe

R.-J.-M de Wiest (1965) - Traduction du chapitre 7 de «Geohydrology ». Invasion marine dans les aquifères côtiers. Bulletin du BRGM Section III, n°2 – 1970, p.7-22, 11 fig.

SOUZA W., OKI D., BOLKE E., BAUER G. (1997) – Numerical analysis of the hydrogeologic controls in a layered coastal aquifer system, Oahu, Hawaii, USA U.S Geological Survey of Hawaiï and Oregon. Hawaii State Commission on Water Resource Management. Hydrogeology Journal (1998) p 243 – 263

USEPA - United States Environmental Protection Agency (1999) – The class V Underground Injection Control Study. Volume 20: Salt Water Intrusion Barrier Wells. Office of Ground Water and Drinking Water (4601). EPA/816-R-99-014t

VOSS C. I and SOUZA W. R. (1987) - Variable Density Flow and Solute transport Simulation of Regionals Aquifers Containing a Narrow Freshwater-Saltwater Transition Zone. U.S Geological Survey of Virginia and Hawaii Water Resources Research, Vol.23 NO 10, pages 1851-1866,

WENTHWORTH C.K (1942) – Storage consequences of the Ghyben-Herzberg theory. Trans. Am. Geophysic. Union, 23 p. 683-693, 7 fig.

YUEN AL G. Associates, Inc (1989) Groundwater resources and sustainable yield, Aewa plain caprock aquifer, Oahu, hawaii, State of Hawaii, Departement of Land and Natural Resources, report, R-79, 50 pp et appendixes



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009

45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional de La Réunion

5 rue Sainte-Anne
BP 906

97478 – Saint-Denis - France
Tél. : 02 62 21 22 14