

Etude du bassin d'alimentation de la prise d'eau en mer de l'usine de dessalement de Petite terre - Mayotte (délimitation, vulnérabilité, pressions)

Rapport final

BRGM/RP-57112-FR

Mai 2009



DIRECTION
DE L'AGRICULTURE
ET DE LA FORET



Liberté - Égalité - Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



Ministère
de l'Écologie, de l'Énergie,
du Développement durable
et de l'Aménagement
du territoire



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Etude du bassin d'alimentation de la prise d'eau en mer de l'usine de dessalement de Petite terre - Mayotte (délimitation, vulnérabilité, pressions)

Rapport final

BRGM/RP-57112-FR
Mai 2009

Étude réalisée dans le cadre
de la convention de recherche & développement partagés
DAF/BRGM 2008

A. MALARD, B. AUNAY

Vérificateur :

Nom : J.F.VERNOUX

Date : 23/04/09

Signature :



Approbateur :

Nom : P.PUVILLAND

Date : 26/05/2009

Signature :



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

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

Mots clés : bassin d'alimentation de captage, usine de dessalement, vulnérabilité, Petite-terre, Mayotte

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

MALARD A., AUNAY B. (2009) - Etude du bassin d'alimentation de la prise d'eau en mer de l'usine de dessalement de Petite terre - Mayotte (délimitation, vulnérabilité, pressions). Rapport BRGM/RP-57112-FR, 60 p., 15 ill.

© BRGM, 2009, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Au vu de la vulnérabilité des ressources en eau de l'île de Mayotte et de l'intérêt pour les services de l'Etat de disposer d'outils de réglementation indispensables à l'application de la loi sur l'eau et aux exigences de la Directive Cadre sur l'Eau, il s'est avéré urgent à Mayotte de définir les Bassins d'Alimentation de Captage (BAC). La délimitation de ces bassins d'alimentation initiera les travaux vers la mise en place des périmètres de protection des captages et des actions de lutttes contre les pollutions diffuses qui s'inscrivent dans une logique de gestion des eaux de Mayotte.

Lors du comité permanent de la MISEEN du 03/03/08, il a été convenu que toutes les prises d'eau et forages d'alimentation en eau potable de Mayotte devaient être protégés. L'usine de dessalement de Petite terre fait partie intégrante des ouvrages à protéger. Le précédent comité du 08/11/07 avait proposé cinq captages ainsi que les forages d'eau souterraine destinés à l'alimentation implantés sur le même bassin versant comme prioritaires:

- La prise d'eau de l'Ourovéni bas, la prise d'eau de la retenue ainsi que le drain de M'réréni, les forages Combani-Mréréni (12306X0038), Ourovéni 1 (12306X0048) et Combani-Kahani (12306X0047) ;
- La prise d'eau de la Gouloué ainsi que les forages Gouloué 1 (12307X0045) et Gouloué 2 (12307X0053) ;
- Les prises d'eau de Bouyouni Bas et de Bouyouni Haut, ainsi que le forage de Bouyouni Bouyouni (12306X0024) ;
- La prise d'eau de Méresse ainsi que le forage de Bouyouni Méresse (12306X0046);
- **Et la prise d'eau en mer de l'usine de dessalement de Petite terre qui fait l'objet du présent rapport .**

L'étude du bassin d'alimentation de captage de la prise d'eau en mer est basée sur une démarche apparentée à l'étude des bassins d'alimentation des captages d'eau souterraine et de surface, c.à.d. avec prise en considération des trois volets : la délimitation de la surface contribuant à l'alimentation du captage, la détermination de la vulnérabilité du captage (naturelle et/ou modifiée) et les pressions exercées sur l'aire d'alimentation

Le croisement des critères de vulnérabilité et de pressions permet d'appréhender – dans les limites de son bassin d'alimentation - le risque réel encouru par le captage en termes de pollution ou de dégradation et de proposer des actions en vue de les limiter.

Les résultats de l'étude montre que, bien que l'alimentation soit essentiellement assurée par des eaux marines dont les modalités de circulation et donc de renouvellement à cette échelle ne permettent pas de tracer de bassin d'alimentation au

sens propre du terme, il ressort que la vulnérabilité du captage est essentiellement d'origine continentale.

La définition de BAC ne pouvant être apposée en milieu marin, en raison de l'absence de morphologie et donc de mécanismes observables dans les bassins continentaux, il sera préféré la notion de secteur contribuant à l'alimentation du captage. Ainsi, l'aire d'alimentation de la prise d'eau comprend une partie continentale (basé sur le principe du bassin d'alimentation de captage) et une partie marine correspondant à l'étendue du platier et considérée comme le secteur le plus contributif à l'alimentation du captage.

Le croisement des critères de vulnérabilités et des pressions montre que le risque majeur encouru par la prise d'eau est la présence d'un parc d'élevage de zébus en amont de la ravine principale d'accès au captage. Cette ravine joue en effet son rôle de vecteur de pollution en se déversant directement à proximité - voire sur les drains. Dans le cas d'une pollution diffuse suspectée, l'impact sur le captage n'est pas négligeable. Il serait le plus significatif lors d'épisodes pluvieux et à marée basse. D'autres pressions ont pu être identifiées, notamment au niveau des exutoires pluviaux du lycée et de la station de dessalement qui se déverse sur le platier mais aussi au niveau des rejets d'assainissement du lotissement Chanfi - à prendre en compte car en projet. Ces pressions sont toutefois mineures en comparaison au parc à zébus.

La Direction de l'Agriculture et de la Forêt et la Direction des Affaires Sanitaires et Sociales de Mayotte souhaitent mettre en œuvre rapidement ces procédures réglementaires, sur les cinq captages AEP prioritaires et à l'avenir, étendre ces réglementations à l'ensemble des captages AEP de l'île ainsi qu'aux forages prochainement mis en exploitation¹.

¹ La signature de la convention SIEAM / BRGM 2009 prévoit le lancement des études BAC sur 5 autres bassins versants exploités par des captages d'eau de surface et/ou des captages d'eau souterraine. La signature de la convention ONEMA/DAF/BRGM 2009 prévoit la réalisation des études BAC sur les 4 bassins versants restant. Fin 2009, les études BAC devront être abouties sur tous les captages en service ou en instance de mise en service de Mayotte.

Sommaire

1. Introduction au contexte	9
2. L'usine de dessalement de Petite terre	11
2.1. HISTORIQUE.....	11
2.2. FONCTIONNEMENT	11
2.2.1. La fosse de pompage	13
2.2.2. Les drains	13
2.2.3. La station de dessalement.....	14
2.3. SYNTHESE DES OBSERVATIONS.....	14
2.4. PERSPECTIVES	17
3. Méthodologie appliquée à l'étude du bassin d'alimentation de captage de la prise d'eau en mer	19
3.1. LA NOTION DE BAC APPLIQUEE EN MILIEU MARIN – CAS DES PRISES D'EAU EN MER	19
3.2. DELIMITATION DU BAC DE L'USINE DE DESSALEMENT.....	22
3.2.1. Les rabattements induits par les pompages	22
3.2.2. Direction majeure des courants dans la zone d'étude.....	23
3.2.3. Les alimentations en provenance des terres	25
3.2.4. Délimitation.....	25
3.3. VULNERABILITE	28
3.3.1. Le recouvrement de la prise d'eau par les marées	28
3.3.2. La présence de la ravine en amont hydraulique directe de la prise d'eau.....	29
3.3.3. Cartographie et conclusion sur la vulnérabilité	29
3.4. PRESSIONS	31
3.4.1. Les exutoires pluviaux se déversant sur le platier de Pamandzi.....	31
3.4.2. Le parc à zébus	32
3.4.3. Les rejets des systèmes d'assainissement des logements concentrés ...	34
3.4.4. Le rejet des saumures	34
3.4.5. Le transport maritime.....	34
3.4.6. Les pressions d'origine naturelle	35

3.4.7. Cartographie et conclusion sur les pressions	35
4. Recommandations	39
5. Conclusion.....	41
6. Bibliographie	43

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation de l'usine de dessalement de Petite-terre et tracé du drain de captage (rouge) et de la conduite d'évacuation des saumures (en bleu, qui se jette extérieur récif). Le relevé est réalisé d'après les observations de terrain (support orthophoto IGN – 2003).....	12
Illustration 2 : Fosse de pompage des eaux marines.....	13
Illustration 3 : A gauche, ravine d'accès à la plage, aménagée par SOGEA. En rouge est figurée la direction de développement des drains de captage.....	14
Illustration 4 : Observations réalisées lors de la sortie de terrain du 18 mars 2009.	15
Illustration 5 : Ouvrages pluviaux du lycée (1) et de la station de dessalement (2). L'incision au sommet de la falaise est bien visible.	16
Illustration 6 : parc à zébus en amont de la prise d'eau.	16
Illustration 7 : Erosion de la falaise. Illustrations par éboulements récents.....	17
Illustration 8 : Contextes d'implantations de prises d'eau en milieu marin et importance relative de la provenance des alimentations en eau (flèches bleues pour les apports continentaux et noir pour les apports marins). a. milieu marin fermé, peu profond à alimentation continentale forte, b. milieu marin ouvert, profond et alimentation continentale négligeable, c. milieu marin intermédiaire, semi ouvert et à alimentation continentale significative.....	21
Illustration 9 : Schéma de détail d'un drain.....	23
Illustration 10 : Délimitation de l'aire d'alimentation de la prise d'eau en mer, partie continentale + platier (support IGN 1/25 000)	27
Illustration 11 : Cartographie de la vulnérabilité de l'aire d'alimentation de la prise d'eau en mer. Les drains sont ici représentés en rouge sans connotation particulière en termes de vulnérabilité.....	30
Illustration 12 : Lors d'épisodes pluvieux, les écoulements du parc à zébus se dirigent directement vers la plage via la ravine, voir illustration suivante (photographie SOGEA).	32
Illustration 13 : Les écoulements en provenance du parc à zébus et canalisés par la ravine viennent s'épandre sur les drains en partie découverts à marée basse, ici symbolisés en rouge (photographie SOGEA).	33
Illustration 14 : Détail du panache. La matière organique en provenance du parc à zébus est bien visible (photographie SOGEA)	33
Illustration 15 : Cartographie de synthèse de vulnérabilité et pressions du nord de l'aire d'alimentation de la prise d'eau en mer. Les drains sont ici représentés en rouge sans connotation particulière.	36

Liste des annexes

Annexe 1 Principe de l'osmose inverse	45
Annexe 2 Modélisation courantologique au large de Petite terre (extrait du rapport BRGM/RP-56334-FR)	53

1. Introduction au contexte

A l'heure actuelle – c.à.d. au printemps 2009 - l'île de Mayotte est pourvue de 36 ouvrages de production d'eau (forages, captages en rivière ou en retenue et usine de dessalement) qui assurent l'alimentation de près de 186 452 habitants (chiffre INSEE 2007) bien que tous les citoyens ne soient pas encore raccordés au réseau d'eau potable. A l'exception de la retenue de Combani dont les périmètres de protection font l'objet d'un arrêté², aucun autre ouvrage d'eau à Mayotte ne fait l'objet de périmètres de protection comme codifié à l'article L 1321 du code de la Santé publique et rendu obligatoire par le renforcement de la loi sur l'eau de 1992.

Ainsi, considérant l'essor démographique, la densité de population et la pression des aménagements dont l'île est l'objet, il s'avère urgent de mettre en place les pratiques réglementaires de protection des ressources en eau, ressources qui dans l'ensemble sont limitées du fait de l'insularité de Mayotte, du climat et de l'insuffisance des réservoirs naturels potentiels et par conséquent d'autant plus vulnérables.

La particularité des ressources en eau de Mayotte a trois conséquences immédiates. D'une, la localisation des ressources, la quantité d'eau disponible et ses mécanismes de renouvellement sont souvent difficiles à approcher. Deux, l'alimentation en eau potable de l'île nécessite de diversifier autant que possible les prélèvements, qu'ils soient d'eau de surface, d'eau souterraine ou de dessalement d'eau côtière et trois, les ressources sont très sensibles aux atteintes anthropiques (agriculture, rejets domestiques, assainissement, etc.) voire naturelles (glissement, embâcles, coulées de boues, etc.), que ce soit en terme de quantité ou en qualité.

Le BRGM, pour le compte de la DAF s'est engagé à mener en 2008/2009 les études relatives à la délimitation et à la caractérisation du Bassin d'Alimentation de la prise d'eau de l'usine de dessalement de Petite terre (commune de Pamandzi) dans le cadre du projet d'étude des bassins d'alimentation des captages prioritaires de l'île sur la base des principes méthodologiques développés par le BRGM (cf. rapport BRGM/RP-55332-FR, RP-55874-FR et RP-55875-FR).

Dans le cas de la prise d'eau de l'usine de dessalement, l'application des principes méthodologiques développés par le BRGM pour les captages d'eau souterraine ne se vérifie pas en milieu marin où les processus physiques du cycle de l'eau sont différents.

Etant donné le nombre très faible d'unités de dessalement en France métropolitaine et leur capacité limitée (exemple de l'unité de Belle île en mer) ces ouvrages ne sont pas encore soumis à la définition des périmètres de protection au même titre qu'un captage continental. Ainsi, la délimitation et la caractérisation des BAC - ou de son équivalent -

² Arrêté préfectoral n°03 DAF/98 relatif à la protection de la retenue collinaire de Combani.

en milieu marin n'a donc jamais fait l'objet de méthodologie appropriée. Il est donc important de souligner le caractère novateur de ce type d'étude.

Ainsi, après la description factuelle de l'ouvrage et de son fonctionnement, des principes méthodologiques BAC développés en milieu continental ne seront retenus que les axes de travail principaux qui structurent la démarche de caractérisation du bassin d'alimentation. Ces axes, sont les suivants :

- **La délimitation** des secteurs géographiques contribuant à l'alimentation du captage. Dans le cas qui nous intéresse, cette délimitation se limitera aux secteurs les plus rapidement contributifs et/ou susceptibles de nuire à la qualité des eaux captées par l'apport de produits considérés polluants. Ces secteurs pourront englober une surface continentale et/ou une surface marine en fonction de la position du captage ;
- L'estimation du degré **de vulnérabilité** de la prise d'eau par rapport au contexte environnemental, c.à.d. le recensement des vecteurs principaux pouvant porter atteinte au captage en cas de pollution ;
- L'énumération et la caractérisation **des pressions** environnantes anthropiques ou naturelles susceptibles de nuire à la qualité des eaux captées.

Fait singulier, il est important de noter que dans le cas des prises d'eau en mer, les secteurs d'alimentation ont une origine essentiellement marine alors que le degré de vulnérabilité de même que les pressions seront définies au regard du continent, étant donné l'absence d'activité anthropique en milieu marin - si ce n'est le trafic maritime qu'il est important de mentionner et de discuter de son impact potentiel.

Le croisement de l'ensemble de ces observations et résultats permettra d'estimer le degré de protection de la ressource captée, les risques réels encourus par la ressource et surtout d'envisager le volume et les conditions du travail suivant relatif aux études d'instauration des périmètres de protection du captage.

2. L'usine de dessalement de Petite terre

2.1. HISTORIQUE

Petite terre est équipée d'une usine de dessalement mise en service le 25 décembre 1997 sur la commune de Pamandzi et plus précisément en bordure de la plage de l'aéroport, dans sa partie Nord (voir Illustration 1). Le SIEAM³ est maître d'ouvrage et la SOGEA⁴ exploite les installations.

2.2. FONCTIONNEMENT

Fonctionnant sur le principe de l'osmose inverse (cf. Annexe 1), la capacité initiale de production - assurée par un jeu de 4 osmoseurs - était fixée à 2 000 m³/jour maximum, ce qui représente aujourd'hui environ 70 % de la consommation en eau de Petite terre ; Le complément d'alimentation à hauteur de 1450 m³/jour étant assuré par Grande terre via une conduite dite « sea line » reliant les deux îles.

L'usine fonctionne 24h/24, et le stockage d'eau sur Petite terre étant limité à huit heures, l'arrêt de l'usine (coupures, entretien, etc.) ne peut excéder ce délai. D'autant qu'un délai de quatre heures est nécessaire à la remise en route de ces osmoseurs après arrêt.

Le site comporte un réservoir de stockage de 1000 m³ et un réservoir d'eau de mer de 200 m³ (en sortie des deux décanteurs à chicanes de 100 m³ chacun)

L'approvisionnement de l'usine est assuré par un système de 2 drains sensiblement divergents qui courent sur le platier sur une distance de 250 m environ en direction du large (direction 165/175 S). Ces drains sont percés tous les 20 cm environ, enfouis sous 50 cm à 1 m de sable et captent l'eau de mer sur toute leur longueur à marée haute. Cette eau est conduite par gravité dans une fosse de pompage de 7 m de profondeur creusé sur la plage (cf. Illustration 2).

Il est important de noter qu'initialement le projet prévoyait d'approvisionner en eau de mer la station de traitement au moyen de 3 forages réalisés le long de l'escarpement (cf. plans de recollement de l'usine de dessalement de l'eau de mer, SOGEA 1998). Très rapidement, la capacité que pouvait délivrer les forages s'est avérée trop faible pour alimenter l'usine et ces derniers ont été abandonnés et remplacés par le dispositif des drains.

³ Syndicat Intercommunal d'Eau et d'Assainissement de Mayotte

⁴ La distribution en eau potable sur l'île de Mayotte est confiée - pour la partie exploitation - à la SOGEA Mayotte par un contrat d'affermage

2 pompes immergées assurent ensuite l'acheminement jusqu'à l'usine - située 50 m en retrait et 20 m en amont - où l'eau est traitée.



Illustration 1 : Localisation de l'usine de dessalement de Petite-terre et tracé du drain de captage (rouge) et de la conduite d'évacuation des saumures (en bleu, qui se jette extérieur récif). Le relevé est réalisé d'après les observations de terrain (support orthophoto IGN – 2003).

Suite à quelques difficultés d'exploitation mais aussi en raison du coût de production, l'usine ne produit que 1300 m³/jour en moyenne, c.à.d. suffisamment pour compléter l'alimentation de Petite terre (à hauteur de 45 % des besoins) et le rejet de saumures est estimé à 135 m³/h. le taux de conversion de l'eau de mer en eau potable par osmose inverse avoisine 40 %.

Les saumures ou concentrats sont évacués via une seconde conduite longeant la plage par le Nord et débouchant sur le tombant. La concentration en chlorure de sodium des concentrats est mesurée et se situe autour de 55 g/L contre 35 g/L en moyenne dans les eaux de mer.

Une visite de reconnaissance le 18 mars 2009 a permis de dresser un nombre conséquent d'observations.

2.2.1. La fosse de pompage

La fosse de pompage est située sur la plage, au débouché du chemin d'accès en contrebas de la station; chemin qui n'est autre qu'une ravine aménagée par la SOGEA lors de la construction de la fosse et des drains (cf. Illustration 2). La margelle de la fosse est située au niveau de la ligne de marée haute. Des blocs de maintien, disposés autour de la fosse, ont pour effet de ralentir les phénomènes de surcreusement par les eaux charriées de la ravine, mais aussi l'affouillement par les marées qui auraient pour conséquence de mettre à nu une partie de l'ouvrage et de surtout de le fragiliser.



Illustration 2 : Fosse de pompage des eaux marines.

La fosse de pompage est dans un état moyen, non signalée et non sécurisée.

2.2.2. Les drains

Les drains sont enterrés sur toute leur longueur, sous 1 à 2 m de sable. Ce sont des canalisations PVC de 250 mm de diamètre. Deux observations sont importantes :

A marée basse, le platier sous lequel courent les drains est émergé. Néanmoins, sous l'effet combiné de l'enfouissement des drains et de la présence de bâches (étendues d'eau résiduelles), les drains ne sont jamais complètement à sec – du moins en ce qui concerne les parties basses. A marée basse, la diminution de la longueur de captage et la baisse de charge hydraulique au niveau diminue considérablement le régime de pompage. Aujourd'hui, ce facteur est le facteur limitant la production d'eau de l'usine de dessalement de Petite terre.

Ces drains sont recouverts tout le long par un géotextile qui assure une filtration relative des eaux par rétention des très grosses particules - le géotextile joue le rôle de massif filtrant et évite l'accumulation de sable dans les drains et dans la fosse de pompage qui peut nuire au fonctionnement de la pompe.

Les drains se développent en contrebas du chemin d'accès, dans l'axe de la ravine (cf. Illustration 3), à l'endroit même où les écoulements s'épandent (cf. Illustration 8) en formant un éventail, visible à marée basse (cf. Illustration 4 et Illustration 13).



Illustration 3 : A gauche, ravine d'accès à la plage, aménagée par SOGEA. En rouge est figurée la direction de développement des drains de captage..

La partie gauche étant réservée pour le chemin d'accès à la plage et le passage des canalisations, les écoulements sont concentrés le long de la paroi droite et s'épandent sur la plage au débouché de la ravine, c.à.d. dans l'axe même des drains de captage.

2.2.3. La station de dessalement

Située sur la partie sommitale de la falaise surplombant la plage de l'aéroport au niveau de la fosse, l'usine de dessalement comprend :

- l'unité de traitement
- un réservoir de stockage de 1000 m³ et un réservoir eau de mer de 200 m³ (en sortie des deux décanteurs à chicanes de 100 m³ chacun)

2.3. SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS

Les observations réalisées sur le terrain sont les suivantes (à relier à l'illustration 4)

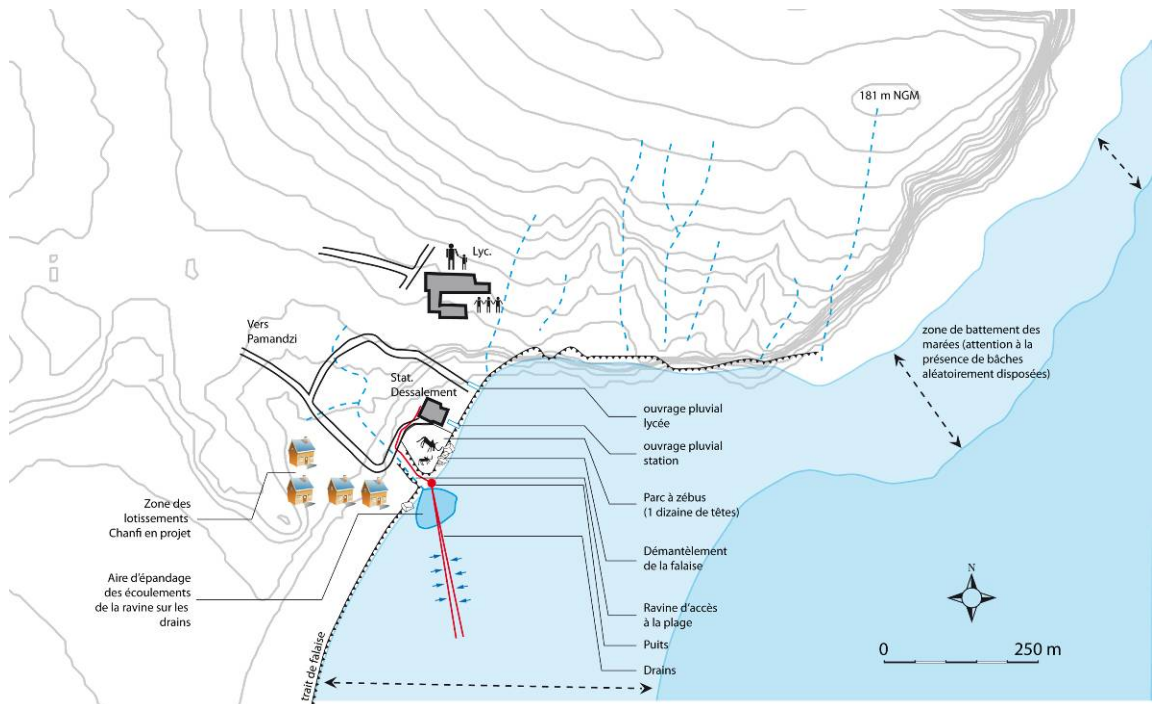


Illustration 4 : Observations réalisées lors de la sortie de terrain du 18 mars 2009.

Les drains : le géotextile recouvrant les drains est en partie dégradé, percé par endroits et n'assure plus la filtration des très grosses particules comme le sable par exemple ou les amas de matière organique.

La zone de lotissements : il s'agit d'un projet de lotissements (lotissements Chanfi) dont les travaux n'ont pas encore commencé à la date d'aujourd'hui. L'impact de ces lotissements sur la prise, en terme d'ouvrages pluviaux, d'assainissement, etc. est à prévoir (cf. Avis technique concernant l'érosion des falaises de Pamandzi, en relation avec le projet de lotissement Chanfi ; note 2006 SAR/RÉU/MAYOTTE).

Les ouvrages pluviaux : à signaler, celui du lycée qui est le plus important et celui de la station. Les écoulements sont conduits en bordure de falaise et entaillent cette dernière (cf. Illustration 5) avant de se répandre sur la plage. Ces ouvrages ne sont pas sans conséquence sur l'érosion du trait de falaise comme en témoignent les nombreux éboulements.



Illustration 5 : Ouvrages pluviaux du lycée (1) et de la station de dessalement (2). L'incision au sommet de la falaise est bien visible.

Le parc à zébus : situé entre la station de dessalement et la prise d'eau, le parc ne compte pas moins d'une dizaine de zébus. L'utilisation de la parcelle est sauvage et l'exploitant n'en est ni propriétaire, ni locataire. Aucun aménagement n'est prévu pour abriter une telle exploitation et les risques de dégradation du site entraînés par la présence d'un tel élevage sont importants.



Illustration 6 : parc à zébus en amont de la prise d'eau.

Le démantèlement de la falaise : comme signalé précédemment, l'érosion de la falaise bordant la plage est importante. Des chutes fréquentes de blocs contribuent à grignoter la falaise au détriment de la parcelle sur laquelle repose de la station. De tels éboulements peuvent présenter un risque pour la prise d'eau (cf. Illustration 7, les éboulements se sont produits cinquante mètres derrière la fosse de pompage). Cette zone a été classée en aléa fort chute de blocs et érosion (Atlas BRGM/RP-53037-FR).



Illustration 7 : Erosion de la falaise. Illustration par éboulements récents

Au vu des aménagements qui ont été réalisés lors de la construction du captage et ceux réalisés après ou en cours de réalisation, il est manifeste que de nombreux paramètres défavorables n'ont pas été pris en compte - ou alors sous estimés - notamment lors du positionnement des drains.

2.4. PERSPECTIVES

A l'heure actuelle, le devenir de l'usine de dessalement de Petite terre est incertain, notamment en raison du coût et des difficultés de production ainsi que des problèmes écologiques que l'exploitation induit (consommation de carburant fossile, rejet de saumures, etc.).

Les difficultés actuelles d'exploitation sont les suivantes :

- en fonction de la marée (et notamment pour des marées inférieures à 0,8 m CM⁵) l'immersion des drains captants est insuffisante pour assurer le débit d'entrée minimal de 260 m³/h nécessaire au fonctionnement des 4 osmoseurs ;
- le géotextile qui recouvre les drains captants est abimé par endroit et ne joue plus son rôle de filtre. la turbidité et la charge colloïdale des eaux augmentent, les membranes s'encrassent plus rapidement et les filtres à sable se colmatent. Par conséquent, la production d'eau traitée ralentit et nécessite une maintenance plus onéreuse.

Par ailleurs, les pressions anthropiques exercées sur l'usine et/ou la fosse de pompage et/ou le drain sont en progression : le développement de Petite terre conduit à la construction de logements résidentiels à proximité, ce qui représente un risque en termes de rejets domestiques, l'élevage sauvage de bovins au dessus des ouvrages présente aussi un risque sanitaire pour la qualité des ouvrages et des eaux. Ces aspects seront abordés par la suite.

Divers projets ont été proposés en alternatives à l'usine de dessalement. Parmi les plus importants, citons :

- Le projet de pompe avec crépine flottante en pleine mer qui permettrait de prélever directement les eaux hors-lagon, de meilleure qualité – rendant ainsi obsolète la prise d'eau actuelle - a été abandonné.
- Le projet « sea-line » - la conduite d'eau reliant Grande Terre à Petite terre – dont les travaux devraient commencer prochainement - a pour finalité d'assurer en totalité l'approvisionnement de Petite terre par Grande terre. Dans ce sens, l'usine de dessalement ne servirait qu'en cas d'urgence, si l'une ou l'autre des conduites venaient à rencontrer un problème. Le maintien de l'usine et le maintien d'un régime de fonctionnement minimal sont donc obligatoires par mesure de précaution.

Par ailleurs, la construction de la STEP de Petite terre dont l'emplacement n'est à ce jour pas défini (cf. rapport SAFEGE 2005) pourrait conduire au déplacement de la prise d'eau de mer afin d'éviter toute interférence entre les rejets des effluents de la STEP et les prélèvements de la prise d'eau.

Quoi qu'il en soit, le devenir de l'usine - aussi incertain soit-il – ne sera pas remis en question dans les années qui viennent. A cet égard, l'étude de délimitation du bassin d'alimentation de captage de la prise d'eau en mer sera réalisée sur la base de l'emplacement actuel de la prise d'eau et sans prendre en compte les projets de station d'assainissement de Petite terre.

⁵ Deux référentiels altimétriques existent à Mayotte : le Nivellement Général de Mayotte (NGM) et la Cote Marine (CM). La relation entre les deux est : $X_{CM} = X_{NGM} + 1,78$ m

3. Méthodologie appliquée à l'étude du bassin d'alimentation de captage de la prise d'eau en mer

3.1. LA NOTION DE BAC APPLIQUEE EN MILIEU MARIN – CAS DES PRISES D'EAU EN MER

La notion de bassin d'alimentation de captage dont la définition est suivante : lieu des points de la surface du sol qui contribuent à l'alimentation du captage (extrait du rapport BRGM/RP-55874-FR) s'applique aux captages d'eau souterraine et d'eau de surface physiquement conditionnés par des morphologies de bassin : une nappe d'eau souterraine est inscrite dans un bassin versant souterrain au même titre qu'un cours d'eau de surface est inscrit dans un bassin versant de surface, sans oublier que des interactions entre ces deux types de bassins versants sont omniprésentes et imposent souvent d'être considérées simultanément dans l'alimentation d'un captage.

A l'inverse, compte tenu de leur continuité hydraulique, les masses d'eau littorales et marines ne sont plus conditionnées physiquement par des morphologies continentales de bassins : les circulations des masses d'eau sont le fruit des déplacements des masses océaniques, contrôlées par la circulation thermohaline, les dispositions continentales, la rotation terrestre, l'effet des marées et les circulations majeures atmosphériques.

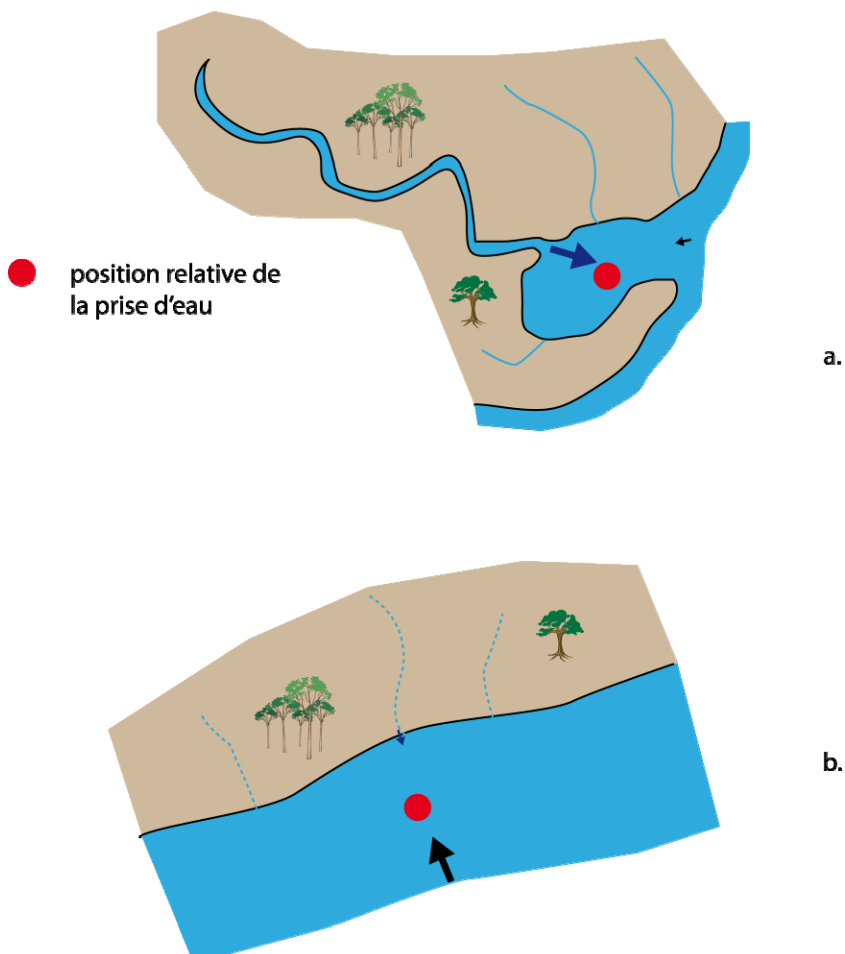
La notion de bassin d'alimentation de captage n'est pas la plus appropriée dans ce cas de figure. A cette notion sera préférée la notion de « zone contributive à l'alimentation du captage ».

L'ouvrage d'eau de Pamandzi peut être découpé en deux éléments, la prise d'eau en mer (les drains) et la fosse de pompage (ou réservoir) de la plage comme représenté en Illustration 4. Ce dernier pourra être considéré dans la suite de l'étude comme un élément significatif de l'ouvrage tout entier.

Comme énoncé en introduction, l'alimentation d'une prise d'eau en mer est composite et peut être assurée – selon le contexte par :

- des apports provenant en part importante du continent dans le cas de prises d'eau peu profondes et peu éloignées du rivage (cf. Illustration 8, a.). Ce constat est d'autant plus vrai que la prise d'eau est située près d'une embouchure fluviale dans un espace marin restreint (type baie, crique, etc..). Le renouvellement des eaux est davantage assuré par apport du continent que par apport marin. Dans ce cas, la notion de bassin d'alimentation de captage comme entendue plus haut dans le cas des bassins souterrains et de surface peut s'appliquer tout en étant légèrement adaptée.

- des apports essentiellement marins dans le cas de prises d'eau plus profondes, situées à une relative distance des côtes, en milieu marin ouvert et où l'apport d'eau douce par les continents peut être négligé (cf. Illustration 8, **b.**). Dans ce cas, la notion de bassin d'alimentation de captage ne peut être appliquée, l'alimentation du captage est seulement contrôlée par le champ d'action de la pompe et les aléas courantologiques. Dans ce cas, l'aire d'alimentation correspond aux panaches de courants se dirigeant en direction du captage.
- des apports mixtes dans les cas intermédiaires, où l'apport d'eau par les continents représente une part significative des apports d'eau marine (cf. Illustration 8, **c.**). Dans ce cas, la notion de bassin d'alimentation de captage est difficilement applicable sans adaptation plus conséquente prenant en compte l'importance des deux domaines d'alimentation (mari marin et continental).



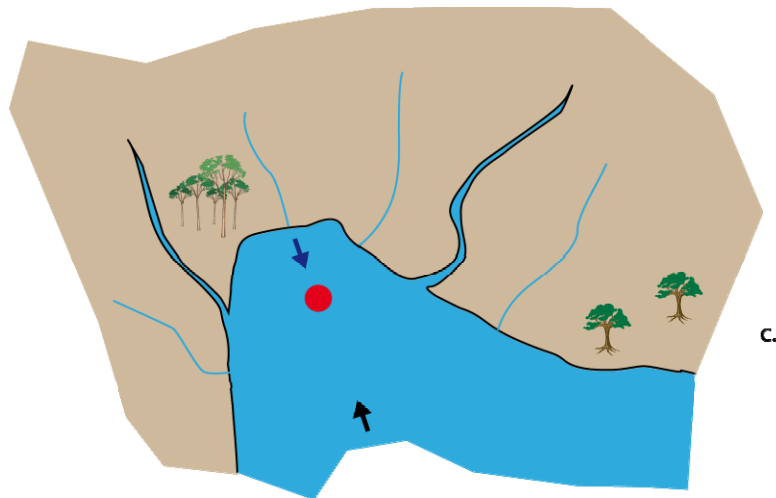


Illustration 8 : Contextes d'implantations de prises d'eau en milieu marin et importance relative de la provenance des alimentations en eau (flèches bleues pour les apports continentaux et noir pour les apports marins). a. milieu marin fermé, peu profond à alimentation continentale forte, b. milieu marin ouvert, profond et alimentation continentale négligeable, c. milieu marin intermédiaire, semi ouvert et à alimentation continentale significative

Par conséquent, à la notion de bassin d'alimentation de captage sera préférée la notion de secteurs contribuant à l'alimentation du captage.

En ce qui concerne la prise d'eau en mer de Petite terre, les observations montrent :

- que les prélèvements sont opérés dès le départ de la plage à marée haute ;
- que les prélèvements sont opérés à faible profondeur. La profondeur du platier jusqu'à la limite du tombant n'excédant pas 2 m par marée basse ;
- que le milieu marin n'est pas réellement ouvert sur l'extérieur. La plage dite de Ha Shiwawa sur laquelle sont placés la fosse et la conduite, forme une anse qui participe à la limitation des échanges avec l'eau du large ;
- que la longueur de la prise d'eau est courte (moins de 200 m de linéaire immergé en marée basse) ;
- que - compte tenu de la disposition des drains, qui débutent au débouché de la ravine d'accès - l'alimentation des drains par les eaux de surface peut être considérée comme nulle en contexte sec mais importante en contexte d'épisodes pluvieux (cf. Illustration 12 Illustration 13).

Par conséquent, si l'on se réfère à l'illustration 8, le contexte de la prise d'eau de Petite terre peut être assimilé aux cas **c.**, c.à.d. comme composite, à alimentation continentale significative et qui ne répond pas à la définition des bassins d'alimentation de captage comme entendu en début de paragraphe.

L'étude des alimentations du captage s'appuiera donc sur : les modalités courantologiques aux abords du captage qui permettront d'identifier les circulations marines principales, les zones en amont contributives à l'alimentation du captage et le

bassin versant qui participe – en partie - à l'alimentation du captage en saison pluvieuse.

3.2. DELIMITATION DU BAC DE L'USINE DE DESSALEMENT

Comme décrit dans les paragraphes précédents, l'alimentation composite de la prise d'eau marine nécessite la prise en compte de 3 critères principaux dans le choix de la délimitation du BAC de l'usine de dessalement :

- Le débit d'exploitation de l'usine et par conséquent l'importance des aspirations ou rabattements à proximité des drains qui conditionnent la surface d'appel des eaux ;
- La direction majeure des courants alimentant les drains qui conditionne le renouvellement de la masse d'eau couvrant le captage ;
- Les alimentations épisodiques en provenance des terres qui peuvent rentrer dans une part significative de l'alimentation en fonction : des épisodes pluvieux, du stade de marée et des vents.

La prise en considération de ces 3 éléments permet de définir la taille et la géométrie du BAC. Ce dernier comportera donc une aire d'alimentation tracé en milieu continental et une aire d'alimentation en milieu marin qui est la superposition de la zone d'aspiration des drains et le tracé du panache de courant dominant. Ces deux aires seront forcément contigües au niveau de la prise d'eau.

3.2.1. Les rabattements induits par les pompages

En fonction des régimes de prélèvement, et donc de l'importance des pompages, l'extension du cône de rabattement des eaux donne la dimension de la surface directement sollicitée par les pompages.

A raison d'un débit d'exploitation nécessaire au fonctionnement minimal de l'usine de l'ordre de 260 m³/h, réparti sur les 2 drains, de 250 m de longueur chacun, il est déduit que l'apport de chaque mètre de drain est de 520 L/h.

Considérant que chaque mètre de drain comporte 5 fentes d'entrée, le débit d'entrée par fentes est de 104 L/h

Considérant que chacune de fentes se développe sur ½ périmètre du drain et 3 cm de large en moyenne (schéma en Illustration 9), la surface d'entrée par fente est de 0,0075 m².

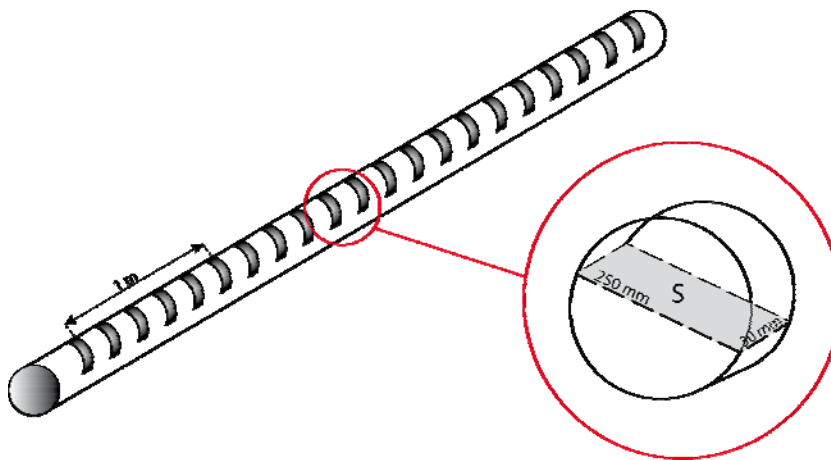


Illustration 9 : Schéma de détail d'un drain

Par conséquent, considérant 104 L/h de débit et 0,0075 m² de surface, la vitesse d'aspiration au droit de chaque fente est de 13 à 14 m/h.

Par ailleurs, compte tenu du fait que les alimentations sont radiales, c.à.d. qu'elles s'opèrent autour de la demi-périphérie du drain, cette vitesse est difficilement interprétable en terme de zone d'appel. En se basant sur un renouvellement cyclique des eaux toutes les 6 heures à la faveur des marées, il est possible de déterminer une aire d'appel autour des drains d'un rayon inférieur à $14 * 6$ soit 84 m environ.

Cette aire est considérée comme minimale en raison de l'agitation perpétuelle de la masse d'eau – surtout si faible profondeur - sous l'effet des marées, du vent ou de la saison.

De fait il sera considéré autour des drains, une aire d'alimentation directe en forme de haricot d'un rayon de 50 m par rapport à leur axe de développement inscrite dans une aire d'alimentation générale plus vaste (cf. § 3.2.2 et 3.2.3.).

3.2.2. Direction majeure des courants dans la zone d'étude

Deux études relatives à la modélisation courantologique à proximité de Petite terre serviront à esquisser les directions préférentielles des courants aux abords des drains de captage (à mettre en relation avec l'Annexe 2).

Avant tout, il est important de souligner que le domaine marin cote Est de Petite terre est composé d'une étendue de platier importante, de plus d'1 kilomètre et de moins de 5 m de fond, d'un tombant récifal de plus de 200 m d'à pic et d'un domaine externe, c.à.d. hors lagon. Soit deux environnements marins aux modalités hydrodynamiques complexes distinctes.

Les études de modélisation courantologique (rapport BRGM/RP-56334-FR) ont montré qu'à l'échelle du lagon, les circulations majeures étaient dominées par les courants de marée, à savoir :

- Au large, les courants se dirigent globalement vers le sud ouest au flot et vers le sud est au jusant ;
- Dans les passes et sur les récifs, ils sont entrants au flot et sortants au jusant.

En extérieur récif, les mêmes modélisations ont montré en conditions limites que sur la marge Est de Petite terre, les courants se déplaçaient majoritairement en direction du nord au jusant et en direction du Sud au flot, que ce soient des marées de vives ou de mortes eaux. Bien que pour ces dernières, le paramètre vent conditionne - avec au moins autant d'influence - les courants de surface et de subsurface. Les courants restent dans cette zone limités à 0,3 m/s.

Dans le détail, cette circulation implique - en partie - qu'au jusant, les courants longeant la côte Est de Petite terre sont les courants sortants du lagon. Au flot, les courants longeant la même côte sont des eaux du large.

Les études réalisées par le bureau d'études SAFEGE (cf. rapport d'études préalables à la réalisation d'une STEP – octobre 2005) dans le cadre des projets de mise en place de la STEP de Petite terre et du déplacement de la prise d'eau en mer ont montré via l'utilisation de modèles numériques que :

- En saison humide, les courants longeant la cote est de Petite terre sont dirigés vers le sud au jusant, légèrement infléchis vers l'est en raison de la vidange de la passe en S et vers le nord au flot, en surface et en subsurface (jusqu'à 7 m de profondeur).
- En saison sèche, les mêmes courants sont nettement dominés par la marée, ils se dirigent cette fois vers le sud au flot et vers le nord au jusant (jusqu'à 7 m de profondeur).

Par ailleurs, les études BRGM et SAFEGE s'accordent pour témoigner que la direction et l'intensité des vents conditionnent significativement ces mêmes courants en plus des mécanismes de marées.

Par conséquent, compte tenu :

- i. de l'hétérogénéité du milieu marin au large de la prise d'eau : domaine du platier, tombant récifal et domaine externe ;
- ii. de la difficulté de modéliser - à l'échelle des prélèvements du captage – les courants à proximité de la prise d'eau en raison de l'importance des masses d'eau ;
- iii. de la variabilité de ces mêmes courants selon les marées, les saisons et les vents dominants et la profondeur (inversion des courants dominants toutes les 6 h en moyenne, etc.) ;
- iv. de l'importance des mélanges et des mécanismes de dispersion / diffusion des masses d'eau marines ;
- v. de l'extension finale de l'aire contribuant à l'alimentation du captage manifestement proportionnelle à l'extension relative des alimentations.

il sera proposé une délimitation du secteur de la masse d'eau marine considéré comme le plus contributif à l'alimentation du captage. Au vu des arguments ci-dessus,

il s'agirait d'une délimitation qui recouvre la surface du platier à l'hydrodynamisme différent des eaux du domaine externe aux échanges sensiblement limités par la présence du récif.

3.2.3. Les alimentations en provenance des terres

Comme observé lors de la visite de terrain du 18 mars 2009, les versants bordant la plage et le platier, et par extension la prise d'eau ne s'organisent pas réellement de manière à former un véritable réceptacle drainant qui pourrait être qualifié de bassin versant. Les contreforts sud du relief de la Vigie ainsi que les falaises surplombant la plage de l'aéroport montrent de nombreuses ravines temporaires qui ne confluent pas et se jettent directement sur l'estran (voir Illustration 4). Ces ravines ne fonctionnent brièvement que lors d'épisodes pluvieux.

Compte tenu du positionnement des drains, dont le captage débute sur la plage au débouché du chemin d'accès et à faible profondeur, ainsi que de la courantologie du secteur, il est évident que les ruissellements en provenance des versants surplombant toute l'anse de la plage de l'aéroport participent à l'alimentation des drains après dilution dans l'eau de mer, bien qu'il soit délicat d'en estimer la proportion et que cette dernière est évidemment fonction de la quantité d'eau ruisselée et de la position des marées.

3.2.4. Délimitation

Compte tenu des aléas courantologiques saisonniers et des phénomènes de marées, il est évident que l'aire d'alimentation de la prise d'eau en milieu marin s'étend à tout le canal du Mozambique, voire à l'ensemble de l'océan Indien, car à plus ou moins brève échéance, toute goutte d'eau est susceptible d'atteindre le captage. Compte tenu du caractère exagéré de cette superficie et des volumes d'eau en jeu comparativement au volume prélevé à la station, cette délimitation ne sera pas représentée ici. Il est néanmoins important de garder à l'esprit que l'aire d'alimentation de la prise d'eau peut être considérée comme infinie par rapport à l'objet étudié et qu'en termes de vulnérabilité par exemple, la prise en compte d'une telle surface n'apporte pas de réelle plus-value à la protection du captage. En milieu marin, seul le platier qui correspond à la masse d'eau directement en contact avec la prise d'eau sera cartographiée en tant qu'aire d'alimentation du captage.

En revanche, en milieu continental, il est possible de déterminer une aire d'alimentation qui comprend l'ensemble des superficies se déversant sur le platier. Cette délimitation est réalisée sur la base des lignes de crêtes topographiques, et la surface ainsi cartographiée englobe :

- la partie sud-est du terrain de l'aéroport soit une partie de la piste et des bâtiments jusqu'à la hauteur maximale de 5 m NGM, hauteur qui marque la délimitation avec le versant s'écoulant en direction de la cote ouest ;
- Un tronçon de la route d'accès au terrain de l'aéroport et la zone des futurs lotissements Chanfi ;

- La station de dessalement et le lycée de Pamandzi ;
- Les versants de la montagne de la Vigie, qui s'étale sous la ligne de crête entre le point de vue et la petite plage au nord.

Soit une surface totale de 2,77 km² environ pour un périmètre de 7,66 km présentée en Illustration 10.

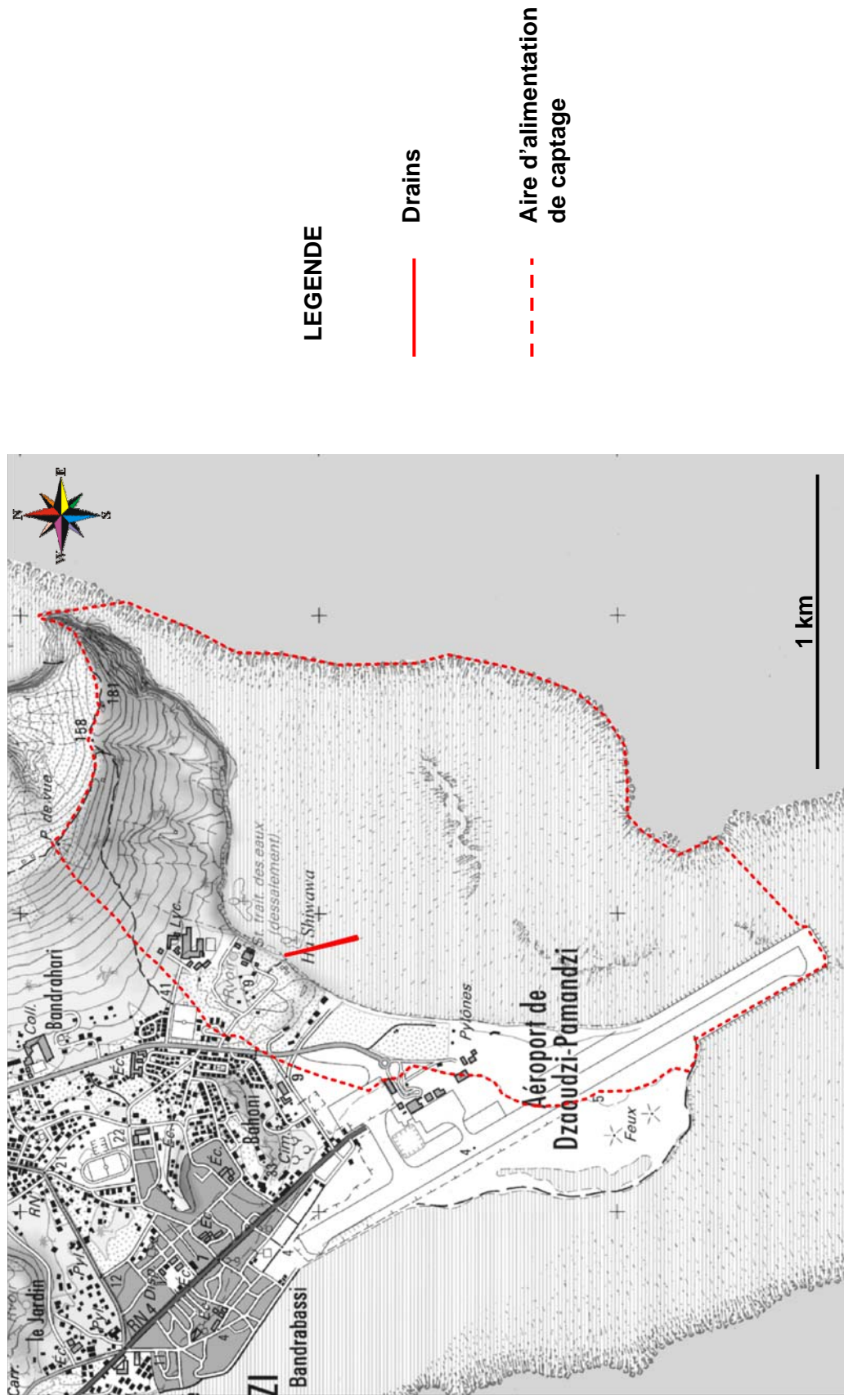


Illustration 10 : Délimitation de l'aire d'alimentation de la prise d'eau en mer, partie continentale + platier (support IGN 1/25 000)

3.3. VULNERABILITE

La vulnérabilité est ici interprétée comme les éléments et/ou le degré de sensibilité de la prise d'eau aux éventuelles pollutions déversées en un point de l'aire contribuant à l'alimentation de la prise d'eau.

Avant tout, il est important de souligner que le choix de l'emplacement du drain hors lagon – c.à.d. à l'est de Petite terre et non à l'ouest, en milieu ouvert implique :

- une exposition moindre aux risques anthropiques, les activités majeures étant concentrés dans le lagon ou en bordure du lagon (nautisme, activités portuaires, urbanisation, etc.) ;
- des masses d'eau en quantité plus importante, par conséquent des mécanismes de dispersion / diffusion moléculaire plus entretenus du fait de l'hétérogénéité thermique et ou chimique de ces masses d'eau ;
- un meilleur brassage et un renouvellement plus fréquent des eaux. Les modèles courantologiques du lagon ont mis en évidence des circulations des masses d'eau moins rapides à l'intérieur du lagon qu'à l'extérieur.

L'emplacement des drains à cet endroit est donc une alternative judicieuse à une moindre vulnérabilité.

Compte tenu de la séparation milieu continental et milieu marin de l'aire d'alimentation, la vulnérabilité sera décrite au regard de la partie de l'aire d'alimentation inscrite sur le continent, et ce à plusieurs titres :

- les pressions relevées sont essentiellement d'origine continentale et très peu d'origine marine en raison de la faible activité qui y règne à proximité (limitée à la circulation des bateaux de plaisance, des embarcation des pêcheurs locaux, cf. § 3.4.5) ;
- les critères de vulnérabilité en milieu marin repose sur le couplage des mécanimes complexes courantologiques, de marées, des vents, etc. l'instabilité spatio-temporelle du milieu marin ne permet donc pas d'évaluer un quelconque degré d'exposition significatif à l'échelle de la prise d'eau.

La vulnérabilité de la prise d'eau se traduit à travers les éléments suivants

3.3.1. Le recouvrement de la prise d'eau par les marées

La tranche d'eau recouvrant les drains (qui composent la prise d'eau) assure une relative protection vis-à-vis des pressions polluantes continentales.

Néanmoins, en raison de son emplacement en partie sur l'estran, les drains sont partiellement émergés à marée basse et donc directement exposés aux pressions polluantes potentielles de surface (ravinement, dégradation, etc.)

3.3.2. La présence de la ravine en amont hydraulique directe de la prise d'eau

La ravine - visible en Illustration 3 et Illustration 4 - est un vecteur significatif des écoulements du versant et par conséquent un vecteur significatif des polluants déversés en un point du versant lors d'épisodes pluvieux. Par ailleurs, le charriage de matériaux représente aussi un risque important qui peut porter atteinte à l'intégrité de la prise d'eau.

La conjugaison d'un événement pluvieux et d'un stade de marée basse accroît fortement la vulnérabilité des drains comme la montre l'Illustration 13.

3.3.3. Cartographie et conclusion sur la vulnérabilité

La carte de vulnérabilité est donc établie sur la base de la conjugaison de ces phénomènes les plus défavorables.

3 classes de vulnérabilité relative sont retenues, 1 synonyme de faible à nul, 2 pour les zones de vulnérabilité moyenne et 3 pour les zones où la vulnérabilité est considérée comme forte. La cartographie de la vulnérabilité est représentée en Illustration 11.

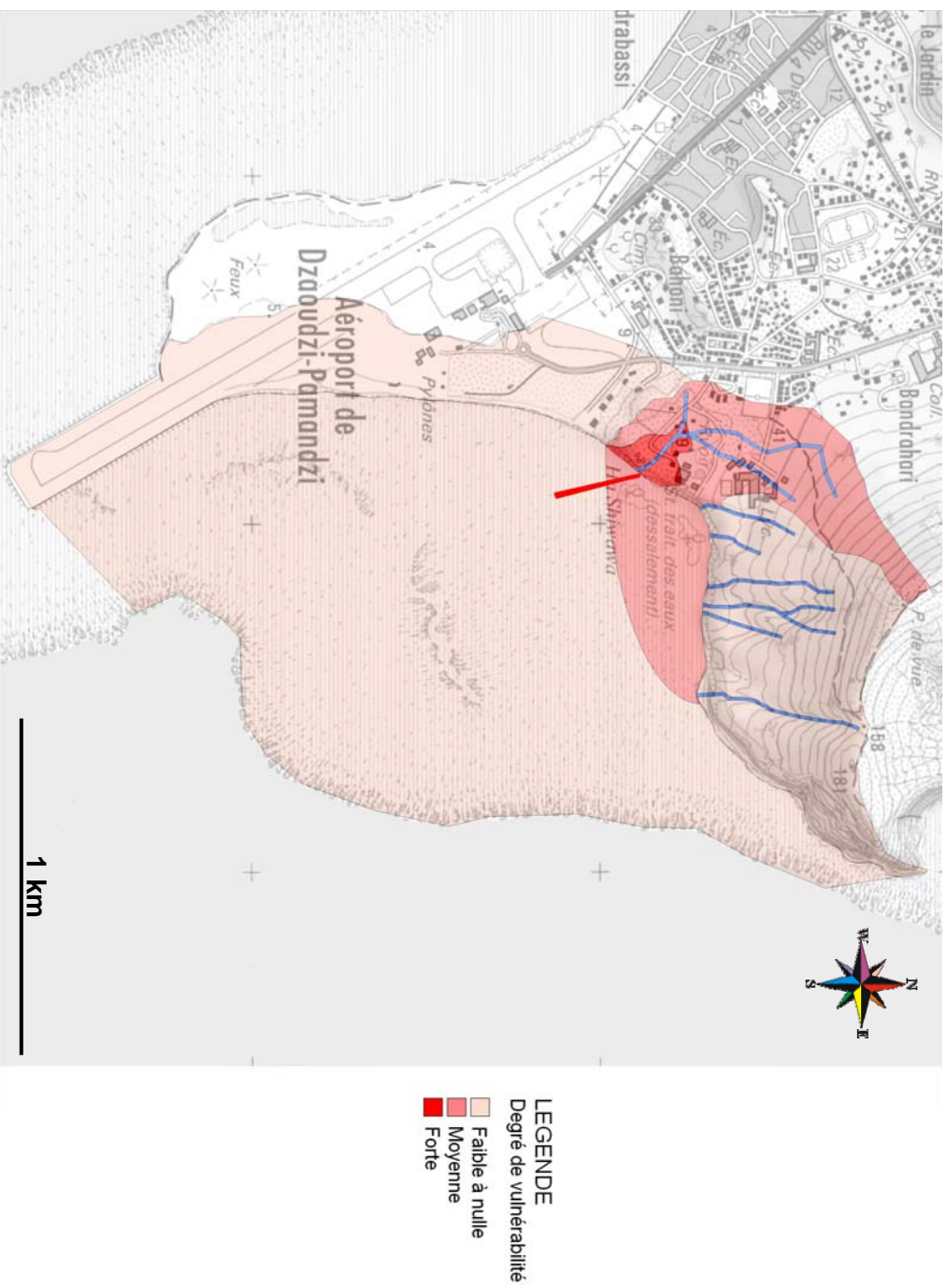


Illustration 11 : Cartographie de la vulnérabilité de l'aire d'alimentation de la prise d'eau en mer. Les drains sont ici représentés en rouge sans connotation particulière en termes de vulnérabilité

Avant toute conclusion, il est important de signaler que le reste du milieu marin est considéré comme zone de faible vulnérabilité mais n'est pas représenté. A la lecture la carte, le secteur considéré comme le plus vulnérable par rapport au captage est le sous bassin versant de la ravine qui se développe en amont du captage, qui longe le parc à zébus, draine la zone de l'usine de dessalement, du lycée et des lotissements Chanfi et qui (ou ses affluents) traverse(nt) la « route » à plusieurs reprises.

3.4. PRESSIONS

Comme indiqué au § 1.1, les pressions susceptibles d'attenter à la qualité des eaux du captage sont majoritairement d'origine continentale. Les pressions issues du milieu marin sont négligeables étant donné la très faible probabilité d'occurrence de déversement de produits polluants directement au large (nauffrage, dégazage sauvage, etc.)

L'inventaire des sites industriels et activités de service de la Collectivité Départementale de Mayotte (Rapport BRGM/RP-52906-FR) ne fait mention d'aucune activité potentiellement à risque dans l'aire contribuant à l'alimentation de la prise d'eau si ce n'est l'aéroport de Dzaoudzi-Pamandzi classé comme installation à risque potentiel faible, d'autant que les principales installations de l'aéroport sont implantées à l'extérieur du périmètre à risque pour la prise d'eau.

Les pressions non industrielles identifiées dans ce chapitre le sont sur la base des informations rapportées dans le rapport d'études préalables à la modification de la prise d'eau de dessalement de Petite terre (SAFEGE-2005) ainsi que d'observations de terrain (à rattacher à l'illustration 4).

Les pressions identifiées à proximité de la prise d'eau actuelle et susceptibles de l'atteindre - sont par ordre d'importance :

- Les exutoires pluviaux se déversant sur le platier de Pamandzi
- Le parc à zébus ;
- Les rejets des systèmes d'assainissement des logements concentrés (emplacement non encore déterminé) ;
- Le rejet de saumures ou concentrats du traitement par osmose inverse ;
- Le transport maritime.

Les pressions ou aléas naturels recensés sont principalement les risques de houles cycloniques et de démantèlement de la falaise pouvant conduire à l'arrêt de la production - voire porter atteinte à l'intégrité des installations.

3.4.1. Les exutoires pluviaux se déversant sur le platier de Pamandzi

En ce qui concerne les exutoires pluviaux, le risque de pollution est dépendant de la fréquence des épisodes pluvieux intenses ainsi que de la nature et du volume de la

charge transportée par les ruissellements (majoritairement des boues de ruissellement ainsi qu'une proportion non négligeable de matière organique. Peuvent être écartés les polluants organiques et métalliques vu l'absence d'activités à risque dans l'aire d'alimentation). L'étude d'impact des exutoires pluviaux de la station de dessalement et du secteur du lycée (SAFEGE, 2005) ne porte que sur le projet de rallongement de la prise d'eau et ne fait pas mention des risques encourus par la prise d'eau actuelle. Il est toutefois mentionné dans le rapport que le panache des rejets pluviaux s'étale sur une bande côtière assez large. C.à.d. que dans la situation actuelle, la prise d'eau est exposée aux rejets pluviaux des exutoires de la station et du secteur du lycée. Ces exutoires et la charge qu'ils transportent constituent donc une pression sur la qualité de la ressource captée (turbidité, germes, etc.).

3.4.2. Le parc à zébus

Comme présenté au § 2.3., la présence du parc à zébus – présence non autorisée et non déclarée - situé en amont hydraulique des drains, 50 m en retrait de la fosse de pompage constitue un risque sanitaire non négligeable pour la prise d'eau.

La concentration des têtes, le fait que le bétail ne soit ni vacciné ni suivi sur un plan sanitaire, le non entretien du parc et l'amoncellement du fumier sont autant de facteurs à risques. En cas de précipitations, il a été confirmé que les écoulements du parc à zébus se dirigeaient vers la ravine et s'épandaient au niveau du dispositif fosse pompage et drains. A marée basse, en l'absence de dilution, le panache se répand directement sur les drains (cf. Illustration 12, Illustration 13 et Illustration 14).



Illustration 12 : Lors d'épisodes pluvieux, les écoulements du parc à zébus se dirigent directement vers la plage via la ravine, voir illustration suivante (photographie SOGEA).



Illustration 13 : Les écoulements en provenance du parc à zébus et canalisés par la ravine viennent s'épandre sur les drains en partie découverts à marée basse, ici symbolisés en rouge (photographie SOGEA).



Illustration 14 : Détail du panache. La matière organique en provenance du parc à zébus est bien visible (photographie SOGEA)

Par ailleurs, il est d'autant plus important d'être vigilant sur le risque que représente le parc à zébus, dans le sens où une partie du troupeau a été décimée en 2008 pour des raisons de santé - environ 7 bêtes en 3 jours. La menace d'une contamination sérieuse de nature bactériologique n'est pas à écarter. Au regard de ces observations, cette pression est considérée comme la plus forte présente sur l'aire d'alimentation du captage.

3.4.3. Les rejets des systèmes d'assainissement des logements concentrés

La construction des lotissements Chanfi (cf. localisation en Illustration 4) et par extension des systèmes d'assainissement en amont hydraulique de la prise d'eau constitue une pression polluante potentielle en devenir vis-à-vis de cette dernière. La solution proposée par le BRGM (2006) consistait en un rejet à une certaine distance du front de la falaise si les éléments ci-dessous étaient réunis :

- la nature des sols doit témoigner d'une bonne capacité d'infiltration (absence de blocage par des argiles par exemple qui entraînerait des contraintes en partie sommitale de la falaise et une destabilisation probable des pans) ;
- la surface d'épandage doit être suffisamment importante pour absorber et drainer les volumes d'eau à infiltrer.

Ces éléments nécessitent une étude des sols et une étude de dimensionnement de l'assainissement afin de ne pas constituer de nuisance pour la prise d'eau.

3.4.4. Le rejet des saumures

Comme indiqué au § 2.2, les saumures font l'objet d'un suivi par analyse. La concentration en sortie en chlorure de sodium est maintenue à 55 g/L, soit 20 g/L de plus que la concentration moyenne des eaux du canal du Mozambique. Il est important que les saumures soient dispersées rapidement et que le panache ne soit pas dirigé en direction de la prise d'eau sous peine d'augmenter la salinité des eaux captées et de diminuer le rendement de production d'eau.

Les résultats des modélisations (SAFEGE - 2005) montrent que l'impact des rejets actuels et des rejets futurs (si l'hypothèse d'un déplacement de la prise d'eau et de la conduite est envisagée) sur la prise AEP est négligeable en terme de qualité. Les rejets de saumures ne constituent pas à proprement parler un risque pour le captage.

3.4.5. Le transport maritime

Selon les informations de la capitainerie de Longoni et des Affaires Maritimes, les activités au large de la prise d'eau se limitent :

- à la circulation des bateaux de plaisance
- à la pêche et à la circulation des embarcations de pêcheurs

Il n'est pas signalé de passage de navires marchands et de pétroliers au large de Petite terre en cote Est, c.à.d. en face de la prise d'eau de dessalement. Par conséquent, le risque d'accident de type déversement de produits polluants est très faible et cette occurrence ne sera pas pris en compte dans l'estimation des pressions.

3.4.6. Les pressions d'origine naturelle

Le démantèlement de la falaise

Comme en témoigne l'illustration 7, le risque d'éboulement et/ou de chute de blocs à proximité de l'ouvrage (et notamment de la fosse de pompage) est important et doit être pris en compte dans l'évaluation globale des risques. D'après l'atlas des aléas naturels à Mayotte (BRGM/RP-53037-FR) le site est exposé à un aléa fort de type mouvement de terrain : chutes de blocs dominantes accompagnées de glissement et un aléa fort de type surcote marine à récurrence forte. Cette pression ne sera pas cartographiée car omniprésente sur le bassin d'alimentation continental.

Les aléas océano-climatiques

L'emplacement de la prise d'eau sur le platier rend cette dernière vulnérable aux aléas océaniques et/ou climatiques marins, parmi lesquels se trouvent :

- Les houles cycloniques
- Les tsunamis

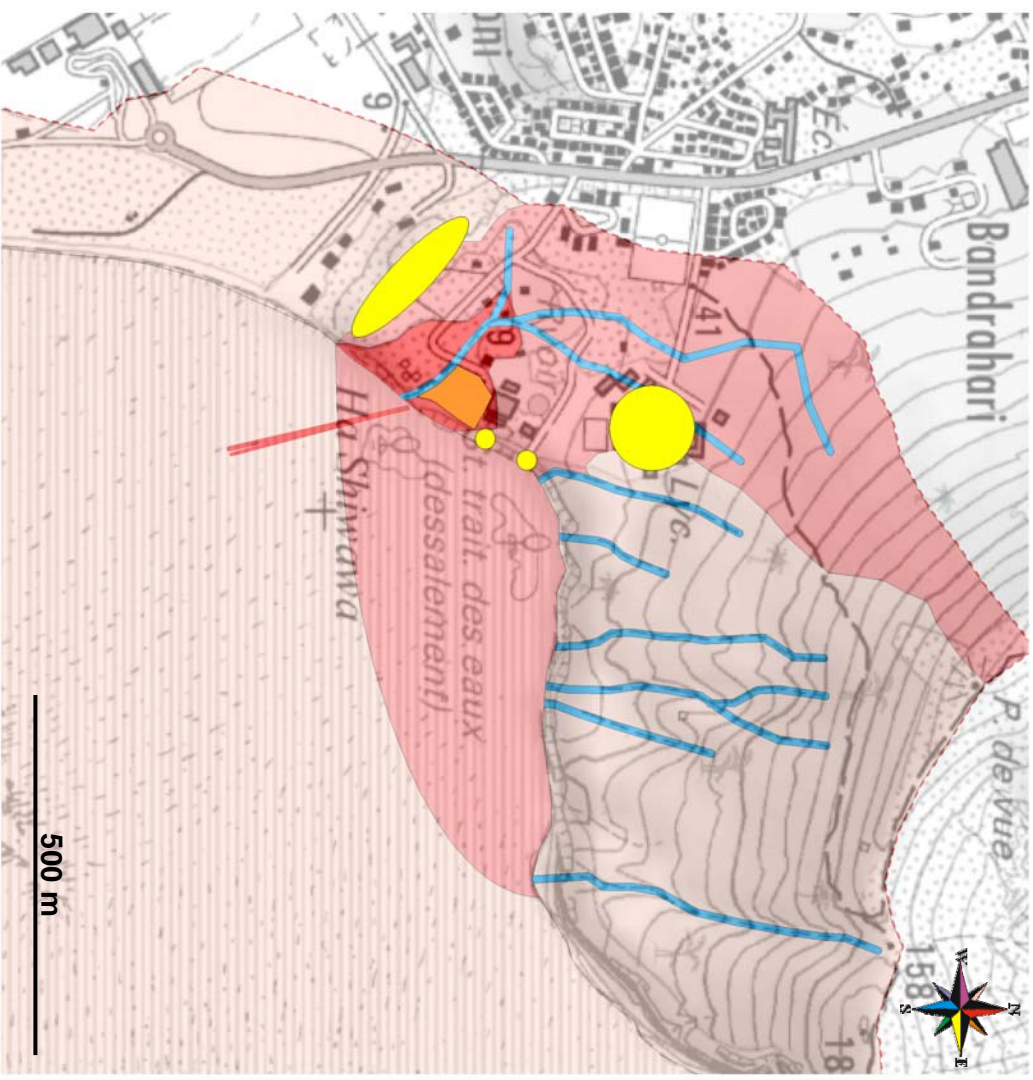
Les événements climatiques d'ampleur suffisante pour générer des désordres marins susceptibles de nuire à la prise d'eau sont peu fréquents dans le canal du Mozambique aux environs de Mayotte. A titre d'exemple, les résultats des modélisations de la houle cyclonique à Mayotte (rapport BRGM/RP-55981-FR) indiquent que les cyclones arrivent sur l'île par le Nord-est, c.à.d. par Petite terre et - pour des intensités standards - ils provoquent des vagues ne dépassant pas 2 m en domaine externe et une surcote de l'ordre de 8 cm dans le lagon. Compte tenu de la position de la prise d'eau, il est possible d'avancer que le platier amortisse les effets de la houle en « cassant » les vagues, réduisant ainsi les risques pour la prise d'eau (risque d'affouillement et/ou de déplacement des drains, etc.).

Les phénomènes de type tsunami sont rares à inexistants à Mayotte au point de ne pas être considérés comme une pression éventuelle sur la prise d'eau.

3.4.7. Cartographie et conclusion sur les pressions

Comme expliqué précédemment, seules les pressions identifiées en milieu continental seront retenues et cartographiées comme telles.

Un degré relatif d'importance est attaché à chacune des pressions en fonction de la nature et de l'intensité des impacts sur la ressource captée. Deux classes sont alors définies, 1 première classe pour les pressions considérées comme d'ampleur moyenne et une seconde classe pour les pressions considérées comme de forte ampleur. Les zones non cartographiées sont considérées comme à pression faible voire nulle.



- LEGENDE**
- Degré de vulnérabilité
- Faible à nulle
 - Moyenne
 - Forte
- Estimation du degré des pressions
- pression moyenne
 - pression forte

Illustration 15 : Cartographie de synthèse de vulnérabilité et pressions du nord de l'aire d'alimentation de la prise d'eau en mer. Les drains sont ici représentés en rouge sans connotation particulière.

Au regard de l'illustration 15, le croisement des critères de forte vulnérabilité et forte pression fait apparaître une zone à risque au niveau du parc à zébus. Comme annoncé précédemment, le parc à zébus constitue le risque de pollution le plus élevé vis-à-vis du captage, c.à.d. le premier risque à prendre en compte dans la politique réglementaire à mettre en place.

4. Recommandations

L'essentiel des alimentations de la prise d'eau est assuré par les eaux marines, renouvelées à chaque marée. Par conséquent l'importance des volumes d'eau en jeu (dilution) et leur circulation (aléatoire à long terme) réduisent sensiblement le degré de vulnérabilité de l'ouvrage. Par ailleurs, les pressions actuellement exercées sur le milieu marin environnant et susceptibles de nuire à la qualité des eaux captées sont très faibles, bien que cela puisse évoluer en fonction des itinéraires maritimes.

On peut donc considérer que la ressource captée par la prise d'eau ne présente pas de risque important de dégradation de sa qualité par le milieu marin.

En revanche, le degré d'exposition de la prise d'eau aux eaux du domaine continental est important. La présence de la ravine au droit des drains et la découverte de ces derniers à marée basse sont les deux secteurs qui rendent l'ouvrage vulnérable aux eaux provenant du domaine continental.

Par ailleurs, l'essentiel des pressions observées provient des environs continentaux de la prise d'eau. Le parc à zébus, les projets d'assainissement du lotissement Chanfi et les réseaux d'évacuation pluviale du lycée et de la station de dessalement sont autant de sources de polluants potentiels qui peuvent à plus ou moins brève échéance, dans des concentrations plus ou moins significatives, atteindre les drains qui composent la prise d'eau.

En terme de recommandations et dans l'optique de protéger durablement l'eau captée d'une dégradation de sa qualité, il serait judicieux de :

- Déplacer la prise d'eau du platier au domaine externe – c.à.d. le DPM ou Domaine Public Maritime - comme cela a déjà été suggéré (cf. § 2.4) et étudié (cf. rapports PARETO 2005 et SAFEGE 2005). La mise en place prochainement de la station d'épuration de Petite terre va dans ce sens, en nécessitant probablement le déplacement de la prise d'eau vers le large et plus en profondeur, domaine à qualité d'eau « constante » moins exposé aux eaux et aux pollutions continentales ainsi qu'à la dégradation directe mais de fait plus exposée aux pollutions d'origine marine. Les résultats des modélisations PARETO/SAFEGE 2005 montrent que l'influence des rejets pluviaux pour une pluie de fréquence mensuelle est pratiquement négligeable sur une prise d'eau située 1 km au large de la fosse de pompage ;
- Réglementer et/ou limiter les pressions s'exerçant sur l'aire continentale contribuant à l'alimentation du captage dans le cas où la prise d'eau ne serait pas déplacée. Il s'agit dans un premier temps de faire respecter la législation concernant la présence illégale du parc à zébus et de veiller au respect des consignes d'installation des systèmes d'assainissement des lotissements Chanfi ;

- Aménager et protéger la prise d'eau actuelle, notamment par la mise en place d'une clôture symbolisant le périmètre de protection immédiat. Cette mesure permettrait d'empêcher toute dégradation directe des ouvrages ;

Dans l'état actuel des choses, l'instauration d'un périmètre de protection – sur la base de la délimitation de l'aire contribuant à l'alimentation du captage, modifiée ou pas – sera nécessaire à la mise en place des pratiques réglementaires de limitation et/ou de restriction d'activités considérées comme à risques pour la prise d'eau.

5. Conclusion

L'étude des bassins d'alimentation de captage à Mayotte appliquée à l'usine de dessalement de Petite terre a permis de délimiter deux aires contribuant à l'alimentation et à la vulnérabilité de la prise d'eau en mer.

Il ressort de cette étude que la prise d'eau en mer de la plage de l'aéroport de Pamandzi - bien qu'essentiellement alimentée par les circulations des masses d'eau marines s'épanchant sur le platier – présente un degré d'exposition avéré aux eaux du domaine continental. La vulnérabilité de la prise d'eau est ainsi contrôlée par le domaine continental en particulier au niveau des ravines situées en amont de la prise d'eau.

Les pressions recensées et significatives qui s'exercent sur l'aire contribuant à l'alimentation du captage sont toutes, sans exception, des pressions issues du domaine continental et qui représentent un risque réel de dégradation de la qualité des eaux captées. Le parc à zébus est vraisemblablement la pression la plus significative à prendre en compte dans la dégradation de la qualité des eaux.

En l'absence de projet de déplacement de la prise d'eau vers le large, il est nécessaire de mettre en place les moyens réglementaires nécessaires à la limitation et/ou à la restriction des activités présentant un risque avéré de nuisance de la qualité des eaux captées dont les conséquences sur l'exploitation ont un coup financier onéreux et ne sont pas sans risques sur la santé publique.

6. Bibliographie

Avis technique concernant l'érosion des falaises de Pamandzi, en relation avec le projet de lotissement Chanfi. Y. DE LA TORRE Service Géologique Régional océan Indien. Note 2006 SAR/RÉU/MAYOTTE.

De La Torre Y., Delattre M., Idier D., Romieu E., collab Delvallee E. et le Cozannet G. (2008) – Modélisation courantologique du lagon de Mayotte. Rapport BRGM/RP-56334-FR, 113 p.

Frissant N., De la Torre Y. et Mouron R. (2004) – Inventaire des sites industriels et activités de service de la Collectivité Départementale de Mayotte. Rapport BRGM/RP-52906-FR. 21 pages, 7 figures, 6 tableaux, 5 annexes dont 3 hors texte.

J.-C. Audru, A. Bitri, J.-F. Desprats, C. Mathon, N. Maurillon, J.-L. Nedellec, O. Jossot, J.-P. Rançon, P. Sabourault, O. sedan, M. Terrier-Sedan et N. Zornette, avec la collaboration de P. Stollsteiner (Antéa), de S. Guillobez (Cirad), de P. Daniel et de B. Haie (Météo-France) : Atlas des aléas naturels à Mayotte, Communes de Mamoudzou, Kougou, Dzaoudzi et Pamandzi. Rapport BRGM/RP-53037-FR, 135 pages., 65 figures ou photos., 4 tableaux., 72 cartes et 8 annexes.

Lecacheux S., Balouin Y. et De La Torre Y. (2007) – Modélisation des vagues d'origine cyclonique à Mayotte. BRGM/RP-55981-FR, 100 p., 62 fig.

PARETO – Novembre 2005. Étude d'impact de la station d'épuration de Petite terre. Analyse hydrologique et sédimentologique des trois sites de rejets potentiels de la STEP et du site de captage de l'usine de dessalement. Rapport technique. Contrat de sous traitance SAFEGE.

Plans de recollement de l'usine de dessalement de Petite terre – SOGEA. TP3694, janvier 1998.

SAFEGE - Octobre 2005. Etudes préalables à la réalisation d'une STEP. Analyses préliminaires à l'implantation du site de traitement. Annexe – Volume 1. Modélisation maritime.

SAFEGE – Octobre 2005. Etudes réglementaires et de maîtrise d'œuvre pour la réalisation d'un nouveau point de captage des eaux de mer en vue du dessalement – usine de Petite terre.

Stieljes L, Cantagrel J.M, Nougier J., Vatin-Perignon N., Watelet P. (1988) – Carte géologique de Mayotte (Archipel des Comores). Echelle : 1/50 000, Collectivité Départementale de Mayotte. Editions du BRGM.

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Seguin J.J, Dörfliger N. (2007) – Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis

des pollutions diffuses. Rapport intermédiaire : synthèse bibliographique et analyse des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie, rapport BRGM/RP-55332-FR, 128 pages, 125 illustrations, 8 annexes.

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Dörfliger N. (2007) – Délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Guide méthodologique, rapport BRGM/RP-55874-FR, 75 pages, 14 illustrations

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Dörfliger N. (2008) - Délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Application du guide méthodologique sur des bassins test, BRGM/RP-55875-FR, 172 pages, 113 illustrations, 7 annexes

Annexe 1

Principe de l'osmose inverse

OSMOSE INVERSE

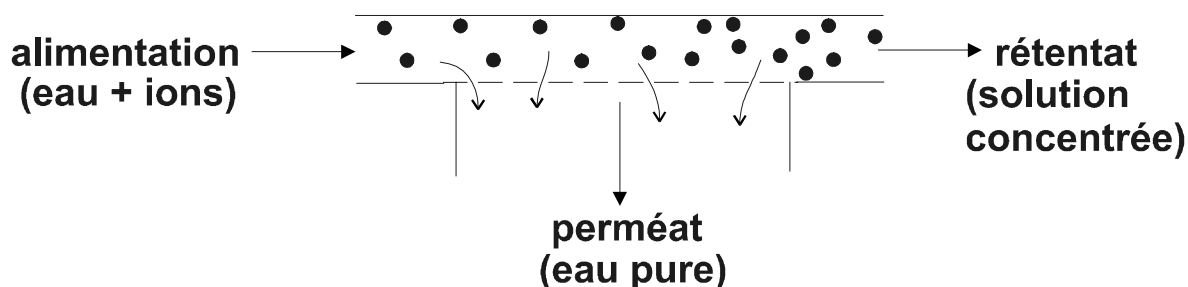
I/ DÉFINITIONS

Une membrane semi-sélective est une membrane permettant certains transferts de matière entre deux milieux qu'elle sépare, en interdisant d'autres ou plus généralement en favorisant certains par rapport à d'autres.

L'osmose inverse est un procédé de séparation en phase liquide par perméation à travers des membranes semi-sélectives sous l'effet d'un gradient de pression.

L'écoulement s'effectue en continu tangentiellement à la membrane. Une partie de la solution à traiter (débit Q_0) se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes:

- une partie (débit Q_p) passe à travers la membrane (perméat)
- une partie qui ne passe pas à travers la membrane (concentrat ou rétentat) et qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane



La fraction de débit qui traverse la membrane est le taux de conversion Y défini par:

$$Y = \frac{Q_p}{Q_0}$$

Le flux de matière intéressant est suivant les cas le perméat (cas de la déminéralisation d'eau) ou le concentrat (concentration de produits alimentaires). Le débit de la solution d'alimentation peut atteindre une valeur 500 fois supérieure à celle du débit de perméat.

Lors d'une filtration classique la suspension à traiter est amenée perpendiculairement au milieu filtrant; l'accumulation de matières forme une couche qui diminue la porosité et ainsi le débit de filtration. L'écoulement tangentiel permet

au contraire de limiter l'accumulation sur la membrane des diverses espèces (particules, molécules, ions) retenues par cette dernière.

La sélectivité d'une membrane est définie par le taux de rejet R (ou taux de rétention) de l'espèce que la membrane est censée retenir:

$$R = \frac{C_0 - C_p}{C_0} = 1 - \frac{C_p}{C_0}$$

où C_0 est la concentration de l'espèce à retenir dans la solution et C_p est la concentration de la même espèce dans le perméat.

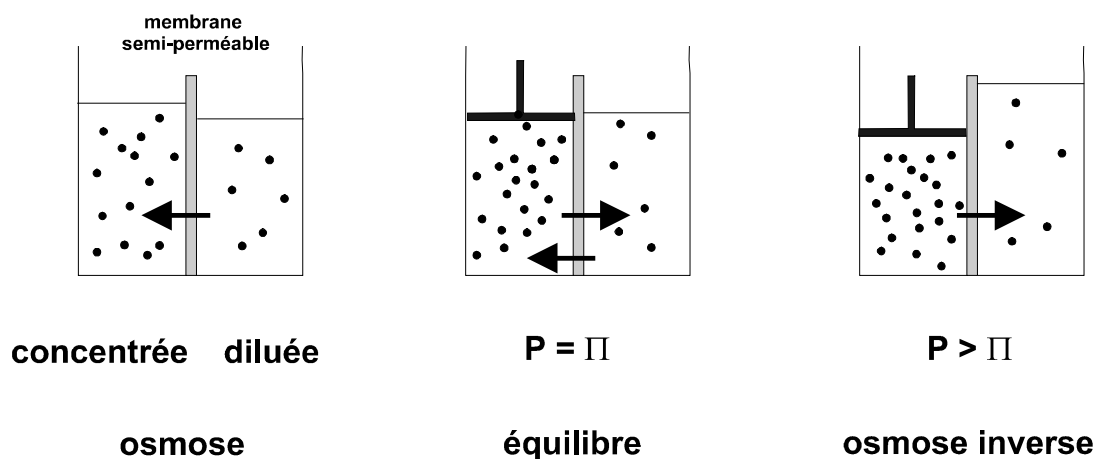
L'osmose inverse utilise des membranes denses sans porosité qui laissent passer le solvant et arrêtent les ions.

II/ PRINCIPES DE L'OSMOSE INVERSE

1/ Pression osmotique:

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Si on considère un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes, l'osmose se traduit par un flux d'eau dirigée de la solution diluée vers la solution concentrée.

Si on applique une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Avec une pression suffisamment forte, le flux d'eau va même s'annuler: cette pression est nommée la pression osmotique P (en faisant l'hypothèse que la solution diluée est de l'eau pure). Si on dépasse la valeur de la pression osmotique, on observe un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique: c'est le phénomène d'osmose inverse.



La pression osmotique des électrolytes est donnée par la relation suivante:

$$\underline{\Pi = i \cdot C \cdot R \cdot T}$$

où i est le nombre d'espèces d'ions constituant le soluté, C la concentration molaire du soluté ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$), T la température (K) et R la constante des gaz parfaits ($8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Π est exprimée en pascals. Cette relation est valable pour des solutions diluées.

Exemple: la pression osmotique de l'eau de mer (3 % en masse de chlorure de sodium) à 25 °C est environ de 25 bars.

2/ Mécanisme diffusionnel:

En osmose inverse les transferts de solvant et de soluté se font par solubilisation - diffusion: toutes les espèces moléculaires (soluté et solvant) se dissolvent à travers la membrane et diffusent à l'intérieur de celle-ci comme dans un liquide sous l'action d'un gradient de concentration et de pression. Le transfert ne dépend donc plus de la dimension des particules mais de leur solubilité dans le milieu membranaire. Les séparations sont donc d'origine chimique et sont liées au pouvoir solvant de la membrane.

Le flux massique J_{solvant} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) de solvant et le débit volumique de solvant ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) traversant la membrane sont donnés par les relations:

$$J_{\text{solvant}} = A \cdot (\Delta P - \Delta \Pi) \text{ et } Q_P = \frac{A \cdot S}{\rho} \cdot (\Delta P - \Delta \Pi)$$

où A est la perméabilité de la membrane au solvant ($\text{m}^{-1} \cdot \text{s}$), S la surface de la membrane (m^2), ρ la masse volumique du solvant ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), ΔP la différence de pression de part et d'autre de la membrane et $\Delta \Pi$ la différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane. $\Delta \Pi$ est la pression osmotique du flux d'alimentation si le perméat est une solution très diluée. Les pressions sont exprimées en pascals.

Le flux massique $J_{\text{soluté}}$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) de soluté traversant la membrane est donné par la relation:

$$J_{\text{soluté}} = B \cdot (C_0 - C_P)$$

où B est la perméabilité moyenne de la membrane au soluté ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), C_0 et C_P sont respectivement la concentration en soluté de l'alimentation et du perméat de part et d'autre de la membrane ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

On montre donc que le flux de solvant est proportionnel à la pression efficace $\Delta P - \Delta \Pi$ tandis que le flux de soluté en est indépendant. On montre également que le taux de rejet d'une membrane augmente lorsque la pression efficace augmente.

La sélectivité des membranes d'osmose inverse pour les différentes espèces chimiques dépend de leur possibilité de solvatation par l'eau. Les espèces les plus fortement solvatées ont un taux de rejet toujours plus important. On peut en tirer les indications suivantes:

- les ions sont mieux retenus que les molécules.
- les protéines ont une rétention plus faible pour des pH proches du point isoélectrique.
- pour les acides faibles, le taux de rejet est élevé lorsque le pH est supérieur au pK.
- pour des ions de valence différente, le taux de rejet croît avec la valence des ions.
- pour des ions de même valence, le taux de rejet diminue si leur masse molaire augmente.

IV/ MEMBRANES

1/ Constitution et assemblage en modules:

Les membranes sont le plus souvent fabriquées en acétate de cellulose ou en polymères de synthèse (polyamides, polysulfones). Elles peuvent être planes ou tubulaires (épaisseur de l'ordre de 200 μm) ou en fibres creuses obtenues en filant des polymères (diamètre intérieur de 25 à 800 μm et diamètre extérieur de 50 à 1000 μm)

Les membranes sont caractérisées par leur qualités de stabilité chimique (pH, oxydants, dichlore ...), de stabilité thermique (important facteur pour les utilisations biologiques où il y a stérilisation en autoclave), de stabilité microbologique (dégradation bactérienne pour les membranes en acétate de cellulose) et de résistance mécanique. Leur coût intervient dans 40 à 50 % de l'investissement d'une unité d'osmose inverse.

Pour être mises en œuvre les membranes doivent être montés dans des supports appelés modules. Une enceinte résistant à la pression est toujours nécessaire. On trouve trois types principaux:

- module spirale: une membrane plane est enroulée autour d'un tube creux collecteur de perméat.
- module tubulaire: une membrane tubulaire est fixée sur un support poreux.
- module à fibres creuses: les fibres en U sont mises en faisceau et assemblées de façon à réaliser l'étanchéité aux deux extrémités du module. Le liquide à traiter circule perpendiculairement à l'axe des fibres tandis que le concentrat est recueilli

dans une enceinte qui enveloppe le faisceau et permet son évacuation à une des extrémités du module. Le perméat s'écoule à l'intérieur de chacune des fibres puis dans un collecteur.

2/ Polarisation et colmatage:

La polarisation, apparaissant en osmose inverse, est un phénomène réversible (disparaissant quand le gradient de concentration s'annule) caractérisé par une accumulation à la surface de la membrane des espèces retenues. La concentration étant à la surface plus élevée que dans le volume de la solution il s'ensuit une augmentation de la pression osmotique près de la membrane et donc une diminution de la pression efficace $\Delta P - \Delta \Pi$: le flux de perméat va donc diminuer.

Le colmatage est possible en osmose inverse. On peut atteindre la limite de solubilité des sels au niveau des membranes et avoir une formation de tartre lors de la déminéralisation d'eaux salines.

3/ Procédés:

Les unités d'ultrafiltration ou d'osmose inverse comportent principalement en plus des modules les éléments suivants:

- une pompe à haute pression (40 à 80 bars) pour l'osmose inverse.
- un échangeur de chaleur pour maintenir les liquides aux températures souhaitées.

Les procédés existent en discontinu comme en continu avec dans les deux cas des montages permettant le recyclage des concentrats pour améliorer la séparation. Une étape d'élimination préalable des plus grosses particules est toujours nécessaire.

V/ APPLICATIONS INDUSTRIELLES

Les principales applications de l'osmose inverse et de l'ultrafiltration sont les suivantes:

- traitement des eaux: dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, production de l'eau ultrapure (industries électronique, pharmaceutique ...).
- extraction de protéines du lactosérum dans l'industrie laitière.

Les techniques présentées présentent les avantages suivants:

- opération à température ambiante ce qui évite la dégradation de molécules fragiles dans le domaine agro-alimentaire.
- pas d'intervention de réactifs chimiques comme des agents d'extraction qui sont des sources de pollution.

- consommation énergétique faible vis à vis de la distillation pour le dessalement de l'eau.

Néanmoins des inconvénients existent:

- baisse de la perméabilité et modification de la sélectivité en cas de colmatage des membranes.
- sélectivité entre les espèces chimiques "soluté" toujours inférieure à 100 %.
- durée de vie limitée des membranes soit par perte de résistance mécanique soit par suite d'une mauvaise tenue aux réactifs utilisés pour le nettoyage.

BIBLIOGRAPHIE

- *Techniques de l'ingénieur: articles relatifs à l'ultrafiltration et à l'osmose inverse*

Annexe 2

Modélisation courantologique au large de Petite terre (extrait du rapport BRGM/RP-56334-FR)

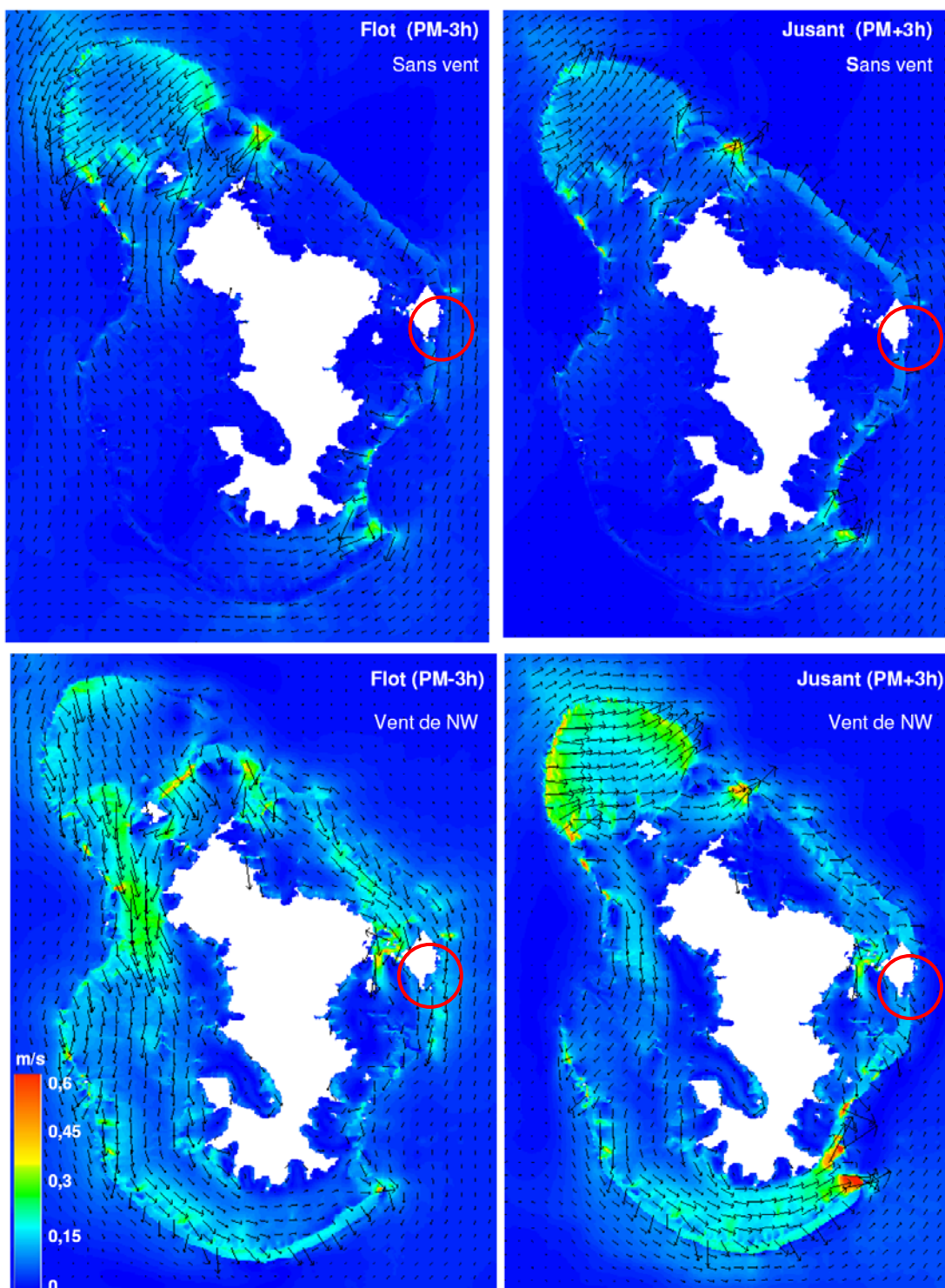


Figure 1 : Comparaisons des vitesses et direction des courants de jusant et de flot en mortes-eaux et sans vent et avec vent de NW

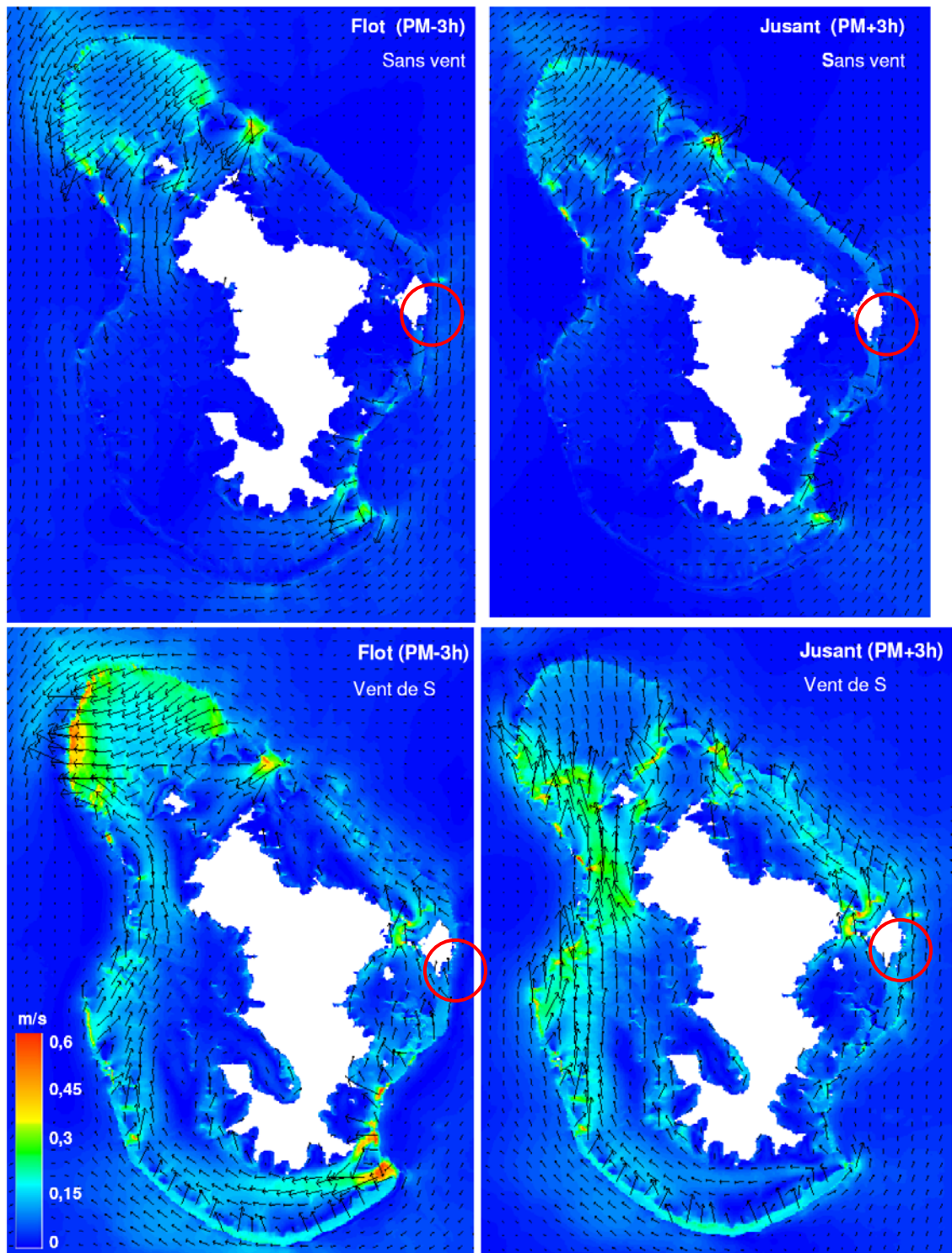


Figure 2 : Comparaisons des vitesses et direction des courants de jusant et de flot en mortes-eaux et sans vent et avec vent de S.



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional de Mayotte”
9, centre Amatoula, Z.I. de Kawéni
BP 363
97600 – Mamoudzou France
Tél. : 02 69 61 28 13