

Bloc 2B : Volet Hydrogéologie

Amélioration de la connaissance de l'aléa éboulement
Secteur de la citadelle, falaise de Bonifacio

BRGM/RP-69836-FR

Avril 2020

Bloc 2B : Volet Hydrogéologie

Amélioration de la connaissance de l'aléa effondrement

Secteur de la citadelle, falaise de Bonifacio

BRGM/RP-69836-FR

Avril 2020

M Geneviev, BRGM

**Avec la collaboration de
B. Vignerot, BRGM**

CEREMA

Vérificateur :
Nom : Malascrabes Marie
Fonction : Chef service risques géologiques
Date : 15/09/2020
Signature : 

INERIS

Vérificateur :
Nom : FRANCK Christian
Fonction : Responsable de l'Unité Auscultation et Surveillance Géologique et Géotechnique
Date : 05/09/2020
Signature : 

BRGM

Vérificateur :
Nom : Corbier Pauline
Fonction : Hydrogéologue
Date : 08/04/20
Signature : 

Approbateur :
Nom : REY Anthony
Fonction : Directeur Régional
Date : 17/04/2020
Signature : 

Ce rapport synthétise une partie du programme d'étude (Bloc 2B) et a été rédigé par le BRGM. Conformément au système de gestion de qualité, ce rapport a donc été vérifié et approuvé par le BRGM. Il a par ailleurs été vérifié par les autres opérateurs du groupement pour assurer la cohérence du document par rapport aux objectifs de l'étude.

Mots-clés : HYDROGEOLOGIE, CAUSSE, KARST, RESEAUX HUMIDES, BONIFACIO, CORSE DU SUD

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

M. Geneviev avec la collaboration de B. Vignerot (2020) – Amélioration de la connaissance de l'aléa effondrement du secteur de la citadelle, falaise de Bonifacio. BLOC 2B : Volet Hydrogéologie BRGM/RP-69836-FR, 51 p., 28 ill., 1 ann.

SYNTHESE

Suite à la réalisation de la carte multialéas « mouvement de terrain » et « hydraulique » dans les secteurs à enjeux de la commune de Bonifacio par le Cerema en 2013, la DDTM de Corse-du-Sud et les opérateurs BRGM, Cerema et Ineris ont convenu de mener une étude, sous le pilotage du BRGM, visant à améliorer la connaissance et à évaluer l'aléa « effondrement en grande masse » sous la Citadelle de Bonifacio, notamment au droit de la zone de surplomb (encorbellement d'environ 20 m) figurant en aléa de niveau très élevé.

Il s'agit notamment :

- de mener une analyse géologique et structurale détaillée de la Citadelle et de la zone d'étude en s'appuyant sur trois forages de reconnaissance et des essais en laboratoire ;
- de faire progresser la connaissance en ce qui concerne le fonctionnement hydrogéologique du système et les conséquences potentielles de sa fragilisation ou de l'apparition des mécanismes de rupture pressentis ;
- et de faire également progresser la connaissance sur le comportement du pied de falaise au regard du contexte hydrodynamique maritime (altération hydromécanique de la falaise et action de la houle sur la sape du pied).

Le présent rapport constitue le volet hydrogéologie de l'étude globale menée (Bloc 2B).

L'eau qui s'infiltré dans le massif de la presqu'île de la haute ville est susceptible d'être le moteur de futurs éboulements. L'objectif de l'étude était donc de tenter de définir les conditions de circulation des eaux et de mise en charge du massif au travers de :

- l'identification de l'origine de l'eau susceptible de s'infiltrer (eau de pluie ?, eau issue des réseaux d'eau anthropiques ?...);
- la caractérisation qualitative de la porosité des formations en présence, c'est-à-dire la nature et le volume des vides (porosité karstique ?, fissurale ?, d'interstices ?...);
- la caractérisation de leur perméabilité, c'est-à-dire de l'aptitude de la roche à se laisser traverser par l'eau, correspondant à la vitesse à laquelle l'eau circule dans la roche ;
- l'identification des exutoires du massif (présence de sources ?, de suintements ?, décharge diffuse sous-marine ?...).

Les investigations mises en œuvre ont consisté dans un premier temps en la réalisation d'une synthèse bibliographique des études hydrogéologiques menées à l'échelle régionale sur le bassin miocène de Bonifacio afin d'identifier les comportements hydrogéologiques des différentes formations. Les observations de terrain couplées géologie/hydrogéologie menées, les résultats des sondages réalisés Place du Marché et les données disponibles sur l'état et les caractéristiques des réseaux d'eau de la haute ville ont ensuite été analysés.

Le fonctionnement hydrogéologique du massif de la presqu'île de Bonifacio a ainsi pu être décrit.

Compte-tenu de la présence quasi généralisée d'un revêtement de surface, l'eau infiltrée au droit de la haute ville correspond principalement à des apports indirects par les fuites des réseaux d'eaux dont le volume n'a pas pu être calculé. L'infiltration de l'eau de pluie n'est pas à exclure, mais elle semble mineure.

L'eau circule majoritairement au contact des fractures et des petits conduits karstiques agrandis par la dissolution des carbonates. Les écoulements sont concentrés dans les niveaux de calcarénites correspondant aux faciès les plus carbonatés 1, 2 et 3. Ils correspondent aux trente-cinq premiers mètres de la falaise par rapport au sol. Ces écoulements sont guidés par la stratification qui les oriente vers le sud mais également par la fracturation intra-bancs (vers le front de la falaise). La perméabilité des faciès carbonatés constituant la partie supérieure du massif est de l'ordre de 10^{-5} m/s tandis que celle des faciès gréseux inférieurs est d'environ 10^{-7} m/s, ce qui peut être considéré comme faible mais non négligeable. Le massif de la presqu'île ne renferme pas de nappe à proprement parler.

Sous la haute ville, les exutoires principaux du massif correspondent à des suintements observés en falaise, au droit des niveaux carbonatés des faciès 1, 2 et 3. Le dernier niveau carbonaté en surplomb (noté 4CC36), situé à 36 m de profondeur par rapport au sol de la haute ville est susceptible de constituer le collecteur de la majorité des eaux infiltrées au droit de la haute ville. Des circulations d'eau souterraine se produisent jusque dans le faciès gréseux inférieur mais ils sont très limités et ne concernent que des secteurs affectés par une fracturation verticale intense. Il s'agit de l'angle de la falaise situé dans l'axe de la rue Fred Scamaroni et au niveau du puits Saint-Barthélémy.

En résumé, la mise en charge du massif, majoritairement localisée dans les faciès carbonatés supérieurs, est très limitée du fait de la forte imperméabilisation de surface limitant l'infiltration des précipitations et d'une perméabilité non négligeable dans les faciès carbonatés, guidée par la fracturation et la stratification favorisant un fonctionnement « d'évacuation / lessivage » plutôt que de mise en charge. Les circulations d'eau dans le massif, même réduites, constituent cependant un facteur aggravant à la stabilité du massif (lessivage des fractures ouvertes existantes, fragilisation progressive des ponts rocheux qui subsistent, mise en charge des fractures fermées, développement progressif de conduits karstiques dans les faciès carbonatés).

Ainsi, afin d'éviter les conséquences néfastes des circulations d'eau dans le massif sur sa stabilité, il est recommandé de poursuivre les efforts d'imperméabilisation des « génois »¹, de rénovation des réseaux d'eau et de suppression des structures susceptibles de constituer des puits d'infiltration d'eau du plateau de la haute ville vers l'intérieur du massif (cuves et sous-sols récupérant les eaux de pluie). D'une manière générale, les recommandations émises visent à limiter au maximum, voire de supprimer, toute alimentation en eau du massif.

Il est recommandé la mise en œuvre des actions suivantes afin de suivre l'efficacité des travaux de rénovation de la haute ville et leur impact sur les circulations d'eau dans le massif :

- équiper les réseaux d'eau de la haute ville de compteurs permettant de quantifier leur rendement (AEP) et de systèmes d'écoute pour identifier les fuites (réseaux pluvial et eaux usées), si cela n'a pas déjà été fait. Il est recommandé de mesurer le rendement du réseau AEP tous les ans. Ce suivi permettra de surveiller l'évolution de la situation et anticiper les dégradations ;
- consigner au fur et à mesure la localisation des éventuelles fuites recensées, les volumes d'eau de fuite, et la façon dont l'eau s'est évacuée pendant l'épisode (via les réseaux d'eau pluviale, les citernes enterrées, par infiltration diffuse vers le massif, etc.) ;

¹ Drains historiques qui avaient été creusés dans la roche dans les rues de la ville pour évacuer les eaux pluviales et usées et qui sont désormais empierrés ou bétonnés. Ils présentent une section d'environ 0.50 x 0.50 m.

- surveiller l'état des suintements de la falaise sous la haute ville par un contrôle visuel tous les trois mois pour voir si une évolution peut être constatée (augmentation manifeste des suintements, maintien, ou diminution).

Sommaire

1. Rappel succinct du contexte de l'étude	11
1.1. PROBLEMATIQUE.....	11
1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE	13
2. Hydrogéologie régionale : le bassin miocène de Bonifacio	15
2.1. LES HORIZONS AQUIFERES ET LEURS CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES.....	16
2.2. MANIFESTATIONS KARSTIQUES	17
2.3. LA RECHARGE DES AQUIFERES	17
2.4. LES EXUTOIRES DES AQUIFERES	20
3. Hydrogéologie de la presqu'île de la haute ville de Bonifacio	21
3.1. CARACTERISTIQUES GEOMORPHOLOGIQUES DE LA PRESQU'ILE ET IMPLICATIONS SUR SON HYDROGEOLOGIE	21
3.2. OBSERVATIONS DE TERRAIN COUPLEES GEOLOGIE/HYDROGEOLOGIE	23
3.2.1. Pente de surface versus pendage des couches géologiques	23
3.2.2. Rappel sur les faciès géologiques identifiés sur la falaise de la presqu'île	24
3.2.3. Observations des manifestations d'écoulement d'eau sur la falaise sud	25
3.3. APPORTS DES SONDAGES CAROTTES SUR L'HYDROGEOLOGIE DE LA PRESQU'ILE	33
3.3.1. Résultats des diagraphies	33
3.3.2. Slug test sur F3	34
3.4. ANALYSE DE L'IMPACT DE L'ACTIVITE ANTHROPIQUE SUR L'ALIMENTATION EN EAU DU MASSIF	39
3.4.1. Le réseau d'eau pluviale.....	39
3.4.2. Les citernes enterrées et sous-sols.....	41
3.4.3. Le réseau d'eau potable	41
4. Conclusion : fonctionnement hydrogéologique de la presqu'île de la haute ville de Bonifacio	43
5. Bibliographie	45

Liste des illustrations

Illustration 1 : Géométrie du surplomb (Cerema, 2014, photo BRGM 2018)	12
Illustration 2 : Programme d'étude articulé en 4 blocs d'analyse, le bloc 1 est l'objet de ce rapport	13
Illustration 3 : Carte de situation des éléments de connaissance hydrogéologique du bassin miocène de Bonifacio.	16
Illustration 4 : Esquisse piézométrique de la nappe supérieure du bassin de Bonifacio en octobre 2013, en phase de hautes eaux (Santoni, 2016a). Les isopièzes ont été construites à partir des relevés piézométriques effectués sur les ouvrages CPO-B10, VB-B5, CANF-B7, EB-B1, CAM2-B3, DF-B17, CANP-W5, MAN-B4 et FUNTA-B18.	18
Illustration 5 : Suivi piézométrique du bassin miocène de Bonifacio entre 2009 et début 2020.	19
Illustration 6 : Suivi piézométrique du bassin de Bonifacio et précipitations au Cap Pertusato entre 2015 et début 2020 (station Météo France n°20041001).	20
Illustration 7 : Topographie de la presqu'île et de ses abords, et localisation des 4 profils topographiques de l'illustration ci-après.	22
Illustration 8 : Profils topographiques sur la presqu'île de la haute ville.	22
Illustration 9 : Carte des observations de terrain faites lors de la visite du 28/09/2018.	24
Illustration 10 : Détail des quatre faciès géologiques identifiés sur la falaise de la presqu'île. 1 : Calcarénite sableuse peu fracturée ; 2 : Calcaire arénitique à interlits sableux gris vert ; 3 : Zone de transition vers les grès grossiers du faciès 4 ; 4 : Grès grossier à ciment carbonaté peu fracturé.	25
Illustration 11 : Localisation des stalactites qui suintent sur la falaise dans les faciès 2 et 3, sous la haute ville.	26
Illustration 12 : Localisation des suintements sur la falaise entre la citadelle (à l'est) et la caserne Montlaur (à l'ouest) (sur fond de photographies aériennes issues de Google Maps).	26
Illustration 13 : Traces des gouttes d'eau qui suintent des stalactites, sur l'éboulis.	27
Illustration 14 : Niveau qui suinte dans les grès grossiers, au pied de la haute ville.	27
Illustration 15 : Suintements dans l'Escalier du Roy d'Aragon.	29
Illustration 16 : Suintements sur la paroi à l'ouest de l'Escalier du Roy d'Aragon, en contrebas du parc de jeux d'enfants.	29
Illustration 17 : Exemples de vides observés dans le faciès gréseux n°4, au pied de la falaise de la haute ville.	31
Illustration 18 : Manifestation de phénomènes de dissolution dans les calcarénites du faciès 1, sous la citadelle, au pied de la tour de la Porte de Gênes.	31
Illustration 19 : Photographie aérienne de l'angle de la falaise dans l'axe de la rue Fred Scamaroni (sur fond de photographies aériennes issues de Google Maps).	32
Illustration 20 : Photographies de l'angle de la falaise dans l'axe de la rue Fred Scamaroni.	33
Illustration 21 : Azimut des plans de fracture rencontrés en fonction de la profondeur sur les trois sondages.	34
Illustration 22 : Schématisation d'un slug test (d'après Sanders, 1998) : a) test par analyse du rabattement du niveau d'eau b) test par analyse de la hausse du niveau d'eau. H_0 est la différence entre le niveau d'eau dans l'ouvrage avant le test et le niveau le plus haut atteint après l'insertion d'un volume (d'eau ou d'un objet). H est la différence entre le niveau d'eau avant l'injection et le niveau à un instant t après l'insertion d'un volume.	35

Illustration 23 : Rabattement mesuré dans le forage F3 après injection de l'eau (gauche) et débit de fuite correspondant calculé (droite), en fonction de la profondeur.	36
Illustration 24 : Courbe de la cote H par rapport à la cote H_0 en fonction du temps pour déterminer t_{30} et visualiser la portion de courbe exploitable pour évaluer la perméabilité K (points en jaune).	37
Illustration 25 : Evolution de la cote H en fonction du temps pour identifier les couples t et H... ..	38
Illustration 26 : Calcul de la conductivité hydraulique K pour différents couples de t et H.....	38
Illustration 27 : Localisation du réseau d'eau pluviale (les génois) de la haute ville, des problèmes identifiés par UrbaSud en 2010 et des secteurs fuyards sur le réseau AEP signalés par Kyrnolia sur fond de photographies aériennes de l'IGN (datées d'octobre 2016).	40
Illustration 28 : Débits minimum et maximum journaliers enregistrés par le poste d'écoute de Kyrnolia à l'entrée de la citadelle, sur le réseau de distribution d'AEP, entre 2017 et 2019.	42

Liste des annexes

Annexe 1 Vues en coupe et en plan de la Grotte Saint Barthélémy.....	47
----------------------------------------------------------------------	----

1. Rappel succinct du contexte de l'étude

1.1. PROBLEMATIQUE

La DGPR a produit une note rappelant le contexte global, dont un extrait est présenté ci-après :

« En 2012-2013, le Cerema a réalisé à la demande de la DDTM de la Corse du Sud une carte multialéas « mouvement de terrain » et « hydraulique » dans les secteurs à enjeux de la commune de Bonifacio. Les résultats de cette étude ont été portés à la connaissance de la commune. Elle identifie deux secteurs particulièrement exposés à l'aléa mouvement de terrain : le secteur de la plage de Sutta Rocca et celui de la citadelle dans la vieille ville. Ils ont fait chacun l'objet d'une étude complémentaire en 2014 afin d'affiner l'aléa, de déterminer des protections envisageables pour la plage de Sutta Rocca et d'examiner la faisabilité d'une instrumentation pour la citadelle.

Le secteur de la citadelle, où l'aléa est qualifié de très élevé, s'avère particulièrement problématique. Il est concerné par 2 types de phénomènes : « chute de petits blocs » (<1 m³), posant essentiellement problème pour les éventuels promeneurs en pied de falaise et « effondrement en grande masse » (environ 1000 m³). Le mécanisme de rupture identifié est une érosion par sape du pied de falaise qui conduit à la mise en surplomb de la partie supérieure. La rupture se produit sous l'effet de l'augmentation de la pression hydrostatique à l'intérieur des fractures sub-verticales du massif. Son extension spatiale est conditionnée par le réseau de fractures.

Environ 33 bâtiments (332 habitants à l'année) sont menacés par un effondrement soudain et brutal en grande masse. Le Cerema préconise dans son rapport de 2014, la surveillance de la fracturation pour évaluer le fonctionnement réel du massif, tout en précisant que l'instrumentation mise en place ne pourra pas dans un premier temps servir de système d'alerte. Plusieurs années d'analyse des données seront nécessaires... ».

Il a été convenu entre la DDTM de Corse du Sud et les opérateurs BRGM, Cerema et Ineris (sous le pilotage du BRGM) de produire une étude visant à améliorer la connaissance et l'évaluation de l'aléa « effondrement en grande masse » sous la Citadelle de Bonifacio, et plus particulièrement la zone de surplomb (encorbellement d'environ 20 m) figurant en aléa de niveau très élevé.

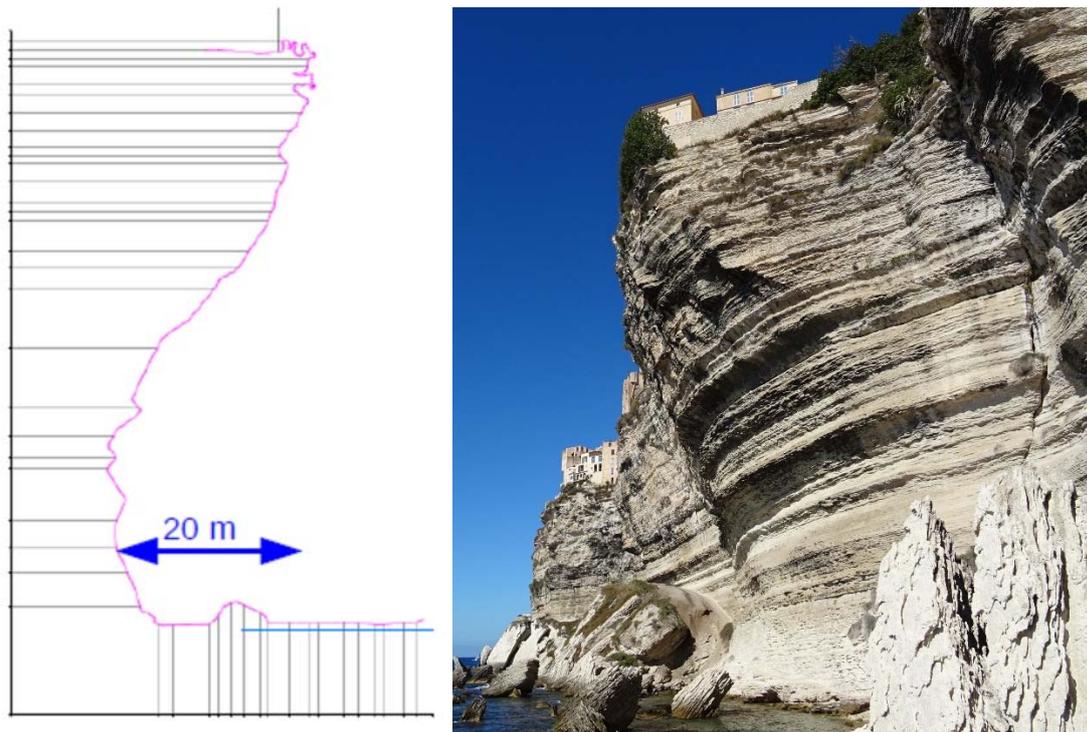


Illustration 1 : Géométrie du surplomb (Cerema, 2014, photo BRGM 2018)

Il s'agit notamment de produire une analyse géologique et structurale détaillée de la Citadelle et de la zone d'étude, avec l'appui de trois forages de reconnaissance et d'essais en laboratoire (bloc d'étude 1), de progresser dans la connaissance du fonctionnement hydrogéologique (bloc d'étude 2B, sujet de ce rapport) du système et de ses conséquences potentielles en matière de fragilisation ou de facilitation des mécanismes de rupture préférentielles pressenties, de progresser également dans la connaissance du comportement du pied de falaise au regard du contexte hydrodynamique maritime (altération hydromécanique de la falaise et action de la houle sur la sape de pied, bloc d'étude 2C).

Bloc	Tâche	Sous tâche	Description	Pilote	Perimètre
0			Synthèse sur les données existantes	CEREMA	Du Port au Cap Petusato
		0,1	Synthèse des analyses faites depuis 2013	CEREMA	
		0,2	Données Disponibles anciennes (BRGM, CETE, CEREMA...)	CEREMA	
		0,3	Partage des données et métadonnées du groupement sur plate-forme e-cenaris, suivi dispositifs d'observation	INERIS	
1			Forages Inclinés	CEREMA	Citadelle
		1,1	Redaction CdC	CEREMA	
		1,2	phase AO / autorisation / etude d'impact	BRGM	
		1,3	Suivi forage	BRGM	
		1,4	Géophysique en forage BHTV + radar	BRGM	
		1,5	Instrumentation extensométrie en forage incliné - benchmark, faisabilité et conception	INERIS	
		1,6	Suivi Instrumentation	INERIS	
2			Etudes complémentaires	BRGM	Citadelle/Peninsule
	2A		Observation du site	INERIS	Citadelle/Peninsule
		2,1	Aquisition et traitement LIDAR terrestre	INERIS	
		2,2	Aquisition et traitement LIDAR aéroporté	BRGM	
		2,3	Complement photogrammetrie	BRGM	
		2,4	Instrumentation de paroi et observation : installation et maintenance	INERIS	
		2,5	Radar Geologique	BRGM	
		2,6	Modelisation Facets	BRGM	
	2B		Complément Hydrogéologique	BRGM	Citadelle/Peninsule
		2,9	Terrain / recueil informations AEP/ EU / Pluvial	BRGM	
		2,10	Valorisation / Analyse exutoires	BRGM	
	2C		Complément Erosion en pied de falaise	BRGM	Citadelle/Peninsule
		2,11	Photo-interpretation falaise	BRGM	
		2,12	Analyse comparative du trait de cote (Litto 3D/Lidar .).	BRGM	
		2,13	Etude historicité + événements extremes	BRGM	
		2,14	Caractérisation régime de Houle	BRGM	
		2,15	Valorisation, scenarii d'érosion	BRGM	
3			Construction d'un modèle partagé	BRGM	Citadelle
	3A		Modèle global	BRGM	
		3,1	Réunions d'échanges	BRGM	
		3,2	Modèle et definition des masses potentiellement instables	BRGM	
	3B		Modèle Geomécanique	INERIS	Citadelle
		3,4	Biblio paramètres géomécaniques et calcul géométrique simple	INERIS	
		3,5	Essais en laboratoire + forage(s) verticaux pour prélèvements	CEREMA	
		3,6	Calcul de stabilité Geomécanique (volume rocheux défini, REX sur dièdre éboulé)	INERIS	
		3,7	Calcul de stabilité Geomécanique (volume identifié par sondages, paramétrage continuité, taux de ponts rocheux, ...)	INERIS	
4			Scenarior de rupture	BRGM	Citadelle
		4,1	Definition Scenarior rupture, Evaluation détaillée de l'aléa	BRGM	
		4,2	Proposition de reponse aux scenarior (Mesures de mitigation - volet surveillance)	BRGM	
		4,3	Accompagnement communication	BRGM	

Illustration 2 : Programme d'étude articulé en 4 blocs d'analyse, le bloc 1 est l'objet de ce rapport

Il s'agit également de mettre en place un système d'observation du comportement du massif, au sein des forages entrepris mais également au droit de la Citadelle et des falaises la délimitant (bloc d'étude 2A).

L'évaluation finale de l'aléa « effondrement en grande masse », et la proposition de mesures de mitigation en fonction du niveau retenu (bloc d'étude 4), est l'objectif final de l'étude à l'horizon de mi 2020, au terme de dix-huit mois d'investigations et d'analyses. L'évaluation de l'aléa s'appuiera sur l'ensemble des éléments informatifs acquis, et sur une modélisation géomécanique des mécanismes de mouvement de terrain jugés comme étant les plus pertinents (blocs d'étude 3A et 3B).

1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Des études globales sur le fonctionnement de l'aquifère de Bonifacio existent (Santoni et al., 2016 a, b, c, Santoni et al., 2018). Elles décrivent les processus de recharge de l'aquifère et montrent notamment qu'ils sont contrôlés par l'infiltration rapide de l'eau de pluie depuis la surface à la faveur des hétérogénéités de la roche. Ces processus ont été étudiés à l'échelle du plateau

carbonaté de Bonifacio mais les investigations n'ont pas porté sur la presqu'île qui constitue l'objet de l'étude.

L'objectif de ce complément est d'analyser les relations entre précipitations, ruissellement de surface, infiltration et circulations dans le massif à la faveur des discontinuités.

Les repérages en falaise d'exutoires favorables (conduits karstiques, présence d'ouvrages anthropiques de type génois) ont été privilégiés ainsi que les conditions de mise en charge du massif. De façon générale, toute émergence présente en falaise a été étudiée pour comprendre son fonctionnement.

Une attention toute particulière a été portée sur des apports éventuels liés à des eaux anthropiques issues de réseaux fuyards (eaux d'assainissement collectif, eaux pluviales, distribution de l'eau potable, localisation de dispositifs d'assainissement autonomes). Les données existantes des éventuels compteurs volumétriques installés sur ces réseaux ont été collectées ainsi que les données de rendement et d'éventuels diagnostics réseaux.

L'eau qui s'infiltré dans le massif de la presqu'île de la haute ville est susceptible d'être le moteur de futurs éboulements. L'objectif de l'étude était donc de tenter de définir les conditions de circulation des eaux et de mise en charge du massif au travers de :

- l'identification de l'origine de l'eau susceptible de s'infiltrer (eau de pluie ?, eau issue des réseaux d'eau anthropiques ?...) (*fonction d'entrée*) ;
- la caractérisation qualitative de la porosité des formations en présence, c'est-à-dire la nature et le volume des vides (porosité karstique ?, fissurale ?, d'interstices ?...) ;
- la caractérisation de leur perméabilité, c'est-à-dire de l'aptitude de la roche à se laisser traverser par l'eau, correspondant à la vitesse à laquelle l'eau circule dans la roche ;
- l'identification des exutoires du massif (présence de sources ?, de suintements ?, décharge diffuse sous-marine ?...) (*fonction de sortie*).

L'ensemble des réponses apportées à ces questions permettront d'esquisser un modèle hydrogéologique de la presqu'île de la haute ville.

2. Hydrogéologie régionale : le bassin miocène de Bonifacio

Etant physiquement peu connectée au reste du bassin hydrographique du causse² de Bonifacio, il est attendu que la presqu'île de la haute ville soit hydrogéologiquement peu connectée également. Ainsi, elle est susceptible de ne pas bénéficier d'apports en eau latéraux. La nappe régionale du bassin ne s'étend donc probablement pas jusqu'à ce massif.

Il est néanmoins proposé d'identifier les comportements hydrogéologiques des différentes formations au travers d'une synthèse hydrogéologique réalisée à l'échelle du bassin miocène pour tenter de mieux comprendre le fonctionnement hydrogéologique de la presqu'île.

Une première étude menée par le BRGM en 2002 avait permis d'établir une première caractérisation géométrique et hydrodynamique du causse de Bonifacio, principalement à partir de la synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques existantes.

Plus récemment, une thèse intitulée « Contributions du multi-traçage isotopique et géochimique à la compréhension des aquifères côtiers : mise en place d'un modèle de fonctionnement de l'aquifère de Bonifacio (Corse-du-Sud) » a été publiée (Santoni, 2016a). Ces travaux ont notamment porté sur l'évaluation des temps de résidence et la caractérisation de l'origine des eaux infiltrées (Santoni et al., 2016c). Ils se sont ensuite poursuivis par des travaux sur les processus de recharge des aquifères du bassin (Santoni et al., 2018) et sur la détection et la quantification des exutoires sous-marins.

Une synthèse de ces différents travaux est proposée ci-après afin de faire l'état des connaissances hydrogéologiques sur le bassin dans son ensemble (Illustration 3).

² On appelle communément causse, les plateaux carbonatés des régions tempérées entaillés de vallées profondes et canyons, présentant les figurés karstiques tels que les pertes, résurgences, dolines, lapiés

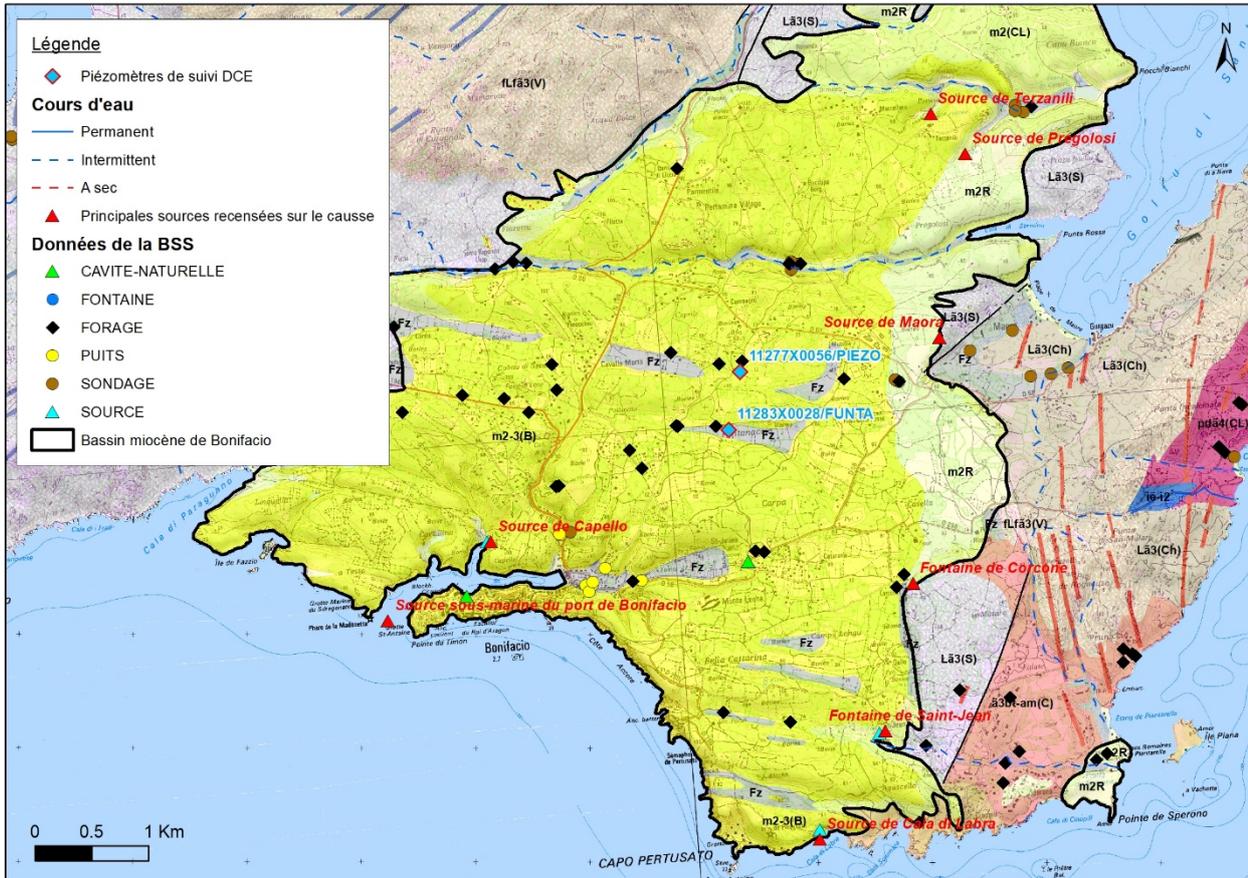


Illustration 3 : Carte de situation des éléments de connaissance hydrogéologique du bassin miocène de Bonifacio.

2.1. LES HORIZONS AQUIFERES ET LEURS CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES

Deux aquifères sont distingués dans le bassin de Bonifacio.

L'aquifère inférieur correspond à la formation de Balistra, dont l'épaisseur peut atteindre une centaine de mètres, et à la partie inférieure de la formation de Cala-di-Labra sus-jacente. Les propriétés hydrodynamiques de cet aquifère, estimées par géophysique (Dorfliger et al., 2002), sont : une teneur en eau inférieure à 2 % et une perméabilité inférieure à $3 \cdot 10^{-7}$ m/s. La nappe est rendue captive par la présence, au toit de cet horizon aquifère, d'un horizon argileux de 5 à 6 m d'épaisseur. Ce niveau sépare l'horizon aquifère inférieur du supérieur.

L'horizon aquifère supérieur correspond au sommet de la formation de Cala-di-Labra et à la formation de Bonifacio, principalement constituée de calcarénites blanches. Les propriétés hydrodynamiques de cet aquifère, estimées par géophysique, sont moyennes : une porosité efficace d'environ 7 % (Dorfliger et al., 2002, Chenux et al., 2018) et une perméabilité comprise entre $1 \cdot 10^{-7}$ et $3 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Des pompages d'essai ont également été menés par des bureaux d'études en avril 2010 dans les deux nappes du bassin. Le pompage réalisé sur la nappe inférieure a mis en évidence une transmissivité de $1,6 \cdot 10^{-3}$ m²/s et un coefficient d'emmagasinement de $3,2 \cdot 10^{-4}$. Deux pompages ont été réalisés en deux points différents de la nappe supérieure, révélant son hétérogénéité. L'un a mis en évidence une transmissivité de $2,2 \cdot 10^{-4}$ m²/s et un coefficient d'emmagasinement

de $7,2 \cdot 10^{-5}$, caractéristiques d'un aquifère captif, et l'autre a mis en évidence une transmissivité de $1,2 \cdot 10^{-3}$ m²/s et un coefficient d'emménagement de $2,1 \cdot 10^{-1}$, correspondant aux caractéristiques d'une nappe libre.

Les potentialités de l'aquifère supérieur du bassin restent limitées, avec des débits de prélèvement n'excédant pas 15 m³/h par ouvrage.

2.2. MANIFESTATIONS KARSTIQUES

Le causse se caractérise par la présence d'un modelé karstique, bien que peu développé du fait de la nature grésocalcaire des dépôts. De manière générale, les indices de karstification se trouvent préférentiellement dans la formation de Bonifacio :

- la morphologie du causse est marquée par plusieurs vallées sèches d'orientation W-E à WNW-ESE correspondant à d'anciens axes de drainage ;
- des cavités sont présentes le long du littoral (grottes du Capo Pertusato, de Saint-Antoine et du Sdragonato). La grotte la plus importante est celle du Sdragonato, à l'entrée du port de Bonifacio, avec une salle d'environ 50 m de long qui se poursuit par une galerie d'une trentaine de mètres. Aucune venue d'eau n'est cependant visible au niveau de cette cavité. La cavité du puits Saint-Barthélémy (Annexe 1), située sur la presqu'île de la haute ville, au pied de la falaise, est également un témoin de la karstification observée dans ces formations. Elle est évoquée dans les chapitres suivants. Il est à noter que ces cavités se développent le long de plans de fractures.

2.3. LA RECHARGE DES AQUIFERES

Les travaux de Santoni et al. (2016 et 2018) décrivent les processus de recharge des aquifères du bassin miocène de Bonifacio et montrent qu'ils sont contrôlés par l'infiltration rapide de l'eau de pluie depuis la surface (à la faveur des hétérogénéités de la roche telles que les fractures plus ou moins agrandies par dissolution, ainsi que via les interstices de la roche). Le taux moyen annuel de recharge de l'aquifère calculé est de 26 % par rapport aux 550 mm de précipitations annuelles moyennes mesurées sur la période de 1980 à 2014 (ces ratios varient d'une année à l'autre). Une part non négligeable d'alimentation allochtone en provenance des massifs granitiques alentours a également été mise en évidence et représenterait un peu plus de 20 % au total.

L'utilisation des isotopes du strontium a permis de quantifier les mélanges au sein des différents compartiments de l'aquifère (Santoni et al., 2016b) :

- dans l'aquifère supérieur : 22 % de recharge allochtone, 19 % d'eau en provenance de l'aquifère inférieur (par drainance verticale) et 59 % d'eau de la recharge autochtone ;
- dans l'aquifère inférieur : 24 % de recharge allochtone, 24 % d'eau en provenance de l'aquifère supérieur et 52 % d'eau à long temps de résidence (de 35 à 60 ans environ).

La recharge fournie par les granites environnants fracturés a pu être quantifiée de façon relative et représente jusqu'à un quart de la recharge du plateau carbonaté. Cette recharge naturelle additionnelle est donc significative et doit être prise en compte dans le fonctionnement de l'aquifère. Elle représente un terme supplémentaire à considérer dans le bilan hydrologique.

Des esquisses piézométriques de l'aquifère supérieur du bassin miocène de Bonifacio ont été dessinées par Santoni dans le cadre de sa thèse en 2016 (Illustration 4). Ces esquisses piézométriques font apparaître deux principales zones de recharge, une au centre du plateau (pseudo-dôme piézométrique dans l'axe de la vallée de Saint-Julien) et une autre en limite nord-ouest, au contact des granites. Depuis ces zones de recharge, les eaux souterraines semblent s'écouler vers le port de Bonifacio au sud et le golfe de Sant'Amanza au nord-est. Dans les zones de recharge, le battement de la nappe peut être significatif, surtout au niveau de la limite nord-ouest. Ces observations permettent donc de localiser les points d'entrée des eaux météoriques dans le réservoir souterrain et d'apporter un premier regard sur l'organisation spatiale des écoulements jusqu'à leurs exutoires naturels en mer méditerranéenne ou tyrrhénienne.

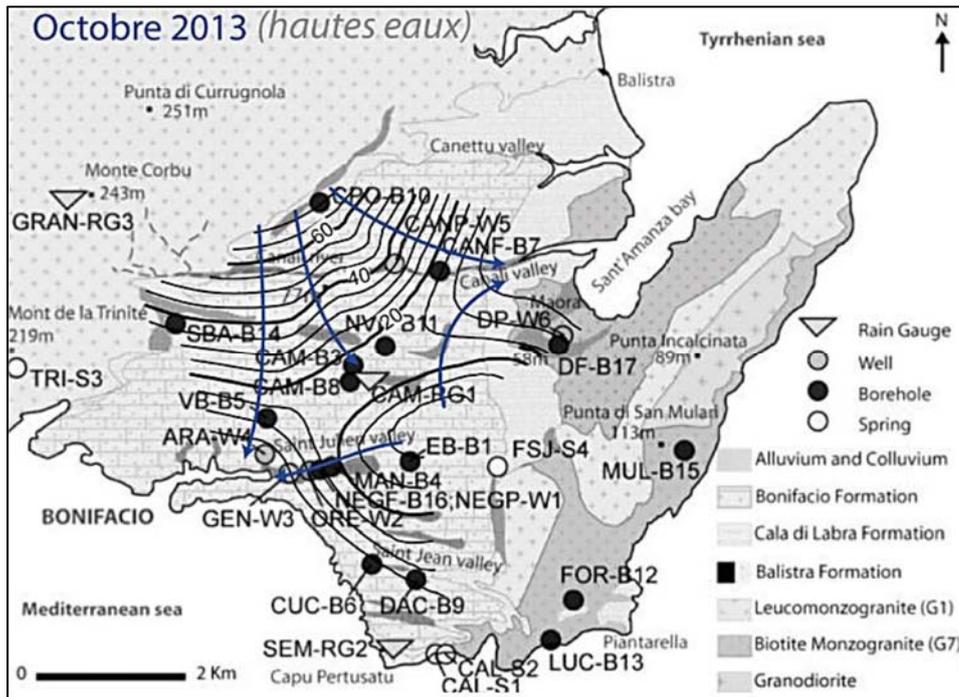


Illustration 4 : Esquisse piézométrique de la nappe supérieure du bassin de Bonifacio en octobre 2013, en phase de hautes eaux (Santoni, 2016a). Les isopièzes ont été construites à partir des relevés piézométriques effectués sur les ouvrages CPO-B10, VB-B5, CANF-B7, EB-B1, CAM2-B3, DF-B17, CANP-W5, MAN-B4 et FUNTA-B18.

Deux piézomètres du réseau piézométrique DCE (Directive Cadre sur l'Eau) de suivi des masses d'eau souterraine suivent les deux niveaux aquifères, au centre du plateau (Illustration 4) :

- l'ouvrage référencé 11283X0028/FUNTA dans la BSS (Banque de données du Sous-Sol) suit l'aquifère supérieur, depuis 2009 ;
- l'ouvrage 11277X0056/PIEZO suit l'aquifère inférieur, depuis 2013.

Ces suivis mettent en évidence :

- une charge hydraulique plus élevée dans l'aquifère inférieur que dans le supérieur dans ce secteur (Illustration 5). Sur la période des données disponibles, elle oscille entre 22,20 et 23,40 m NGF, ce qui représente une amplitude supérieure à 1 m. La charge hydraulique de l'aquifère supérieur a quant à elle varié entre 17,90 et 19,90 m NGF depuis 2009 ;

- une recharge annuelle marquée par une certaine inertie sur les deux aquifères (Illustration 5). La réaction aux précipitations semble décalée de quelques mois et semble différente pour les deux aquifères. Contrairement à ce qui est attendu, le piézomètre implanté dans la nappe inférieure enregistre une réactivité plus forte et des phases de recharge plus précoces que celui qui est implanté dans la nappe supérieure ;
- la piézométrie de l'aquifère supérieur, suivie depuis plus longtemps, montre une augmentation des niveaux d'étiage entre la période 2010-2013 et de 2013 à aujourd'hui (Figure 5). La chronique souffre toutefois d'une période de lacune et l'enregistrement effectué sur l'aquifère inférieur ne permet pas de faire de comparaison directe. Mais l'augmentation brutale des niveaux observée sur la courbe rouge en 2013 semble toutefois témoigner d'une recharge plus efficace que les années précédentes et pourrait expliquer l'augmentation précédemment mentionnée sur l'aquifère supérieur. Pour Santoni et al. (2016a), ces fluctuations traduisent une dynamique pluriannuelle d'alimentation des aquifères du bassin. Cette tendance reste néanmoins à confirmer par la poursuite de l'acquisition de données (plusieurs dizaines d'années sont en effet nécessaires pour qualifier des cycles pluriannuels) ;
- l'épisode pluvieux du 1^{er} octobre 2015 présentant le cumul journalier le plus important sur la période 2015-2019, avec 134 mm de précipitations, n'a pas engendré de phase de recharge de l'aquifère supérieur (Illustration 6). Cet évènement intense très ponctuel s'est probablement traduit par un fort ruissellement, limitant l'infiltration (une forte évapotranspiration n'est pas à exclure non plus, mais ces données ne sont pas disponibles sur la station Météo France de Cap-Pertusato).

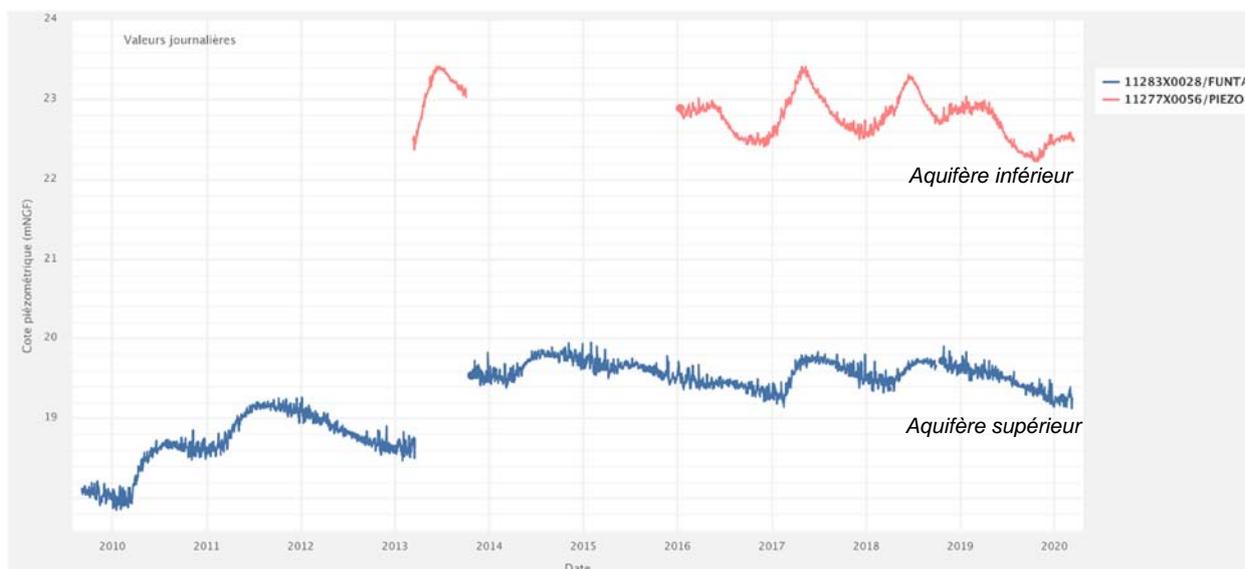


Illustration 5 : Suivi piézométrique du bassin miocène de Bonifacio entre 2009 et début 2020.

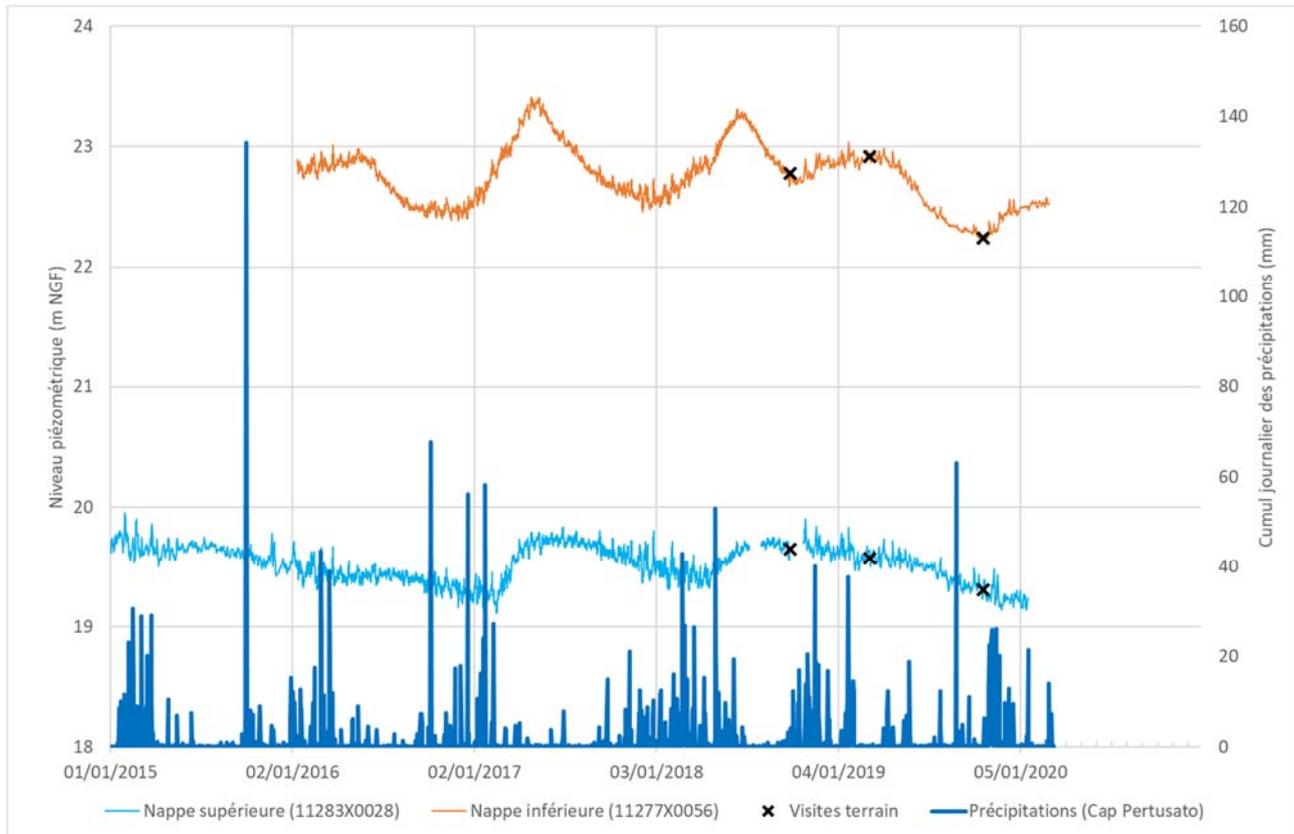


Illustration 6 : Suivi piézométrique du bassin de Bonifacio et précipitations au Cap Pertusato entre 2015 et début 2020 (station Météo France n°20041001).

De façon plus générale, la région de Bonifacio présente une évapotranspiration élevée, cohérente avec le climat méditerranéen qui y règne et le régime de vent important. L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle a été estimée entre 897 à 1258 mm selon la méthode de calcul (Santoni et al., 2016b). Ce régime implique une recharge très souvent nulle des aquifères en période estivale.

2.4. LES EXUTOIRES DES AQUIFERES

Au niveau du causse, moins de dix sources sont dénombrées (Illustration 3), dont deux au niveau du littoral (sources de Cala di Labra et de Capello) et une source sous-marine (entre le phare de la Madonetta et la grotte Saint-Antoine). Dans l'ensemble, il s'agit de sources à faible débit dont le régime n'est pas connu.

Comme suggéré par Dorfliger et al. (2002), Santoni et al. (2020) ont étudié les exutoires sous-marins du bassin miocène par une approche « multi-traçages » combinant l'analyse de photographies aériennes infrarouges, de températures de l'eau, de profils de conductivité électrique, des ions majeurs et de radionucléides (^2H , ^{18}O , ^{222}Rn , ^{223}Ra et ^{224}Ra). Cette étude a mis en évidence des sorties à faible débit d'écoulement au niveau du port de Bonifacio, de la Baie de Sant'Amanza et de la Cala di Stentinu.

3. Hydrogéologie de la presqu'île de la haute ville de Bonifacio

3.1. CARACTERISTIQUES GEOMORPHOLOGIQUES DE LA PRESQU'ILE ET IMPLICATIONS SUR SON HYDROGEOLOGIE

La presqu'île de la haute ville est peu large et de forme allongée. De par ses modestes dimensions (1.4 km de long en est-ouest et 0.3 km de large en nord-sud), elle constitue de fait un réservoir aquifère limité.

La morphologie de surface de la presqu'île n'est pas plane. A l'est de la haute ville il existe deux thalwegs incisant profondément le plateau selon un axe globalement orienté nord-sud :

- le premier, directement à l'est de la citadelle, est celui de la Montée Rastello ;
- le second est celui qu'emprunte la route D260 qui va vers Pertusato, situé à l'est sud-est du port.

Les profils topographiques réalisés à partir du Lidar de l'IGN (levés réalisés en octobre 2016, Illustration 7 et Illustration 8) mettent ainsi en évidence que les fonds de ces thalwegs atteignent respectivement les altitudes de 14 et 11,50 m NGF. Les parties hautes de la presqu'île présentent de leur côté une altitude globalement comprise entre 60 et 65 m NGF. Ces incisions engendrent ainsi une différence d'altitude d'environ 50 m. Elles constituent donc, de fait, des axes de drainage des formations carbonatées dans ce secteur.

D'après les esquisses piézométriques dessinées par Santoni (2016a) (Illustration 4), la direction des écoulements de la nappe de l'aquifère supérieur est orientée de l'est vers l'ouest à l'approche du port. Ainsi, tout écoulement de la nappe régionale dont l'altitude serait supérieure à 11,50 m NGF sera intercepté par le thalweg de la D260 situé le plus à l'est et n'atteindra pas la presqu'île qui se situe hydrauliquement en aval.

En outre, d'après ces esquisses, le niveau piézométrique se situe globalement à 10 m NGF vers le thalweg de la D260 et à environ 5 m NGF à l'entrée du port, soit à un niveau inférieur au fond de ces deux thalwegs. Bien qu'il soit attendu un niveau piézométrique proche de 0 m NGF au niveau du port, dans cette configuration il reste donc possible que la nappe régionale se poursuive jusqu'au droit de la presqu'île, avec des charges hydrauliques très faibles. La source sous-marine observée à la sortie du goulet du port (Illustration 4) pourrait notamment témoigner de ces écoulements souterrains.

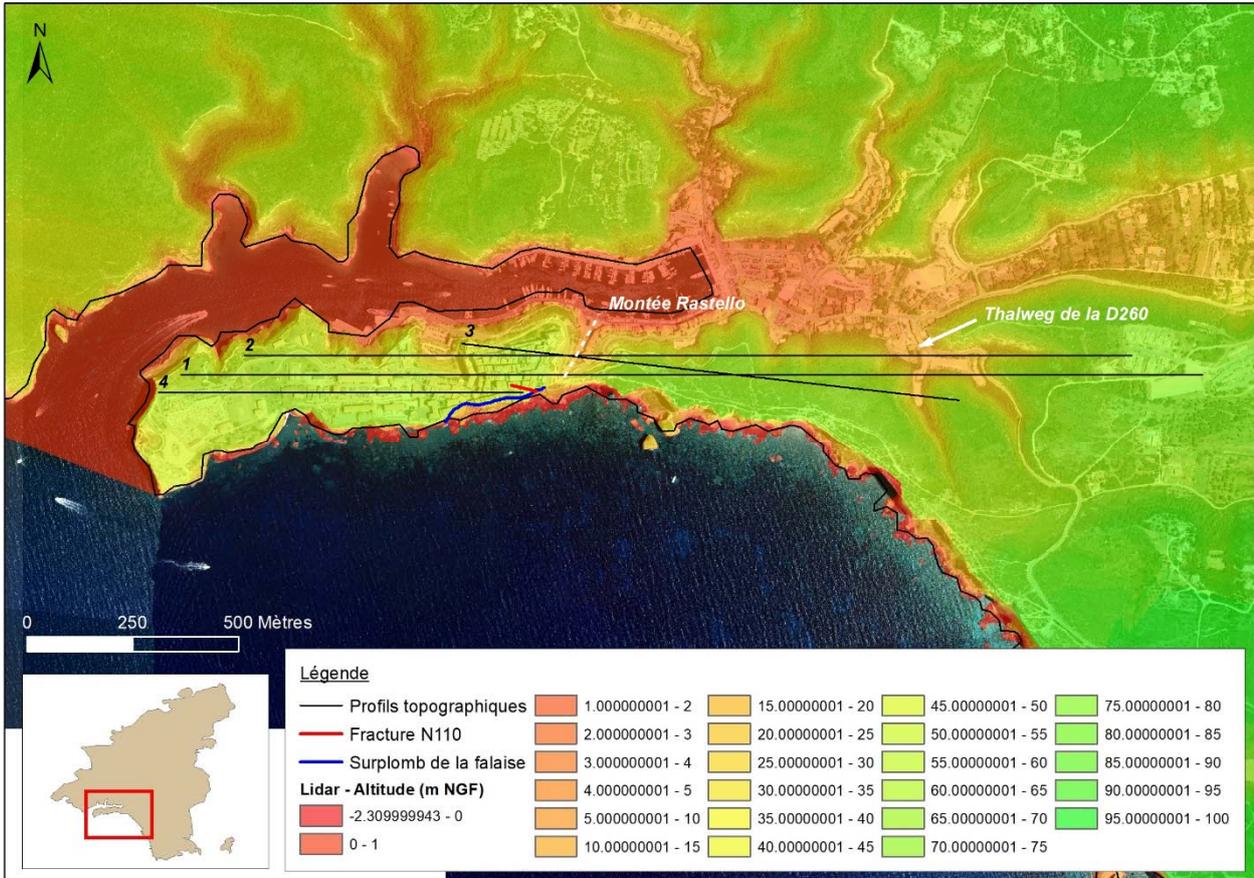


Illustration 7 : Topographie de la presqu'île et de ses abords, et localisation des 4 profils topographiques de l'illustration ci-après.

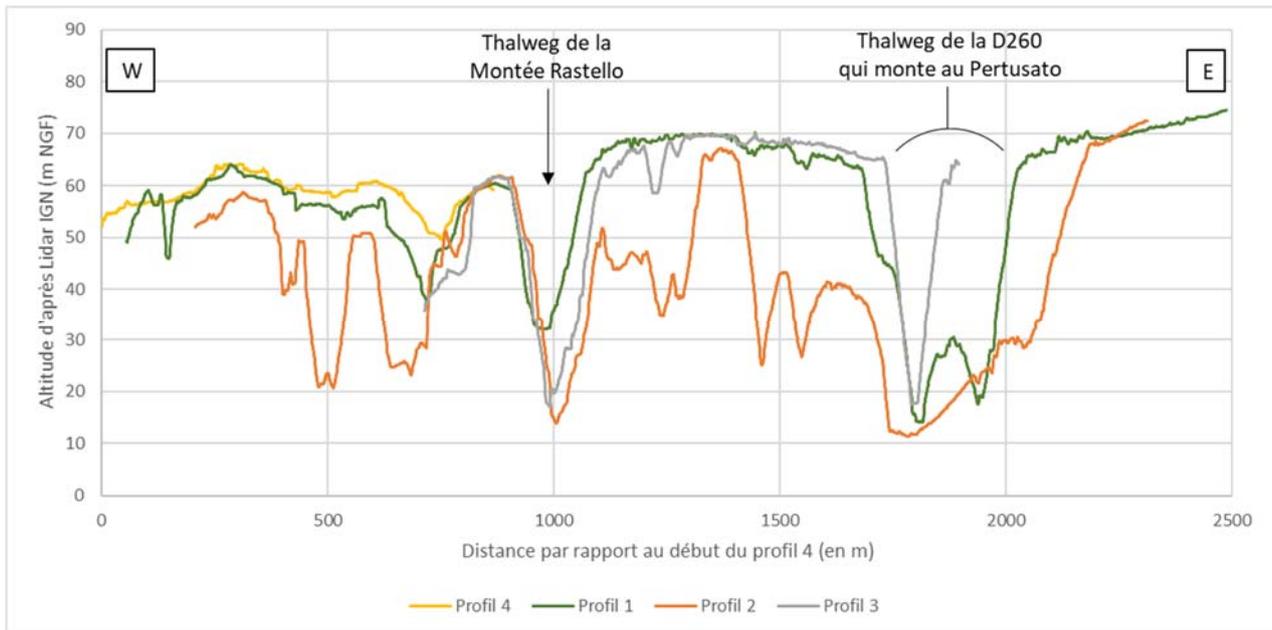


Illustration 8 : Profils topographiques sur la presqu'île de la haute ville.

3.2. OBSERVATIONS DE TERRAIN COUPLEES GEOLOGIE/HYDROGEOLOGIE

Des reconnaissances de terrain ont été menées le 28/09/2018 et le 22/10/2019, en fin de saison estivale et avant la reprise des précipitations automnales (excepté l'épisode pluvieux de fin août 2019 d'environ 60 mm).

La première visite réalisée en septembre 2018 par un géologue et un hydrogéologue avait pour objectif de faire des observations couplées et d'identifier de manière qualitative l'influence de la géologie sur l'hydrogéologie et les écoulements de l'eau au sein du massif en général.

3.2.1. Pente de surface versus pendage des couches géologiques

En premier lieu, il est intéressant de noter que la pente de surface du terrain de la haute ville est orientée vers le nord (Illustration 9), évacuant donc les écoulements de surface qui ne s'infiltrent pas vers le port, et non vers la falaise. Seuls deux secteurs présentent une pente de surface dans d'autres directions :

- la place du marché où se situe la fracture N110³, avec une pente en direction du sud-est ;
- l'extrémité ouest de la presqu'île, au niveau du cimetière marin, avec une pente vers le sud-ouest.

Le centre-ville de la haute ville est largement recouvert par différents types de revêtements censés être imperméables, et ainsi favoriser le ruissellement plutôt que l'infiltration (pavés ou pierres cimentées, béton, asphalte).

Au contraire de la pente de surface, le pendage des couches géologiques de la presqu'île est globalement orienté vers le sud-ouest. Cette configuration est susceptible d'engendrer un drainage du massif vers le sud (vers la falaise côté mer), selon le pendage des couches (stratification).

³ Fracture identifiée en paroi et à l'origine de la prise en compte en 2013 d'un aléa « effondrement » très élevé dans ce secteur.

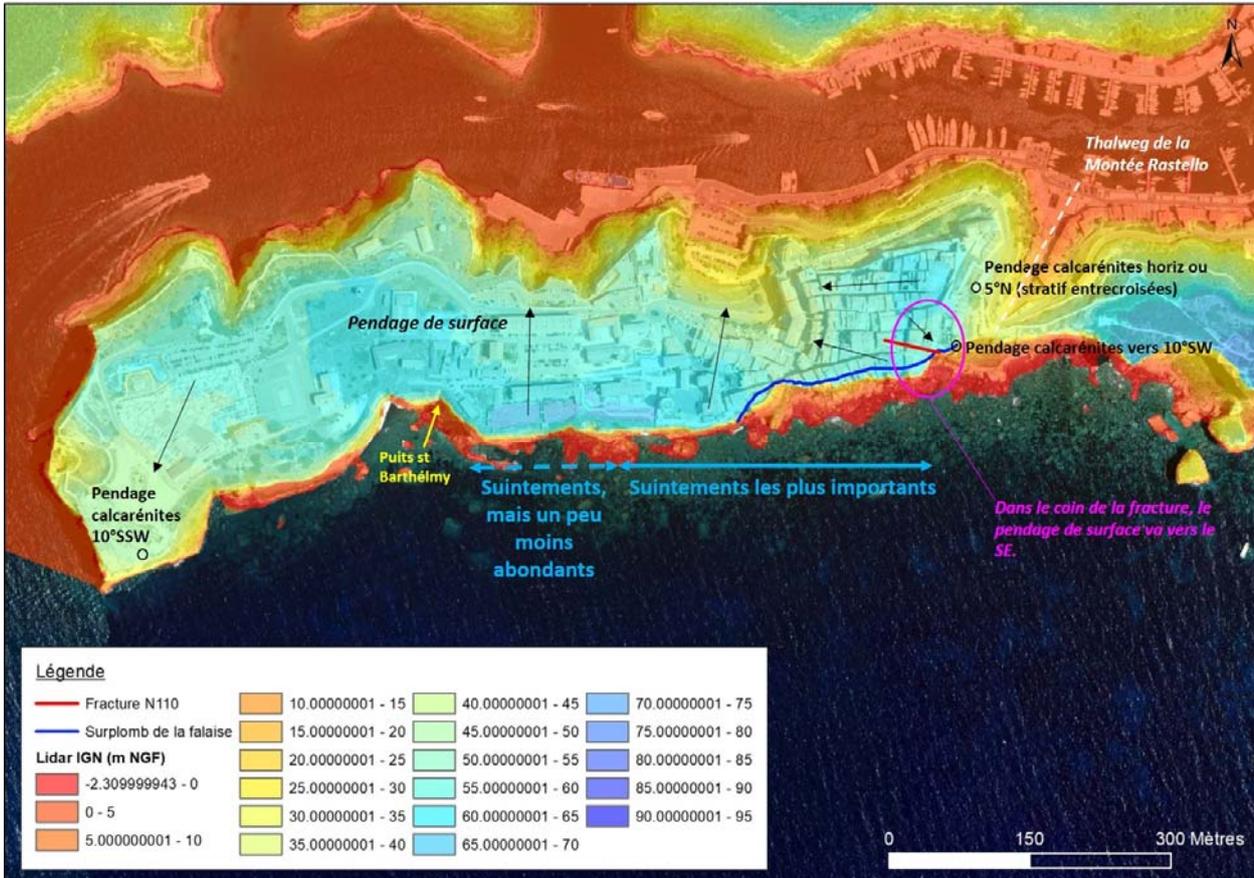


Illustration 9 : Carte des observations de terrain faites lors de la visite du 28/09/2018.

3.2.2. Rappel sur les faciès géologiques identifiés sur la falaise de la presqu'île

L'analyse des carottes des trois sondages réalisés sur la place du Marché (cercle rose sur l'illustration 9) couplées aux observations sur les affleurements ont permis d'établir la coupe géologique de la presqu'île. Quatre faciès ont été identifiés. Ils montrent une évolution de faciès de la partie supérieure carbonatée vers la partie inférieure plus gréseuse qui est cohérente avec les différences de compétences observées sur la falaise (Illustration 10) :

- faciès 1 : calcarénite sableuse peu fracturée ;
- faciès 2 : calcaire arénitique à interlits sableux gris vert ;
- faciès 3 : zone de transition vers les grès grossiers du faciès 4 ;
- faciès 4 : grès grossier à ciment carbonaté peu fracturé.

Il est à noter que le niveau noté « 4CC36 » correspond au dernier niveau carbonaté en surplomb. Il est situé à 36 m de profondeur par rapport au sol (haute ville).

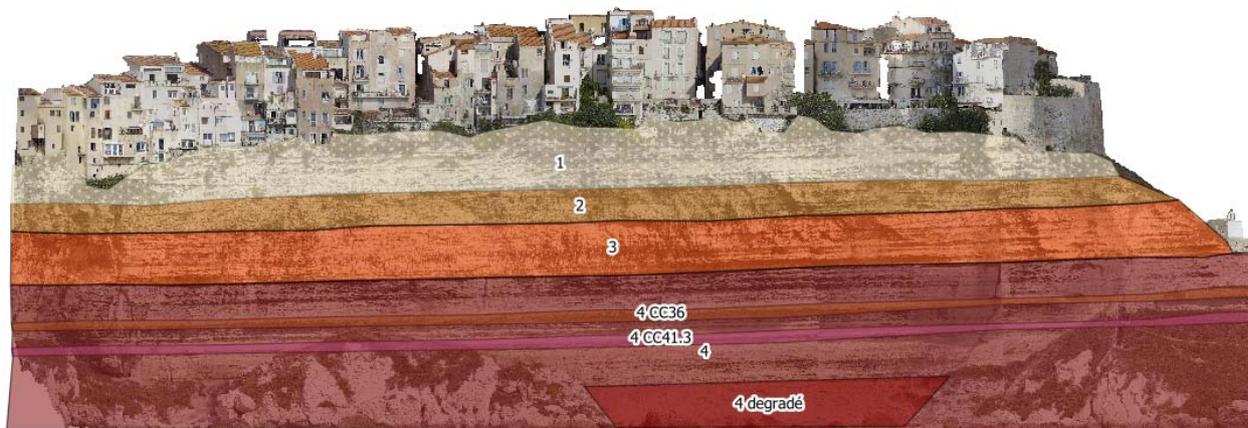


Illustration 10 : Détail des quatre faciès géologiques identifiés sur la falaise de la presqu'île. 1 : Calcarénite sableuse peu fracturée ; 2 : Calcaire arénitique à interlits sableux gris vert ; 3 : Zone de transition vers les grès grossiers du faciès 4 ; 4 : Grès grossier à ciment carbonaté peu fracturé.

3.2.3. Observations des manifestations d'écoulement d'eau sur la falaise sud

La falaise sud de la presqu'île est marquée par la présence de nombreuses stalactites (Illustration 11 et Illustration 12).

Elles présentent les caractéristiques suivantes :

- elles sont localisées dans les faciès 2 et 3 qui sont respectivement les calcaires arénitiques à interlits sableux gris verts et la zone de transition vers les grès grossiers du faciès 4 (Illustration 13). Ce sont les faciès les plus compétents ;
- elles sont les plus nombreuses sous la haute ville, entre l'aplomb de la Place du Marché et la mairie de Bonifacio (correspondant à l'Escalier du Roy d'Aragon) ;
- elles suintent tout au long de l'année (du moins, sur la période de la présente étude) ;
- elles sont marquées, par endroit, par de la végétation à tendance hygrophile.

Dans les grès grossiers à ciment carbonaté (faciès 4, en position inférieure sur la falaise), il n'y a plus de stalactites, et peu de suintements. Les niveaux plus indurés qui se détachent dans ce faciès ne sont pas le siège de suintements marqués, à l'exception d'un niveau que l'on peut suivre depuis la plage de Sutta Rocca jusqu'à l'éboulis qui le masque (Illustration 14).



Illustration 11 : Localisation des stalactites qui suintent sur la falaise dans les faciès 2 et 3, sous la haute ville.



Illustration 12 : Localisation des suintements sur la falaise entre la citadelle (à l'est) et la caserne Montlaur (à l'ouest) (sur fond de photographies aériennes issues de Google Maps).



Illustration 13 : Traces des gouttes d'eau qui suintent des stalactites, sur l'éboulis.

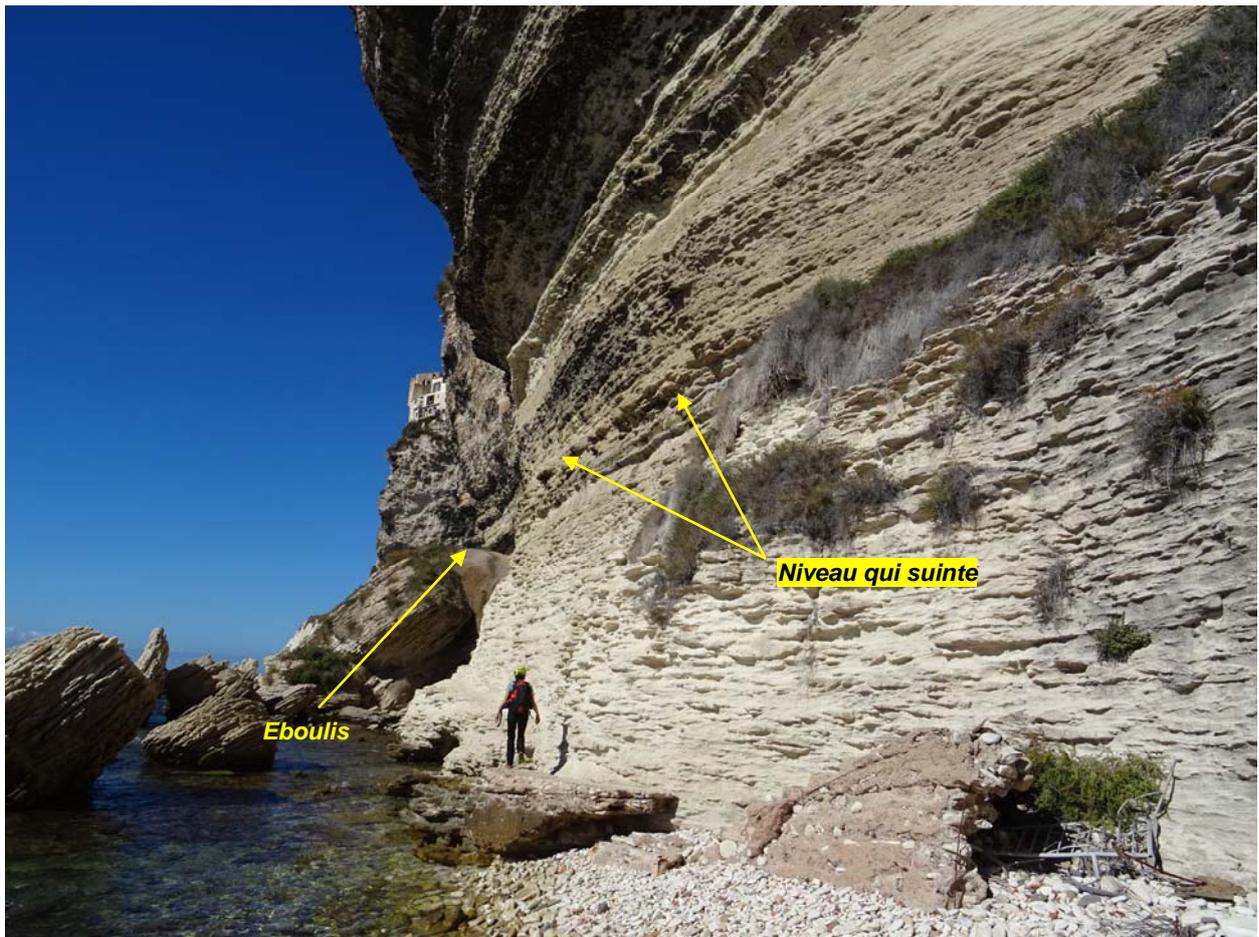


Illustration 14 : Niveau qui suinte dans les grès grossiers, au pied de la haute ville.

A l'est du thalweg de la Montée de Rastello (à l'est de la haute ville), des stalactites sont visibles sur la falaise dans les mêmes faciès que sous la haute ville, mais en faible nombre, et il n'y a pas de traces de suintements permanents. Il en est de même à l'extrémité ouest de la presqu'île, au droit du cimetière marin. En outre, il n'y a pas de telles stalactites sur les falaises qui surplombent le port de Bonifacio, côté nord de la presqu'île. Cette dernière observation prouve que les eaux qui s'infiltrent dans le massif s'écoulent globalement vers le sud, selon le pendage des couches géologiques.

Les suintements observés sur la falaise sous la haute ville sont dans les faciès 2 et 3 les plus calcaireux, et plus particulièrement localisés au niveau des fissures subverticales qui s'expriment dans ces bancs dont le plan est orienté nord-sud (les plans mesurés sur le terrain s'échelonnent entre N170 et N20). Ces fissures s'expriment très peu dans les niveaux gréseux inférieurs.

Il est à noter que la position en surplomb de ces niveaux calcaireux à stalactites est favorable à leur présence.

La position haute de ces suintements exclut par ailleurs qu'ils soient alimentés par la nappe régionale du bassin miocène, compte-tenu de l'existence des thalwegs mentionnés précédemment (Montée Rastello et D260).

Il n'a pas été possible de quantifier ces suintements par des mesures de débit du fait de leur dispersion sur une large surface de la falaise et de leur inaccessibilité. Cette eau n'a par ailleurs pas pu être prélevée, ne permettant pas la réalisation d'analyses chimiques pour tenter de déterminer l'origine de l'eau (seules les eaux usées auraient éventuellement pu être identifiées par l'analyse des isotopes du bore, des perborates étant contenus dans les lessives).

Au niveau de l'EEscalier du Roy d'Aragon et directement à l'ouest, sur la falaise, des suintements sont visibles, marqués par des plantes hygrophiles, mais pas par des stalactites (Illustration 15 et Illustration 16). Après discussion avec l'employé de l'Office Municipal de Tourisme de Bonifacio lors de la visite de terrain du 22/10/2019, il apparaît que ces écoulements sont plus abondants depuis que les espaces verts du parc de jeux d'enfants et de l'Espace Saint-Jacques sont arrosés. Ce changement de pratiques date de 2017 et l'absence de stalactites semble témoigner d'écoulements récents. Au vu des faibles surfaces arrosées et aux faibles quantités d'eau nécessaires (espèces méditerranéennes), il paraît cependant plus probable que les infiltrations des au niveau des terrains non imperméabilisés au niveau de la caserne Montlaur, de la cour d'école ou des jardins autour de l'église Saint Dominique et Espace Saint-Jacques soit à l'origine des suintements.

Au-delà de ce secteur, vers l'ouest, à partir de l'aplomb de la caserne Montlaur, les suintements sont réduits, voire absents.

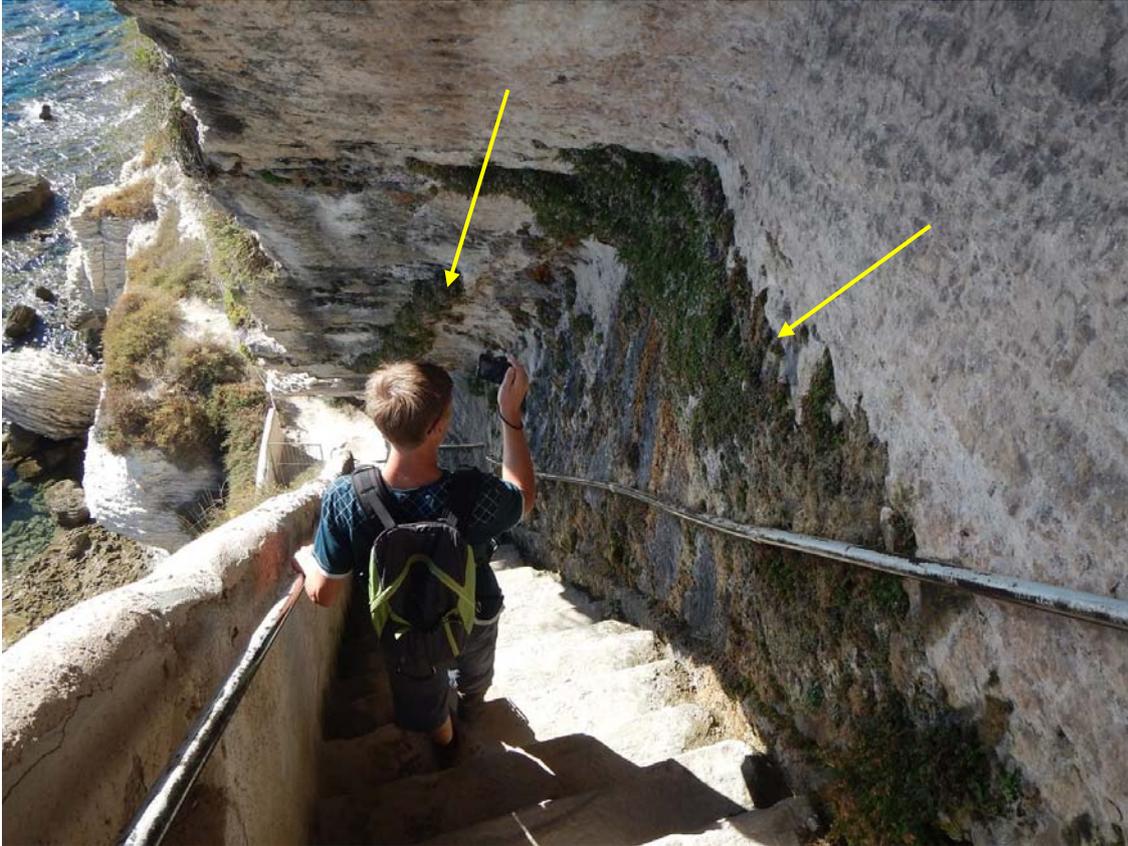


Illustration 15 : Suintements dans l'Escalier du Roy d'Aragon.

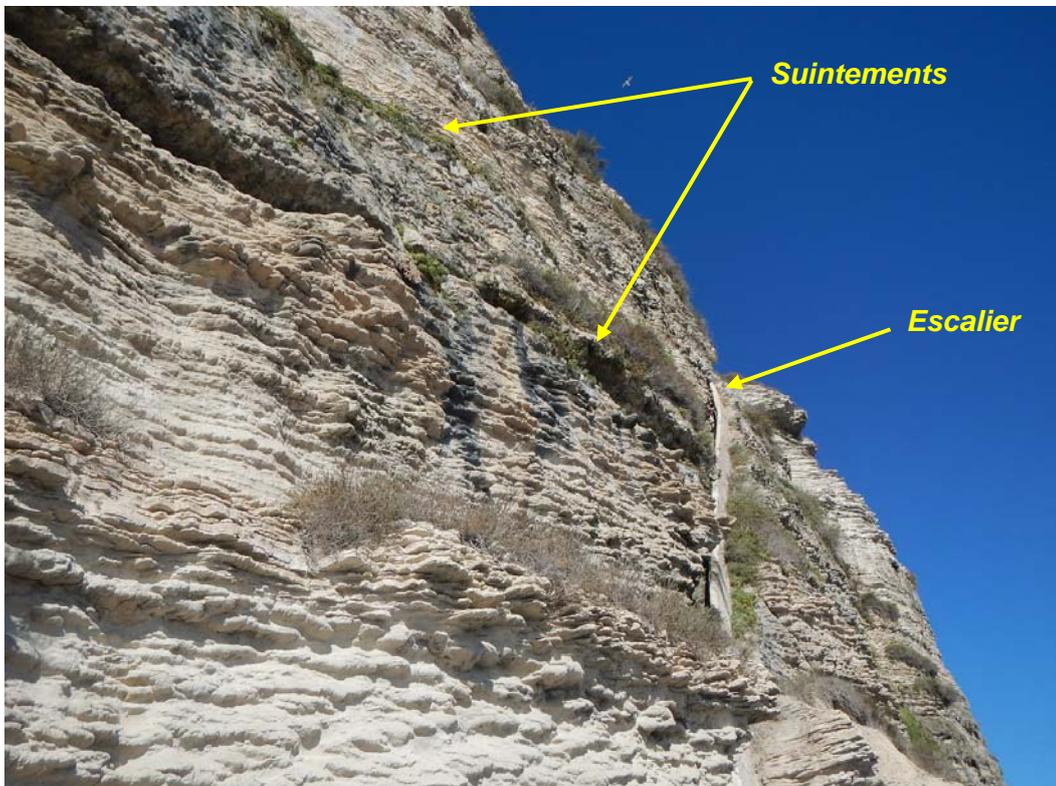


Illustration 16 : Suintements sur la paroi à l'ouest de l'Escalier du Roy d'Aragon, en contrebas du parc de jeux d'enfants.

La falaise est également marquée par des phénomènes de karstification de relativement faible ampleur (ou phénomènes d'ouverture de vides). Outre la cavité située à la base du puits Saint-Barthélémy, des vides sont observés dans les niveaux calcaireux, mais également dans les niveaux plus gréseux de la base. Ils témoignent d'épisodes de lessivage par des écoulements d'eau a priori temporaires (Illustration 17), comme l'ouverture qui est observée sur la fracture N110 sous la Place du Marché.

Des petites cavités pluri-centimétriques sont visibles dans les calcarénites du faciès 1 sur un affleurement situé sous la tour de la Porte de Gênes, à l'entrée de la citadelle (affleurement faisant face au nord) (Illustration 18). Elles témoignent de phénomènes de dissolution le long des fissures sub-verticales.

Le puits Saint-Barthélémy, situé dans la caserne Montlaur, à l'ouest de la haute ville, atteint à sa base, située à une soixantaine de mètres de profondeur, une cavité qui s'est développée le long d'une faille orientée nord nord-est / sud sud-ouest (N195). La cavité est ouverte sur la falaise sud, pratiquement au niveau de la mer, et est occupée par un petit lac. Une lentille d'eau douce surnage sur l'eau salée plus dense. Le puits de 65 m de profondeur et de 3 m de diamètre construit en 1858 était destiné à l'exploitation de cette ressource en eau, à l'aide d'une chaîne actionnée par une éolienne (et plus tard, par des ânes puis des moteurs) et équipée de godets. L'eau ainsi récupérée servait peu à la consommation ordinaire, assurée au quotidien par des citernes montées sur des charrettes en provenance du puits de Longone, près du Port de Bonifacio, ou par la récupération de l'eau de pluie. Elle aurait par contre assuré une autonomie en cas de forte sécheresse ou de repli de la population dans la citadelle. Il est intéressant de noter qu'un rapport de médecin militaire précisait, en 1893, que l'eau du puits était parfaite pour l'hygiène et « buvable malgré un petit goût salé qui ne rendait pas malade » (D'après Tercé in Bonneau et al., 2014), témoignant d'une faible ressource en eau douce disponible dans le massif.

Ces différentes observations montrent que ce sont principalement les fissures qui confèrent une certaine porosité et perméabilité au massif de la presqu'île. Les petits conduits karstiques, correspondant à l'agrandissement par dissolution ou par simple lessivage des fissures préexistantes, et la porosité d'interstices, contribuent également à la capacité du massif à laisser l'eau s'écouler à travers lui.



Illustration 17 : Exemples de vides observés dans le faciès gréseux n°4, au pied de la falaise de la haute ville.



Illustration 18 : Manifestation de phénomènes de dissolution dans les calcarénites du faciès 1, sous la citadelle, au pied de la tour de la Porte de Gênes.

- **Zone sensible située dans l'axe de la rue Fred Scamaroni**

L'angle que forme la falaise dans l'axe de la rue Fred Scamaroni apparaît comme sensible à d'éventuels problèmes d'effondrement (Illustration 19 et Illustration 20). Cette zone présente en effet :

- une fracturation intense, orientée nord ;
- des suintements importants le long de ces plans de fracture ;
- dans l'axe de la rue, une topographie caractérisée par une dépression susceptible de favoriser la concentration des écoulements ;
- et une morphologie en surplomb au niveau des niveaux à calcarénites ainsi qu'au pied de la falaise, dans le faciès gréseux, à l'endroit de la petite cavité formée.

L'état des réseaux d'eau dans ce secteur est discuté dans le chapitre suivant.

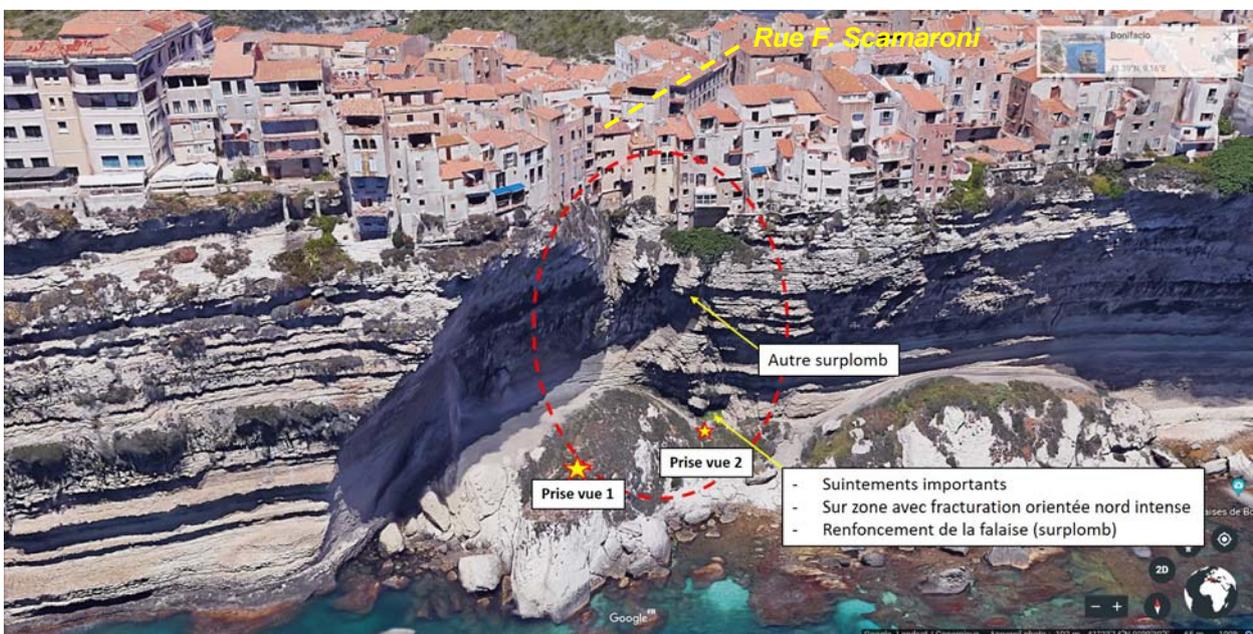
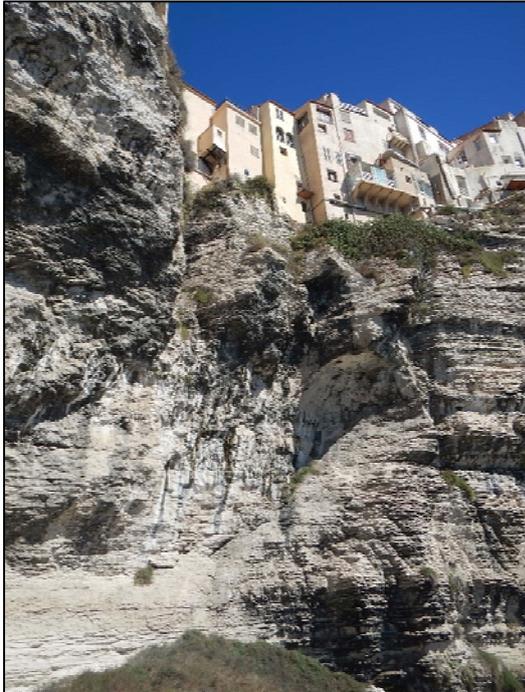


Illustration 19 : Photographie aérienne de l'angle de la falaise dans l'axe de la rue Fred Scamaroni (sur fond de photographies aériennes issues de Google Maps).

Prise de vue 1 : Zone présentant de nombreux plans de fractures et de suintements.



Prise de vue 2 : Renflement à la base de la falaise dans le faciès gréseux formant une petite cavité. Nombreux suintements et fracturation subverticale orientée au nord intense.



Illustration 20 : Photographies de l'angle de la falaise dans l'axe de la rue Fred Scamaroni.

3.3. APPORTS DES SONDAGES CAROTTES SUR L'HYDROGEOLOGIE DE LA PRESQU'ILE

3.3.1. Résultats des diagraphies

L'analyse des diagraphies caméra des trois sondages carottés réalisés sur la place du Marché a mis en évidence la présence de fractures plus ou moins ouvertes et de petits conduits karstiques.

Ces conduits ont été observés sur le forage SC2-F2 à 27,50 et 28,50 m de profondeur. Ils sont localisés dans le faciès 3 de transition entre les calcarénites et le faciès gréseux, celui qui correspond au dernier surplomb de la falaise présentant des stalactites. Bien qu'il ait été observé quelques suintements d'eau à des niveaux inférieurs sur la falaise, ce niveau situé entre 27,50 et 28,50 m de profondeur par rapport au sol (haute ville) peut être considéré comme le niveau collecteur de la majorité des eaux infiltrées au droit de la haute ville. Il est intéressant de noter que ce vide observé n'est pas rempli d'eau au droit du forage. Cela implique qu'il n'y a pas de mise en charge dans ce secteur, aux abords de la fracture N110.

L'azimut des plans de fracture rencontrés a été mesuré dans les trois sondages via les diagraphies. Ces mesures sont reportées dans l'illustration 21 ci-après. Les directions principales de l'azimut sont N90 et N270, correspondant à des plans de fracture orientés nord-sud. Elles confirment les observations des fractures faites en falaise.

Ces fractures sont majoritairement localisées entre 10 et 30 m de profondeur par rapport au sol, dans les faciès calcaireux 1, 2 et 3 qui localisent le plus de stalactites et suintements sur la falaise sud, sous la haute ville.

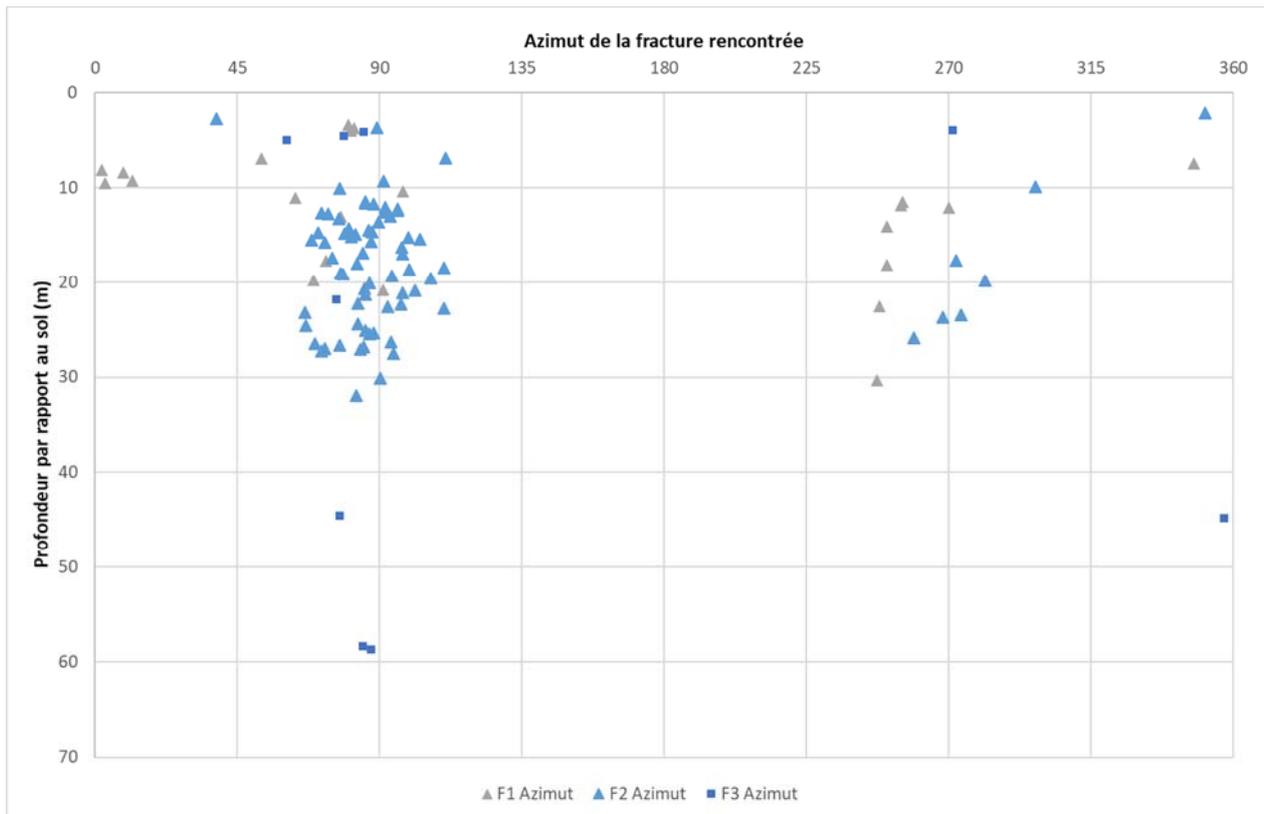


Illustration 21 : Azimut des plans de fracture rencontrés en fonction de la profondeur sur les trois sondages.

Le niveau d'eau observé dans le sondage vertical SC1-F3 au repos, 9 jours après la foration est de 58,90 m par rapport au sol. Il correspond à peu près au niveau de la mer, la Place du Marché se situant à environ 59,6m NGF. Il est à noter que ce niveau d'eau ne correspond a priori pas à celui d'une véritable nappe, mais plutôt à un résidu non infiltré de la foration réalisée à l'eau. Il peut donc être conclu qu'il n'existe pas de véritable nappe d'eau au sein du massif de la presqu'île, en cohérence avec les observations faites dans le puits Saint Barthélémy.

3.3.2. Slug test sur F3

Un test d'infiltration a été mené sur le forage vertical SC1-F3 suite à sa foration (mars 2019) pour évaluer la perméabilité du massif à proximité immédiate de l'ouvrage.

Il est à noter que la diagraphie de l'ouvrage a révélé peu de fractures ouvertes susceptibles d'évacuer préférentiellement l'eau du forage vers le massif, comme le montre l'illustration 21. Lors de la foration, des pertes d'eau ont été observées à 28,40 m, 40,20 m et 51,90 m de profondeur. Ces profondeurs ne correspondent cependant pas à des fractures d'après la diagraphie, mais à des passes moins carbonatées de la stratification.

Le test mené a consisté à injecter un volume d'eau le plus rapidement possible sans pour autant saturer la roche dans le forage (Illustration 22 a)) jusqu'au remplissage du forage et à suivre l'évolution du rabattement du niveau d'eau jusqu'à son niveau initial.

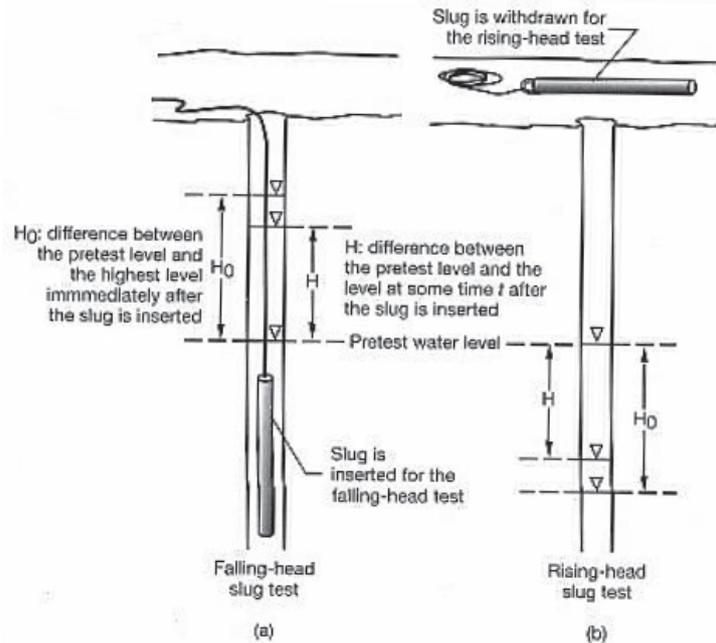


Illustration 22 : Schématisation d'un slug test (d'après Sanders, 1998) : a) test par analyse du rabattement du niveau d'eau b) test par analyse de la hausse du niveau d'eau. H_0 est la différence entre le niveau d'eau dans l'ouvrage avant le test et le niveau le plus haut atteint après l'insertion d'un volume (d'eau ou d'un objet). H est la différence entre le niveau d'eau avant l'injection et le niveau à un instant t après l'insertion d'un volume.

L'évolution du rabattement du niveau d'eau au cours du temps, après injection, est présenté dans l'illustration 23 ci-après, accompagnée de celle du débit de fuite calculé. Celui-ci est obtenu par calcul du rapport entre le volume d'eau perdu entre deux niveaux d'eau relevés et le temps écoulé entre ces deux relevés. Les valeurs de débit mesurées diminuent en fonction de la profondeur, en cohérence avec la baisse de charge hydraulique. Outre la première valeur qui semble s'écarter de la tendance générale, les autres s'étagent entre 17 et 5 L/min sur la tranche allant de 5 à 35 m de profondeur par rapport au sol. En-dessous de 35 m de profondeur, la gamme des débits devient très faible. Cette observation est cohérente avec la localisation des fractures relevée dans les sondages par diaggraphie et celle des suintements observés en paroi.

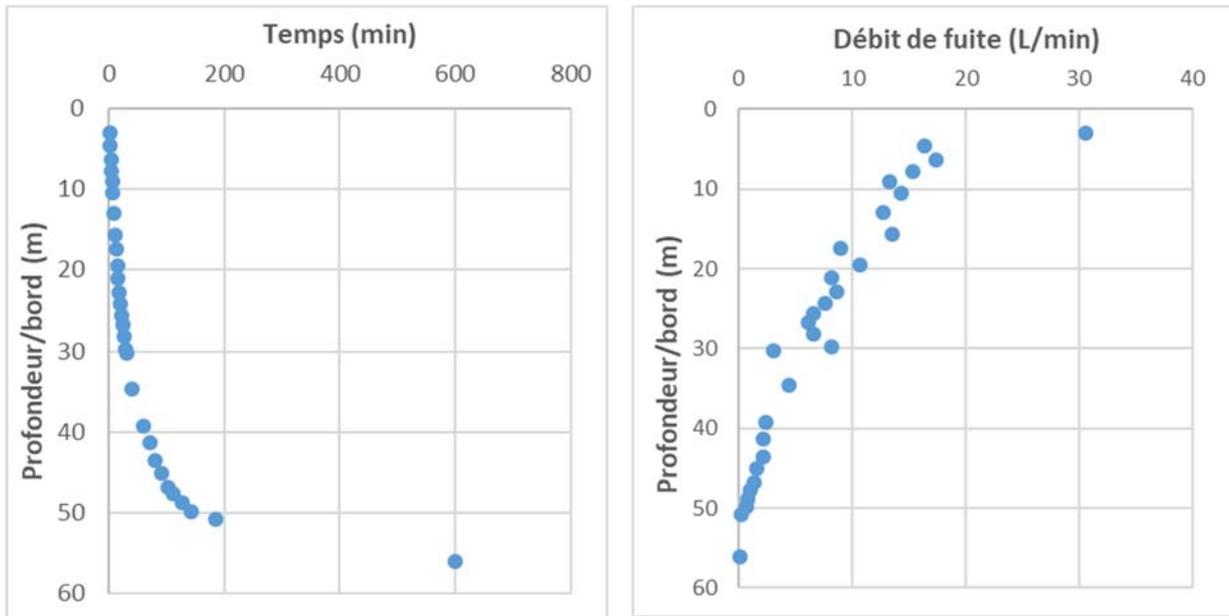


Illustration 23 : Rabattement mesuré dans le forage F3 après injection de l'eau (gauche) et débit de fuite correspondant calculé (droite), en fonction de la profondeur.

Il existe plusieurs solutions analytiques développées selon la configuration de l'aquifère testé (libre ou captif) et les caractéristiques de l'ouvrage pour interpréter les résultats d'un tel slug test. La solution la plus employée dans le cas d'un aquifère libre, comme ici, est celle de Bouwer et Rice (1976), qui reprend l'équation de Thiem valable pour un aquifère libre en régime permanent, et qui permet de déterminer une conductivité hydraulique K (perméabilité, exprimée en m/s) :

$$K = \frac{r_c^2 \cdot \ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)}{2L_e} \cdot \frac{1}{t} \cdot \ln\left(\frac{H_0}{H}\right)$$

- Avec :
- r_c le rayon du tubage du puits (m)
 - r_e le rayon d'influence (m)
 - r_w le rayon du puits nu (hors tubage, en m)
 - L_e la longueur de la portion de puits non tubée (m)
 - t le temps écoulé depuis H_0 (secondes)

A partir d'un modèle électrique analogue, Bouwer et Rice ont obtenu deux formules empiriques reliant le facteur $\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)$ à la géométrie de l'aquifère, une première pour $L_w > B$ et une seconde pour $L_w < B$, où B est l'épaisseur de la formation (en m) et L_w la hauteur de la colonne d'eau statique avant essai (en m). Dans le cas présent, $L_w = B$.

Ainsi, les paramètres utilisés pour le test mené sur F3 pour estimer la conductivité hydraulique aux abords du piézomètre sont les suivants :

Paramètre de l'équation	Valeur pour F3
r_c	0.05715
$\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)$	2.86
L_e	2.46
H_0	58.50

Il est généralement admis qu'il faut atteindre au moins t_{30} pour pouvoir procéder à une bonne interprétation, c'est-à-dire l'instant t auquel le niveau de l'eau a été rabattu à un niveau de 30 % du niveau initial H_0 . Ici, les 30 % sont atteints pour $H = 17,55$ m, correspondant à $t = 4000$ secondes (Illustration 24 et Illustration 25).

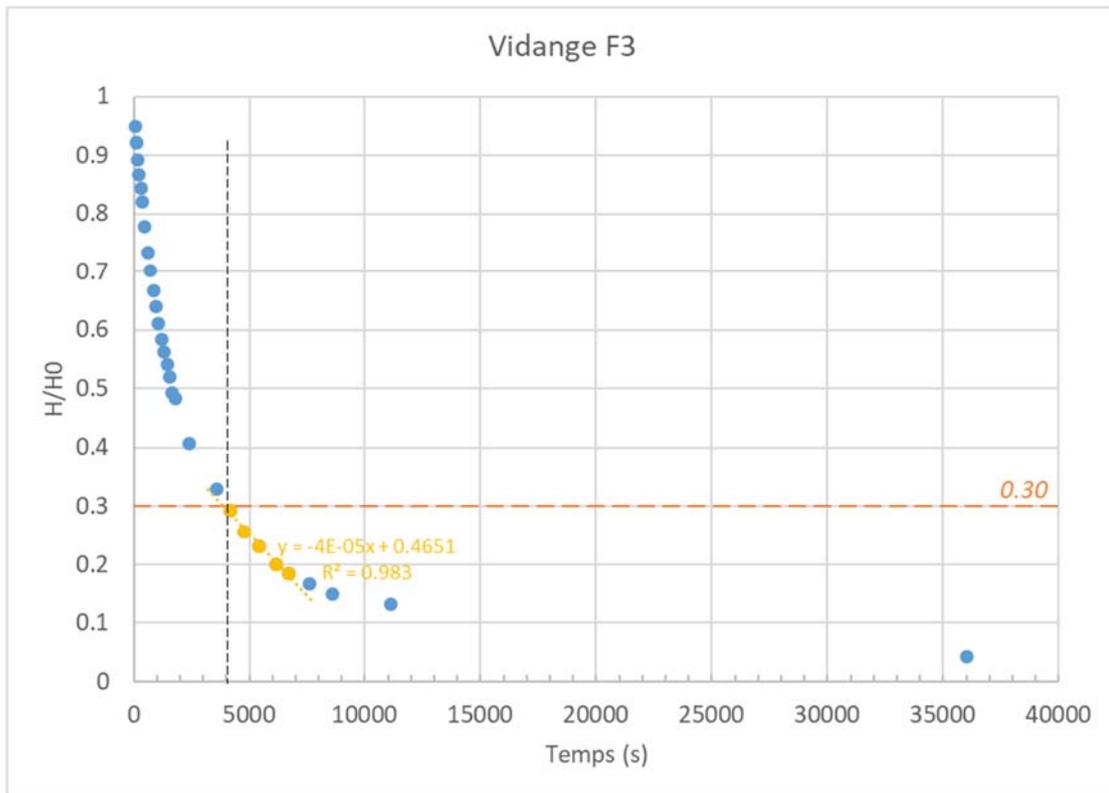


Illustration 24 : Courbe de la cote H par rapport à la cote H_0 en fonction du temps pour déterminer t_{30} et visualiser la portion de courbe exploitable pour évaluer la perméabilité K (points en jaune).

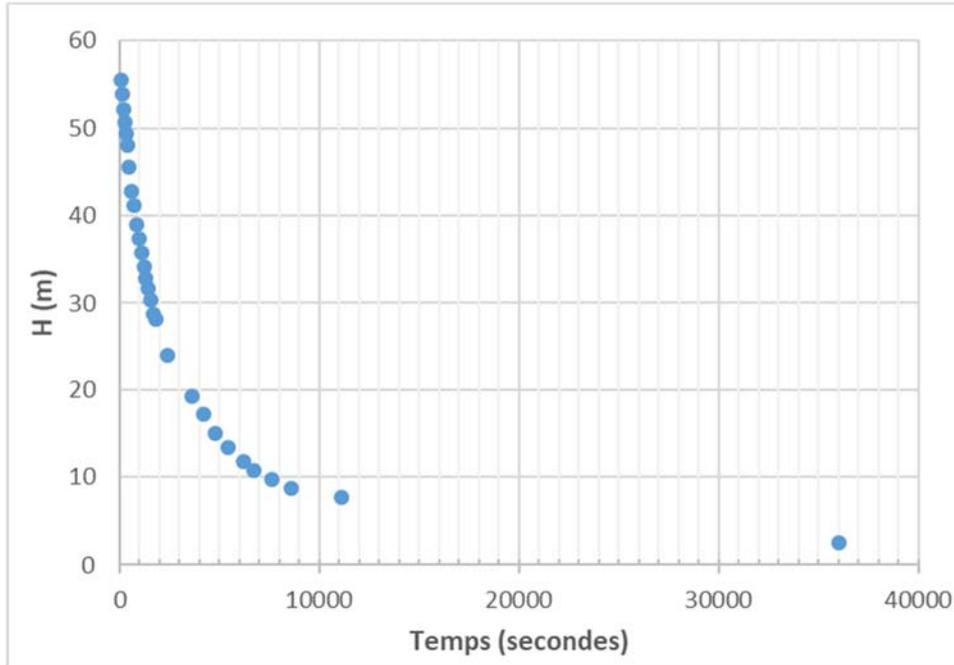


Illustration 25 : Evolution de la cote H en fonction du temps pour identifier les couples t et H.

Les valeurs obtenues de conductivité hydraulique pour les différents couples de t et H retenus sont les suivantes (Illustration 26) :

t (sec)	H (m)	K (m/s)
4200	41.35	$9,48 \cdot 10^{-7}$
4800	43.50	$7,09 \cdot 10^{-7}$
5400	45.05	$5,55 \cdot 10^{-7}$
6180	46.80	$4,15 \cdot 10^{-7}$
6720	47.70	$3,49 \cdot 10^{-7}$
Moyenne géométrique :		$5,58 \cdot 10^{-7}$

Illustration 26 : Calcul de la conductivité hydraulique K pour différents couples de t et H.

La moyenne géométrique (adaptée lorsque les observations sont cumulatives comme ici) obtenue est de $5,58 \cdot 10^{-7}$ m/s. Cette valeur de perméabilité est donc représentative de la tranche du piézomètre comprise entre 41 et 48 m de profondeur par rapport au sol.

Le même calcul a été réalisé avec le couple t et H correspondant à 21 m de profondeur (cependant pour un rapport H/H_0 de 0.80) afin d'avoir une estimation de la perméabilité au sein des faciès calcaires qui concentrent les suintements. Il donne une perméabilité de $1,22 \cdot 10^{-5}$ m/s, donc plus élevée. Les variations de lithologie, de fracturation et la localisation des suintements observés en forage et directement sur la falaise sur toute la hauteur du massif sont cohérentes avec ces résultats. En effet, les niveaux les plus carbonatés, présents sur les trente-cinq premiers mètres de la falaise à partir du haut, sont les plus perméables et présentent une perméabilité de l'ordre de 10^{-5} m/s, tandis que pour les niveaux gréseux de la base, elle est d'environ 10^{-7} m/s.

Ces valeurs de perméabilité sont en outre tout à fait cohérentes avec celles données par la littérature pour le bassin miocène dans son ensemble (10^{-5} à 10^{-7} m/s, cf. paragraphe 2.1).

3.4. ANALYSE DE L'IMPACT DE L'ACTIVITE ANTHROPIQUE SUR L'ALIMENTATION EN EAU DU MASSIF

Comme vu précédemment, une alimentation majeure du massif de la presqu'île par la nappe régionale est à exclure. L'alimentation en eau du massif ne peut donc provenir que de deux « sources » :

- l'infiltration naturelle des eaux de pluie ;
- l'infiltration de l'eau issue de l'activité anthropique, à savoir l'arrosage des espaces verts, la fuite des réseaux d'eau (eau pluviale, eaux usées, eau potable) ou les citernes et sous-sols historiquement dédiés au stockage de l'eau de pluie.

Cet apport anthropique d'eau au massif est soupçonné depuis longtemps et considéré comme facteur potentiellement défavorable à sa stabilité. Les diagnostics et travaux engagés depuis une dizaine d'années par la commune de Bonifacio permettent de tracer l'emprise de ces réseaux et structures, leur état avant rénovation et ainsi évaluer le potentiel d'apport en eau qu'ils représentent en cas de fuite.

3.4.1. Le réseau d'eau pluviale

La société UrbaSud a réalisé en 2010 un état des lieux des réseaux pluviaux et d'eaux usées de la haute ville de Bonifacio.

Dès les premières investigations, il a été constaté la présence de génois sous la majorité des rues de la haute ville servant de réseau pluvial. Ces génois sont des drains historiques qui avaient été creusés dans la roche et qui sont désormais empierrés ou bétonnés et qui présentent une section d'environ 0.50 x 0.50 m. Certains ont été condamnés mais certains ont été utilisés pour faire passer un réseau d'eaux usées en PVC et sont le siège d'infiltrations d'eaux pluviales. Il a également été noté l'existence de branchements particuliers d'eaux usées directs aux génois (donc au réseau pluvial). Les réseaux d'eaux usées et d'eaux pluviales sont donc imbriqués, mélangés, vétustes et ou réalisés sans respect des règles de l'art.

L'étanchéité des génois n'a pas été évaluée mais leur conception laisse penser qu'elle est toute relative. Ceux qui ont été bétonnés sont probablement plus étanches que ceux qui sont toujours constitués de pierres ajustées.

Le diagnostic d'UrbaSud réalisé en amont des travaux de rénovation des réseaux menés depuis fin 2018 caractérise l'état « initial » du réseau d'eau pluviale, et donc des génois, à partir des accès à ces réseaux existants (les regards).

L'illustration 27 ci-après représente les problèmes sur les génois recensés par UrbaSud.

Cette carte représente les portions du réseau d'eau pluviale (les génois) observées et identifiées via les regards (en bleu foncé) et les portions supposées (en bleu clair). Ces portions supposées ont par la suite été confirmées par les reconnaissances menées par la société Artelia en 2017. Sans connaissance précise du revêtement et de l'étanchéité de ce réseau de génois, ce tracé constitue donc un linéaire potentiel d'infiltration d'eau issue des eaux usées ou pluviales vers le massif avant les travaux de rénovation qui ont débuté en 2018. Il n'y a par ailleurs aucun compteur sur ce réseau, excluant toute possibilité d'évaluer les volumes d'eau y transitant et les éventuelles fuites.

Les problèmes recensés par UrbaSud, qui étaient a priori non exhaustifs car limités aux regards, montraient l'existence de tronçons en état moyen voire mauvais. Bien qu'il n'y ait pas de détails, on peut supposer que leur étanchéité était mauvaise.

A ce titre, il est à noter que les génois situés aux abords de la Place Fondaco, à l'extrémité sud de la rue Fred Scamaroni, étaient signalés en mauvais état (y compris dans la rue Doria dont le réseau se déverse vers la place puis vers la rue F. Scamaroni). Des infiltrations d'eau issues de ces portions de génois vers le massif pouvaient donc se produire au contact de l'angle de la falaise identifié comme sensible à d'éventuels éboulements (paragraphe 3.2 ci-avant).

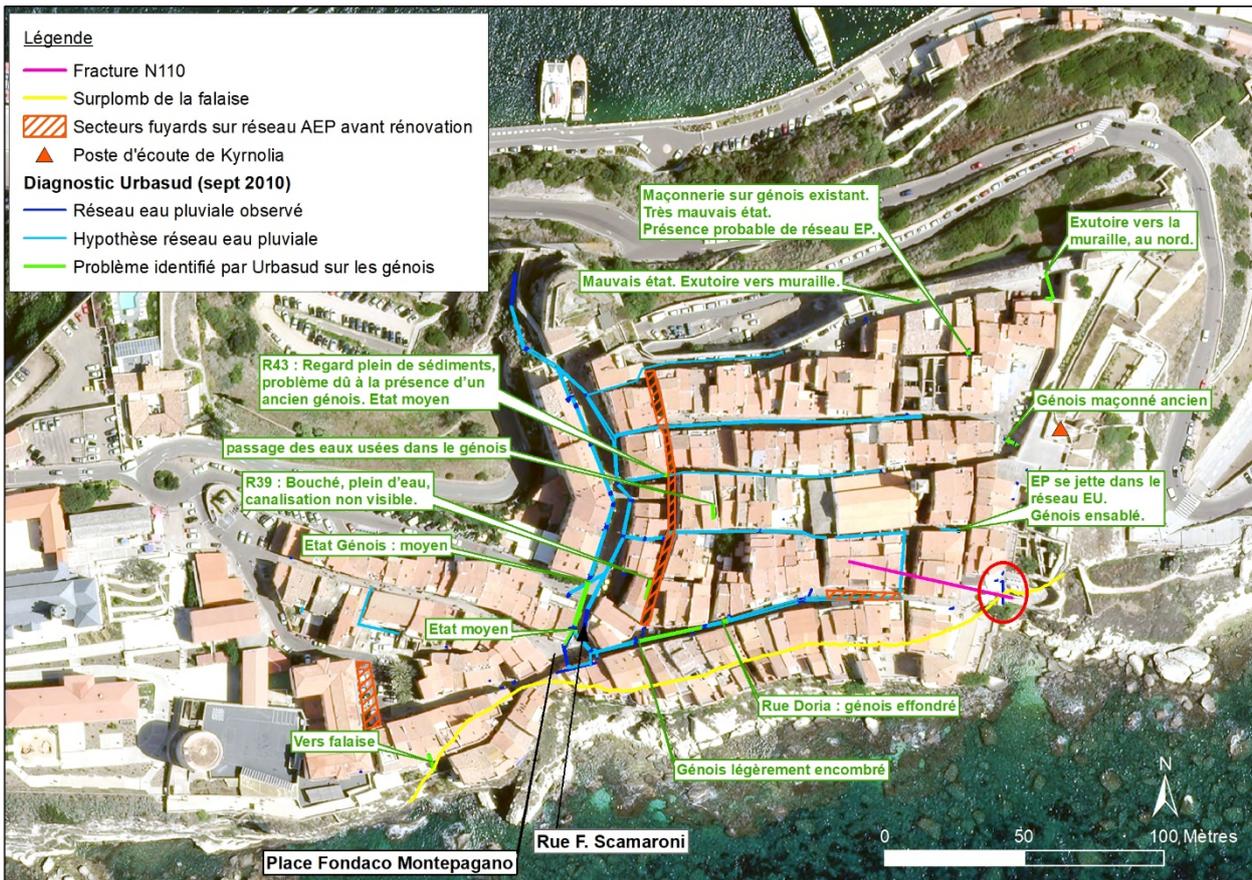


Illustration 27 : Localisation du réseau d'eau pluviale (les génois) de la haute ville, des problèmes identifiés par UrbaSud en 2010 et des secteurs fuyards sur le réseau AEP signalés par Kyrnolia sur fond de photographies aériennes de l'IGN (datées d'octobre 2016).

Concernant l'extrémité sud de la place du marché, une portion de génois a été identifiée (cercle rouge sur la carte) recoupant la fracture N110. Même dans le cas où il ne présenterait pas de problème d'étanchéité, le rejet d'eau sur la falaise au contact de cette fracture pendant une longue période expliquerait l'agrandissement observé.

La ligne de conduite que s'est imposée la ville de Bonifacio pour ses travaux de rénovation des réseaux de la haute ville est de capter un maximum d'eau de ruissellement pour limiter toute infiltration vers le massif.

3.4.2. Les citernes enterrées et sous-sols

Il n'existe actuellement pas de document global recensant les citernes et sous-sols. C'est l'objet, entre autre, de « l'étude patrimoniale sur le réseau hydraulique de Bonifacio » que mène actuellement la DRAC (Direction Régionale des Affaires Culturelles). Elle viendra compléter « l'étude des éléments caractéristiques architecturaux et patrimoniaux de l'ensemble bâti de la ville haute ». Ainsi, ce programme de recherche que mène actuellement la ville de Bonifacio a pour but d'identifier et de reconstituer le mode de gestion historique de la ressource en eau dans ce milieu urbain particulier de la presqu'île.

Les citernes et sous-sols collectant des eaux pluviales actuellement recensés, notamment dans le cadre d'une étude du bureau d'études Hydrogéotechnique, sont localisés :

- dans la rue Doria (au numéro 30 et 32) ;
- sous certaines habitations bordant la place du Marché ;
- sous certaines habitations bordant la place Manichella, ainsi que sous la place elle-même ;
- sous la place d'armes, en face du Bastion de l'Etendard.

La société Artelia, qui assure la maîtrise d'œuvre des travaux de réhabilitation de la haute ville, a constaté à plusieurs reprises l'existence de nombreuses citernes qui collectent les gouttières qui passent à l'intérieur des bâtiments, dans les parties privatives et donc non accessibles. Toujours d'après Artelia, il a été constaté que certaines de ces citernes sont toujours remplies d'eau. Les branchements de gouttières sur citernes qui ont été identifiés ont été redirigés vers les réseaux d'eau pluviale lors des travaux de rénovation, mais il est susceptible d'en exister encore de nombreux. Dans ce cas, la citerne recevant ces eaux pluviales constitue un puits d'infiltration vers le massif.

3.4.3. Le réseau d'eau potable

La société BL Ingénierie a remis en janvier 2018 son rapport de mise à jour du schéma directeur de la commune, consistant en un diagnostic de la distribution de l'eau potable.

Dans le cadre de cette étude, le rendement du réseau de distribution de l'AEP a été mesuré. Il était de 81,5 % en 2015 pour l'ensemble du linéaire, ce qui est correct. Le détail concernant la haute ville n'est pas connu. Le linéaire de distribution sur ce secteur est de 1165 m.

Le diagnostic indique cependant que le secteur de la haute ville est principalement alimenté par des conduites en amiante-ciment. Ce matériau vétuste pose des problèmes sanitaires importants lors des réparations en cas de casse.

Le réseau a été modélisé afin de calculer les charges dans les canalisations. Il est ainsi observé de faibles pertes de charge dans le réseau sur ce secteur liées aux faibles vitesses. Il est indiqué qu'en soi, les pertes de charge faibles sont plutôt une bonne chose, mais que les vitesses faibles peuvent aussi provoquer des sédimentations de matières en suspension, ce qui peut conduire à des réductions de sections hydrauliques. Les temps de séjour peuvent également être longs, ce qui peut être favorable au développement de bactéries.

Il est enfin remarqué que les pressions sont en majorité comprises entre 4 et 5 bars, ce qui est relativement élevé par rapport aux capacités de résistance des conduites en amiante-ciment.

Le service de distribution de l'eau potable est délégué à la société Kyrnolia qui a transmis au BRGM l'enregistrement des débits dans le réseau au niveau du poste d'écoute localisé à l'entrée de la citadelle, à la Porte de Gênes (Illustration 27 et Illustration 28). La chronique fournie s'étend de 2017 à 2019 mais présente des lacunes importantes entre fin 2018 et 2019, période pendant laquelle les rénovations du réseau ont débuté. Le débit transitant dans la canalisation se situe autour de 10 m³/h en période hivernale de basse fréquentation, et il atteint pratiquement 30 m³/h en saison estivale, entre juillet et septembre. Ainsi, le débit ne dépasse pas 30 m³/h en temps normal, mais des pics pouvant atteindre jusqu'à 100 m³/h sont identifiés. Ils correspondent à la survenance de fuites sur le réseau. L'eau issue de ces fuites peut s'être déversée dans le réseau d'eau pluviale mais une partie peut également s'être infiltrée dans le massif.

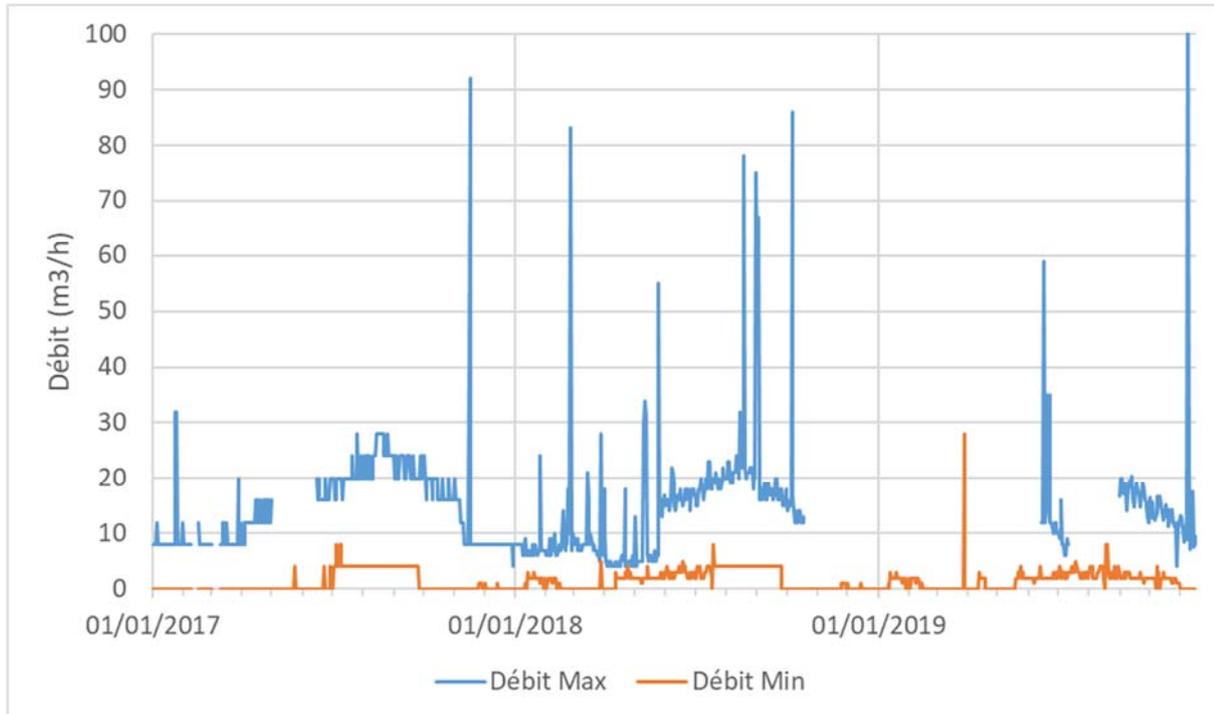


Illustration 28 : Débits minimum et maximum journaliers enregistrés par le poste d'écoute de Kyrnolia à l'entrée de la citadelle, sur le réseau de distribution d'AEP, entre 2017 et 2019.

En résumé, il est délicat de quantifier la contribution du réseau de distribution de l'eau potable à l'alimentation en eau du massif de la presqu'île, mais les éléments rassemblés montrent que des fuites se sont produites régulièrement et qu'une partie de ces volumes d'eau, parfois conséquents, est susceptible de s'être infiltrée.

4. Conclusion : fonctionnement hydrogéologique de la presqu'île de la haute ville de Bonifacio

La compilation des différentes observations de terrain et mesures réalisées permet de décrire le fonctionnement hydrogéologique du massif de la presqu'île de Bonifacio.

- **La fonction d'entrée du système : l'eau infiltrée**

Compte-tenu de la présence quasi généralisée d'un revêtement, l'eau infiltrée au droit de la haute ville correspond principalement à des apports indirects par les fuites des réseaux d'eaux. Le volume potentiel que cela peut représenter n'a pas pu être calculé.

L'infiltration de l'eau de pluie n'est pas à exclure, mais elle apparaît mineure du fait de l'urbanisation de la haute ville.

- **La porosité et la perméabilité du massif : où et comment circule l'eau**

Après s'être infiltrée (fuite des réseaux en tout genre (génois, AEP, eau pluviale, eaux usées, citernes), infiltration via les espaces verts et zones non imperméabilisées de la haute ville), l'eau circule majoritairement au contact des fissures affectant le massif et des fractures et petits conduits karstiques agrandis par la dissolution des carbonates. Les écoulements sont concentrés dans les niveaux de calcarénites correspondant aux faciès les plus carbonatés 1, 2 et 3. Ils correspondent aux trente-cinq premiers mètres de la falaise par rapport au sol de la haute ville. Ces écoulements sont guidés horizontalement par la stratification qui les intercepte et les oriente vers la falaise et verticalement selon les plans de fracturation au sens large observés (plan des diaclases intra-bancs, fractures...).

La perméabilité des faciès carbonatés constituant la partie supérieure du massif est de l'ordre de 10^{-5} m/s tandis que celle des faciès gréseux inférieurs est d'environ 10^{-7} m/s, correspondant à une gamme de valeurs qualifiées de faibles mais qui ne permettent a priori pas la mise en charge du massif.

Le massif de la presqu'île ne renferme pas de nappe à proprement parler.

- **La fonction de sortie du système : les exutoires**

Les exutoires du massif sous la haute ville correspondent principalement aux niveaux carbonatés des faciès 1, 2 et 3, matérialisés par les suintements et stalactites observés. Le dernier niveau carbonaté en surplomb (noté 4CC36) situé à 36 m de profondeur par rapport au sol de la haute ville est susceptible de constituer le collecteur de la majorité des eaux infiltrées au droit de la haute ville.

Il se produit des circulations d'eau souterraine jusque dans le faciès gréseux inférieur, mais elles sont très limitées et ne concernent que les secteurs affectés par une fracturation verticale continue intense. Il s'agit typiquement de l'angle de la falaise dans l'axe de la rue Fred Scamaroni et la zone située à proximité du puits Saint Barthélémy.

En résumé, la mise en charge du massif, majoritairement localisée dans les faciès carbonatés supérieurs, est très limitée du fait de la forte imperméabilisation de surface limitant l'infiltration des précipitations et d'une perméabilité non négligeable dans les faciès carbonatés, guidée par la stratification et la fracturation favorisant un fonctionnement « d'évacuation / lessivage » plutôt que

de mise en charge. Les circulations d'eau dans le massif, même réduites, constituent cependant un facteur aggravant à la stabilité du massif (lessivage des fractures ouvertes existantes, fragilisation progressive des ponts rocheux qui subsistent, mise en charge des fractures fermées, développement progressif de conduits karstiques dans les faciès carbonatés).

Afin d'éviter les mises en charge du massif susceptibles d'être des moteurs aux éboulements de terrain, il est recommandé de poursuivre les efforts d'imperméabilisation des génois, de rénovation des réseaux d'eau et de suppression des structures susceptibles de constituer des puits d'infiltration d'eau vers le massif (cuves et sous-sols récupérant les eaux de pluie). L'objectif est de limiter au maximum, voire de supprimer, toute source anthropique d'alimentation en eau du massif.

Il est recommandé la mise en œuvre des actions suivantes afin de suivre l'efficacité des travaux de rénovation de la haute ville et leur impact sur les circulations d'eau dans le massif :

- équiper les réseaux d'eau de la haute ville de compteurs permettant de quantifier leur rendement (AEP) et de systèmes d'écoute pour identifier les fuites (réseaux pluvial et eaux usées), si cela n'a pas déjà été fait. Il est recommandé de mesurer le rendement du réseau AEP tous les ans. Ce suivi permettra de surveiller l'évolution de la situation et anticiper les dégradations ;
- consigner au fur et à mesure la localisation des éventuelles fuites recensées, les volumes d'eau de fuite, et la façon dont l'eau s'est évacuée pendant l'épisode (via les réseaux d'eau pluviale, les citernes enterrées, par infiltration diffuse vers le massif, etc.). une réflexion sur la recherche et l'interdiction des citernes est à envisager;
- la prise en compte rapide des fuites de réseaux d'eau est à mettre en place, elle pourra être améliorée par l'automatisation de la détection des fuites (sectorisation et télétransmission)
- surveiller l'état des suintements de la falaise sous la haute ville par un contrôle visuel tous les trois mois pour voir si une évolution peut être constatée (augmentation manifeste des suintements, maintien, ou diminution).

5. Bibliographie

Bonneau, Jager, Quilici (2014) - Spécial Bonifacio : histoire d'une île dans une île. Stantari Histoire Naturelle & Culturelle de la Corse (Numéro 34 - Été 2014).

Bouwer, H. and R.C. Rice (1976) - A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resources Research*, vol. 12, no. 3, pp. 423-428.

Dörfliger N., Ferrandini J., Ferrandini M., Mathieu F. (2002) – Caractérisation géométrique et hydrodynamique du causse de Bonifacio (Corse) à partir d'une synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques et par méthodes géophysiques. BRGM/RP-51860-FR, 134 p., 24 fig., 7 tabl., 4 photos, 6 ann.

Santoni, S. (2016a) - Contributions du multi-traçage géochimique et isotopique à la compréhension des aquifères côtiers : mise en place d'un modèle de fonctionnement de l'aquifère de Bonifacio (Corse-du-Sud). Ph. D. Thesis. Université de Corse Pascal Paoli, France, pp. 281.

Santoni S., Huneau F., Garel E., Aquilin, L., Vergnaud-Ayraud V., Labasque T., Celle-Jeanton H. (2016b) - Strontium isotopes as tracers of water-rocks interactions, mixing processes and residence time indicator of groundwater within the granite-carbonate coastal aquifer of Bonifacio (Corsica, France). *Science of The Total Environment*, 573: 233-246. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.08.087.

Santoni S., Huneau F., Garel E., Vergnaud-Ayraud V., Labasque T., Aquilina L., Jaunat J., Celle-Jeanton H. (2016c) - Residence time, mineralization processes and groundwater origin within a carbonate coastal aquifer with a thick unsaturated zone. *Journal of Hydrology*, 540: 50-63. DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.06.001.

Santoni, S., Huneau, F., Garel, E., Celle-Jeanton, H. (2018) - Multiple recharge processes to heterogeneous Mediterranean coastal aquifers and implications on recharge rates evolution in time. *J. Hydrol.* 559, 669–683. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.068>.

Santoni S., Garel E., Mayer A., Radakovitch O., Travi Y., Huneau F. - (2020). Detection and quantification of low submarine groundwater discharge flows by radionuclides to support conceptual hydrogeological model of porous aquifers. *Journal of Hydrology* 583 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124606>.

Annexe 1

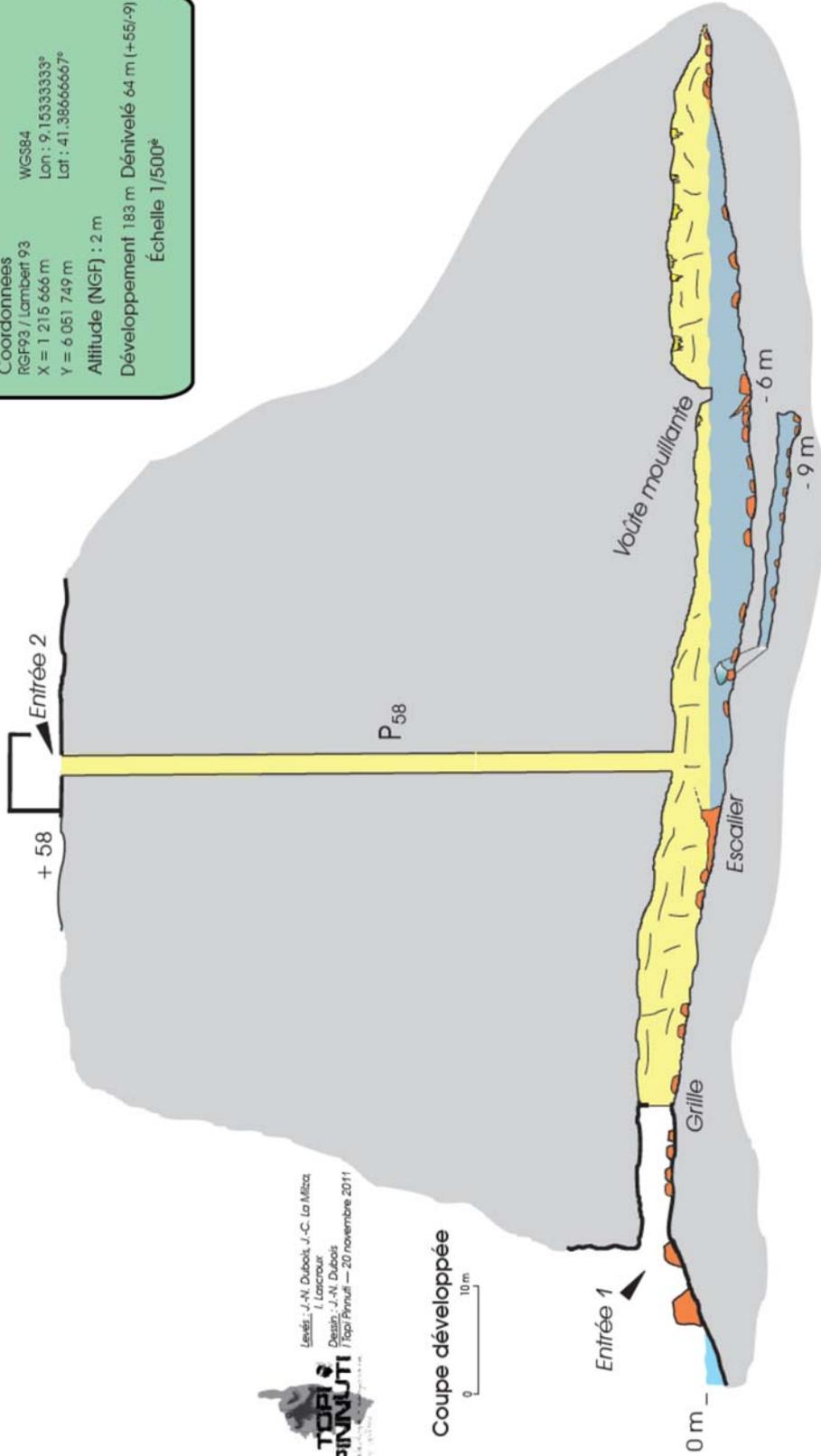
Vues en coupe et en plan de la Grotte Saint Barthélémy

GROTTE SAINT BARTHÉLÉMY
BONIFACIO (CORSE-DU-SUD)

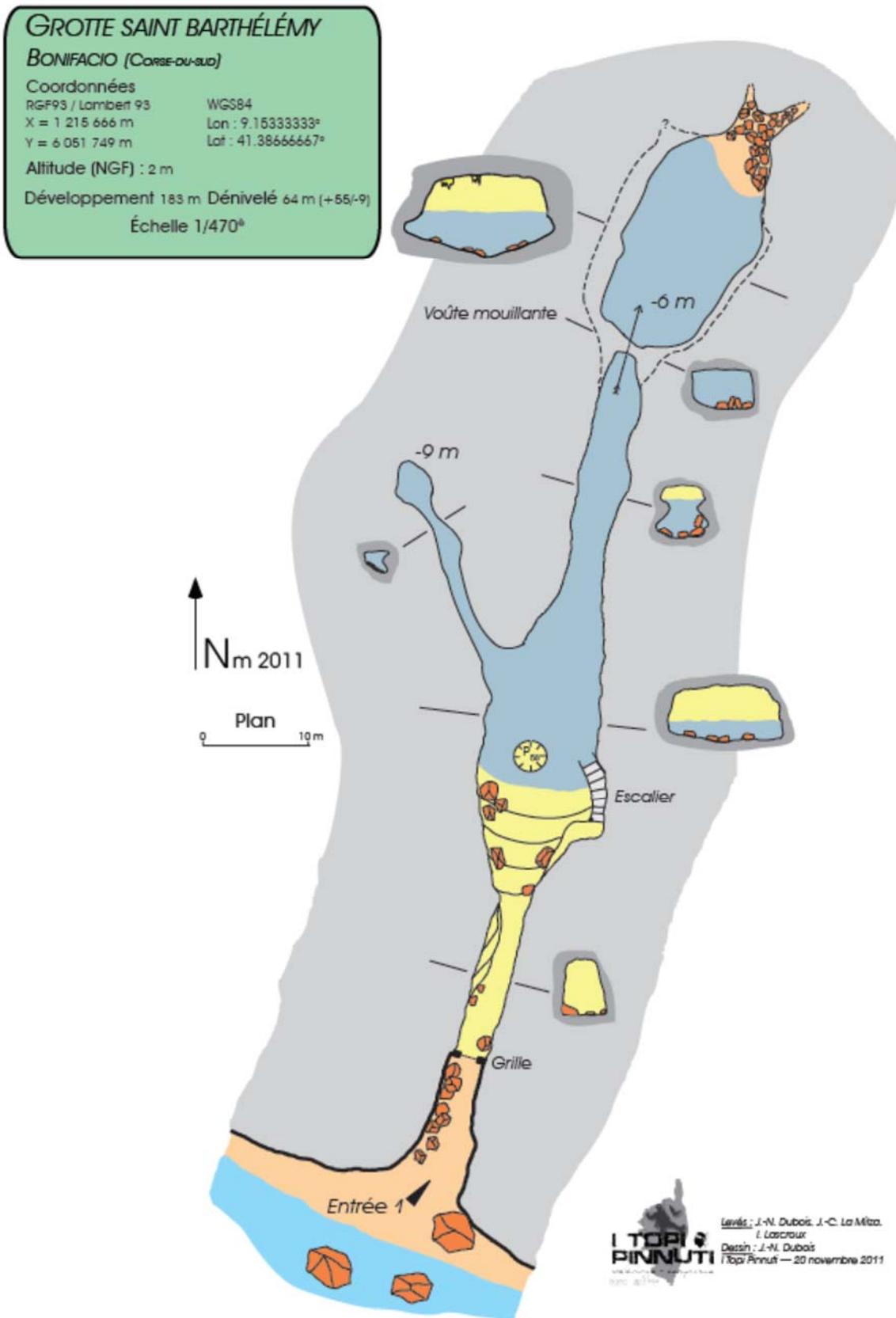
Coordonnées
 RGF93 / Lambert 93
 X = 1 215 666 m
 Y = 6 051 749 m

WGS84
 Lon : 9,15333333°
 Lat : 41,38666667°

Altitude (NGF) : 2 m
 Développement 183 m Dénivelé 64 m (+55,-9)
 Échelle 1/500*



I TOPAI PINNUTI
 Ingénierie et Services
 Levés : J.-N. Dubois, J.-C. La Milza
 I. Larcroux
 Dessins : J.-N. Dubois
 Topo Pinnuti – 20 novembre 2011





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

Direction régionale du BRGM en Corse
Immeuble Agostini
Zone industrielle de Furiani
20600 – Bastia – France
Tél. : 04 95 58 04 33