

Référentiel hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie BDLISA-NC. Rapport d'étape n°3

Les ressources stratégiques en eau souterraine
(Outils d'aide à la décision)

GOUE A. (DIMENC/SGNC), MARDHEL V. (BRGM)
MONGE O. (DIMENC/SGNC),
SGNC-2022(06) – MAI 2022

Industrie, mines et énergie
GOUVERNEMENT DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE

Affaires vétérinaires, alimentaires et rurales
GOUVERNEMENT DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

PEPnc
Politique de l'eau partagée
de la Nouvelle-Calédonie

SGNC
Service Géologique
de Nouvelle-Calédonie



Le projet régional océanique des territoires pour la gestion durable des écosystèmes, PROTEGE, est un projet intégré qui vise à réduire la vulnérabilité des écosystèmes face aux impacts du changement climatique en accroissant les capacités d'adaptation et la résilience. Il cible des activités de gestion, de conservation et d'utilisation durables de la diversité biologique et de ses éléments en y associant la ressource en eau. Il est financé par le 11^{ème} Fonds européen de développement (FED) au bénéfice des territoires de la Nouvelle-Calédonie, de la Polynésie française, de Pitcairn et de Wallis et Futuna.

L'objectif général du projet est de construire un développement durable et résilient des économies des pays et territoires d'Outre-mer (PTOM) face au changement climatique en s'appuyant sur la biodiversité et les ressources naturelles renouvelables.

Le premier objectif spécifique vise à renforcer la durabilité, l'adaptation au changement climatique et l'autonomie des principales filières du secteur primaire. Il est décliné en deux thèmes :

- Thème 1 : la transition agro-écologique est opérée pour une agriculture, notamment biologique, adaptée au changement climatique et respectueuse de la biodiversité ; les ressources forestières sont gérées de manière intégrée et durable.
- Thème 2 : les ressources récifo-lagonaires et l'aquaculture sont gérées de manière durable, intégrée et adaptée aux économies insulaires et au changement climatique.

Le second objectif spécifique veut renforcer la sécurité des services écosystémiques en préservant la ressource en eau et la biodiversité. Il se décline également en 2 thèmes :

- Thème 3 : l'eau est gérée de manière intégrée et adaptée au changement climatique
- Thème 4 : les espèces exotiques envahissantes sont gérées pour renforcer la protection, la résilience et la restauration des services écosystémiques et de la biodiversité terrestre.

La gestion du projet a été confiée à la Communauté du Pacifique (CPS) pour les thèmes 1, 2 et 3 et au programme régional océanique pour l'environnement (PROE) pour le thème 4, par le biais d'une convention de délégation signée le 26 octobre 2018 entre l'Union européenne, la CPS et le PROE. La mise en œuvre du projet est prévue sur 4 ans.

Ce rapport est cité comme suit :

GOUÉ A., MARDHEL V., MONGE O. (2022), Référentiel hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie BDLISA-NC -Rapport d'étape n°3 – Les ressources stratégiques en eau souterraine (Outils d'aide à la décision). Rapport DIMENC/SGNC-2022(06). 62 pages.

Cette publication a été produite avec le soutien financier de l'Union européenne. Son contenu relève de la seule responsabilité du Service Géologique de la Nouvelle-Calédonie et ne reflète pas nécessairement les opinions de l'Union européenne.

Partenaires

Nom de l'entité : Nouvelle-Calédonie, représentée par la direction des affaires vétérinaires, alimentaires et rurales (DAVAR) en tant que chef de file Eau et la direction de l'industrie, des mines et de l'énergie de Nouvelle-Calédonie (DIMENC) comme responsable opérationnel.

Cette étude est conduite en collaboration avec le BRGM, établissement public français de référence dans le domaine des sciences de la Terre, promoteur de la Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères (BDLISA).

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la Politique de l'Eau Partagée, et notamment de son Objectif Stratégique 1 : « **Protection - Sanctuariser nos zones de captage et nos ressources stratégiques, préserver nos milieux à échéance 2023** » mais également de son Objectif Transversal B : « **Data Eau – Améliorer les connaissances pour mieux protéger préserver, planifier, piloter** ».

En effet, l'objectif de ce programme est de fournir un atlas hydrogéologique, c'est-à-dire le référentiel des réservoirs hydrogéologiques de la Nouvelle-Calédonie. Cet ensemble d'informations alimentera les données sur l'eau de la Nouvelle-Calédonie (OTB de la PEP) et sera une étape indispensable **pour la définition des ressources stratégiques en eau souterraine** (OS1 de la PEP).

PROTEGE a ainsi souhaité aider ce projet sur les activités de son thème 3 en Nouvelle-Calédonie et plus précisément l'opération 9A.1 « Stratégie de gestion des bassins versants ou des masses d'eau ».

Ce projet est financé par un contrat de service (n°CPS20/253) d'une durée de 24 mois. Il est opérationnellement mené par le Service Géologique de la Nouvelle-Calédonie (SGNC), au sein de la DIMENC et notamment Angéline Goué, recrutée sur un contrat de Volontaire au Service Civique (VSC) pour la durée des travaux (deux ans). Le Service Géologique et le BRGM sont par ailleurs engagés sur la transposition à la Nouvelle-Calédonie de la BDLISA depuis plusieurs années. La collaboration du service de l'eau de la DAVAR porte également sur les aspects techniques et stratégiques du projet.

Table des matières

1	Introduction	7
1.1	Contexte	7
1.2	Rapport d'étape n°3.....	7
2	Valorisation du référentiel hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie (BDLISA-NC)8	
2.1	Explo'Lisa, Explorateur cartographique	8
2.2	Un poster dédié à l'atlas hydrogéologique	8
3	Vers un outil d'aide à la détermination des ressources stratégiques	11
3.1	Définition.....	11
3.2	Cadrage	11
3.3	Etat des lieux (EDL) de communes pilotes	12
3.4	Approche systémique pour les ressources stratégiques relatives à l'AEP et aux eaux souterraines.....	13
4	Recensement des « pressions » et « enjeux » vis-à-vis de l'AEP et incorporation des données relatives aux eaux souterraines	14
4.1	Recensement des « pressions » et « enjeux » vis-à-vis de l'AEP	14
4.2	Incorporation des données relatives aux eaux souterraines aux entités de la BDLISA-NC	21
5	Revue des méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution	22
5.1	Définitions	22
5.2	Revue des méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères.....	22
5.3	Les méthodes de cartographies à index	23
5.4	Les autres méthodes	28
5.5	Démarches communes aux méthodes inventoriées.....	29
5.6	Synthèse des critères utilisés	30
6	Proposition de cartographie la vulnérabilité des systèmes aquifères de Nouvelle-Calédonie selon les critères qualitatifs disponibles	32
6.1	Modèle conceptuel proposé pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en Nouvelle-Calédonie	32
6.2	CRITERE LISA –Vulnérabilité associée aux entités BDLISA	34
6.3	CRITERE MOS – Vulnérabilité associée au mode d'occupation des sols (MOS 2014)	38
6.4	CRITERE SOLS – Vulnérabilité associée à la lithologie des sols	39
6.5	CRITERE GEOMORPHO- Notes associées à la géomorphologie	41

6.6	Modulations utilisées.....	42
6.7	Combinaison des critères retenus.....	45
6.8	Discussion des résultats et scénarios.....	49
7	Conclusion	59
7.1	Bilan et avancement du projet.....	59
7.2	Perspectives	59
8	Références.....	60
9	Liste des figures	61
10	Liste des tableaux.....	62

Résumé exécutif

Titre de l'étude	Référentiel hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie BDLISA-NC. Rapport d'étape n°3 (Mai 2022)
Auteurs	A. GOUE, V. MARDHEL, O. MONGE
Collaborateurs	S. BALAYRE
Editeurs	B. ROGER, P. WINCHESTER
Année d'édition du rapport	2022

Objectif	L'objectif de l'étude est de constituer un référentiel accessible à tous pour améliorer la gestion de la ressource en eau souterraine.		
Contexte	<p>Cette étude s'inscrit dans le cadre de la Politique de l'Eau Partagée, et notamment de son Objectif Stratégique/Transversal : OS1 (Plan Pr'eau'tection 2023) et de l'OTB (Plan Data eau 2021).</p> <p>Financé par l'Union européenne (Contrat n°CPS20/253) ce projet a pour objectif la construction et la mise en ligne du référentiel BDLISA-NC, Base de Données des Limites Aquifères de Nouvelle-Calédonie pour la cartographie et la caractérisation hydrogéologiques des formations à l'échelle du territoire.</p> <p>La transposition à la Nouvelle-Calédonie de la BDLISA métropolitaine a été initiée en 2017, dans le cadre d'un partenariat entre le BRGM et le gouvernement de la Nouvelle-Calédonie (DIMENC/SGNC)</p> <p>Ce projet financé par PROTEGE permet la réalisation de la version initiale (v0) du référentiel hydrogéologique BDLISA-NC et l'appui à la définition des ressources en eau stratégiques.</p>		
Méthodologie	<ol style="list-style-type: none"> 1) Incorporer des données « pression » et « enjeux » aux entités BDLISA-Nouvelle-Calédonie 2) Bibliographie des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines 3) Proposition et mise en œuvre d'une évaluation cartographique de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en Nouvelle-Calédonie 		
Résultats et conclusions	Conformément au contrat de service (n°CPS20/253), un an et demi après le démarrage du projet, le présent rapport d'étape n°3 rend compte du travail effectué sur l'incorporation des données « pressions » et « enjeux » en vue de l'identification des ressources stratégiques en eau souterraine pour l'AEP.		
Limites de l'étude	Le périmètre de l'étude est l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie. Elle se limite cependant aux données accessibles et à jour.		
Evolutions	3	Date de la version	13/06/2022

1 Introduction

1.1 Contexte

La constitution d'un référentiel hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie a été initiée en 2017 lors d'une convention de recherche et de développement partagé, entre le BRGM et le gouvernement de la Nouvelle-Calédonie. Les principes de construction de la BDLISA-NC et les données géologiques utiles sont présentées dans les rapports RP-68516-FR/DIMENC-SGNC-2019(08) et RP-70134-FR/DIMENC-SGNC-2020(09).

Le programme financé par l'Union européenne dans le cadre du projet PROTEGE (Contrat n°CPS20/253) consiste notamment à apporter un soutien pour la construction, la mise en ligne et l'édition du référentiel ou atlas hydrogéologique « BDLISA-NC ».

L'atlas ou référentiel hydrogéologique (BDLISA-NC) constituait l'Axe 1 de cette mission dont il a été rendu compte dans les deux premiers livrables du programme PROTEGE : SGNC-2021(05) et SGNC-2021(13).

Le travail de la seconde année doit valoriser l'atlas ou référentiel hydrogéologique pour contribuer à la définition et la cartographie des ressources stratégiques en eaux souterraines (Axe 2, semestre 3). Le dernier semestre devant viser à étendre cette définition aux eaux superficielles (Axe 2, semestre 3).

Tout au long du projet, l'Axe 3 correspond à une tâche de restitution et valorisation des actions sur le territoire.

1.2 Rapport d'étape n°3

Ce troisième rapport d'étape présente l'avancement du Référentiel Hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie BDLISA-NC (Base de Données des Limites du Système Aquifères) après un an et demi de travail dans le cadre du programme PROTEGE. Il rend compte :

- De la valorisation et la diffusion grand public du Référentiel Hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie BDLISA-NC (Explo'LISA, § 2, Axe 3) ;
- De l'avancement pour l'identification des ressources stratégiques en eau souterraine et en particulier ;
 - o L'évolution du projet vers un outil d'aide à la décision vis-à-vis des ressources stratégiques (§ 3) ;
 - o L'incorporation des données « pression » et « enjeux » sur les ressources utilisées pour l'AEP (§ 4) ;
 - o La revue des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines (§ 5) ;
 - o Une proposition et l'application d'une évaluation cartographique de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en Nouvelle-Calédonie (§ 6).

2 Valorisation du référentiel hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie (BDLISA-NC)

La livraison de « L’atlas hydrogéologique » composé de l’ensemble des fiches signalétiques des entités hydrogéologiques locales (SGNC-2021(13), a permis de concrétiser l’ampleur de la tâche et la difficulté à manipuler un document de 1877 pages et environ 680Mo.

Aussi, pour faciliter la valorisation du référentiel hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie (BDLISA-NC), deux voies ont été entérinées :

- Un explorateur cartographique permettant notamment la consultation, le téléchargement des données et des fiches signalétiques d’intérêt ;
- L’édition d’un poster pédagogique présentant dédié au référentiel hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie.

2.1 Explo’Lisa, Explorateur cartographique

Depuis le 25 mars 2022, le service géologique de la DIMENC met à disposition le référentiel hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie (BDLISA-NC) sur Georep (Figure 1, Figure 2). Ce référentiel permet d’améliorer la connaissance et le suivi de la ressource en eau souterraine. Vous y trouverez des informations concernant les caractéristiques des entités hydrogéologiques du territoire à plusieurs niveaux.

Un explorateur cartographique dédié à l’atlas hydrogéologique BDLISA-NC est disponible à l’adresse suivante :

<https://dimenc.gouv.nc/actualites/thematique/geologie/latlas-hydrogeologique-de-nouvelle-caledonie-bdlisa-nc>

Il est précisé que « *Ce travail a bénéficié du soutien financier du gouvernement de la Nouvelle-Calédonie et du BRGM. Il a également été développé avec la Communauté du Pacifique (CPS), dans le cadre du programme PROTEGE, financé par l’Union Européenne.* »

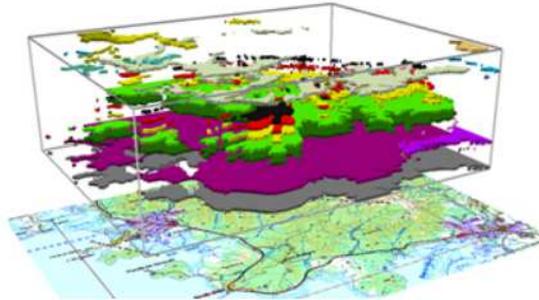
Par ailleurs, les rapports relatifs au projet sont également mis à disposition :

<https://dimenc.gouv.nc/geologie/diffuser-la-connaissance-geologique/latlas-hydrogeologique-de-nouvelle-caledonie-bdlisa-nc>

2.2 Un poster dédié à l’atlas hydrogéologique

Après validation du présent document par le programme PROTEGE et par le groupe de travail de la MISE, des posters communicants de grande dimension seront et diffusés pour présenter et expliquer à la fois le référentiel hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie (Figure 3) et sa valorisation en termes de vulnérabilité intrinsèque (Figure 24) pour l’identification des ressources stratégiques en eaux souterraines.

Explo' LISA : L'atlas hydrogéologique de Nouvelle-Calédonie (BDLISA-NC)



L'atlas hydrogéologique BDLISA-NC a été réalisé par le Service Géologique (SGNC) de la DIMENC et a bénéficié du soutien de la Nouvelle-Calédonie, du BRGM et de la Communauté du Pacifique (CPS), dans le cadre du programme PROTEGE, financé par l'Union européenne.

Avec l'appui technique de la Direction du Numérique et de la Modernisation (DINUM), le SGNC a mis en place un explorateur cartographique dédié à la ressource en eau souterraine.

Cet explorateur cartographique permet de visualiser et consulter le référentiel hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie qui permet d'améliorer la connaissance et le suivi de la ressource en eau souterraine.

A travers cet outil, vous trouverez sur cet espace cartographique des informations concernant les caractéristiques des entités hydrogéologiques avec des fiches signalétiques téléchargeables pour chaque entité.

[Accéder à l'application](#)

Figure 1 : Vers l'explorateur thématique (Explo'LISA), dédié à l'Atlas hydrogéologique de Nouvelle-Calédonie (BDLISA-NC).

Figure 2 : Explo'LISA : L'atlas hydrogéologique de Nouvelle-Calédonie (BDLISA-NC).

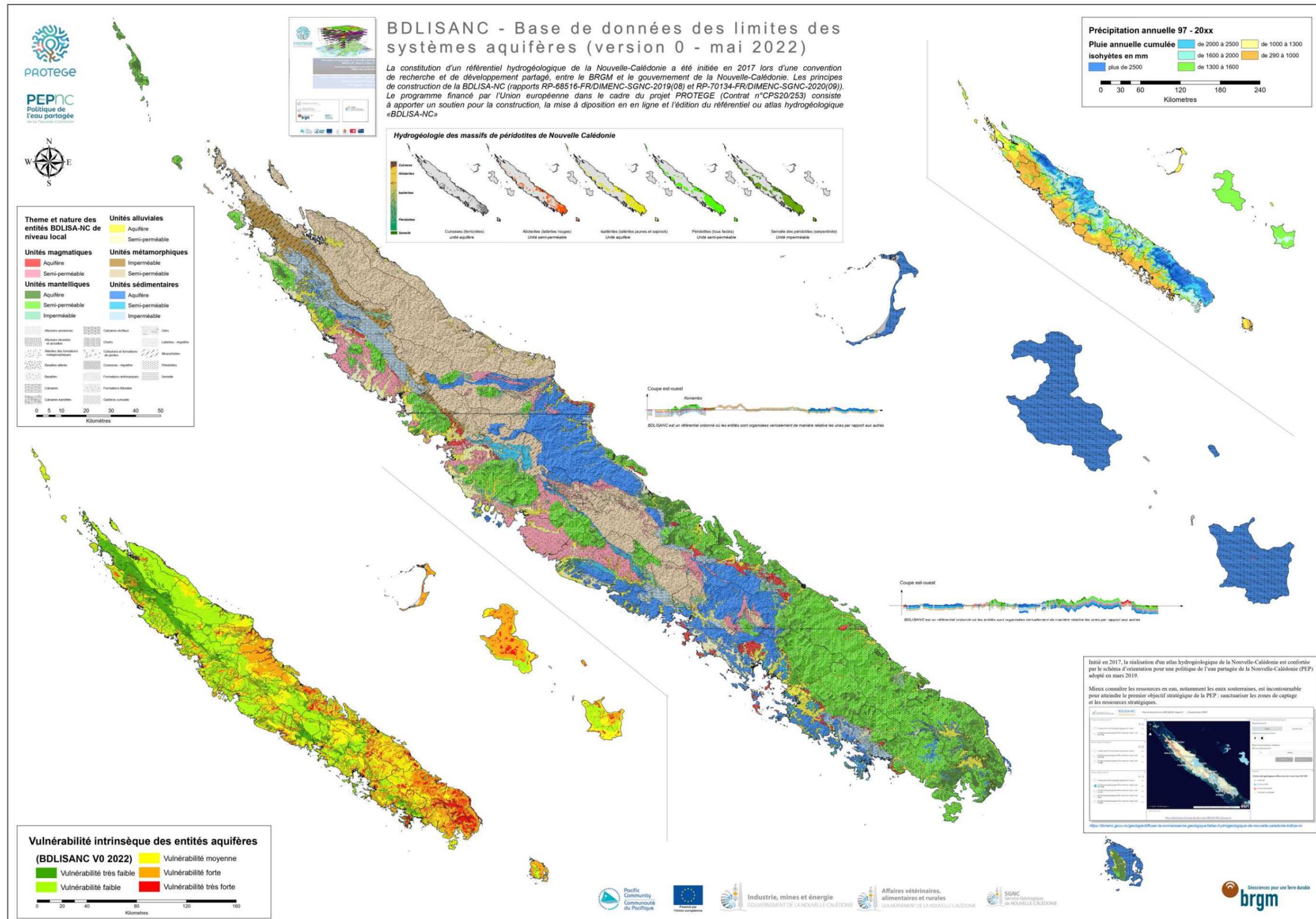


Figure 3 : Projet de poster de l'atlas hydrogéologique BDLISA-NC

3 Vers un outil d'aide à la détermination des ressources stratégiques

3.1 Définition

Selon le Schéma d'orientation pour une politique de l'eau partagée de la Nouvelle-Calédonie (PEPnc, § 3.2.2) « **les ressources dites « stratégiques »** [sont] *celles dont la détérioration ou la disparition compromettrait gravement, sans alternative possible, les conditions de vie des populations, le bon fonctionnement des écosystèmes ou le maintien d'activités économiques considérés prioritaires.* »

Au vu des échanges au sein des groupes de travail de la MISE, et notamment au sujet de la dualité entre situations actuelles sous-tension et ressources prometteuses, il apparaît probablement pertinent de distinguer :

- Des **ressources en eau critiques** (forte sollicitation, faible redondance, menacée, vulnérable, productivité résiduelle faible, etc.) ;
- Des **ressources en eau d'avenir** (potentiel important, naturellement protégées ou faiblement vulnérable, etc.)

3.2 Cadrage

La mission relevant du Contrat n°CPS20/253 doit permettre de contribuer à la définition des ressources en eau stratégiques en Nouvelle-Calédonie. Pour mener à bien cette tâche, en particulier l'Axe 2 relatif aux ressources en eau stratégiques, il est prévu de tenir compte des préconisations des groupes de travail dédiés de la politique de l'eau Partagé : PEP OS1 et OTB.

La charte de projet « Outil d'aide à la détermination des ressources stratégiques », diffusée en mars 2022, apporte des précisions en ce sens et permet de mieux cadrer notre action (encart ci-après).

Une ressource en eau ne peut être considérée stratégique que par ses utilisateurs ou gestionnaires locaux.

Il n'est d'aucune façon envisagé de déterminer de manière cartographique les ressources qui doivent relever d'une telle spécificité.

Cependant, il est envisagé de développer les moyens d'un diagnostic des enjeux et des menaces qui peuvent concerner une ressource en eau.

Les enjeux et les menaces sont des critères d'analyses qui peuvent être caractérisés pour chaque type d'usage ou d'intérêt de la ressource (AEP, Economique, Ecologique, Patrimonial).

Ainsi, la charte du projet visant à mieux définir les connaissances et le périmètre des ressources en eau stratégiques est construite sur la base de 19 actions de la PEP et propose une organisation fonctionnelle distinguant (Figure 4) :

- **La concertation** qui commence dès la phase de recueil des données et de construction des outils avec une phase « d'état des lieux communal », puis se poursuit jusqu'à la détermination de ressources stratégiques et à la mise en place éventuelle d'organe de gestion locaux.
- **L'approche « systémique »** qui propose d'organiser les données d'enjeux et de menaces sur les ressources en eaux et de développer un outil d'aide à la décision.

L'outil d'aide à la décision vise à classer et prioriser les ressources (Figure 5), en fonction de leurs enjeux (usage et potentialité actuelle) et du niveau de menace (surexploitation, feu, mine, IOTA, ...).

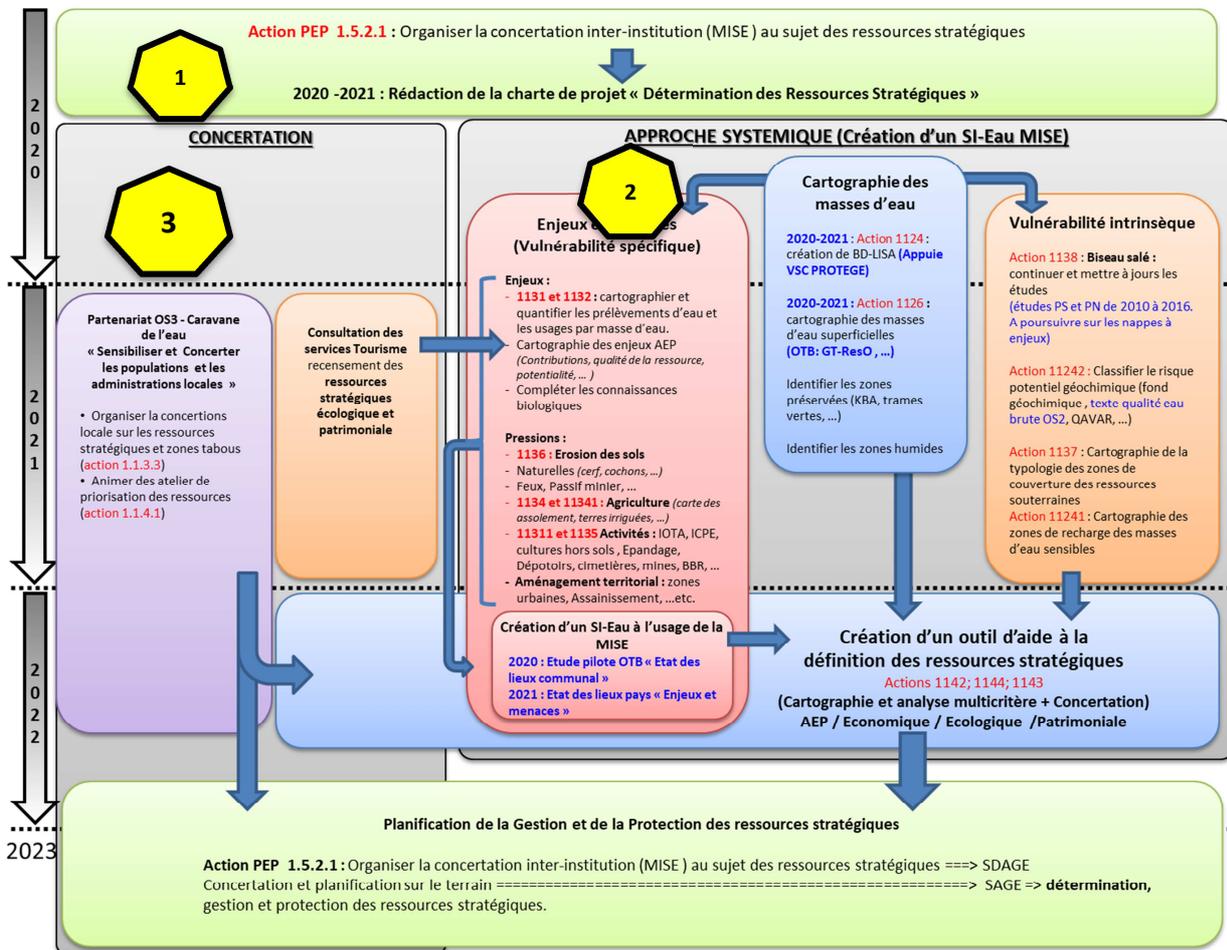


Figure 4 : Organisation fonctionnelle pour définir les connaissances et le périmètre des ressources en eau stratégiques d'après https://e-lien.gouv.nc/share/s/pu_u-l3mROq_f1lI2p2bfa.

3.3 Etat des lieux (EDL) de communes pilotes

Un premier Etat Des Lieux (EDL) a été réalisé sur quatre communes pilotes : Maré, Hienghène, La Foa et Boulouparis, auxquelles ont été ajoutées Farino et Sarraméa. Cet état des lieux vise un triple objectif :

- Apporter aux communes une synthèse multicritère des informations institutionnelles et des services publics en lien avec la gestion de l'eau et de son milieu naturel ;
- Présenter cette analyse sur la base de 5 cartes thématiques, qui doivent permettre de visualiser les problématiques majeures, de désigner les lacunes et les enjeux propres à la commune ;
- Mettre à disposition de la MISE des bases de données synthétiques, actualisables et comparables à l'échelle du territoire, pour permettre des analyses multicritères à une échelle plus large que celle de la commune, et la mise en place d'indicateurs pour la politique de l'eau partagée de la Nouvelle-Calédonie.

L'état des lieux doit permettre de compiler l'ensemble des données utiles à la réalisation d'une analyse multicritères pour classer les ressources stratégiques, aux dires des parties prenantes. Quatre types de ressources stratégiques ont été retenus : pour l'AEP, Economiques, Biologiques ou écosystémiques et Patrimoniales.

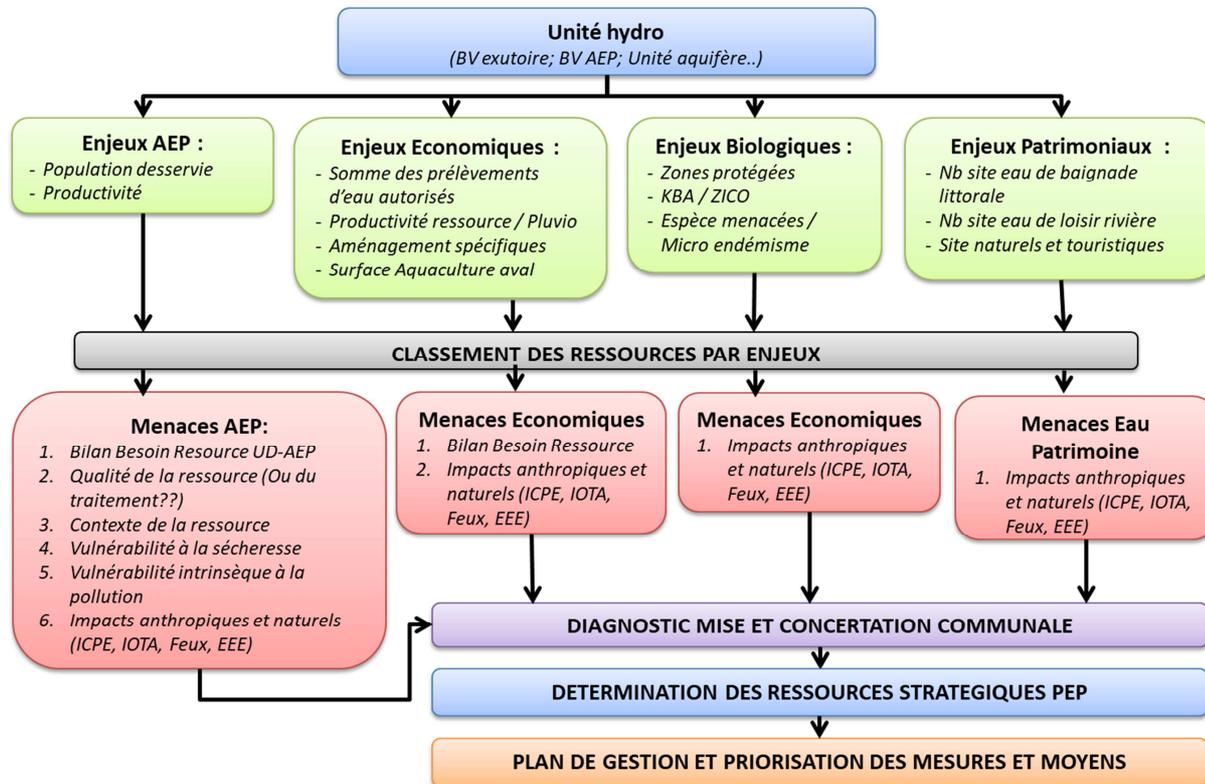


Figure 5: Exemple d'analyse multicritère des enjeux et des menaces permettant un diagnostic et une aide à la concertation communale d'après https://e-lien.gouv.nc/share/s/pu_u-l3mROq_f1l2p2bfA.

3.4 Approche systémique pour les ressources stratégiques relatives à l'AEP et aux eaux souterraines

Dans l'approche développée ci-dessus (§ 3.2), le présent rapport rend compte de la mise en œuvre de l'approche systémique pour **les ressources stratégiques relatives à l'AEP et aux eaux souterraines**, tout en veillant autant que possible, à rester dans le cadre contractuel défini.

Ainsi, les étapes suivantes sont présentées par la suite :

- L'incorporation des données « pression » et « enjeux » sur les ressources utilisées pour l'AEP (§ 4) ;
- La revue des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines (§ 5) ;
- La proposition et l'application d'une évaluation cartographique de la vulnérabilité des eaux souterraines en Nouvelle-Calédonie (§ 6).

4 Recensement des « pressions » et « enjeux » vis-à-vis de l’AEP et incorporation des données relatives aux eaux souterraines

4.1 Recensement des « pressions » et « enjeux » vis-à-vis de l’AEP

Les données géographiques de pressions et enjeux sur les ressources en eau utilisées pour l’AEP sont extraits de plusieurs bases de données à disposition (la base de données de l’EDL, BDTOPO, BDLISA-NC, MOS2014,...).

4.1.1 Recensement des « pressions » ou « menaces »

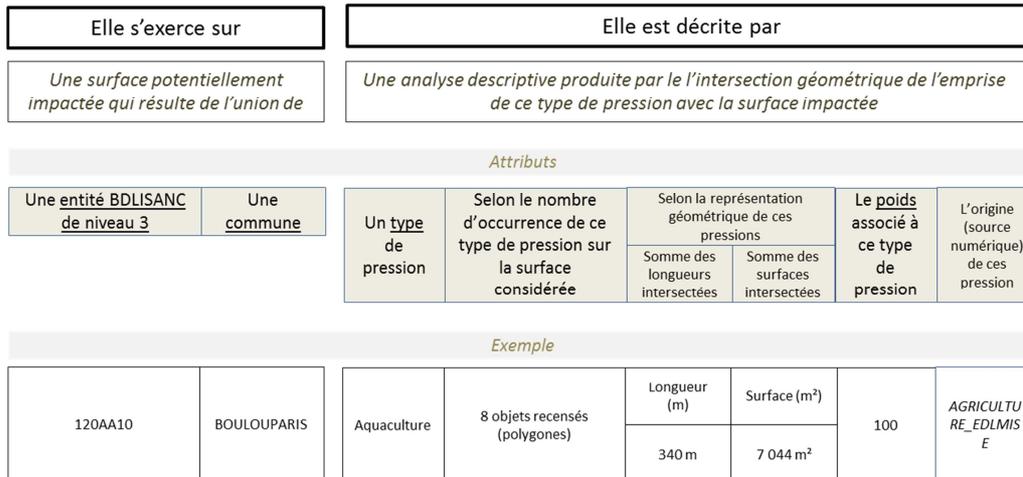
14 couches sont considérées comme des pressions vis-à-vis de l’AEP mais certaines couches ne concernent que les communes pilotes de l’EDL (Tableau 1). Le recensement des pressions et leur association aux entités BDLISA-NC est effectué sur tout le territoire. Les communes de l’EDL bénéficient de plus d’informations (14 couches) par rapport aux autres communes (9 couches).

Les pressions sur les communes pilotes de l’EDL	Les pressions sur les communes du territoire
CARRIERES_SURFACE_MOS2014	CARRIERES_SURFACE_MOS2014
Carrières autorisés et historiques	Carrières autorisés et historiques
MINES_Surface_MOS2014	MINES_Surface_MOS2014
ICPE_EDLMISE	ICPE_EDLMISE
VOIRIE_BDTOPO	VOIRIE_BDTOPO
BATI_BDTOPO	BATI_BDTOPO
ELECTRICITE	ELECTRICITE
MOS2014	MOS2014
FEUX_VIIRS_2012_2021	FEUX_VIIRS_2012_2021
AGRICULTURE_EDL_MISE	-
Mines autorisés et historiques	-
RESAUX_ASS_COLLECTIF	-
UNITE_ASS_COLLECTIF	-
IOTA	-

Tableau 1 : Liste des couches de pressions sur les communes pilotes et sur les autres communes du territoire.

Les couches n’étant pas décrites de manière homogène, un travail de mise en forme de la donnée a été nécessaire pour faciliter le recensement des pressions. Il est recommandé, autant que possible, une harmonisation des bases de données produites et partagées pour ces pressions.

Pour la suite des travaux menés, une proposition d’harmonisation du formalisme de ces données est fournie. Ainsi, chaque pression est recensée par entité BDLISA-NC et par commune puis comparées entre elles. Ainsi une pression type est décrite dans le schéma suivant (Figure 6).



Pression type proposée

Figure 6 : Schéma de représentation type des pressions

La requête ci-dessous (Figure 7) au format SQL (et OGC) permet de créer une vue des pressions qui s'appliquent sur les entités LISANC type, à partir des couches de pressions listé dans le tableau précédent (Figure 6). Ces requêtes sont « normalisées » afin de présenter les mêmes attributs et être additionnées les unes aux autres en un unique inventaire des pressions distinguées par leur type, géométrie, source et poids.

```

Create View  PRESSIONS_xxx_par_LISA_Communes AS
SELECT
  Cible.RHF_ENTITE as ENTITE_LISA,
  Cible.nom as NOM_COMMUNE,
  Cible.code_com as CODE_COMMUNE,
  count(Pression.ID) as Combien,
  Pression.type_used as Type_Pression,
  Pression.Shape.STGeometryType() As Geometrie,
  count(Pression.SHAPE.STIntersection(Cible.Shape)) as Nombre_objets,
  sum(Pression.SHAPE.STIntersection(Cible.Shape).STArea()) as Pression_Surf,
  sum((Pression.SHAPE.STIntersection(Cible.Shape).STLength())) as Pression_Long,
  'source (fichier) des pressions' as Source_pression,
  100 as Poids
  geometry::UnionAggregate(Pression.SHAPE.STIntersection(Cible.Shape)) as Shape

FROM  PRESSION_Nom AS Pression CROSS JOIN LISA_COMMUNE AS Cible
WHERE (Pression.SHAPE.STIntersects(Cible.Shape)=1)
GROUP BY  Cible.RHF_ENTITE,
          Cible.nom,
          Cible.code_com,
          Pression.Type_Pression
          Pression.Shape.STGeometryType()

```

Figure 7 : Requête SQL permettant de créer un fichier de pression type, à partir des couches de pressions. Le Poids est arbitrairement fixé à 100 mais peut découler d'une analyse des types de pressions et d'un tableau spécifique d'attribution selon le contexte étudié

Chaque pression type, qu'elle soit sous forme de polygone, de ligne ou de points, sera organisée de la même façon avec les colonnes suivantes (Tableau 2) : RHF_ENTITE (code BDLISA-NC), Nom (Commune), code_com (code de la commune), type_pression, Combien (dénombrement des pression) ,Somme_Area (somme des géométries, surface ou longueur des pressions) et

Source_pression (fichier pression de base). Une valeur de pression (Poids) variant de 0 à 100 a été prise arbitrairement en fonction de l'importance du type de pression. Par exemple un verger aura une valeur 50, plus importante qu'une culture vivrière qui aura une valeur 10, car elle jugée est moins impactante qu'un verger. Ces valeurs de pression pourraient être ajustées selon les préconisations du groupe de travail OS1.

RHF_ENTITE	nom	code_com	type_pression	Combien	Somme_Area	Poids	Source_pression
120AA10	BOULOUPARIS	98802	210 - Terres arables et cultures permanentes	1	72.9	50	AGRICULTURE_EDLMISE
120AA10	BOULOUPARIS	98802	230 - Terres pastorales aménagées structurées	18	340016.6	80	AGRICULTURE_EDLMISE
120AA10	BOULOUPARIS	98802	Aquaculture	8	7477	100	AGRICULTURE_EDLMISE
120AA10	BOULOUPARIS	98802	Autres	66	604795.5	100	AGRICULTURE_EDLMISE
120AA10	BOULOUPARIS	98802	Cereales et oleagineux	2	1963.6	50	AGRICULTURE_EDLMISE
120AA10	BOULOUPARIS	98802	Cultures vivrières	1	95.1	10	AGRICULTURE_EDLMISE
120AA10	BOULOUPARIS	98802	Elevage	90	1836464.6	70	AGRICULTURE_EDLMISE
120AA10	BOULOUPARIS	98802	Maraîchage	3	4100.4	50	AGRICULTURE_EDLMISE
120AA10	BOULOUPARIS	98802	Verger	34	27056.9	50	AGRICULTURE_EDLMISE

Tableau 2 : Exemple de pression type de la couche pression : AGRICULTURE_EDL_MISE

On observe (Tableau 2) que sur l'entité 120AA10 de BOULOUPARIS il y a 34 vergers et la somme des surfaces totales de ces vergers est de 27 056.9 m². Le Tableau 3 synthétise la compilation des pressions types selon leur entité BDLISA-NC et la commune.

RHF_ENTITE	nom	code_com	type_pression	Combien	Somme_Area	Poids	Source_pression
200KA30	MARE	98815	SENTIER	2600	267576.9	50	VOIRIE_BDTOPO
200KA30	MARE	98815	AXEPISTE	4727	346331.6	50	VOIRIE_BDTOPO
200KA30	MARE	98815	AXNREV	701	75133.4	50	VOIRIE_BDTOPO
200KA30	MARE	98815	AXREV	2995	279613.8	50	VOIRIE_BDTOPO
200KA30	MARE	98815	Carrieres_Edl_mise	1	-	100	CARRIERES_EDLMISE
200KA30	MARE	98815	Divers	2	-	100	ICPE_EDLMISE
200KA30	MARE	98815	Elevage	5	-	100	ICPE_EDLMISE
200KA30	MARE	98815	Garage	8	-	100	ICPE_EDLMISE
200KA30	MARE	98815	Gestion déchets	1	-	100	ICPE_EDLMISE
200KA30	MARE	98815	Station-service	7	-	100	ICPE_EDLMISE
200KA30	MARE	98815	Substances inflammables	7	-	100	ICPE_EDLMISE
200KA30	MARE	98815	210 - Terres arables et cultures permanentes	376	17424556.9	50	AGRICULTURE_EDLMISE
200KA30	MARE	98815	230 - Terres pastorales aménagées structurées	2	336515.9	80	AGRICULTURE_EDLMISE
200KA30	MARE	98815	BATILEG	2174	55920.7	50	BATI_BDTOPO
200KA30	MARE	98815	BATIDUR	6618	427347.1	50	BATI_BDTOPO
200KA30	MARE	98815	Carr_MOS	47	516840.3	100	CARRIERS_SURFACE_MM OS2014_EDLMISE
200KA30	MARE	98815	EL-GENPHO	1	2171.3	80	ELECTRICITE_BDTOPO
200KA30	MARE	98815	Feux_20122020	148	1143665.7	80	FEUX_VIIRS_2012_2020
200KA30	MARE	98815	1 11 112 Tissu urbain discontinu	362	8377204.5	100	MOS_2014

Tableau 3 : Compilation des pressions types pour l'entité BDLISA-NC 200KA30 de la commune de Maré.

Le résultat des pressions types est un tableau de 13 369 lignes. Seule une partie de ce tableau est utilisée pour illustrer le résultat obtenu (Tableau 3, Figure 8). Le tableau de résultat des pressions a été réorganisé en tableau croisé dynamique (840 lignes et 122 colonnes, extrait Tableau 5) permettant de mieux visualiser les types de pressions selon la source de pression, la commune et l'entité BDLISA-NC.

4.1.2 Recensement des « enjeux »

Les enjeux considérés sont les captages AEP souterrains ou superficiels et les eaux de loisirs en eau douce et eaux de baignades littorales. En utilisant la même méthode que pour les pressions, le recensement des enjeux dénombre et représente les captages AEP (Tableau 4, Figure 9 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) par entité BDLISA-NC par commune, par type (souterrain ou superficiel). Le poids de l'enjeu correspond à l'estimation de la population desservie par l'AEP et par unité de distribution.

Selon les données disponibles, les enjeux pourraient être encore précisés.

RHF_ENTITE	nom	code_com	Type_Enjeux	Combien	Poids	Source_pression
120AA10	BOULOUPARIS	98802	Eau souterraine	1	175.0	AEP_DAVAR
120AA10	BOULOUPARIS	98802	Eau superficielle	1	51.8	AEP_DAVAR
120AA10	BOULOUPARIS	98802	Eau superficielle	1	175.0	AEP_DAVAR
120AB30	BOULOUPARIS	98802	Eau souterraine	2	1585.9	AEP_DAVAR
120AB30	BOULOUPARIS	98802	Eau superficielle	1	492.4	AEP_DAVAR
120AB30	BOULOUPARIS	98802	Eau superficielle	1	1585.9	AEP_DAVAR
120AD10	BOULOUPARIS	98802	Eau souterraine	1	0.00	AEP_DAVAR
120AD10	BOULOUPARIS	98802	Eau souterraine	2	1585.9	AEP_DAVAR
120AD10	BOULOUPARIS	98802	Eau superficielle	1	1585.9	AEP_DAVAR
120AD20	BOULOUPARIS	98802	Eau souterraine	1	0.00	AEP_DAVAR

Tableau 4 : Recensement des AEP souterrains ou superficiels par entité BDLISA-NC à BOULOUPARIS et par estimation des populations desservies.

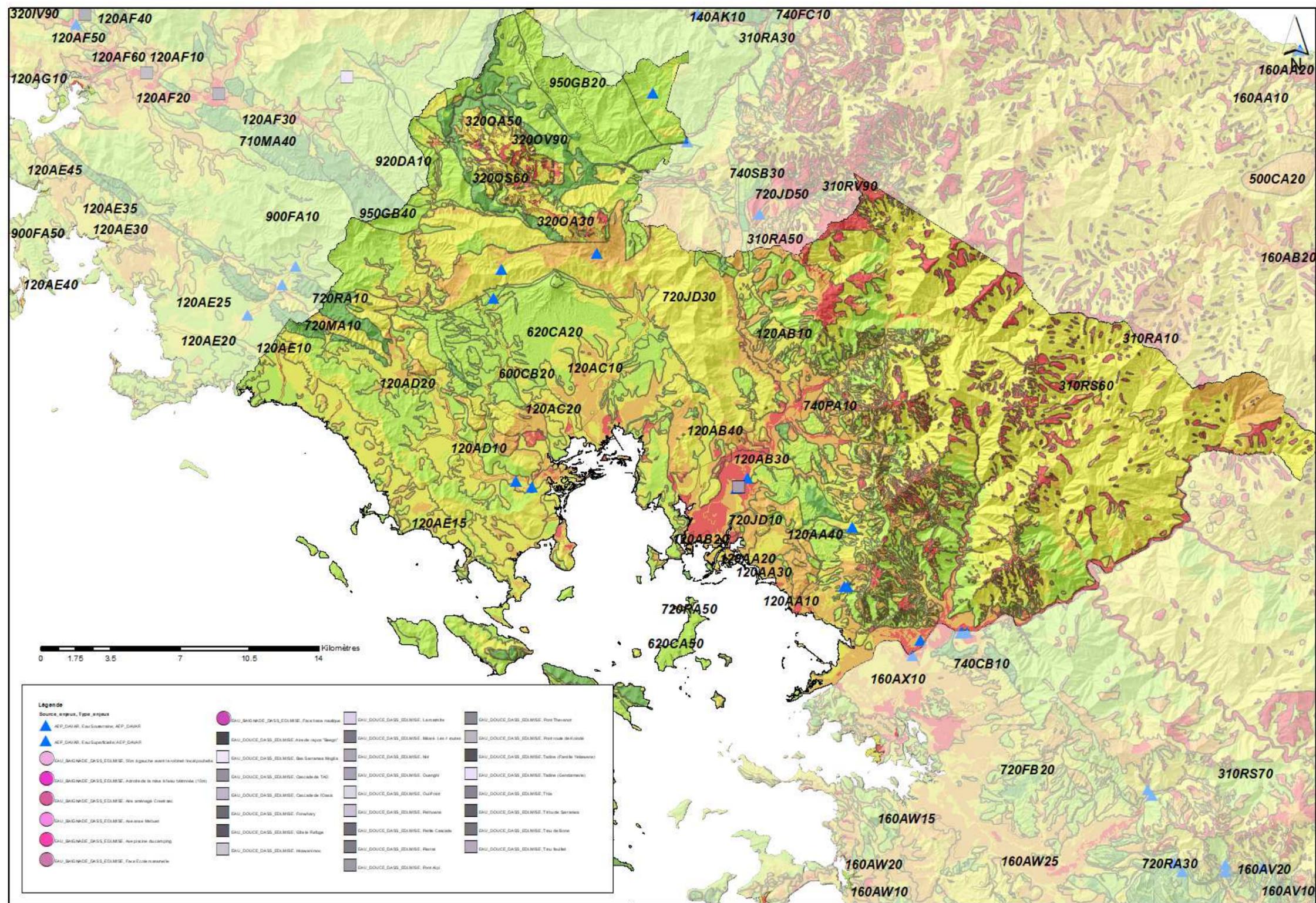


Figure 9 : Carte synthétique des enjeux sur la commune de Boulouparis

4.2 Incorporation des données relatives aux eaux souterraines aux entités de la BDLISA-NC

Les ouvrages recensés dans la Base de Données du Sous-Sols de la Nouvelle-Calédonie (BDSSNC) n'ont pas tous une vocation hydrogéologique. Il peut s'agir d'ouvrages géologiques ou géotechniques « secs ». Par ailleurs, la présence d'eau n'a peut-être pas systématiquement été notée. Ainsi, seulement 26% des ouvrages de la BDSSNC sont renseignés en données relatives aux eaux souterraines (niveau d'eau statique, Figure 10). Les niveaux d'eaux des ouvrages sont associées aux l'entité BDLISA-NC correspondante.

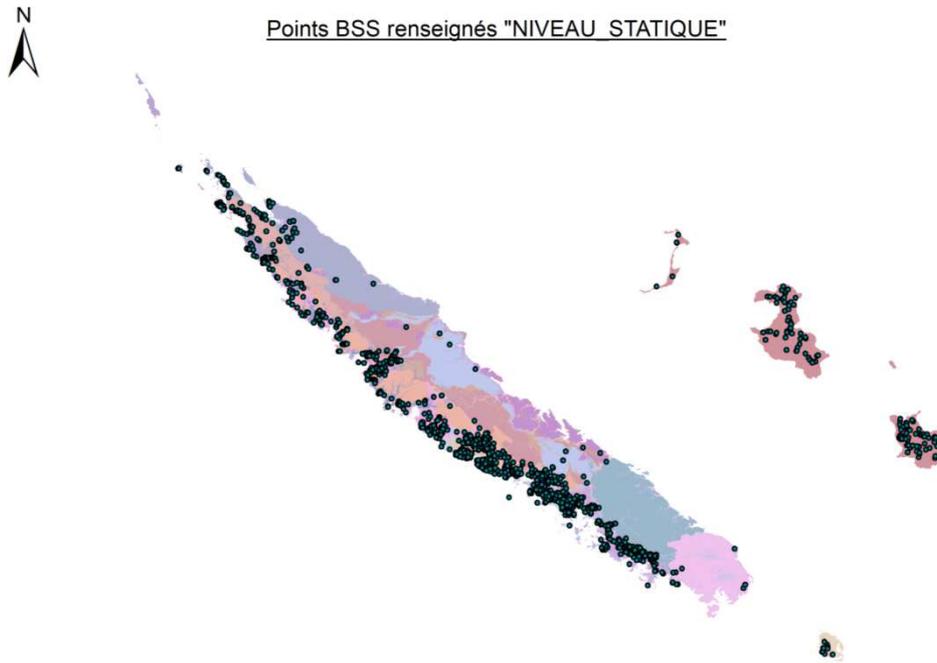


Figure 10 : Carte des ouvrages avec un niveau statique (BSSNC 05/2022)

5 Revue des méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

5.1 Définitions

Le risque de pollution d'une ressource en eau souterraine exprime la conjonction d'une menace (ou aléa) et de la vulnérabilité de cette ressource à la pollution.

La vulnérabilité représente la capacité de l'eau située en surface à rejoindre le milieu souterrain saturé en eau. La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique en relation avec la nappe d'eau souterraine, procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions, suivant les caractéristiques de ce milieu.

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité, intrinsèque et spécifique (Schnebelen et al., 2002) :

- La **vulnérabilité intrinsèque** est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines ;
- La **vulnérabilité spécifique** est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

La distinction des deux types de vulnérabilité est nécessaire car, d'une façon générale, elles ne se placent pas sur la même échelle d'investigation : la vulnérabilité intrinsèque peut être considérée comme invariante dans le temps (à notre échelle de travail) alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux polluants éventuels) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis.

5.2 Revue des méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (Gogu et Dassargues, 1998 b). Elles peuvent être classées en trois grandes catégories :

- **Les méthodes de cartographies à index** basées sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région (critères de vulnérabilité), en donnant un indice numérique ou une valeur à chaque paramètre. La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères (SIG, par exemple) ;
 - o **Le système matriciel** : ce système, adapté à grande échelle (locale), se base sur un nombre limité de paramètres, judicieusement choisis. On procède à une combinaison de classes pour définir de façon descriptive le degré de vulnérabilité des aquifères.
 - o **Le système de classe** : on définit un intervalle pour chaque paramètre jugé nécessaire pour l'évaluation de la vulnérabilité, ensuite on subdivise chacun des intervalles retenus en fonction de la variabilité du paramètre en question. Le score final résulte de la sommation de chaque note attribuée pour les différents paramètres. Il sera subdivisé en un nombre de classes limité.

- **Le système de classes pondérées:** basé sur l'affectation de notes aux paramètres qui sont retenus pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines en définissant des intervalles (id méthode précédente). Avant l'analyse combinatoire (somme ou multiplication), une pondération est attribuée pour chaque paramètre selon son importance dans l'évaluation de la vulnérabilité.
- **Les modèles de simulation :** ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant le processus de transfert de contaminants (Schnebelen 2002). Ils donnent une image de vulnérabilité spécifique de la nappe car le « calage » dépend des polluants pris en compte (notion de facteur retard, K_d ,...);
- **Les méthodes statistiques :** elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants sur la zone d'étude et fournissent des caractéristiques sur les probabilités de contamination sur la zone d'étude. Elles donnent une image de la vulnérabilité spécifique de la nappe.

5.3 Les méthodes de cartographies à index

Méthode DRASTIC

Elle a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis en 1985 et Aller et al. en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines (Schnebelen et al., 2002). Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept critères :

- D, Depth to groundwater (distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée) ;
- R, Recharge (recharge) ;
- A, Aquifer media (nature de la zone saturée) ;
- S, Soil media (nature du sol) ;
- T, Topographie (topographie, pente en %) ;
- I, Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée) ;
- C, Conductivity (perméabilité de l'aquifère).

Chaque critère est cartographié avec un index, appelé aussi note (n), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité.

L'index de vulnérabilité final (D_i) est la somme pondérée des sept paramètres selon la formule suivante : $D_i = D_n D_p + R_n R_p + A_n A_p + S_n S_p + T_n T_p + I_n I_p + C_n C_p$

Où :

- D, R, A, S, T, I, C, sont les paramètres cités plus haut ;
- n : notation accordée à chaque paramètre ;
- p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.
- Les cartes DRASTIC permettent de visualiser le degré relatif de vulnérabilité d'un secteur de la zone étudiée. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'index.

La méthode DRASTIC propose deux systèmes de pondération suivant les conditions d'occupation du sol : occupation "normale" ou avec une occupation par une activité agricole intensive utilisant par exemple des produits phytosanitaires.

La méthode DRASTIC est principalement utilisée pour la cartographie à petite échelle.

Méthode SINTACS

Elle est dérivée de la méthode DRASTIC, développée en Italie, au début des années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie (Petelet et al., 2000). Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC, soit en italien :

- S, Soggiacenza (profondeur de la nappe) ;
- I, Infiltrazione (infiltration) ;
- N, Azione del Non Saturo ;
- T, Tipologia della Copertura (sol) ;
- A, Carratteri Idrogeologici dell' Acquifero ;
- C, Conducibilita Idraulica (conductivité hydraulique) ;
- S, Acclività della Superficie Topographica.

Contrairement à DRASTIC, la méthode SINTACS permet d'utiliser, en même temps et dans des cellules différentes, des facteurs de pondération variables selon les situations (Schnebelen et al., 2002).

L'index de vulnérabilité I_v est calculé selon la formule : $I_v = \sum P(1,7) W(1,n)$

Avec :

- $P(1, 7)$, index des critères 1 à 7
- $W(1, n)$, poids de chaque classe (varie de 1 à n)

L'index final résultant de cette méthode est divisé sous forme de pourcentage puis d'intervalles définis sur la base de 500 tests. Ces intervalles sont regroupés en six classes de vulnérabilité. SINTACS utilise donc les sept mêmes paramètres que DRASTIC mais est plus flexible au niveau du système d'indexation et de pondération. L'utilisateur code les données d'entrée en fonction des situations locales de chaque cellule, avec la possibilité d'utiliser des classifications différentes suivant les conditions.

Méthode AVI

Développée par l'institut de recherche national d'hydrologie (National Hydrology Research Institute - NHRI) à Saskatoon, Saskatchewan, la méthode de l'index de vulnérabilité des couches aquifères (Aquifer Vulnerability Index - AVI) détermine un critère de protection des eaux souterraines. Cette technique a été appliquée à une partie de la région frontalière entre le Saskatchewan et l'Alberta (Van Stempvoort, et d'Al, 1992), elle a impliqué la compilation de la stratigraphie, de l'identification des couches aquifères, et du calcul de l'AVI pour approximativement 2.000 points d'eau disponibles sur ce secteur pilote.

Résistance hydraulique, $c = \sum D_i / K_i$, pour les couches de 1 à i

AVI mesure la vulnérabilité selon la résistance hydraulique (c) à l'écoulement vertical de l'eau opposée par les formations géologiques situées au-dessus de la couche aquifère. La résistance hydraulique est calculée à partir de l'épaisseur (d) de chaque couche sédimentaire et de la conductivité hydraulique (k) de chacune de ces couches.

Dans ce type d'approche, des valeurs hydrauliques saturées de conductivité (K_{sat}) sont assignées à chaque couche sédimentaire rapportée par point. Ces valeurs sont souvent établies à partir de valeurs typiques issues de recherches bibliographiques. L'utilisation de K_{sat} pour les niveaux

insaturés devrait donner des valeurs hydrauliques conservatrices de résistance donc une vulnérabilité moins élevée car la perméabilité à saturation est inférieure à la perméabilité d'un milieu non saturé.

L'épaisseur des différentes couches sédimentaires découle de l'étude des ouvrages existants sur le territoire de l'étude. La résistance hydraulique (c) à la dimension du temps (par exemple en années) et représente le flux-temps par gradient d'unité pour l'eau s'infiltrant au travers des diverses couches de sédiment vers la couche aquifère saturée.

Une résistance hydraulique (c) faible, suppose une vulnérabilité importante, à contrario, (c) élevée suppose une vulnérabilité faible.

Une carte de vulnérabilité peut être déduite en calculant le logarithme₁₀ de la résistance hydraulique (notation c) pour chacun des points inventoriés.

Les surfaces résultantes (par interpolation des points, à fortiori pour un milieu supposé homogène) représentent les secteurs de résistance différente. Elles sont groupées par catégories de vulnérabilité (Tableau 6).

Résistance hydraulique, c (années)	Notation (c)	Catégorie de vulnérabilité
< 10 ans	< 1	vulnérabilité extrêmement élevée
10 -100 ans	1 à 2	vulnérabilité élevée
100 -1 000 ans	2 à 3	vulnérabilité modérée
1 000 -10 000 ans	3 à 4	basse vulnérabilité
> 10 000 ans	> 4	vulnérabilité extrêmement basse

Tableau 6 : Classes de vulnérabilité de la méthode AVI.

Méthode EPIK

C'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques sensus-stricto (Doerfliger, 1996 ; Doerfliger et Zwahlen, 1997). Elle a été développée dans le but de délimiter les périmètres de protection des captages, conformément à la législation suisse, à partir d'une base cohérente et rigoureuse. Un des avantages de cette méthode est de traduire la sensibilité des eaux souterraines vis-à-vis de tout type de contaminant. La méthode est systématique puisqu'elle propose une analyse détaillée du bassin d'alimentation de la source karstique découpé en un maillage régulier. Elle est basée sur quatre critères :

- Epikarst ;
- Protective Cover (couverture protectrice : sol) ;
- Infiltration Conditions (conditions d'infiltration) ;
- Karst network development (développement du réseau karstique).

Ces critères correspondent à quatre aspects spécifiques déterminant l'organisation des écoulements en milieu karstique. Chaque paramètre est divisé en classes traduisant des degrés d'impact vis-à-vis d'une pollution. Un coefficient multiplicateur (facteur de pondération) est appliqué à chaque paramètre afin de traduire son importance relative par rapport aux autres (Petelet-Giraud et al., 2000).

L'indice final de vulnérabilité est calculé (facteur de protection) en chaque maille du système selon la formule :

$$F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \delta K_l$$

- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$: coefficients de pondération des critères ;
- E_i, P_j, I_k, K_l : valeur de chacun des critères indexés.

Méthode RISKE

Cette méthode s'inspire de la méthode suisse EPIK en raison de sa spécificité karstique. RISKE est un acronyme qui reprend les initiales des 5 critères pris en compte : Roche aquifère, Infiltration, Sol, Karstification, Epikarst (Petelet-Giraud et al., 2000). La combinaison des 5 cartes correspondant à la transcription des 5 critères RISKE permet de calculer l'indice global de vulnérabilité (Ig) en chaque maille de la zone d'étude. Le choix de la taille de la maille se fait généralement en fonction du pas du Modèle Numérique de Terrain (50x50 m par exemple) ou de la densité de l'information disponible. A chaque maille correspond une valeur de l'indice de chacun des critères. La compilation des cinq cartes élémentaires se fait en introduisant un facteur de pondération entre les critères traduisant l'importance relative qui leur est attribuée.

Toutes les alternatives des critères sont classées en 5 catégories indexées de 0 à 4, du moins au plus vulnérable. Dans la même logique, l'indice global de vulnérabilité (Ig) obtenu en chaque pixel de la zone d'étude est divisé en 5 classes égales (0 à 4) allant du moins au plus vulnérable.

Le calcul de l'indice global de vulnérabilité Ig se fait selon la formule :

$$I_g = \alpha R_i + \beta I_j + \delta S_k + \gamma K_l + \epsilon E_m$$

- $\alpha, \beta, \delta, \gamma, \epsilon$: poids des critères RISKE ;
- i, j, k, l, m : indices des critères RISKE.

Méthode DISCO

La méthode "DISCO" (discontinuités - couverture protectrice) a pour but de définir les zones de protection en tenant compte de l'hétérogénéité du milieu. Elle est basée sur une évaluation de la vulnérabilité intrinsèque prenant en considération les facteurs géologiques et hydrogéologiques conditionnant le fonctionnement de l'aquifère fissuré et le transport des polluants.

Trois paramètres sont jugés nécessaires et suffisants pour évaluer le transport d'un polluant d'un point quelconque du bassin d'alimentation jusqu'à son arrivée au captage. L'importance relative de ces différents paramètres et le mode de combinaison reposent sur des études de cas pratiques sur le terrain.

L'évaluation de l'influence combinée de ces trois paramètres permet de déterminer un facteur de protection naturel en tout point du bassin d'alimentation.

Le paramètre "discontinuités" prend en considération le transit de l'eau à l'intérieur de l'aquifère fissuré entre un point d'infiltration sur le bassin d'alimentation et le captage (p. ex. zone fracturée fortement perméable en connexion rapide avec le captage ; secteur peu fracturé), le paramètre "couverture protectrice" traduit l'effet protecteur des formations géologiques surmontant l'aquifère (sol, dépôts quaternaires), le paramètre "ruissellement" englobe les phénomènes d'écoulement de l'eau en surface avant son infiltration (ruissellement de pente, cours d'eau permanents ou temporaires).

Méthode GOD

Développée par Foster en 1987, elle présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée. Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères :

- Type de nappe (Groundwater occurrence) ;
- Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overall aquifer class) ;
- Profondeur de la nappe (Depth to groundwater table).

Le but de cette méthode est de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère.

Méthode PAPRIKA

« Protection des Aquifères karstiques basée sur la Protection, le Réservoir, l'Infiltration et le degré de Karstification » est une méthode multicritère de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère karstique. Cette méthode cible d'une part la ressource et d'autre part le captage. L'essentiel des critères permet de caractériser le transfert depuis la surface vers la zone non saturée, donc la ressource ; le transfert au sein de la zone saturée est pris en compte dans un deuxième temps avec la notion de vitesse de transfert basée sur les résultats d'essais de traçage artificiel. C'est une méthode de cartographie à index à pondération des critères utilise 4 critères :

- (P) La couverture protectrice résultant de la combinaison la plus productrice entre les critères S Sol, la lithologie, l'épaisseur et la fracturation de la zone non saturée et
- E pour fonctionnement épikarstique,
- R pour la nature de la roche du réservoir souterrain
- I pour la nature de l'infiltration (diffuse ou ponctuelle au niveau de phénomènes exokarstiques)
- Ka pour le degré de karstification et le fonctionnement du système karstique

Méthode IDPR

L'indice de persistance et de développement des réseaux (IDPR) a été créé par le BRGM pour qualifier un territoire en termes de "chemins empruntés" par les eaux météoritiques. L'eau qui se répand à la surface des terrains naturels (qui n'est pas absorbée par les plantes ou soumise à une évaporation directe), quitte son bassin versant de deux manières distinctes :

- elle ruisselle à la surface, se concentre dans les ruisseaux et les rivières et quitte le bassin à la faveur d'un exutoire de surface
- elle s'infiltré dans le sous-sol, se concentre dans un aquifère et quitte ce dernier par un exutoire souvent distinct de celui du réseau des rivières.

L'Indice de développement et de persistance des réseaux se base sur deux critères :

- la zone non saturée (ZNS) qui intervient avant l'arrivée du polluant dans l'aquifère (nature, perméabilité, épaisseur) ;
- les caractéristiques propres des aquifères (type de perméabilité, degré de karstification/fissuration, hétérogénéité) susceptibles d'influencer le comportement du polluant dans la nappe (dispersion, rapidité de propagation,...).

L'IDPR se substitue aux données liées à la perméabilité des sols (eaux superficielles) ou du sous-sol (les eaux souterraines). Il s'agit d'une approche simplifiée des caractéristiques de ces milieux pour lesquels, on l'a vu précédemment, l'IDPR décrit, de manière qualitative, la perméabilité à travers les pôles infiltration et ruissellement.

L'IDPR est croisé avec l'épaisseur de la ZNS pour hiérarchiser la vulnérabilité simplifiée des eaux souterraines. L'épaisseur de la zone non saturée est dans ce cas considérée comme un facteur susceptible de retarder ou d'accentuer la migration des polluants dans le milieu considéré.

L'IDPR permet une approche qualitative du rapport entre ces deux "chemins", il donne une indication quant à l'aptitude des formations du sol et sous-sol à laisser s'infiltrer et/ou ruisseler les eaux de surface vers/depuis le milieu souterrain.

La densité de drainage est donc un indicateur révélateur des propriétés des formations géologiques. Un bassin formé de matériaux très perméables aura en général une densité de drainage faible. A l'inverse, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes ou des argiles, va souvent présenter une densité de drainage élevée.

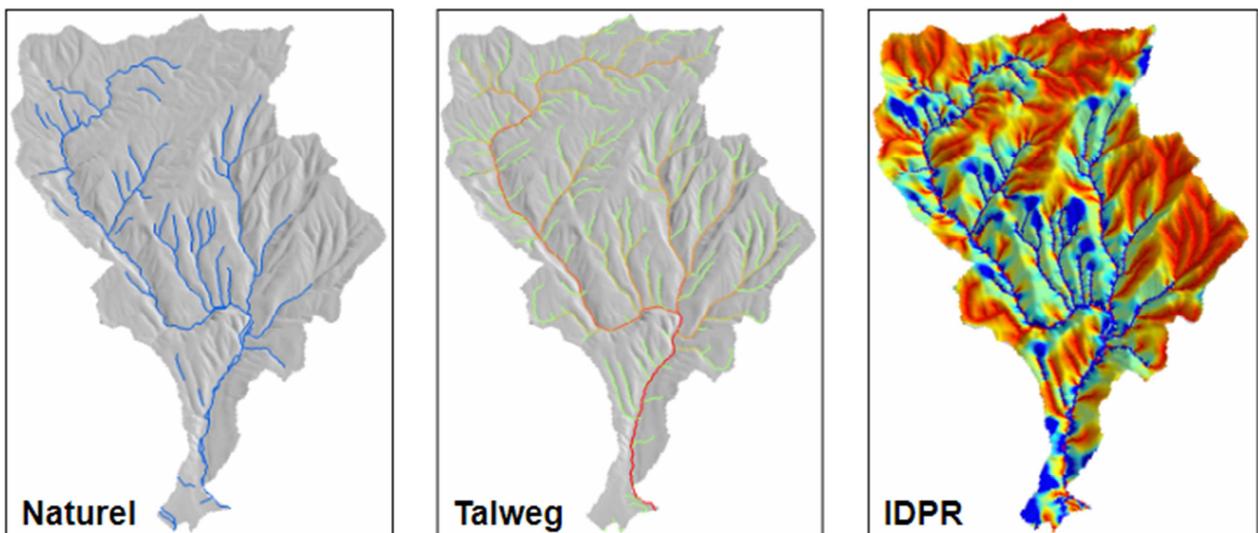


Figure 11 : Illustration de la méthode IDPR : Indice de Développement et de Persistance de Réseaux.

L'IDPR devient ainsi un le moyen de quantifier ce rôle, en comparant un réseau théorique établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène (indice de développement ID), au réseau naturel mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène (de persistance des réseaux PR).

L'indice de développement et de persistance des réseaux présente une métrologie de l'écart constaté entre les deux réseaux.

5.4 Les autres méthodes

Alamy et Langevin (1989) :

Z. Alamy et C. Langevin procèdent à une analyse détaillée de la couverture de sol (Lallemand-Barrès, 1994). Les facteurs et critères retenus par ces auteurs, ainsi que la notation et le poids attribués aux critères sont résumés dans le tableau suivant. On peut constater que la pondération des critères est très subjective.

Ricour (1988) :

Dans le cadre d'une application à la nappe de la craie dans le secteur de Guines (Pas-de-Calais), J. Ricour (1988) propose les paramètres suivants comme critères pour l'élaboration de la carte de vulnérabilité : nature du recouvrement sur l'aquifère crayeux, topographie et profondeur de la nappe sous le sol.

Cette carte de vulnérabilité est superposée à des facteurs à caractère évolutif ayant trait à l'occupation des sols pour constituer une carte de sensibilité aux risques de pollution (Lallemand-Barrès, 1994).

Munoz, Langevin (1991)

S. Munoz (1989) et S. Munoz, C. Langevin (1991), pour élaborer les cartes de vulnérabilité au Guatemala, retiennent les paramètres suivants (Tableau 7).

Images	Variables Paramètres	Echelle de vulnérabilité et poids relatif de chaque paramètres										Poids Global
		(Très vulnérable)				(Peu vulnérable)						
Zone non saturée	Epaisseur	< 10 m		10-20 m		20-30 m		30-50 m		> 50 m		5
	Valeur attribuée	Initiale 1	Finale 5	Initiale 3	Finale 15	Initiale 10	Finale 50	Initiale 25	Finale 125	Initiale 50	Finale 250	
Zone de recharge	Type de milieux					de recharge		hors zone de recharge		urbain		3
	Valeur attribuée					Initiale 1	Finale 3	Initiale 10	Finale 30	Initiale 25	Finale 75	
Densité de drainage	Degré de perméabilité	très perméable		perméable		semi-perméable		ruisselant		très ruisselant		2
	Valeur attribuée	Initiale 1	Finale 2	Initiale 2	Finale 4	Initiale 3	Finale 6	Initiale 10	Finale 20	Initiale 25	Finale 50	
Fracturation	Niveau probable de fracturation					très fracturé		peu fracturé				1
	Valeur attribuée					Initiale 1	Finale 1	Initiale 25	Finale 25			

Tableau 7 : Paramètres permettant le calcul de vulnérabilité selon la méthode de Munoz, Langevin (1991).

Suais (1990) :

Dans l'étude de M.F. Suais (1990) où les critères de vulnérabilité sont assimilés aux critères d'évaluation des risques de pollution, on peut retenir la proposition de nouveaux critères relatifs aux sols, qui sont des critères variables dans le temps ou par intervention humaine.

5.5 Démarches communes aux méthodes inventoriées

La majorité des méthodes présentées exploite un critère relatif à la géomorphologie du territoire étudié à l'exception des méthodes GOD et AVI):

- soit la pente, prise en compte directement au travers de sa valeur absolue (DRASTICS, SINTACS ou Z. Alamy et C. Langevin en 1989)
- soit la pente par un facteur indirect (DISCO, MF Suais 1990), reprenant la densité de drainage des réseaux hydrologique de surface

Au-delà du facteur pente, la nature des couvertures en place au-dessus des aquifères (sols, ZNS) sont en général regroupées en un critère prépondérant pour l'analyse de vulnérabilité ou identifiées de manière systématique (AVI)

Toutes ces méthodes (DRASTICS, SINTAC, AVI,...) supposent l'intégration de nombreuses données dont l'acquisition, à l'échelle régionale, requiert un investissement en temps et ressources difficilement mobilisables.

5.6 Synthèse des critères utilisés

Critères relatifs aux conditions de surface ou sub-surface :

- **Topographie** : Le ruissellement, et par suite la quantité d'eau s'infiltrant, dépend entre autre de la pente (issue du MNT, Modèle Numérique de Terrain). Par ailleurs, elle est susceptible de favoriser le déplacement des pollutions et de participer à leur concentration dans des secteurs favorables ;
- **Pédologie** : la nature, la texture, la perméabilité verticale des sols vont réguler la nature et la quantité d'échanges entre la surface et la ZNS. Dans le cadre de cette étude, la nature des sols au droits des drains du réseau de surface peut être considérée comme homogène et non influente ;

Critères relatifs à la zone non saturée :

- **Profondeur de la nappe libre** (épaisseur de la Zone Non Saturée) : l'épaisseur de la ZNS conditionne de temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interactions physico-chimiques avec l'encaissant) et donc son éventuelle dégradation en cours de transfert ;
- **Amplitude de battement de nappe** : l'amplitude de battement de la nappe, dans la mesure où elle est significative, conditionne l'épaisseur du recouvrement de la nappe (sol + ZNS). De ce fait elle peut devenir un critère de vulnérabilité ;
- **Perméabilité verticale de la ZNS** : elle conditionne le temps de transfert ou même peut empêcher le transfert vertical d'un polluant vers la nappe ;
- **Structure de la ZNS** : variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en matières organiques et argile, sont autant de facteurs conditionnant la migration de fluides vers la nappe.

Critères relatifs à la zone saturée :

- **Type de nappe** (libre ou captive) : l'absence d'horizon imperméable entre la surface et le toit d'une nappe libre lui confère un caractère plus vulnérable qu'une nappe captive protégée par des formations imperméables.
- **Paramètres hydrodynamiques des formations aquifères** (transmissivité (T), perméabilité (K), coefficient d'emmagasinement (s), gradient hydraulique (i)) : ils déterminent la vitesse de migration des polluants dans la nappe ;
- **Piézométrie** : au cours d'un cycle hydrologique complet, la géométrie d'une nappe peut évoluer : par exemple, entre les hautes eaux et les basses eaux, les relations eaux superficielles/eaux souterraines peuvent s'inverser ;
- **Directions et sens d'écoulement** : ils déterminent les espaces susceptibles d'être atteint par un polluant une fois que celui-ci a atteint la nappe ;
- **Type de système hydrogéologique** : un caractère transmissif implique des temps de transfert rapide et également de faibles temps de séjour dans la nappe. Un caractère inertiel implique des temps de transfert lents et des temps de séjours élevés. Un caractère capacitif important permet l'intervention de phénomènes de dilutions des polluants.
- **Relations nappe/cours d'eau** : le type de relation entre les eaux superficielles et les eaux souterraines (drainage ou alimentation) conditionne la possibilité de contamination des eaux souterraines ;
- **Épaisseur de l'aquifère** (quantité de réserve) : la quantité d'eau en réserve détermine les conditions de dilution d'un polluant ayant atteint la nappe ;

- Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci. Cet horizon va déterminer le **caractère libre ou captif** de la nappe ;
- **Recharge** : quantité d'eau atteignant la Zone Saturée sur une période donnée (recharge annuelle nette). Elle dépend de l'infiltration efficace, donc du climat (ETP, précipitations) et de la topographie ; mais également de sa répartition dans le temps (périodes de recharge). Elle constitue un facteur de transfert des polluants vers les eaux souterraines.

Critères communs au sol, à la Zone Non Saturée et à la Zone Saturée :

- **Fracturation** (directions et densité). Des discontinuités verticales telles que les failles peuvent augmenter très sensiblement les vitesses d'infiltration depuis la surface vers la nappe ;
- **Bilan hydrique**. Il détermine l'infiltration efficace et donc la potentialité d'un polluant à pénétrer le sous-sol. Les principaux facteurs le déterminant sont le climat, l'ETP (Evapo-Transpiration Potentielle) et les précipitations.

Synthèse des critères	Donnée existante	Donnée à dire d'expert	Critères qualitatifs pour la NC	Source de la donnée
Topographique	x		Poids (80 - 120 %)	
Pédologie	x			carte morpho-pédo
Profondeur de la nappe libre	x			Iles loyautés
Amplitude de battement de nappe				
Perméabilité verticale de la ZNS		x	Valeurs (0 - 100%)	carte morpho-pédo
Structure de la ZNS				
Type de nappe	x			BDLISA-NC
Paramètres hydrodynamiques des formations aquifères				
Directions et sens d'écoulement				
Type de système hydrogéologique	x		Valeurs (0 - 100%)	Carte BDLISA-NC
Relations nappe/cours d'eau			Poids (80 - 120%)	DCE
Épaisseur de l'aquifère				
Caractère libre ou captif	x		Valeurs (0 -100%)	Lithologie/BDLISA-NC
Recharge	x			Pluie annuelle (proxi)
Fracturation	x		Valeurs (0 - 100%)	BDLISA-NC
Bilan hydrique				

Tableau 8 : Synthèse des données exploitables vis-à-vis des différents critères.

6 Proposition de cartographie la vulnérabilité des systèmes aquifères de Nouvelle-Calédonie selon les critères qualitatifs disponibles

6.1 Modèle conceptuel proposé pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en Nouvelle-Calédonie

A partir des données disponibles en Nouvelle-Calédonie (Tableau 8) une évaluation cartographique de la vulnérabilité intrinsèque est proposée à partir des entités BDLISANC et en se basant sur une méthode cartographique à index. L'objectif est de mettre en place une analyse relative de la vulnérabilité intrinsèque des réservoirs aquifères.

Les jeux de notes, pondérations, modulations peuvent donner lieu à des ajustements ultérieurs selon l'intégration de nouvelles données ou les décisions collégiales des groupes de travail concernés.

La cartographie de la vulnérabilité est établie à partir de la combinaison des 4 critères suivants et d'un modèle conceptuel d'organisation des formations à l'affleurement sur le territoire (Figure 12) : Mode d'Occupation des Sols (MOS), SOL, GEOMORPHO et LISA.

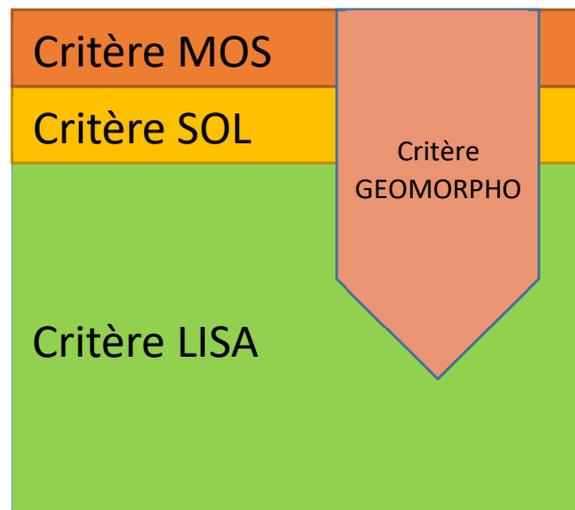


Figure 12 : Modèle conceptuel proposé pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines à partir de BDLISANC

La ressource en eaux souterraines contenues dans ces réservoirs ne peut être détaillée en l'absence de cartes et données piézométriques suffisantes pour définir ce paramètre, à l'exception des Iles Loyautés pour lesquelles une première estimation de la ZNS a été établie lors de la crise sanitaire (COVID-19). Pour le reste du territoire la démarche retenue revient à considérer une épaisseur de la ZNS constante pour chacune des entités.

Les critères MOS, SOL et LISA représentent les milieux qui sont supposés séparer un polluant potentiel de la ressource en eau contenue dans l'entité BDLISA.

Le critère GEOMORPHO a pour objectif de représenter les indices en surface d'un « by-pass » ou « forçage » des formations directement vers la ressource en eau comme peuvent l'être les indices de karstification observés au sol depuis l'analyse du modèle de terrain (zones endoréiques et dolines par exemple)

Dans le détail, les paramètres utilisés pour le calcul de la vulnérabilité sont :

- **C_i**, un critère BDLISA déduit des caractéristiques propres aux entités BDLISA, qui résulte d'une combinaison de différentes notes attribuée, à dire d'expert (Figure 14) :
 - o Aux valeurs des attributs NATURE, THEME, MILIEU et ETAT de chaque entité BDLISA (Tableau 9 à Tableau 12).
 - o Aux perméabilités associées aux entités
 - o Aux principales formations géologiques qui composent les entités à l'affleurement (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).
- **C_m**, un critère MOS déduit de la typologie de l'occupation des sols, qui résulte de l'attribution de notes aux différents modes d'occupation du sol des surfaces qualifiées par le MOS 2014 (Tableau 15, Figure 15).
- **C_s**, un critère SOL déduit de l'analyse de la carte morpho pédologique existante et des différentes notes attribuées aux 44 unités morpho-pédologiques identifiées (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**),
- **C_g**, un critère GEOMORPHOLOGIQUE déduit de l'analyse du MNT au pas de 10 m et de la recherche de caractéristiques qui puissent être associées à l'existence d'un épikarst et/ou d'un karst exprimé en surface (endoréisme, perméabilité de type karstique partielle ou complète des formations affleurantes), (Tableau 17, Figure 16)

Une modulation de ces paramètres est mise en place selon :

- **p_%**, les pentes (% , Figure 17)
- **p_e**, les débits caractéristiques à l'étiage (DCE en L/s, Figure 18) calculés lors de l'établissement du RHM.
- **p_p**, le cumul annuel de pluie (Figure 19)
- **p_z**, l'épaisseur de la zone non saturée (Tableau 18)

Ces poids et critères sont calculés pour un ensemble de polygones composant des **unités supposées** homogènes et qui résultent du croisement :

1. Des entités BDLISA-NC de niveau local et affleurantes (RHF_NIVEAU=3 et RHF_RELATIF= 1)
2. De la carte géologique à l'échelle du 1/50 000 et de ses formations déduites de sa légende
3. De la couche des bassins versant extraite du RHM
4. De la couche d'occupation des sols (MOS2014)

Au total 2.5 millions de polygones élémentaires sont traités à l'échelle de la Nouvelle Calédonie

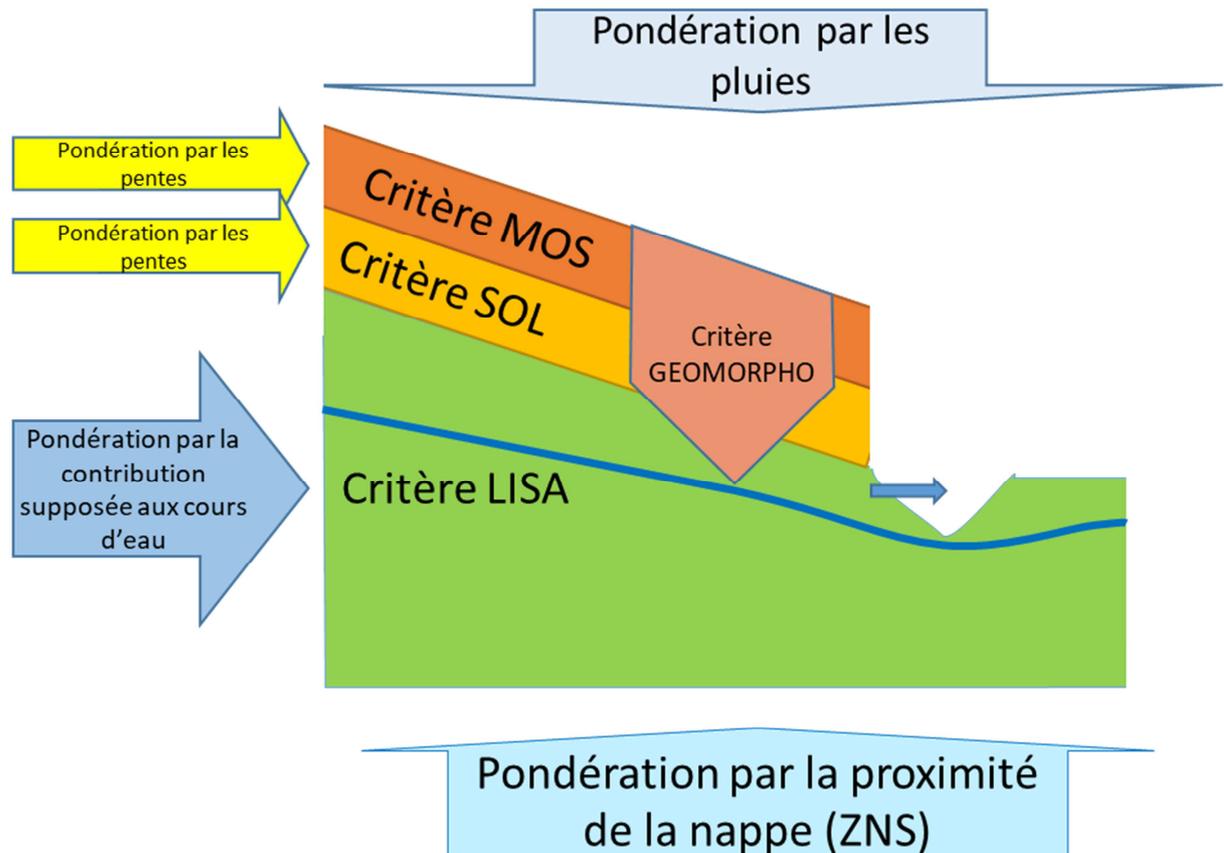


Figure 13 : Modèle proposé pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines à partir de BDLISA-NC et de différentes modulations.

6.2 CRITERE LISA –Vulnérabilité associée aux entités BDLISA

6.2.1 État des entités

Ce sous-critère définit l'état attendu des nappes d'eau souterraine dans l'entité BDLISANC (Tableau 9). Par principe une nappe libre est supposée vulnérable, alors qu'une nappe captive est supposée moins vulnérable à l'intrusion d'un polluant potentiel depuis la surface.

6.2.2 Milieu des entités

Ce sous-critère décrit la perméabilité supposée des formations saturées et non saturées qui composent l'entité BDLISA (Tableau 10). Ainsi une entité LISA au sein d'un milieu karstique est supposée plus vulnérable qu'une entité établie dans un milieu fissuré.

6.2.3 Nature des entités

Par construction, une entité imperméable est considérée comme non vulnérable puisque ne disposant pas des propriétés dynamiques nécessaires à l'établissement d'une nappe (Tableau 11). A contrario une entité aquifère est une entité perméable.

6.2.4 Thème des entités

La nature des formations qui composent les réservoirs des entités BDLISA influence sur leur vulnérabilité intrinsèque (Tableau 12). Ainsi les entités alluviales sont-elles supposées plus vulnérables que les entités métamorphiques.

Critère BDLISA : Etat	Note
Libre	100
Semi-Captive	50
Libre et Captive	75
Sans objet	25

Tableau 9 : Notes attribuées aux différents Etats du critère BDLISA.

Critère BDLISA : Milieu	Perméabilité (m/s)	Note
Poreux	1.00E-05	50
Double porosité : matricielle et de fissures	1.00E-05	60
Double porosité : matricielle et de fractures	1.00E-04	65
Double porosité : fractures et fissures	1.00E-07	70
Fissuré	1.00E-06	75
Triple porosité : matricielle, de fractures et karstique	1.00E-03	80
Double porosité : matricielle et karstique	1.00E-03	85
Double porosité : karstique et de fissures	1.00E-02	90
Sans Objet	1.00E-09	25
Inconnu / Par défaut	1.00E-04	100
Karstique	1.00E-01	100

Tableau 10 : Perméabilités et notes attribuées aux différents Milieux du critère BDLISA.

Critère BDLISA : Nature	Note
Unité imperméable	0
Unité semi-perméable	50
Unité aquifère	100

Tableau 11 : Notes attribuées aux différentes Natures du critère BDLISA.

Critère BDLISA : Thème	Note
Métamorphique	60
Magmatique	60
Mantellique	70
Sédimentaire	80
sans objet	100
Alluvial	100

Tableau 12 : Notes attribuées aux différents Thèmes du critère BDLISA.

6.2.5 Lithologie

La BDLISA découle de l'analyse de la géologie des formations et des regroupements qui ont été fait par les hydrogéologues à partir de propriétés supposées homogènes de ces réservoirs. La lithologie utilisée comme sous critère est la lithologie des formations de la carte géologique que recouvre l'entité BDLISA à l'affleurement.

Par exemple des entités alluviales anciennes peuvent avoir été décrites comme des unités homogènes de la BDLISANC de niveau 3 alors qu'une part majoritaire de leur extension à l'affleurement est occupée par des formations alluviales récentes. La vulnérabilité du critère lithologie des formations est établie à dire d'expert (Tableau 13).

Critère : Lithologie	Note
Pyroclastites	75
Serpentinites	10
Métabasaltes, cherts, argilites	10
Argilites	20
Phtanites	20
Micaschistes	20
Péridotites Serpentinisées	20
Argilites-Grès-Cherts	20
Formations résiduelles	25
Siltites	25
Blocs de silice	25
Semelle	25
Basement	25
Schistes	50
Granodiorites	50
Listvénites	50
Méta-basaltes	50
Méta-volcanites	50
Tufs	50
Gabbros	50
Grauwackes	50
Leptynites	50
Conglomérats	50
Amphibolites	50
Diorites	50
Cherts	50
Méta-tufs	50
Ignimbrites	50
Gabbros cumulats	50
Pyroxénites	50
Niveaux à sulfures	50
Brèche	50
Flysch	50
Filons	50
Formations volcano-sédimentaires	50
Pyro-épicroclastites	50
Filons et complexes filoniens	50
Gabbros pegmatoïdes	50

Critère : Lithologie	Note
Microconglomérats	50
Andésites	50
Pyroxénolites	50
Dolérites	50
Calcschistes	50
Calcrêtes	25
Mélanges ophiolitiques	75
Péridotites	75
Grès	75
Formation hydrothermale	75
Alluvions anciennes	75
Latérites	75
Fluvio-lacustre	80
Basaltes	80
Colluvions	90
Formations de versant	90
Eolianites	90
Calcaires biodétritiques	90
Calcaires	90
Cuirasses	90
Calcaires récifaux	100
Alluvions actuelles et récentes	100
Eau	100
Formations récifales	100
Epandages	100
Gravillons ferrugineux	100
Cuirasses disloquée	100
Anthropique	100
Déblais	100
Formations littorales	100
Indifférencié	100
Eboulis	100

Tableau 13 : Notes attribuées aux différentes Lithologies.

6.2.6 Critère de vulnérabilité à dire d'expert.

Lors de sa création, les entités BDLISANC ont été élaborées par les hydrogéologues impliqués dans ce projet de référentiel, selon une appréciation de leurs caractéristiques lithologiques et d'une homogénéité supposée de leur comportement hydrodynamique.

De la même manière une appréciation de leur vulnérabilité peut être proposée à dire d'expert et intégrée à l'analyse combinatoire des critères. Le rôle de cette vulnérabilité à dire d'expert dans la note finale de la vulnérabilité intrinsèque compte pour 8% des paramètres retenus comme précisé ci-après (Tableau 14).

Ces critères élémentaires sont combinés pour produire le critère BDLISA (Tableau 14)

CRITERE BDLISA : Paramètres utilisés		Pondération / Part relative		Notes	
				Mini	maxi
Etat (Tableau 9)	L'état des entités décrit le caractère libre ou captif des nappes qu'ils renferment	23%	3	50	100
Milieu (Tableau 10)	Les milieux décrivent les types de perméabilité des réservoirs BDLISA	15%	2	50	100
Nature (Tableau 11)	La nature décrit la qualité aquifère ou non des entités	38%	5	0	100
Thème (Tableau 12)	Les thèmes décrivent la lithologie dominante des entités dont la vulnérabilité est définie à dire d'expert	8%	1	60	100
Géologie (Tableau 13)	Les formations géologiques sont associés aux unités fonctionnelles, elles sont qualifiées à dire d'expert en termes de vulnérabilité	8%	1	10	100
Vulnérabilité à dire d'expert	Chaque entité BDLISA a été caractérisée par une vulnérabilité intrinsèque générale définie à dire d'expert hydrogéologue	8%	1	5	100

Tableau 14 : Paramètres d'évaluation du critère BDLISA.

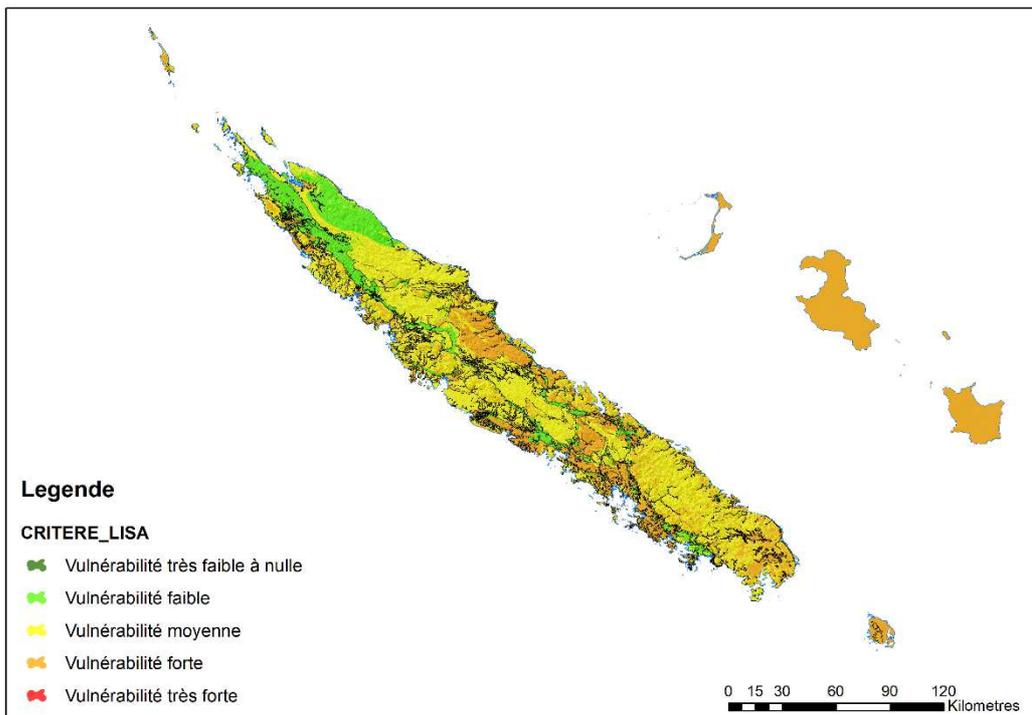


Figure 14 : Evaluation de la vulnérabilité selon le critère LISA.

6.3 CRITERE MOS – Vulnérabilité associée au mode d'occupation des sols (MOS 2014)

Une note de vulnérabilité est attribuée aux différents modes d'occupation des sols (Tableau 15, Figure 15).

Nomenclature de l'occupation des sols (MOS 2014)	Notes
Strate arborée	5
Strate arbustive	10
Strate herbacée	10
Strate arbustive	20
Strate herbacée	20
Vergers et petits fruits	20
Plantation d'arbres - sylviculture	50
Terres pastorales aménagées structurées - Prairies	50
Habitat isolé	50
Terres pastorales aménagées structurées	60
Tissu urbain discontinu	75
Terres arables	80
Réseaux de communication	80
Zones industrielles ou commerciales et équipements	80
Végétation clairsemée	90
Vergers et petits fruits	90
Terres arables et cultures permanentes	90
Eaux continentales	100
Zones humides intérieures	100
Eaux maritimes	100
Marais maritimes	100
Plages, dunes et sable	100
Plages, dunes, sable	100
Roches et sols nus	100
Zones incendiées	100
Espaces verts artificialisés et équipements	100
Tissu urbain continu	100
Décharges, chantiers, extraction de matériaux	100
Mines, décharges minières, infrastructures et chantiers miniers	100

Tableau 15 : Notes attribuées aux différents modes d'occupation du sol (MOS, 2014).

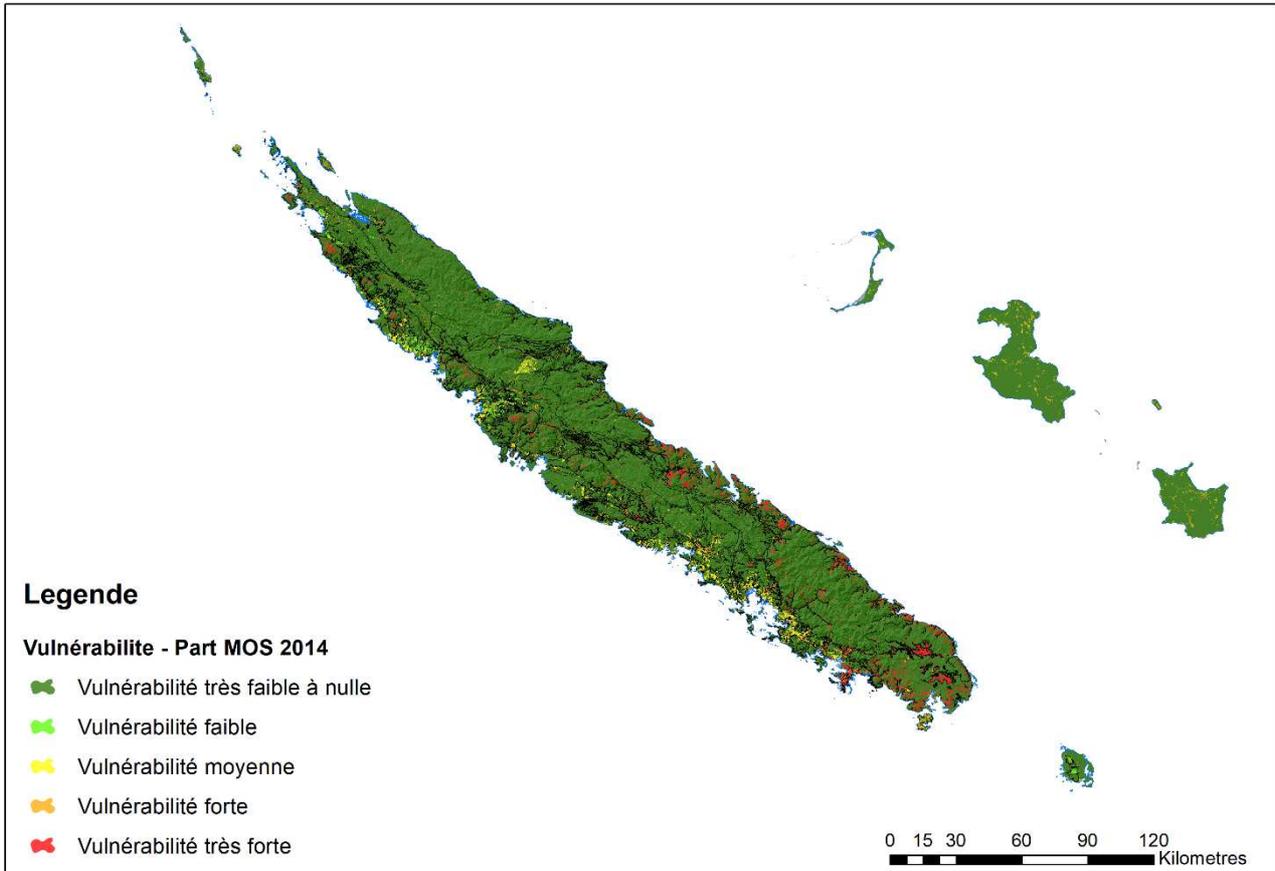


Figure 15 : Évaluation de la vulnérabilité selon le critère MOS.

6.4 CRITERE SOLS – Vulnérabilité associée à la lithologie des sols

Nomenclature des sols (Carte morpho-pédologique)	Poids
Sols calcimagnésiques carbonatés (rendzines très humifères à faciés andique)	1
Sols ferrallitiques ferritiques ou oxydiques ferrugineux; Sols minéraux bruts (cuirasse ferrugineuse affleurante); Sols peu évolués sur cuirasse ferrugineuse	1
Sols calcimagnésiques carbonatés (rendzines modales)	9
Sols brunifiés (sols bruns eutrophes); Sols bruns ferruginisés; Sols ferrallitiques faiblement désaturés typiques et rajeunis.	12
Sols peu évolués d'érosion; Sols bruns eutrophes; Sols bruns vertiques; Vertisols.	12
Sols peu évolués d'érosion; Sols fersiallitiques lessivés; Sols lessivés; Sols lessivés, à évolution podzolique.	12
Sols minéraux bruts; Sols peu évolués d'érosion; Rendzines; Sols bruns calcaires; Sols bruns eutrophes;. Sols bruns vertiques.	14
Sols peu évolués d'érosion régosoliques; Sols bruns acides; Sols fersiallitiques non lessivés; Sols fersiallitiques rouge orangé non lessivés; Sols peu évolués d'apport alluvial; Sols hydromorphes; Sols fersiallitiques non lessivés jaune-orangé; Sols fer	14
Sols peu évolués d'érosion; Sols brunifiés (bruns eutrophes et ferruginisés); Sols ferrallitiques.	14
Sols peu évolués d'érosion; Sols bruns eutrophes; Sols fersiallitiques; Sols fersiallitiques lessivés	15

Nomenclature des sols (Carte morpho-pédologique)	Poids
Sols peu évolués d'érosion; Sols bruns, sols bruns vertiques; Vertisols; Sols peu évolués colluviaux aréniques	17
Lithosol, rendzine, sols bruns et plus rarement vertiques	19
Sols minéraux bruts (Lithosols et Régosols); Sols peu évolués d'érosion; Sols ferrallitiques ferritiques souvent rajeunis (Oxydiques ferrugineux).	21
Sols ferrallitiques ferritiques oxydiques; Sols ferrallitiques oxydiques ferrugineux.	23
Sols bruns acides à fersiallitiques; Sols fersiallitiques lessivés, parfois hydromorphes.	25
Sols calcimagnésiques non carbonatés (bruns calciques humifères, faciés allitique)	29
Sols ferrallitiques faiblement à moyennement désaturés typiques et rajeunis.	29
Sols régosoliques; Sols peu évolués d'érosion; Sols bruns acides à fersiallitiques; Sols fersiallitiques lessivés.	29
Sols peu évolués d'érosion; Sols brunifiés, bruns eutrophes (carapace calcaire); Sols bruns vertiques: Vertisols	30
Sols peu évolués d'érosion; Sols bruns eutropes; Sols bruns lessivés et bruns vertiques	30
Sols minéraux bruts (Lithosols et Régosols); Sols peu évolués d'érosion; Sols ferrallitiques ferritiques souvent rajeunis (Oxydiques ferrugineux); Sols ferrallitiques ferritiques oxydiques	32
Sols peu évolués d'apport alluvial; Sols hydromorphes; Sols fersiallitiques non lessivés jaune-orangé; Sols fersiallitiques bicolores jaune et rouge, hydromorphes.	34
Sols peu évolués d'érosion; Sols bruns ferruginisés.	34
sols minéraux bruts, lithosols; sols peu évolués parfois hydromorphes	36
Sols minéraux bruts; Sols peu évolués d'érosion; Sols peu évolués colluviaux aréniques; Sols bruns ferruginisés; Sols ferrallitiques	36
Anthrosols	37
Sols ferrallitiques oxydiques allitiques, humifères	39
Sols peu évolués d'apport colluvial à caractères vertiques, (amont) et à caractères hydromorphes (aval)	40
Sols peu évolués d'apport alluvial à caractères vertiques; Vertisols	41
Vertisols, Sols peu évolués d'apport alluvial hydromorphes, Sols peu évolués d'apport alluvial, Sols hydromorphes à pseudo-gley, Sol minéral brut d'apport alluvial	43
Sols minéraux bruts; Sols peu évolués d'apport marins; Sols peu évolués d'apport marins hydromorphes, parfois vertiques	46
Sols fersiallitiques non lessivés à faiblement lessivés (Hautes terrasses), Solonetz solodisés, Vertisols halomorphes (moyennes terrasses), Vertisols, Sols peu évolués d'apport alluvial parfois hydromorphes à gley, Sols hydromorphes à gley, Sol minéral brut	47
Sols minéraux bruts d'apport alluvial	47
Sols peu évolués d'apport alluvial oxydiques	47
Sols minéraux bruts d'érosion lithique sur calcaire	50
Sols minéraux bruts d'apport marin hydromorphes; Sols peu évolués d'apport marins hydromorphes; Sols hydromorphes; Sols de mangroves	56
Sols peu évolués d'apport alluvial parfois hydromorphes	57
Sols hydromorphes moyennement organiques à anmor calcique (peu ou pas salés)	58

Nomenclature des sols (Carte morpho-pédologique)	Poids
Sols hydromorphes peu humifères salés	58
Sols minéraux bruts, lithosols, sols peu évolués d'érosion lithiques, sols calcimagnésiques carbonatés : rendzines modales, sols humiques carbonatés, sols ferrallitiques allitiques	65
Sols hydromorphes; Sols peu évolués d'apport alluvial et marin hydromorphes	66
Sols ferrallitiques ferritiques oxydiques; Sols ferrallitiques oxydiques ferrugineux; Sols minéraux bruts (cuirasse ferrugineuse affleurante); Sols peu évolués sur cuirasse ferrugineuse.	68
Sols hydromorphes humifères tourbeux	74
Inco	100

Tableau 16 : Notes attribuées aux différents sols de la carte morpho-pédologique.

6.5 CRITÈRE GEOMORPHO- Notes associées à la géomorphologie

Critère GEOMORPHO	Note
Absence de figures endoréiques	0
Présence de figures endoréiques (>1m)	100

Tableau 17 : Notes attribuées aux différentes occurrences géomorphologiques.

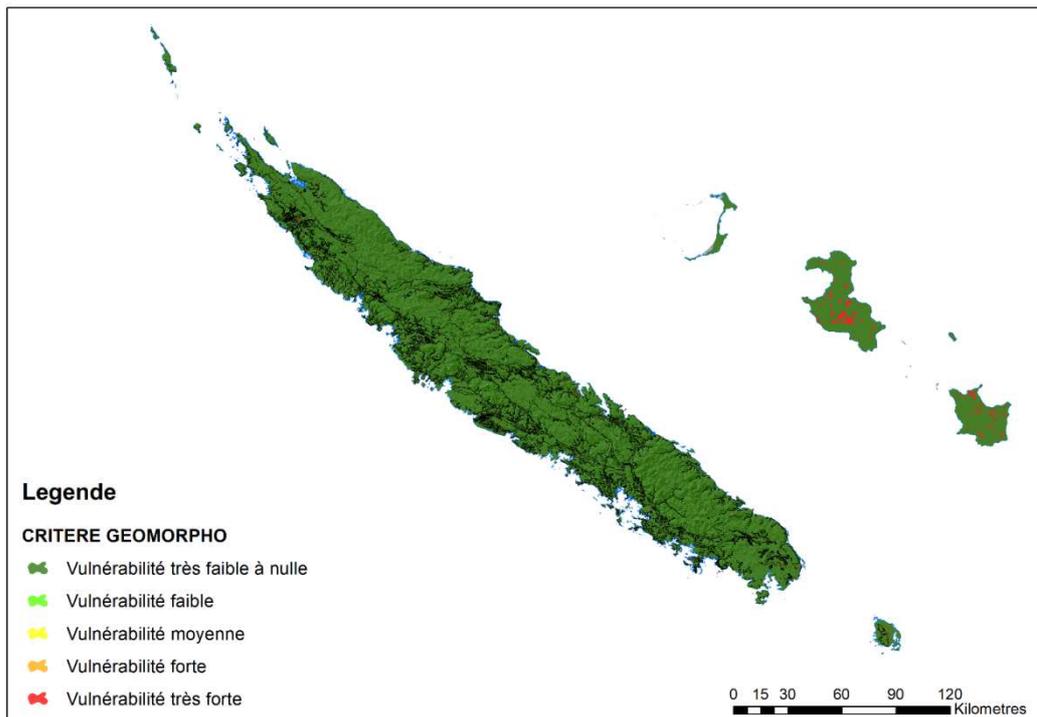


Figure 16 : Évaluation de la vulnérabilité selon le critère GEOMORPHO.

6.6 Modulations utilisées

Comme indiqué dans le modèle conceptuel d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque (Figure 13) est modulée selon :

- $p_{\%}$, les pentes (%) (Figure 17)
- p_e , les débits caractéristiques à l'étiage (DCE, L/s) calculés lors de l'établissement du RHM (Figure 18)
- p_z , l'épaisseur de la zone non saturée (Tableau 18)
- p_p , le cumul annuel de pluie (Figure 19)

Cette modulation s'applique selon un pourcentage qui augmente ou diminue la valeur de la vulnérabilité intrinsèque calculée pour le critère retenu.

Par exemple il est considéré qu'une pente forte des terrains accroît la part du ruissèlement de la lame d'eau météoritique par rapport à la fraction disponible à l'infiltration. Ainsi, les critères formations du sol (SOL) et modes d'occupation du sol (MOS) sont modulés selon les pentes ($p_{\%}$, Figure 17) et la propension de ces dernières à privilégier le ruissellement ou l'infiltration dans des contextes de fortes pentes *versus* les zones de plaines.

6.6.1 Modulation selon la pente des terrains (déduite du MNT au pas de 10m)

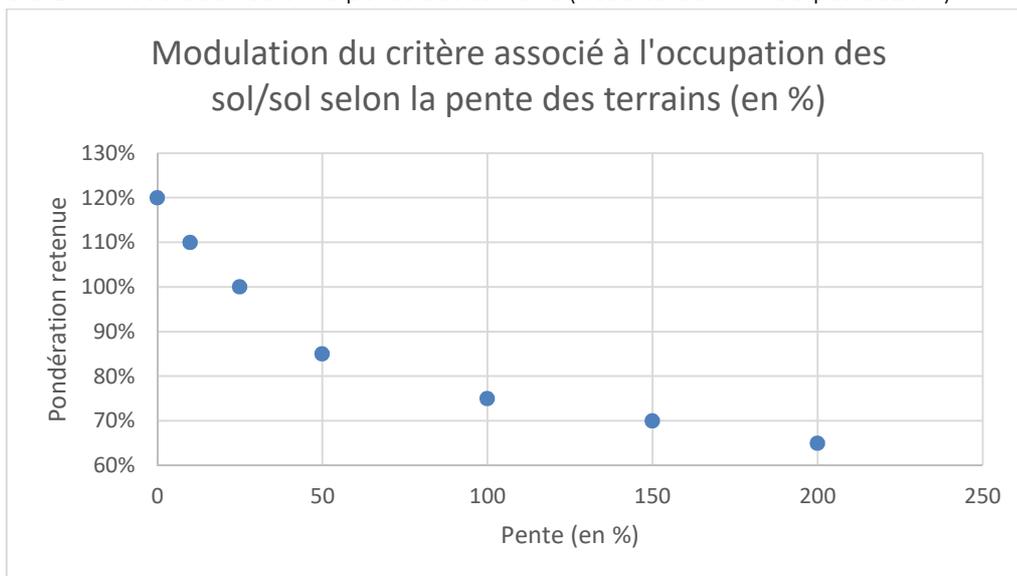


Figure 17 : Modulation selon la pente des terrains (%)

6.6.2 Modulation selon la contribution aux écoulements de surface (DCE extrait du Réseau hydrologique modélisé (DAVAR 2016))

Le critère BDLISA est modulé selon la capacité de ces entités à contribuer aux débits d'étiage des cours d'eau qu'elles contiennent. L'hypothèse sous-tendue considère que plus un système aquifère contribue aux écoulements souterrains, plus il est susceptible d'être proche de ceux-ci et par analogie proche de la surface des terrains et donc vulnérable. Cette pondération est prise en compte en l'absence de données relatives à l'épaisseur effective des terrains saturés.

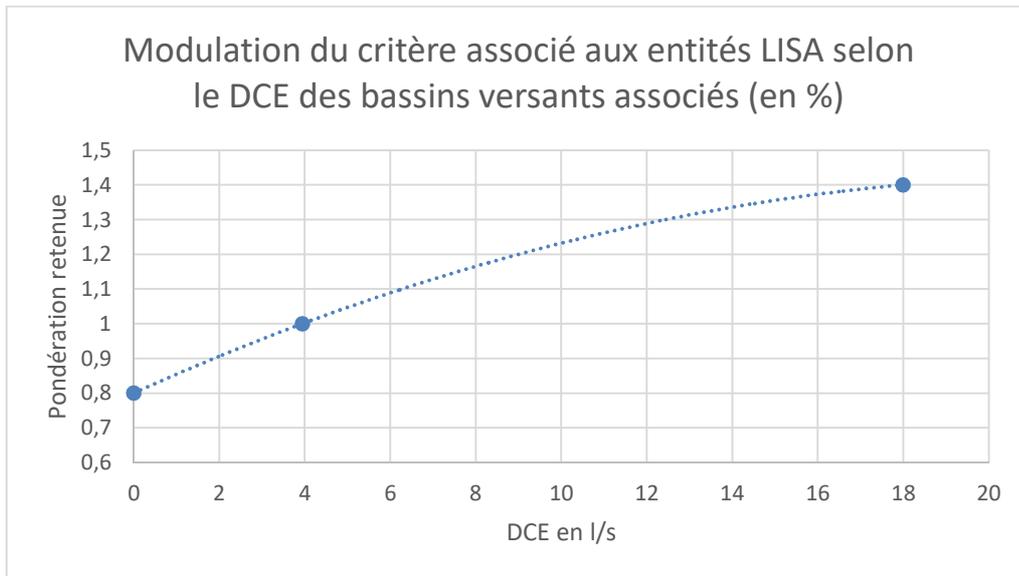


Figure 18 : Modulation selon le débit caractéristique d'étiage (DCE, L/s)

6.6.3 Modulation selon la lame d'eau météoritique (pluie cumulée annuelle)

La pluie totale annuelle est utilisée afin de pondérer l'apport potentiel des polluants vers les nappes d'eau souterraines. Elle permet, en l'absence d'un calcul de la pluie efficace et de sa composante en infiltration, une approximation de la recharge des aquifères qui est exploitée par les méthodes DRASTIC ou SINTACS

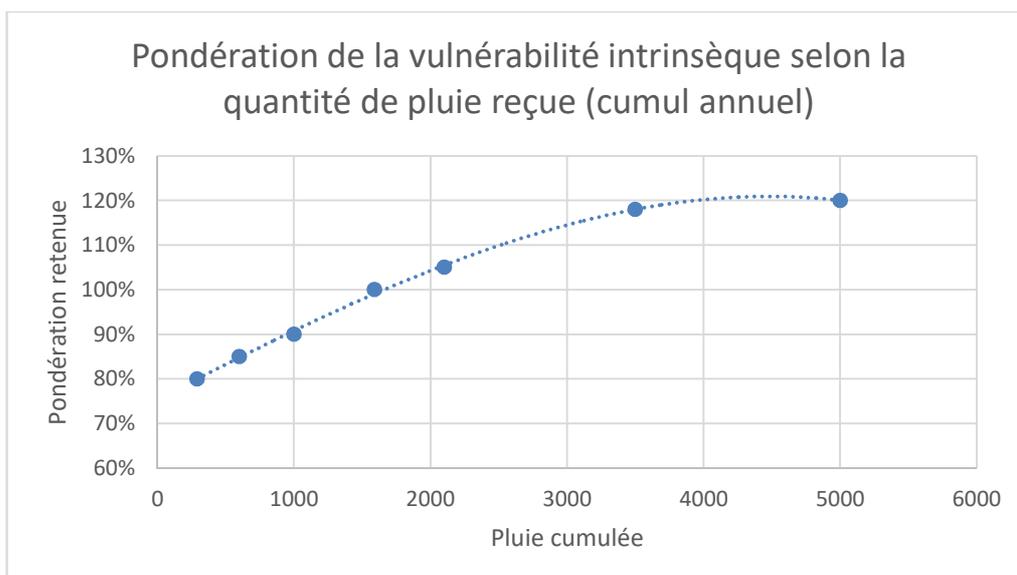


Figure 19 : Modulation selon le cumul annuel de précipitation (mm)

6.6.4 Pondération selon l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS)

La vulnérabilité aux polluants potentiels des entités BDLISA dépend de la nature des réservoirs (les systèmes aquifères de la BDLISANC), des sols et de l'occupation des sols. Elle dépend également de l'épaisseur des terrains non saturés qui détermine (en croisant la perméabilité des formations à traverser avec leur épaisseur) le temps nécessaire au parcours d'un polluant depuis le sol jusqu'aux niveaux saturés en eau (la nappe aquifère contenue dans le système aquifère). Plus ce temps est court (faible épaisseur et/ou forte perméabilité), plus la vulnérabilité s'accroît. Ce facteur est donc déduit d'un tableau à double entrée (Tableau 18).

L'épaisseur maximale de la zone non saturée est fixée arbitrairement à 20 mètres par défaut pour l'ensemble des entités BDLISA à l'exception de celles des îles Loyautés où existe une approximation de son épaisseur. En l'absence de définition précise de l'épaisseur effective de la ZNS. Le rôle de cette modulation peut être limité en encadrant son importance entre 80% et 120%.

		Perméabilité des formations (en m/s)									
		K<=1	K<1 AND K>=0.1	K<0.1 AND K>=0.01	K<0.01 AND K>=0.001	K<0.001 AND K>=0.0001	K<0.0001 AND K>=0.00001	K<0.00001 AND K>=0.000001	K<0.000001 AND K>=0.0000001	K<0.0000001 AND K>=0.00000001	K<0.00000001 AND K>=0.000000001
Epaisseur de la zone non saturée (en m)	0	500%	500%	450%	400%	350%	300%	250%	200%	150%	120%
	2	500%	200%	180%	160%	140%	130%	120%	115%	105%	100%
	5	400%	150%	145%	140%	130%	120%	115%	105%	100%	95%
	10	400%	145%	140%	130%	120%	115%	105%	100%	95%	80%
	15	300%	130%	135%	120%	115%	105%	100%	95%	80%	70%
	20	200%	125%	120%	115%	110%	100%	90%	80%	70%	60%
	30	100%	118%	115%	110%	100%	90%	80%	70%	60%	50%
	40	100%	115%	110%	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%
	50	100%	105%	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
	60	100%	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%
	80	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
120	100%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%	

Tableau 18 : Modulation en % selon l'épaisseur et la perméabilité attendue des formations de la ZNS

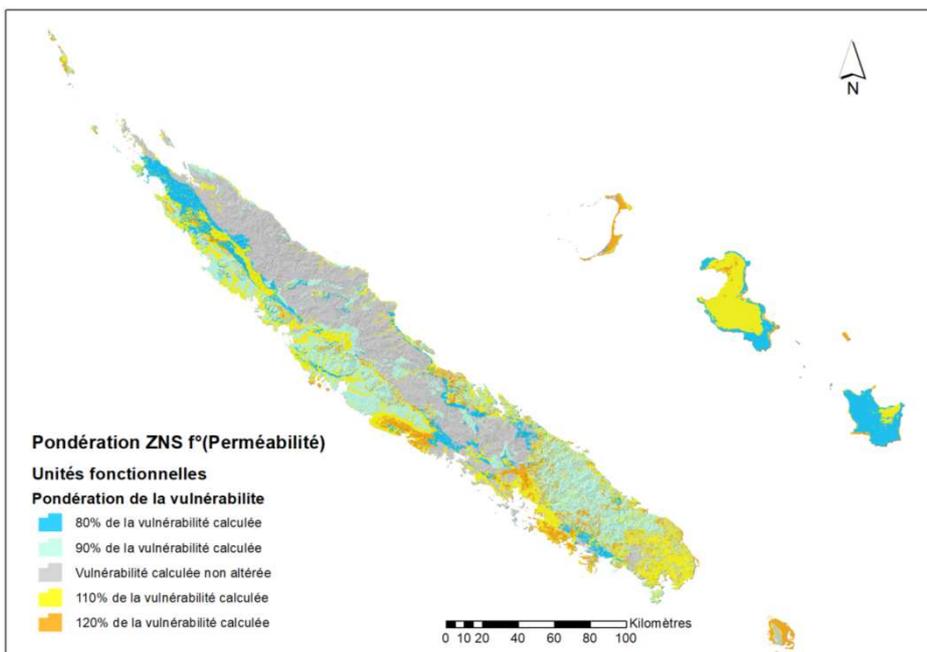


Figure 20 : Distribution spatiale des modulations de la vulnérabilité selon les ZNS et perméabilités

La distribution des perméabilités utilisées pour moduler le rôle de la ZNS en fonction de son épaisseur est déduite du type de milieu défini pour l'entité BDLISANC (Tableau 10).

6.7 Combinaison des critères retenus

La combinaison des critères proposée retenue produit un indice qualitatif (noté de 0 à 100) pour l'ensemble du territoire couvert par BDLISANC. Il a vocation à comparer les entités les unes aux autres, au regard de la vulnérabilité intrinsèque des systèmes aquifères. Il est qualitatif en l'absence d'une mesure effective de l'impact des pollutions sur le milieu souterrain.

Le calcul de cette combinaison s'élabore en quatre étapes, depuis la formule suivante :

$$((4 \times (C_l \times p_e) + 1 \times (C_m \times p\%) + 1 \times (C_s \times p\%)) / 6) + C_g) \times p_p \times p_z$$

- étape 1 : $((4 \times (C_l \times p_e) + 1 \times (C_m \times p\%) + 1 \times (C_s \times p\%)) / 6)$
- étape 2 : étape 1 + C_g
- étape 3 : étape 2 $\times p_p$
- étape 4 : étape 3 $\times p_z$

La présentation des différentes étapes permet d'apprécier l'influence des différents critères ou paramètres.

6.7.1 Etape 1

Ce scénario de calcul prend en compte uniquement 3 critères (LISA, SOL, MOS). Il ne prend pas encore en compte le critère géomorphologique ni les modulations liées aux pluies ou à celle de la ZNS.

$$((4 \times (C_l \times p_e) + 1 \times (C_m \times p\%) + 1 \times (C_s \times p\%)) / 6)$$

Le résultat du calcul est centré puis réduit et la valeur distribuée entre 0 et 1 (Figure 21).

6.7.2 Etape 2

$$((4 \times (C_l \times p_e) + 1 \times (C_m \times p\%) + 1 \times (C_s \times p\%)) / 6) + C_g$$

Ce scénario de calcul prend en compte 3 critères (LISA, SOL, MOS) et intègre le critère géomorphologique qui s'impose le cas échéant fixant une vulnérabilité très forte.

Le résultat du calcul est borné à 100, toute valeur supérieure à 100 est ramenée à 100 (Figure 22).

6.7.3 Etape 3

Ce scénario de calcul prend en compte les critères précédents et intègre une modulation liée à la pluie totale annuelle. Cette modulation peut être rapprochée du critère Recharge, exploitée par les méthodes DRASTIC ou SINTACS.

Ce scénario prend en compte l'importance de la pluie totale (Figure 23). La pluie efficace n'étant pas disponible à cette échelle, elle compose cependant un *proxi* intéressant. Comparativement aux deux étapes précédentes, l'apport de la lame d'eau mets en exergue l'hétérogénéité des côtes au vent et sous-le-vent, selon l'axe NO-SE de la grande terre. Les pluviométries plus abondantes à l'est étant susceptibles d'entraîner d'avantage de polluant potentiels vers les nappes.

$$((4 \times (C_l \times p_e) + 1 \times (C_m \times p\%) + 1 \times (C_s \times p\%)) / 6) + C_g) \times p_p$$

6.7.4 Etape finale

Le scénario prend en compte l'ensemble des critères et ajoute une pondération liée à l'épaisseur de la zone non saturée. En l'absence de données relatives à l'épaisseur de la ZNS pour la part associée à la Grande Terre, une valeur de 20 m est fixée de manière arbitraire (équivalente à la modulation de 100%)

$$\left(\left(4 \times (C_l \times p_e) + 1 \times (C_m \times p_m) + 1 \times (C_s \times p_s) \right) / 6 + C_g \right) \times p_p \times p_z$$

Cible	Origine	Poids	Poids relatif	Poids combiné	pondération	Commentaire		pondération	
CRITERE_LIS	Etat_Denomination	3	20.0%	66.7%	DCE	Centré réduit (distribué de 0 à 100)	Suillé (0-100)	Pluie	ZNS
	Milieu_Denomination	3	20.0%						
	Nature_Denomination	5	33.3%						
	Theme_Denomination	2	13.3%						
	FORMATION (carte géologique)	1	6.7%						
	RHF_ENTITE	1	6.7%						
CRITERE_MC	Nomenclature N3 MOS 2014	1	100.0%	16.7%	Pentes				
CRITERE_SO	TYPE_SOL	1	100.0%	16.7%	Pentes				
CRITERE_GE	Endoréisme	(somme)	100.0%	Addition					

Tableau 19 : Tableau de synthèse de l'analyse combinatoire

Les valeurs de vulnérabilité sont comprises entre 0 et 100 (respectivement vulnérabilité très faible et très forte). Ce sont des valeurs relatives qui ont vocation à prioriser les actions de protection ou d'études à venir. La conversion de ces valeurs relatives en valeurs absolues de vulnérabilité pourrait être entreprise en fonction des données disponibles sur des pollutions constatées.

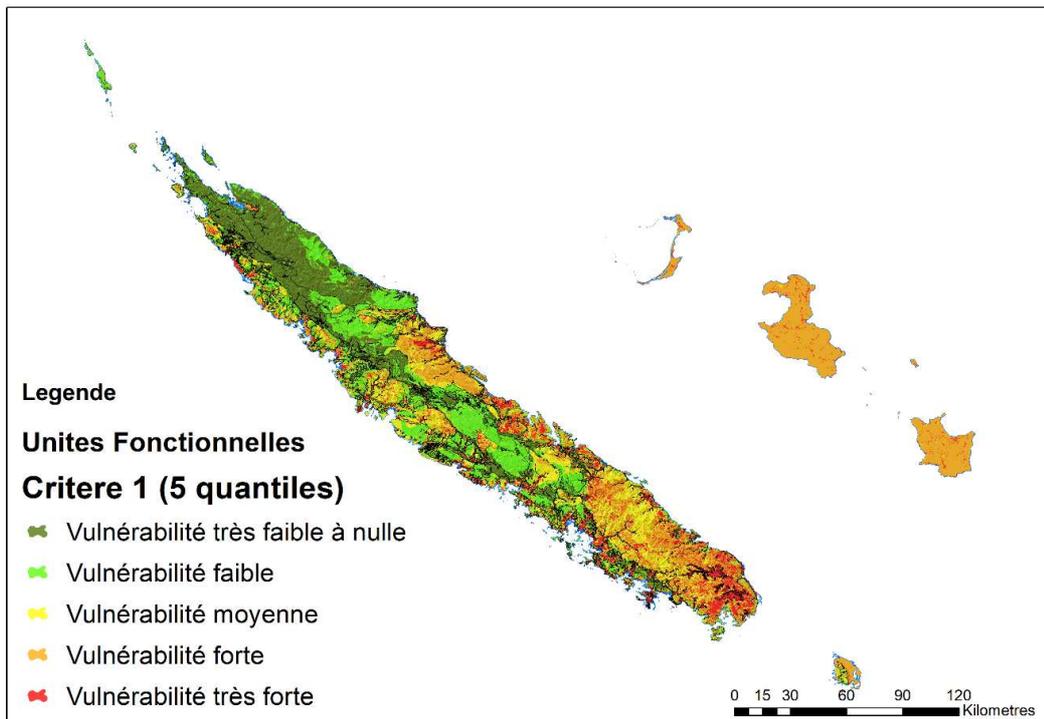


Figure 21 : Etape n°1 de l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque.

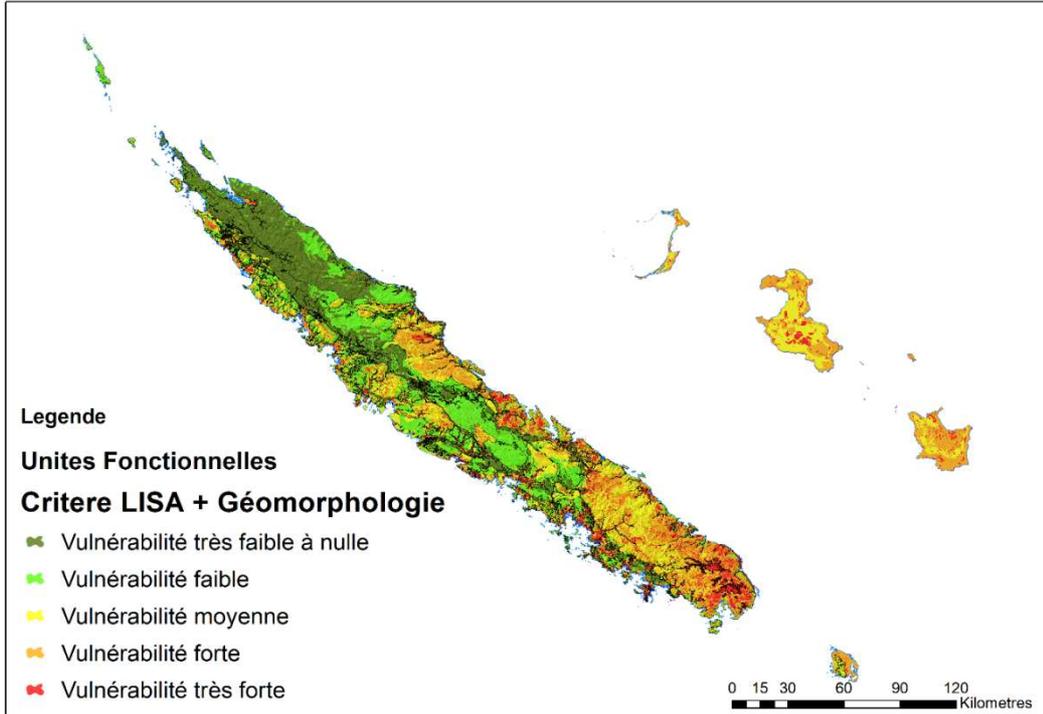


Figure 22 : Etape n°2 de l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque.

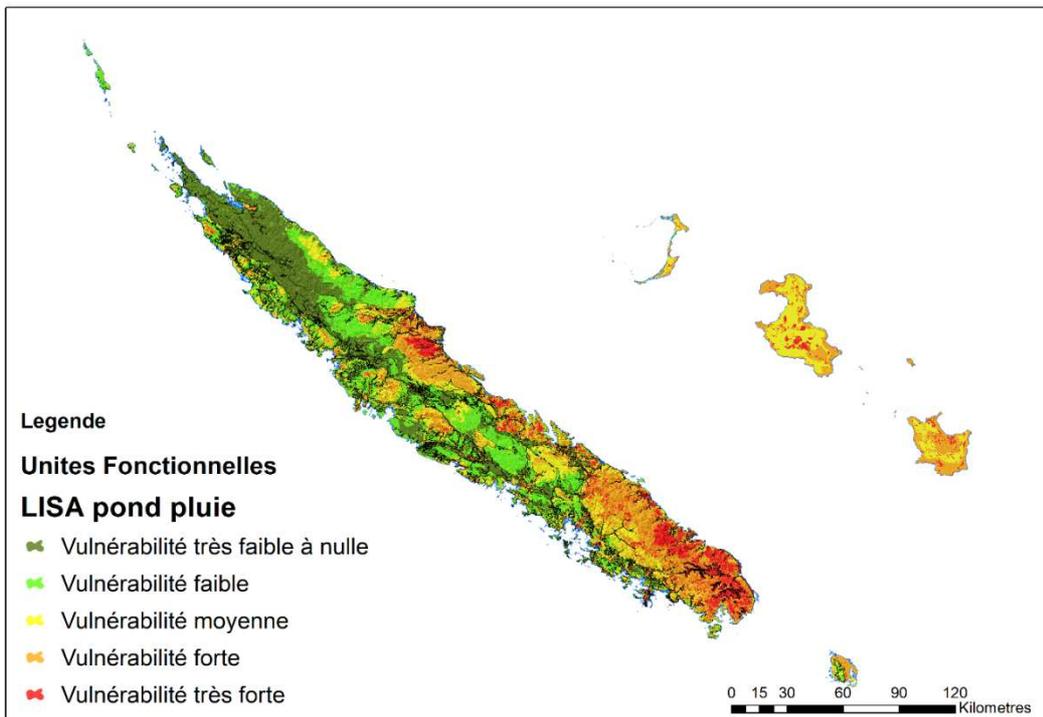


Figure 23 : Etape n°3 de l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque.

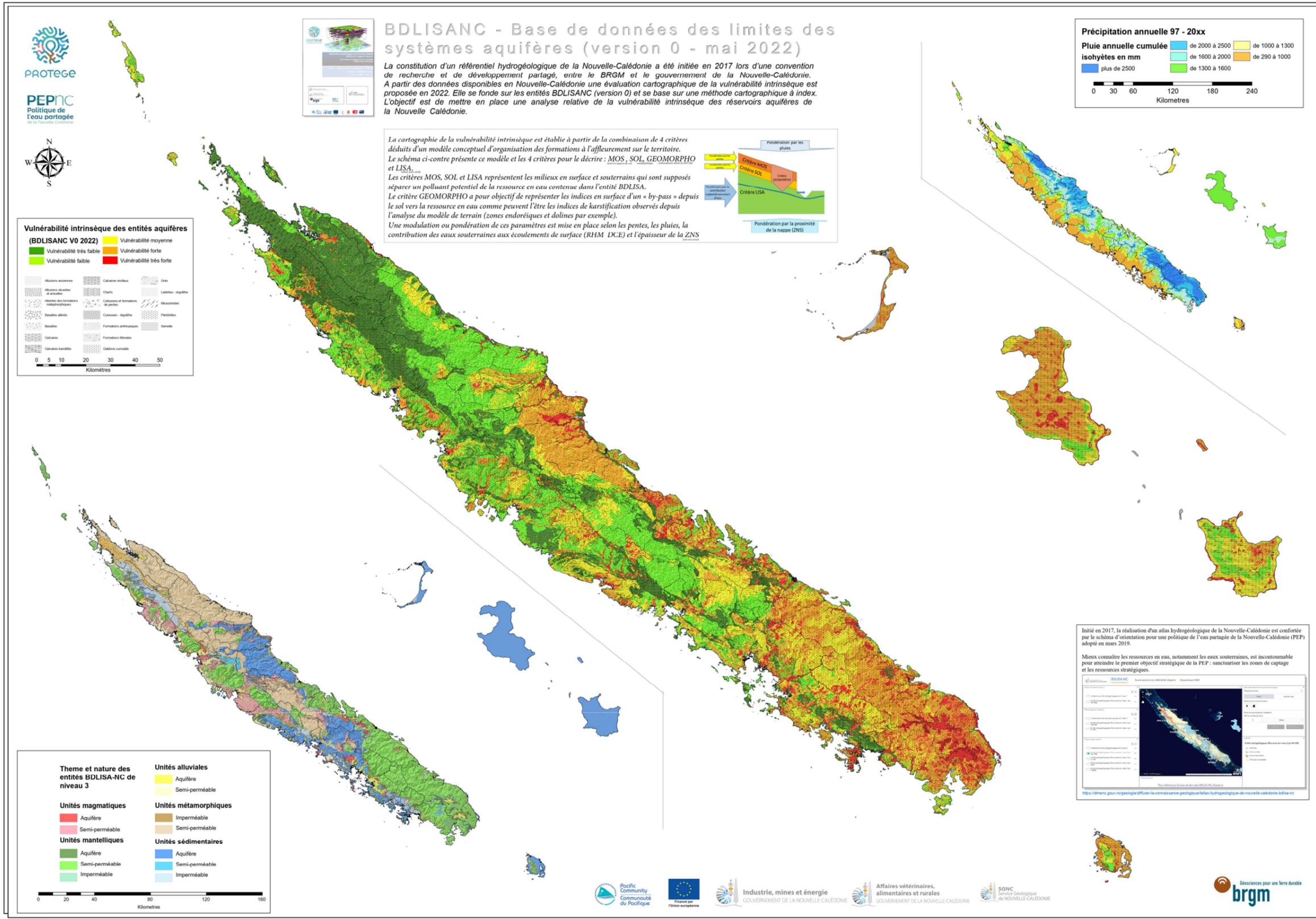


Figure 24 : Carte de vulnérabilité intrinsèque (étape finale, modulation par la ZNS encadrée entre 80% et 120%)

6.8 Discussion des résultats et scénarios

La cartographie de la vulnérabilité proposée dans cette étude est qualitative. Elle a vocation à comparer les entités les unes aux autres et permettre, par exemple, une planification des travaux nécessaires à la gestion des entités, des aquifères stratégiques et des campagnes d'acquisition de mesures ou de travaux nécessaires.

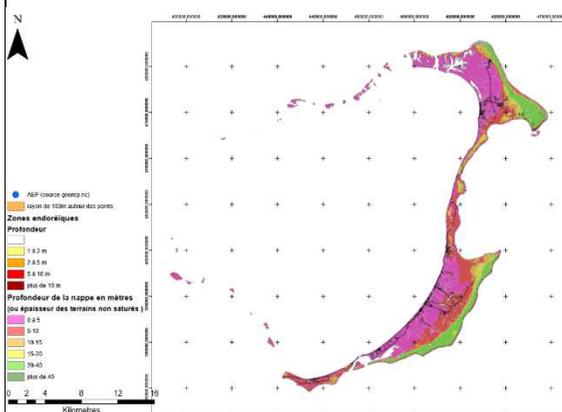
L'intérêt de l'analyse combinatoire proposée réside également dans la distribution des valeurs relatives de la vulnérabilité intrinsèque des entités BDLISA. La carte qui présente une vulnérabilité pour laquelle le rôle de la ZNS est encadrée [entre 80% et 120%] est retenue à ce titre comme résultat final (Figure 24).

Les trois exemples (Figure 26 à Figure 25) suivants montrent la concordance entre l'approche proposée et mise en œuvre à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie, avec des évaluations antérieures de la vulnérabilité réalisées pour les îles Loyautés.

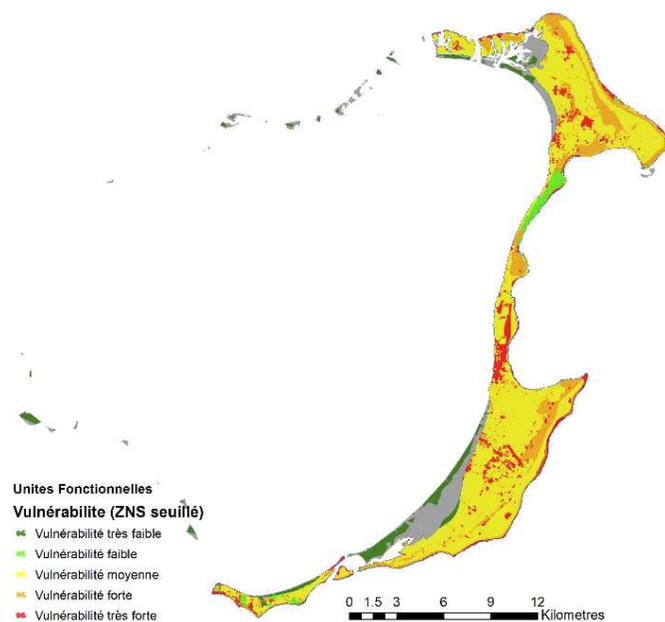
Les figures suivantes (Figure 28 à Figure 33) sont quelques exemples tirés de la carte de vulnérabilité intrinsèque globale, l'échelle d'utilisation de ces données est identique à celle de la carte géologique dont elles découlent (1/50 000).

Ouvéa

Carte de la ZNS



Vulnérabilité intrinsèque sans prise en compte de la ZNS



Vulnérabilité intrinsèque avec prise en compte de la ZNS

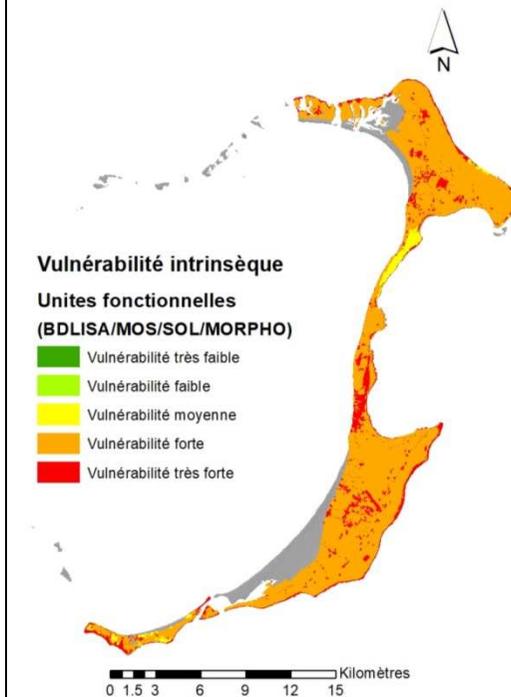
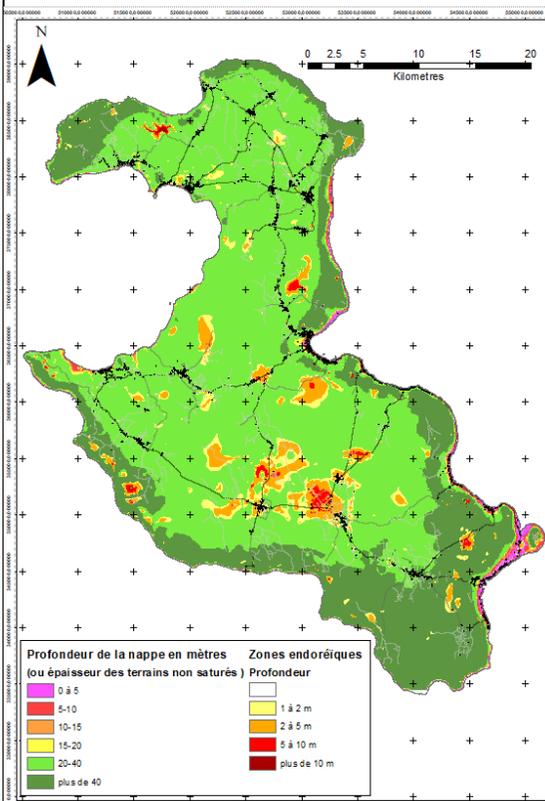


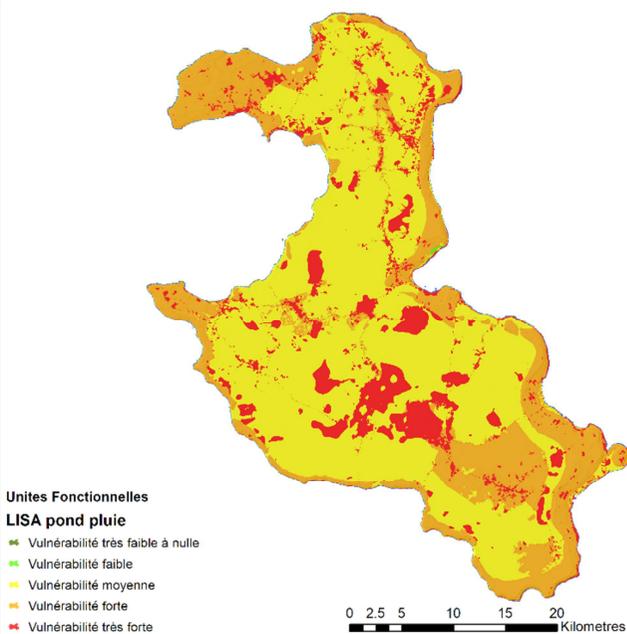
Figure 25 : Comparaison à Ouvéa de l'approche proposée avec une carte de vulnérabilité antérieure bénéficiant de la piézométrie.

Lifou

Carte de la ZNS



Vulnérabilité intrinsèque sans prise en compte de la ZNS



Vulnérabilité intrinsèque avec prise en compte de la ZNS

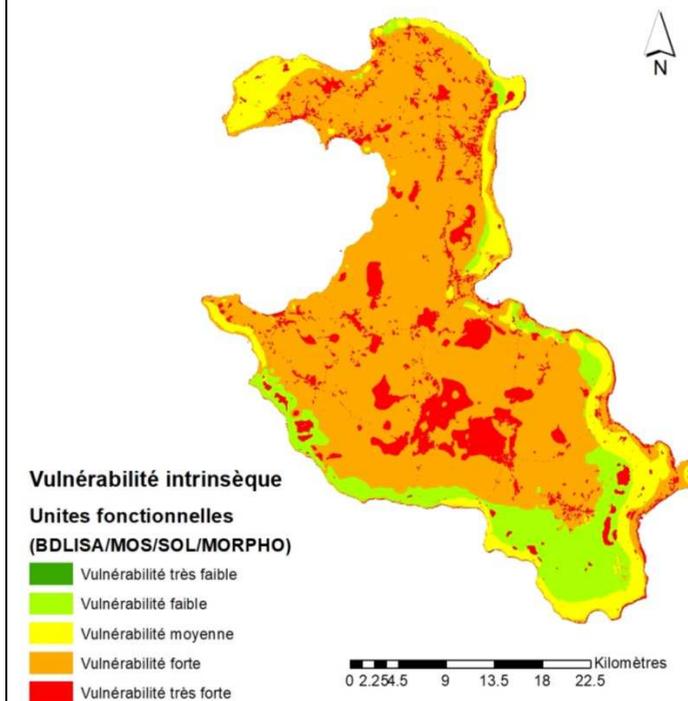


Figure 26 : Comparaison à Lifou de l'approche proposée avec une carte de vulnérabilité antérieure bénéficiant de la piézométrie.

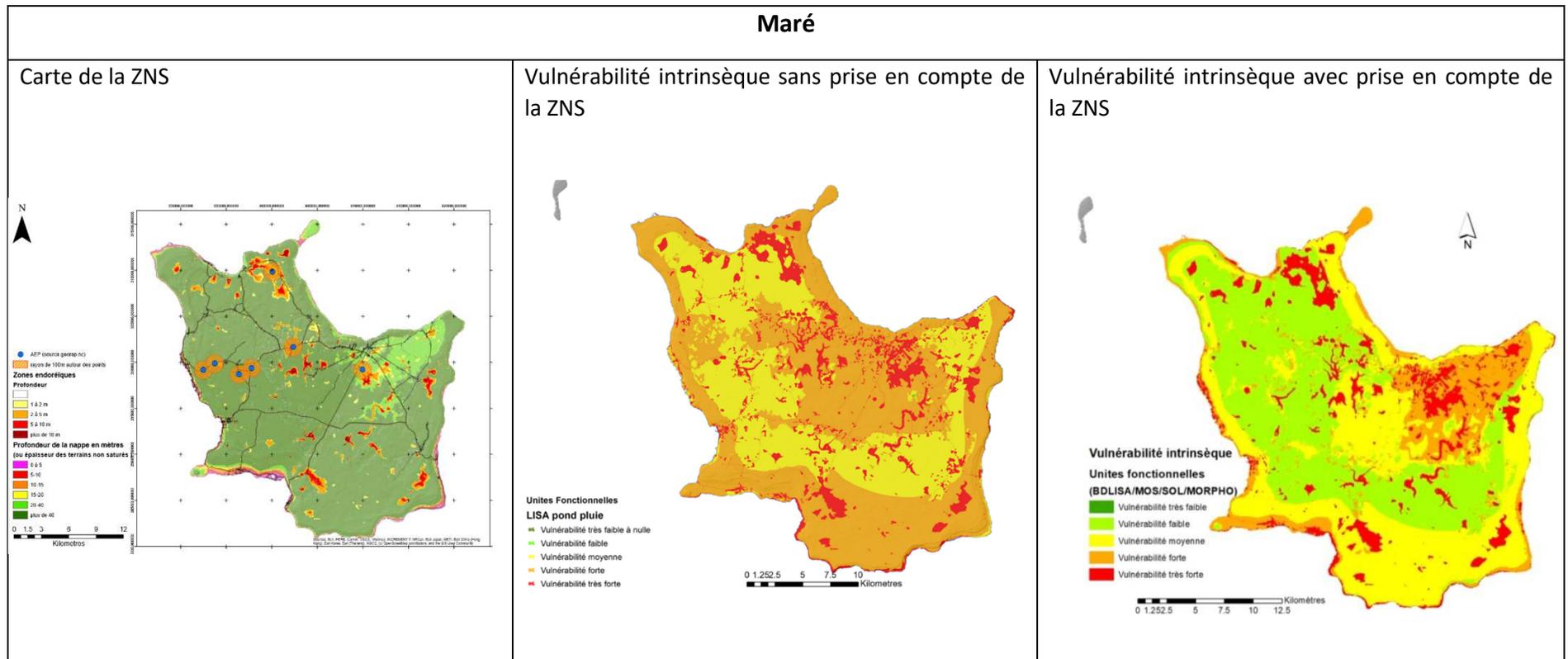


Figure 27 : Comparaison à Maré de l'approche proposée avec une carte de vulnérabilité antérieure bénéficiant de la piézométrie.

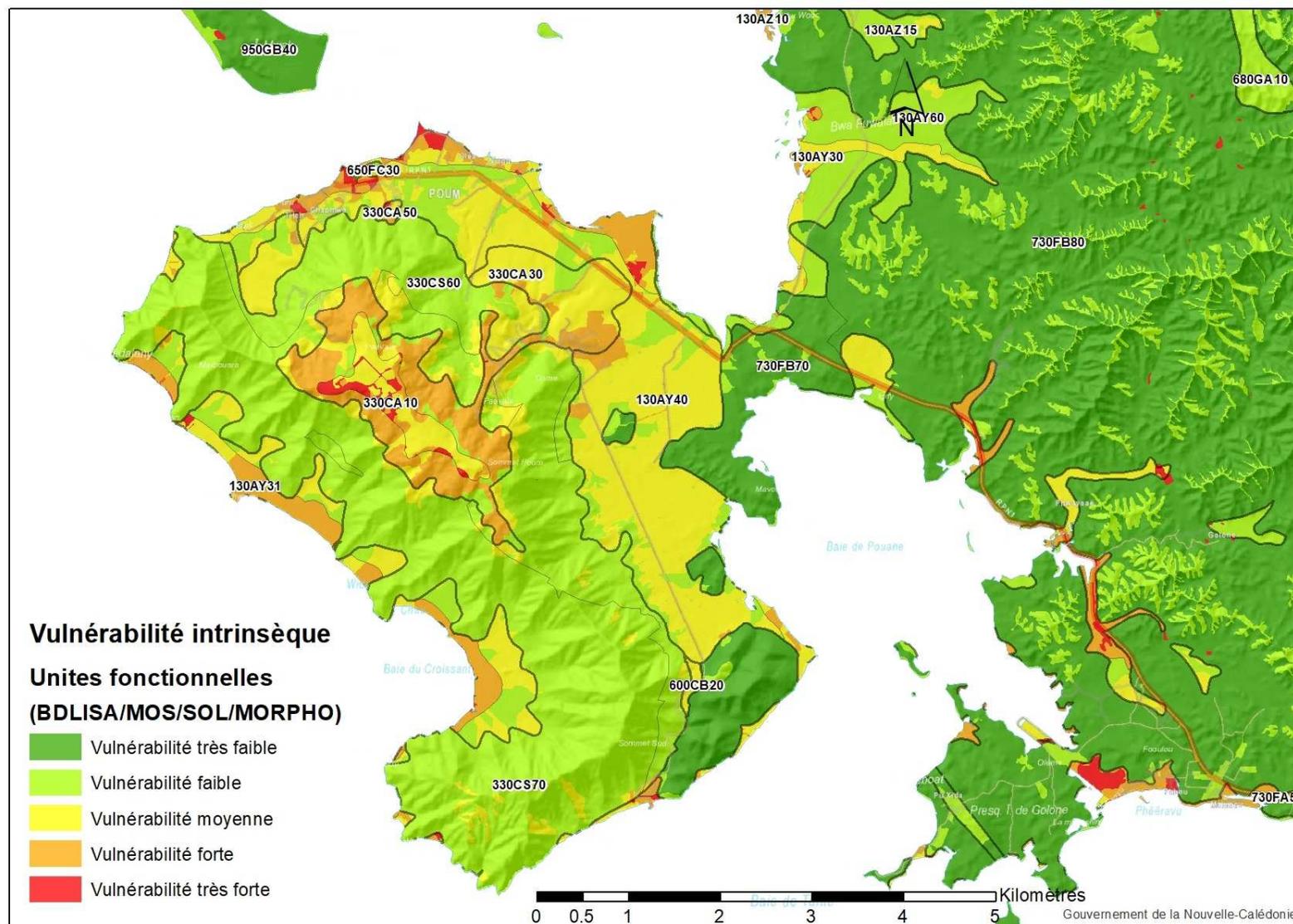


Figure 28 : Extrait de la carte de vulnérabilité intrinsèque autour du massif minier de POUM

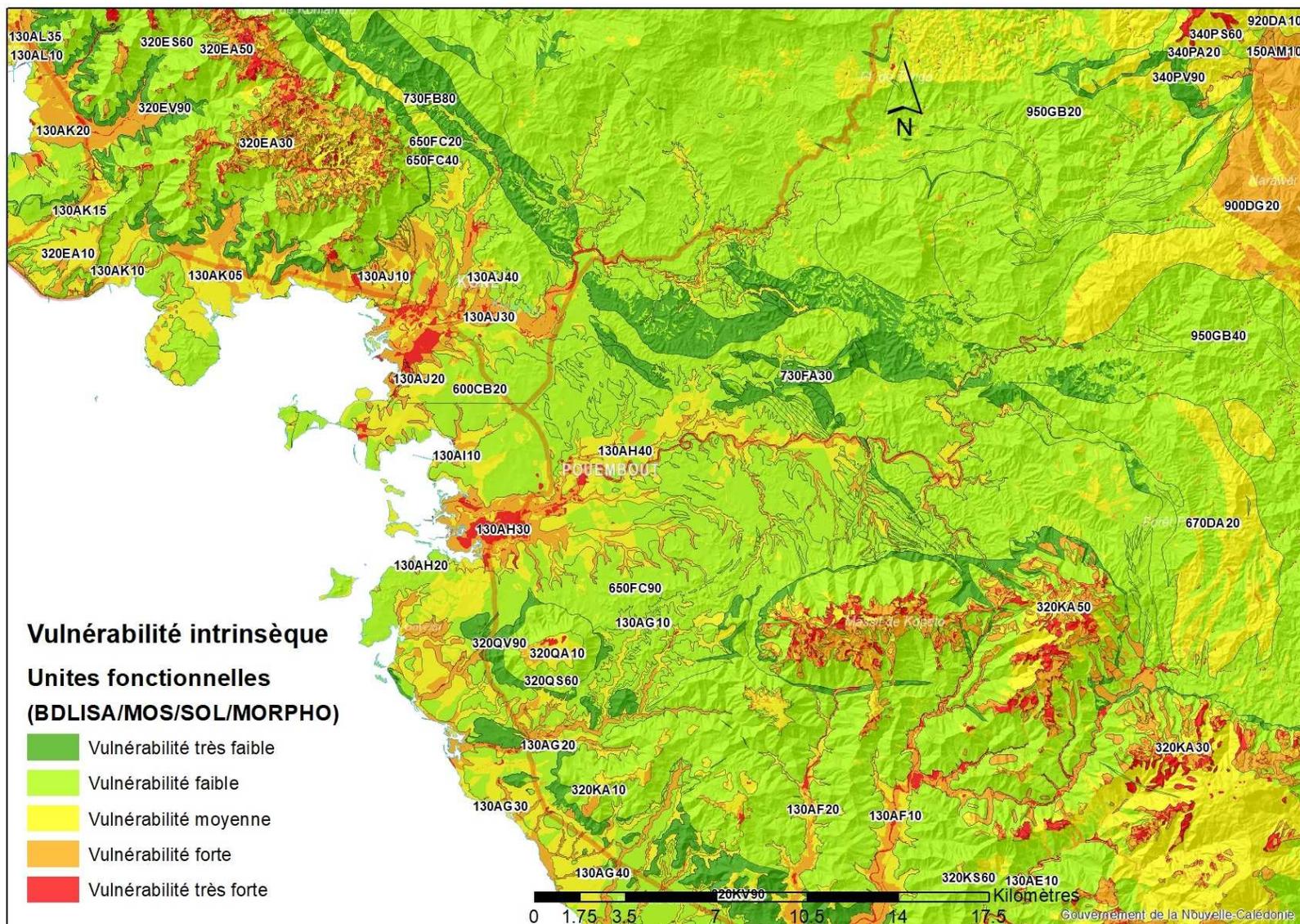


Figure 29 : Extrait de la carte de vulnérabilité intrinsèque autour de la plaine de Koné

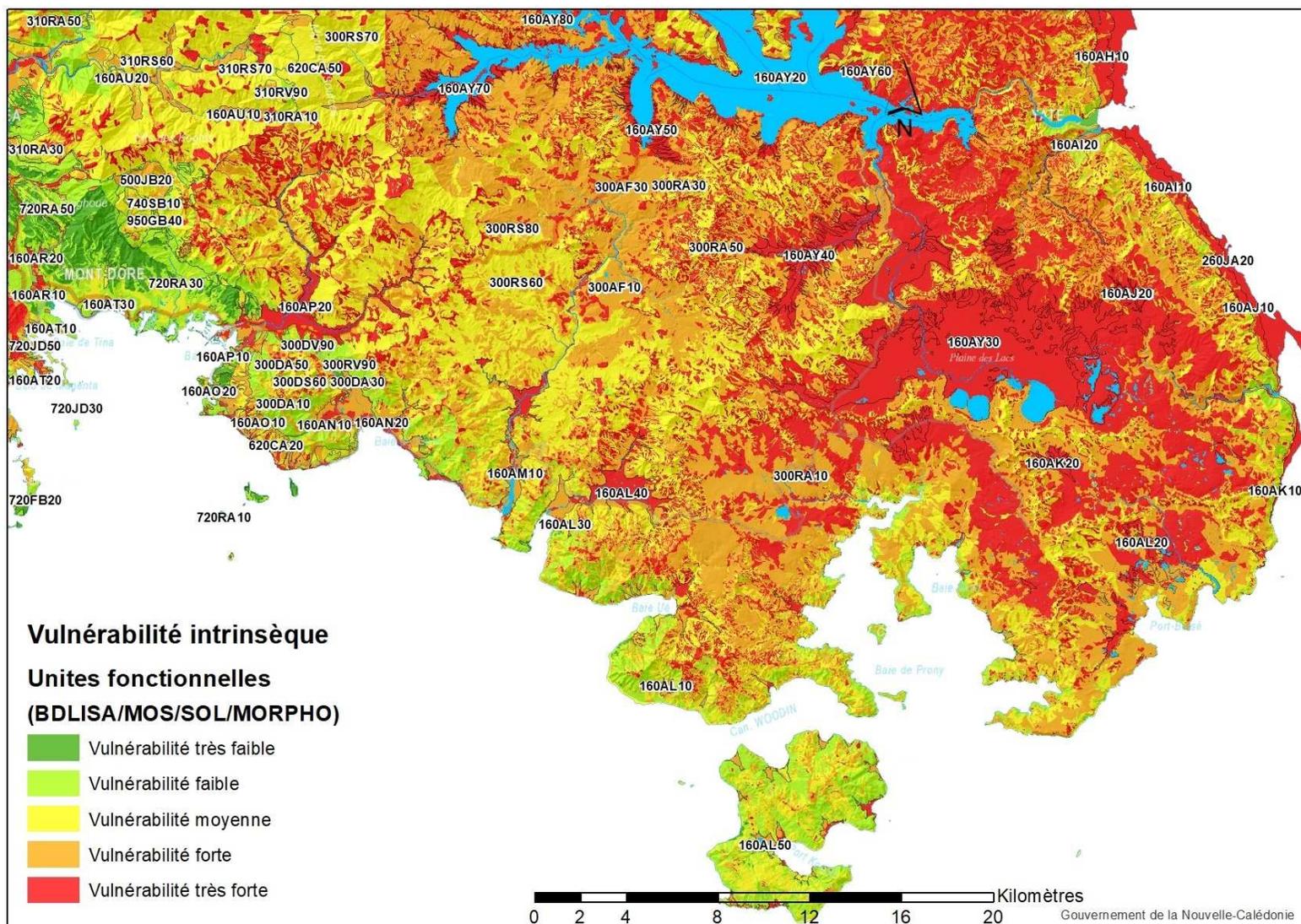


Figure 30 : Extrait de la carte de vulnérabilité intrinsèque secteur Grand Sud

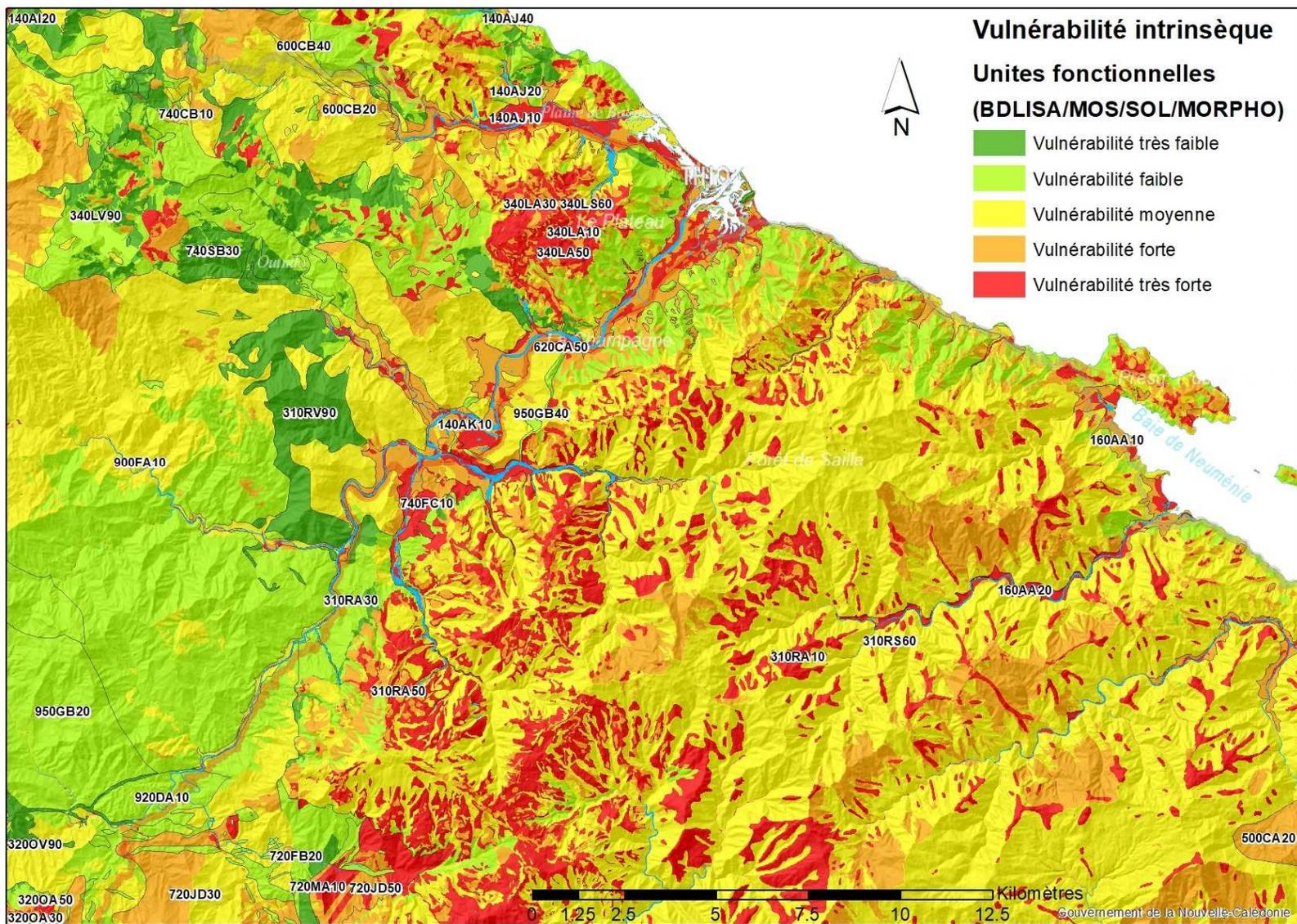


Figure 31 : Extrait de la carte de vulnérabilité intrinsèque secteur côte est - Thio

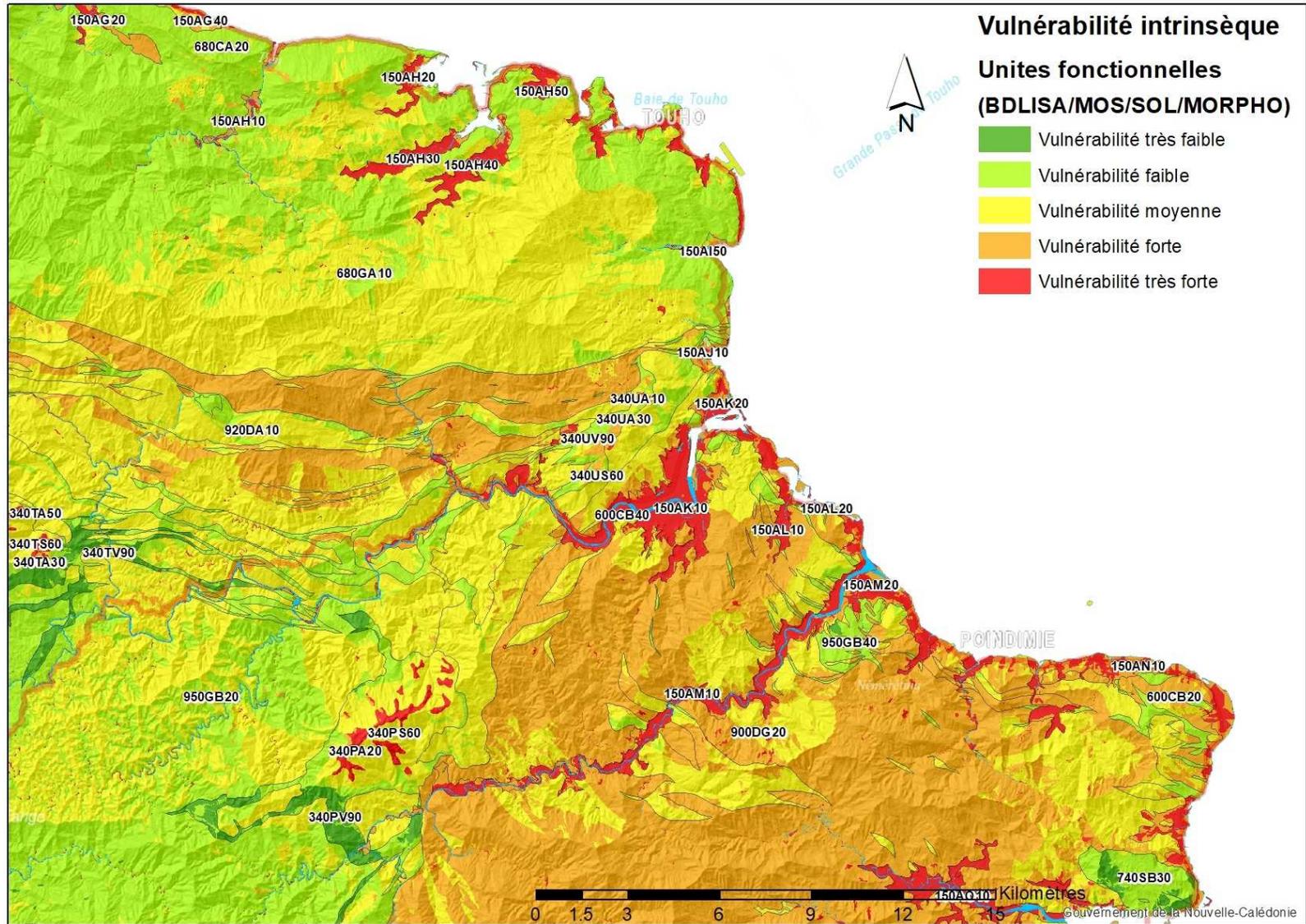


Figure 32 : Extrait de la carte de vulnérabilité intrinsèque secteur côte est – Touho-Poindimié

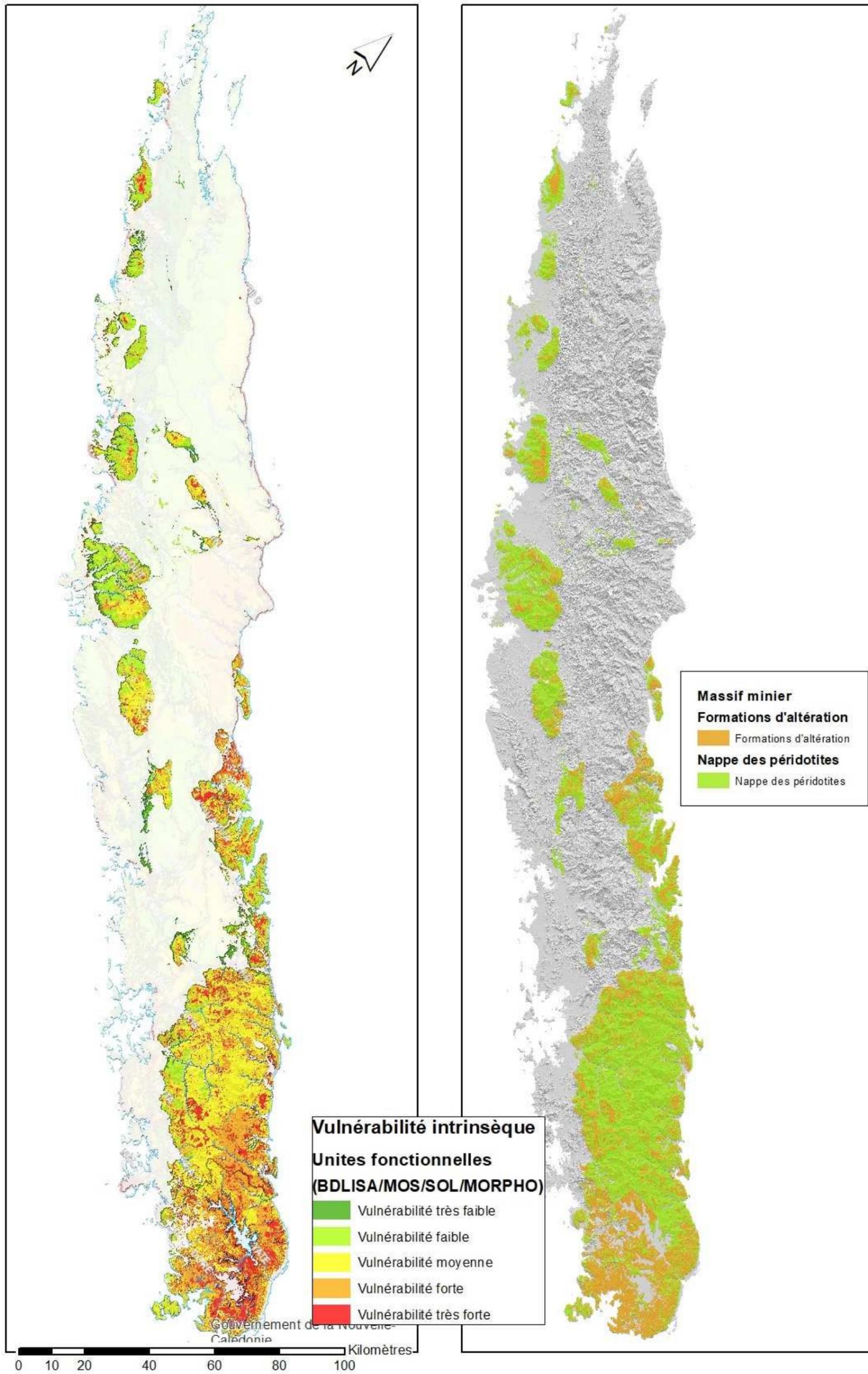


Figure 33 : Vulnérabilité intrinsèque des principaux massifs de péridotites de Nouvelle Calédonie

7 Conclusion

7.1 Bilan et avancement du projet

La production d'un atlas ou référentiel hydrogéologique à l'échelle de la Nouvelle Calédonie (Axe 1 : BDLISA-NC), a constitué l'essentiel des travaux de la première année. Cet avancement s'est concrétisé le 25 mars 2022, par la mise à disposition le référentiel hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie (BDLISA-NC) sur Georep : <https://dimenc.gouv.nc/actualites/thematique/geologie/atlas-hydrogeologique-de-nouvelle-caledonie-bdlisa-nc>

Depuis la précédente échéance, le travail a essentiellement porté sur la valorisation de BDLISA-NC pour contribuer à la définition et la cartographie des ressources stratégiques en eau souterraines. Il en est rendu compte dans le présent rapport :

- L'incorporation des données « pression » et « enjeux » AEP, relatives aux entités hydrogéologiques ;
- La proposition et la mise en œuvre d'une méthode d'évaluation cartographique de la vulnérabilité des eaux souterraines.

La méthode proposée pour parvenir à cette carte se fonde sur une analyse combinatoire de quatre critères (LISA, MOS, GEOMORPH et SOLS) auxquels des modulations (pondérations) ont été appliquées selon la pluie totale reçue, la pente des terrains, les débits caractéristiques d'étiage des bassins versants élémentaires et l'épaisseur supposée des terrains non saturés.

La combinaison de ces critères et pondérations a été proposée par les hydrogéologues du Service de la Géologie de Nouvelle Calédonie. D'autres scénarii pourraient être testés par les différents groupes de travail mobilisés dans le cadre des travaux de la Politique de l'Eau Partagée de Nouvelle Calédonie.

7.2 Perspectives

L'approche mise en œuvre pour identifier les ressources stratégiques en eau souterraines est paramétrique et tient compte des données effectivement disponibles. Elle pourra être consolidée :

- en confrontant les avis éclairés au sein des groupes de travail de la MISE ;
- en intégrant de nouvelles informations, en profitant notamment du caractère générique et reproductible des outils utilisés.

Par ailleurs, à l'occasion d'une prochaine réunion OS1/OTB de la PEP, les discussions avec les partenaires et la considération de données complémentaires devraient permettre de préciser une feuille de route pour étendre cette définition aux ressources critiques ou stratégiques en eaux superficielles. On peut d'ores et déjà envisager d'incorporer les données « pression » et « enjeux » sur les ressources superficielles utilisées pour l'AEP, en exploitant le réseau hydrographique ordonné.

8 Références

- Goué A., Jeanpert J., Mardhel V.**, (03/2021), Référentiel hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie BDLISA-NC -Rapport d'étape n°1. DIMENC/SGNC -2021(05). 50 pages
- Goué A., Jeanpert J., Mardhel V.**, (10/2021), Référentiel hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie BDLISA-NC -Rapport d'étape n°2. DIMENC/SGNC -2021(13). 31 pages, 2 annexes.
- MARDHEL V., JEANPERT J., BALAYRE S. (2019)** – Référentiel Hydrogéologique de Nouvelle-Calédonie BDLISA-NC – Version 0. Rapport BRGM/RP-68516-FR Mai 2019, 42 p., 16 fig.
- MARDHEL V., JEANPERT J., (2020)** – BDLISA-NC : construction du référentiel hydrogéologique à partir de modèles de données géologiques adaptés et d'outils cartographiques dédiés. Rapport BRGM/RP-70134-FR, 42 p., 31 fig.
- Alamy Z., Langevin C. (1989)** – Cartographie multicritère. Aptitude des sols. Etude méthodologique. BRGM 30306 env 4S89
- Aller L., Bennet T., Lehr J.H., Petty R.J and Hackett G. (1987)** – DRASTIC : a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings. US Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87-036, 455pp.
- Doerfliger N. (1996)** – Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multiattribute vulnerability mapping. Thèse 3^{ème} cycle, Université de Neuchâtel, Suisse, 292 pp.
- Dörfliger N. & Zwahlen F (1998)** – Practical Guide, Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK). – Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL) : 56 p.; Bern
- Gogu R.C., Dassargues A., 2000** - Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assesment using overlay and index methods, Environmental Geology, 39 (6), April, Springer-Verlag.
- Lallemend-Barres.A (1994)** : normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. Etude documentaire préliminaire. R37928. BRGM
- Schnebelen, N., Platel, J.-P., Le Nindre, Y. M., Baudry, D., Hoarau, A., Dufour P. et Benhammouda, S. (2002)** Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 5. Opération sectorielle – Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise. Nouvelles connaissances hydrogéologiques. Cartographie de la vulnérabilité aux pollutions. BRGM/RP-51178-FR, BRGM.
- MAURIZOT P., MORTIMER N. (2020)**. New Caledonia: Geology, Geodynamic Evolution and Mineral Resources. Geological Society, London, Memoirs, 51, NP, 16 June 2020, <https://doi.org/10.1144/M51>

9 Liste des figures

Figure 1 : Vers l’explorateur thématique (Explo’LISA), dédié à l’Atlas hydrogéologique de Nouvelle-Calédonie (BDLISA-NC).	9
Figure 2 : Explo’LISA : L’atlas hydrogéologique de Nouvelle-Calédonie (BDLISA-NC).....	9
Figure 3 : Projet de poster de l’atlas hydrogéologique BDLISA-NC.....	10
Figure 4 : Organisation fonctionnelle pour définir les connaissances et le périmètre des ressources en eau stratégiques d’après https://e-lien.gouv.nc/share/s/pu_u-l3mROq_f1lI2p2bfA).	12
Figure 5 : Exemple d’analyse multicritère des enjeux et des menaces permettant un diagnostic et une aide à la concertation communale d’après https://e-lien.gouv.nc/share/s/pu_u-l3mROq_f1lI2p2bfA).	13
Figure 6 : Schéma de représentation type des pressions.....	15
Figure 7 : Requête SQL permettant de créer un fichier de pression type, à partir des couches de pressions. Le Poids est arbitrairement fixé à 100 mais peut découler d’une analyse des types de pressions et d’un tableau spécifique d’attribution selon le contexte étudié	15
Figure 8 : Carte synthétique des pressions sur la commune de Boulouparis	19
Figure 9 : Carte synthétique des enjeux sur la commune de Boulouparis.....	20
Figure 10 : Carte des ouvrages avec un niveau statique (BSSNC 05/2022).....	21
Figure 11 : Illustration de la méthode IDPR : Indice de Développement et de Persistance de Réseaux.	28
Figure 12 : Modèle conceptuel proposé pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines à partir de BDLISA-NC.....	32
Figure 13 : Modèle proposé pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines à partir de BDLISA-NC et de différentes modulations.....	34
Figure 14 : Evaluation de la vulnérabilité selon le critère LISA.....	37
Figure 15 : Évaluation de la vulnérabilité selon le critère MOS.	39
Figure 16 : Évaluation de la vulnérabilité selon le critère GEOMORHO.....	41
Figure 17 : Modulation selon la pente des terrains (%)	42
Figure 18 : Modulation selon le débit caractéristique d’été (DCE, L/s).....	43
Figure 19 : Modulation selon le cumul annuel de précipitation (mm).....	43
Figure 20 : Distribution spatiale des modulations de la vulnérabilité selon les ZNS et perméabilités	44
Figure 21 : Étape n°1 de l’évaluation de la vulnérabilité intrinsèque.	46
Figure 22 : Etape n°2 de l’évaluation de la vulnérabilité intrinsèque.	47
Figure 23 : Etape n°3 de l’évaluation de la vulnérabilité intrinsèque.	47
Figure 24 : Carte de vulnérabilité intrinsèque (étape finale, modulation par la ZNS encadrée entre 80% et 120%).....	48
Figure 25 : Comparaison à Ouvéa de l’approche proposée avec une carte de vulnérabilité antérieure bénéficiant de la piézométrie.....	50
Figure 26 : Comparaison à Lifou de l’approche proposée avec une carte de vulnérabilité antérieure bénéficiant de la piézométrie.....	51
Figure 27 : Comparaison à Maré de l’approche proposée avec une carte de vulnérabilité antérieure bénéficiant de la piézométrie.....	52
Figure 28 : Extrait de la carte de vulnérabilité intrinsèque autour du massif minier de POUM	53
Figure 29 : Extrait de la carte de vulnérabilité intrinsèque autour de la plaine de Koné.....	54
Figure 30 : Extrait de la carte de vulnérabilité intrinsèque secteur Grand Sud	55
Figure 31 : Extrait de la carte de vulnérabilité intrinsèque secteur côte est - Thio	56
Figure 32 : Extrait de la carte de vulnérabilité intrinsèque secteur côte est – Touho-Poindimié.....	57
Figure 33 : Vulnérabilité intrinsèque des principaux massifs de péridotites de Nouvelle Calédonie.....	58

10 Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des couches de pressions sur les communes pilotes et sur les autres communes du territoire.	14
Tableau 2 : Exemple de pression type de la couche pression : AGRICULTURE_EDL_MISE	16
Tableau 3 : Compilation des pressions types pour l'entité BDLISA-NC 200KA30 de la commune de Maré.	16
Tableau 4 : Recensement des AEP souterrains ou superficiels par entité BDLISA-NC à BOULOUPARIS et par estimation des populations desservies.	17
Tableau 5 : Tableau synthétique de présence (o) ou absence des pressions recensées par communes de l'EDL et entités BDLISA-Nouvelle-Calédonie.	18
Tableau 6 : Classes de vulnérabilité de la méthode AVI.....	25
Tableau 7 : Paramètres permettant le calcul de vulnérabilité selon la méthode de Munoz, Langevin (1991). 29	
Tableau 8 : Synthèse des données exploitables vis-à-vis des différents critères.....	31
Tableau 9 : Notes attribuées aux différents Etats du critère BDLISA.	35
Tableau 10 : Perméabilités et notes attribuées aux différents Milieux du critère BDLISA.	35
Tableau 11 : Notes attribuées aux différentes Natures du critère BDLISA.	35
Tableau 12 : Notes attribuées aux différents Thèmes du critère BDLISA.	35
Tableau 13 : Notes attribuées aux différentes Lithologies.....	36
Tableau 14 : Paramètres d'évaluation du critère BDLISA.....	37
Tableau 15 : Notes attribuées aux différents modes d'occupation du sol (MOS, 2014).	38
Tableau 16 : Notes attribuées aux différents sols de la carte morpho-pédologique.....	41
Tableau 17 : Notes attribuées aux différentes occurrences géomorphologiques.	41
Tableau 18 : Modulation en % selon l'épaisseur et la perméabilité attendue des formations de la ZNS	44
Tableau 19 : Tableau de synthèse de l'analyse combinatoire.....	46