



Rapport

Rapport d'étape 3 : Cartographie de la vulnérabilité

Phase 1 : Etude de délimitation de l'aire d'alimentation de captages et cartographie de la vulnérabilité intrinsèque - Captage de la Touvre (16)



Rapport n°A122291/version A– Mars 2023

Projet suivi par Syndia FERNANDES – 06.71.97.23.63 – syndia.fernandes@anteagroup.fr

Fiche signalétique



Rapport d'étape 3 : Cartographie de la vulnérabilité

Phase 1 : Etude de délimitation de l'aire d'alimentation de captages et cartographie de la vulnérabilité intrinsèque - Captage de la Touvre (16)

| CLIENT | SITE |
|--|---|
| EPTB Charente | Captage de la Touvre |
| 5 rue Chante-caille Z.I. des Charriers 17100 SAINTES | Bassins versants de la Touvre, La Bonnierre, La Tardoire et Le Bandiat, Secteur Angoulême |
| Mme Adeline MASSONNEAU TEL : 05.46.74.00.02 et 07.79.59.44.77 | |

RAPPORT D'ANTEA GROUP

| | |
|---|--|
| Responsable du projet | Syndia FERNANDES |
| Interlocuteur commercial | Christophe SUBIAS |
| | Implantation de Bordeaux |
| Implantation chargée du suivi du projet | 05.57.26.02.80 secretariat.bordeaux-fr@anteagroup.com |
| Rapport n° | A122291 |
| Version n° | version A |
| Votre commande et date | C22091 / 02.08.2022 |
| Projet n° | PCHP220137 |

| | Nom | Fonction | Date | Signature |
|-------------|----------------------|---|-----------|---|
| Rédaction | FERNANDES Syndia | Ingénieure de projet | Mars 2023 |  |
| Approbation | SUBIAS Christophe | Directeur de projet EAU - Hydrogéologue | Mars 2023 |  |

Suivi des modifications

| Indice Version | Date de révision | Nombre de pages | Nombre d'annexes | Objet des modifications |
|-------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|
| A | 7/03/2023 | 52 | | |
| | | | | |
| | | | | |

Sommaire

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introduction..... | 7 |
| 2. | Rappel sur la délimitation de l'AAC..... | 9 |
| 2.1. | Principales caractéristiques du captage..... | 9 |
| 2.2. | Délimitation de l'AAC..... | 9 |
| 2.2.1. | Détermination de la PNAC..... | 9 |
| 2.2.2. | Détermination de l'AAC..... | 12 |
| 3. | Méthodologie générale appliquée aux aquifères karstiques de type binaire..... | 14 |
| 4. | Méthodologie utilisée pour la définition de la vulnérabilité d'un aquifère karstique : PAPRIKA .. | 16 |
| 4.1.1. | Méthodologie mise en œuvre..... | 16 |
| 4.1.2. | Paramètres nécessaires au calcul de la vulnérabilité..... | 17 |
| 4.1.3. | Poids des paramètres et classes de vulnérabilité..... | 22 |
| 5. | Méthodologie mise en œuvre et paramètres utilisés pour la définition de la vulnérabilité d'un aquifère superficiel..... | 23 |
| 5.1. | Méthodologie mise en œuvre..... | 23 |
| 5.2. | Paramètres nécessaires au calcul de la vulnérabilité..... | 24 |
| 5.2.1. | Critère D..... | 24 |
| 5.2.2. | Critère K..... | 25 |
| 5.2.3. | Critère Pi..... | 27 |
| 5.2.4. | Critère R..... | 27 |
| 5.2.5. | Critère Dc..... | 28 |
| 6. | Détermination des critères de vulnérabilité..... | 29 |
| 6.1. | Détermination des critères de vulnérabilité d'un aquifère karstique par la méthode PaPRIKa | 29 |
| 6.1.1. | Critère « protection de l'aquifère » (P)..... | 29 |
| 6.1.2. | Critère « nature de la roche du réservoir aquifère » (R)..... | 30 |
| 6.1.3. | Critère « condition d'infiltration » (I)..... | 35 |
| 6.1.4. | Critère « degré de karstification » (Ka)..... | 35 |
| 6.2. | Détermination des critères de vulnérabilité d'un aquifère superficiel par la méthode CEMAGREF (adaptée)..... | 38 |
| 6.2.1. | Critère « accessibilité du milieu aquatique » : « distance hydraulique » (D)..... | 38 |
| 6.2.2. | Critère « fonctionnement hydrique du sol et du sous-sol » (K)..... | 38 |
| 6.2.3. | Critère « physiographie du bassin versant » (Pi)..... | 38 |
| 6.2.4. | Critère « érosivité des pluies » (R)..... | 38 |
| 7. | Calcul de la vulnérabilité intrinsèque et cartographie..... | 43 |
| 7.1. | Calcul de la vulnérabilité intrinsèque et cartographie pour la méthode PaPRIKa..... | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 7.1.1. Calcul de la vulnérabilité intrinsèque du karst..... | 43 |
| 7.1.2. Résultats – BV du Karst | 44 |
| 7.2. Calcul de la vulnérabilité intrinsèque et cartographie pour la méthode CEMAGREF (adaptée) | 46 |
| 7.2.1. Calcul de la vulnérabilité hydrologique pour les BV superficiels | 46 |
| 7.2.2. Résultats – BV superficiels | 47 |
| 7.3. Cartes de vulnérabilité globale – Ressource et Captage | 49 |
| 8. Conclusions..... | 51 |

Table des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1: Localisation des sources de la Touvre (Source: Géoportail) | 8 |
| Figure 2: Schéma synthétique des sources de la Touvre extrait de la thèse de D. ROUILLER | 10 |
| Figure 3: Zones d'alimentation du système de la Touvre | 11 |
| Figure 4: Délimitation du tracé de l'AAC proposé | 13 |
| Figure 5: Organisation des différents critères de la méthode PaPRIKa en fonction de la structure et du fonctionnement des aquifères karstiques (Source : BRGM rapport RP-63311-FR février 2014)..... | 17 |
| Figure 6 : Indexation du sous-critère E - "aquifère épikarstique" | 18 |
| Figure 7 : Détermination de la nature d'un sol en fonction de sa texture et sa proportion de cailloux. * : définition des Arénosols, ** : définition des Peyrosols | 18 |
| Figure 8 : Détermination des classes du critère S par croisement de la nature du sol et de son épaisseur | 18 |
| Figure 9 : Description de la lithologie de la zone non saturée | 18 |
| Figure 10 : Indexation du sous-critère ZNS en croisant les trois paramètres : épaisseur, lithologie et fracturation | 19 |
| Figure 11 : Indexation du critère R « réservoir roche aquifère » | 19 |
| Figure 12 : Indexation du critère I « condition d'infiltration » | 20 |
| Figure 13 : Indexation du critère Ka | 21 |
| Figure 14: Carte du critère "ZNS" | 31 |
| Figure 15: Carte des zonages pédologiques dans le secteur du karst..... | 32 |
| Figure 16: Carte du critère "P" | 33 |
| Figure 17: Carte du critère "R" | 34 |
| Figure 18: Carte du critère "I" | 36 |
| Figure 19: Carte du critère "Ka" | 37 |
| Figure 20: Carte du critère "D" | 39 |
| Figure 21: Carte du critère "K" | 40 |
| Figure 22: Carte du critère "Pi" | 41 |
| Figure 23: Carte du critère "R" | 42 |
| Figure 24: Vulnérabilité intrinsèque du karst par la méthode PaPRIKa | 45 |
| Figure 25: Carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource « Vr » | 48 |
| Figure 26: Carte de vulnérabilité intrinsèque du captage "Vc" | 48 |
| Figure 27: Carte de vulnérabilité globale de la ressource | 49 |
| Figure 28: Carte de vulnérabilité globale du captage | 50 |

Table des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Tableau des pondérations pour les différents critères de la méthode PaPRIKa | 22 |
| Tableau 2 : Tableau des classes de vulnérabilité globale (Vg) | 22 |
| Tableau 3: Classes des indices de vulnérabilité de la ressource "Vr" | 23 |
| Tableau 4: Classes des indices de vulnérabilité du captage "Vc" | 24 |
| Tableau 5: Classes des distances "D" | 24 |
| Tableau 6: Classes du sous-critère "IDPR" | 25 |
| Tableau 7: Classes du sous-critère "Sol" | 25 |
| Tableau 8: Classes du sous-critère "Os" | 26 |
| Tableau 9: Classes du critère "K" | 27 |
| Tableau 10: Classes des intensités de pente "Pi" | 27 |
| Tableau 11: Classes des indices d'érosivité des pluies "R" | 28 |
| Tableau 12: Classes des distances au captage "Dc" | 28 |
| Tableau 13: Poids des paramètres de la vulnérabilité intrinsèque du karst (Méthode PaPRIKa) | 43 |
| Tableau 14 : Classes de vulnérabilité du karst | 43 |
| Tableau 15: Poids des paramètres de la vulnérabilité intrinsèque du karst (Méthode CALLIGEE/ANTEA) | 46 |
| Tableau 16: Poids des paramètres de la vulnérabilité intrinsèque du karst (Méthode CALLIGEE/ANTEA) | 47 |

1. Introduction

Le captage de la Touvre (**source du Bouillant**) est une ressource stratégique pour l'alimentation en eau potable de Grand Angoulême car il assure en moyenne 87 % de l'approvisionnement en eau potable du territoire et de ses 145 310 habitants.

Les sources de la Touvre sont localisées sur la commune de Touvre située sur le territoire de Grand Angoulême (Figure 1).

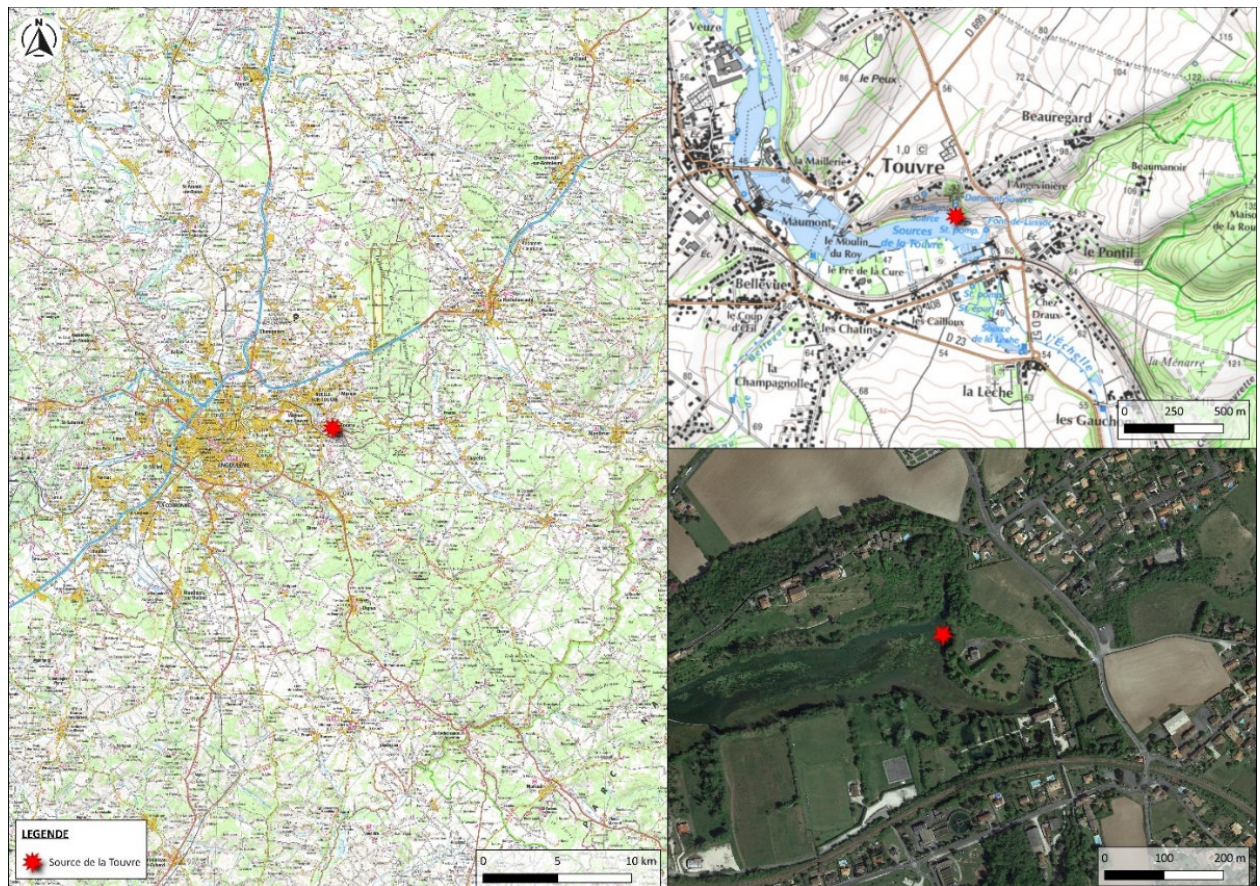
En 2021, l'Agence de l'eau Adour Garonne a conditionné le versement d'une aide à la réalisation d'une étude de délimitation des zones de protection du captage puis la définition d'un plan d'actions afin de préserver cette ressource stratégique.

Cette décision fait également suite au classement de ce captage dans la liste des captages sensibles de priorité 4 en mars 2022. Pour répondre à cette demande, Grand Angoulême a sollicité l'Etablissement Public Territorial de Bassin (EPTB) Charente afin de porter cette démarche. La méthodologie nationale (article L.211-3 du code de l'environnement) définit plusieurs phases comprenant :

- **Phase 1** : Etude de délimitation de l'Aire d'Alimentation du Captage (AAC) et cartographie de la vulnérabilité intrinsèque :
 - Etape 1 : étude hydrogéologique du bassin versant souterrain.
 - Etape 2 : définition de la portion de nappe alimentant le captage (PNAC).
 - Etape 3 : cartographie de la vulnérabilité intrinsèque du captage vis-à-vis des pollutions diffuses.
- **Phase 2** : Diagnostic des pressions du territoire.
- **Phase 3** : Délimitation des Zones Actions Prioritaires au regard de la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque et du diagnostic des pressions.

Ce rapport présente les résultats de l'étape n°3 de la Phase 1 et comporte trois parties :

- Rappels sur la délimitation de l'AAC ;
- Détermination de la vulnérabilité intrinsèque de l'AAC (Méthodologies choisies) ;
- Calcul de la vulnérabilité intrinsèque et cartographie.



2. Rappel sur la délimitation de l'AAC

2.1. Principales caractéristiques du captage

Les sources de la Touvre sont constituées par 3 exutoires principaux :

- Le Bouillant (code BSS : 07093X0020, Z=45 m), vaste zone effondrée de 40 m de long sur 30 m de large et profonde de 15 m. L'eau y arrive par un conduit de 2,5 m de diamètre où les vitesses d'écoulement peuvent atteindre 2 m/s.
- Le Dormant (code BSS : 07093X0077, Z=45 m), situé dans le prolongement du Bouillant auquel il se raccorde en profondeur. La vasque de 27 m de profondeur est fermée par des éboulis à travers lesquels l'eau émerge.
- La Font de Lussac (code BSS : 07093X0066, Z=47 m), située sur une diaclase NS ouverte sur 25 m de longueur et qui se raccorde à des puits verticaux.

Le captage de la Touvre est constitué par 2 siphons (composé d'une crépine pour l'un et 3 crépines pour l'autre) placés dans le griffon de la source du Bouillant entre 3 et 5 mètres de profondeur. Une station de reprise est située directement à proximité des sources. La station de pompage et de traitement se situe route du Pontil, de l'autre côté de la voie SNCF, en rive gauche de la Touvre. Elle présente une capacité de pompage de 2 200 m³/h.

La qualité des eaux captées aux sources de la Touvre d'un point de vue physico-chimique et bactériologique est d'une qualité globale satisfaisante et compatible aux normes eaux brutes avec des teneurs en nitrates stables dans le temps et la présence de pesticides à des concentrations faibles.

2.2. Délimitation de l'AAC

2.2.1. Détermination de la PNAC

L'aquifère capté par le captage de la Touvre au Bouillant est formé de calcaire fracturé correspondant à un système binaire karstique dont l'alimentation provient en grande partie par les pertes des ruisseaux de la Tardoire et du Bandiat.

La délimitation de la PNAC du captage de la Touvre au Bouillant a donc été effectuée à partir des éléments suivants :

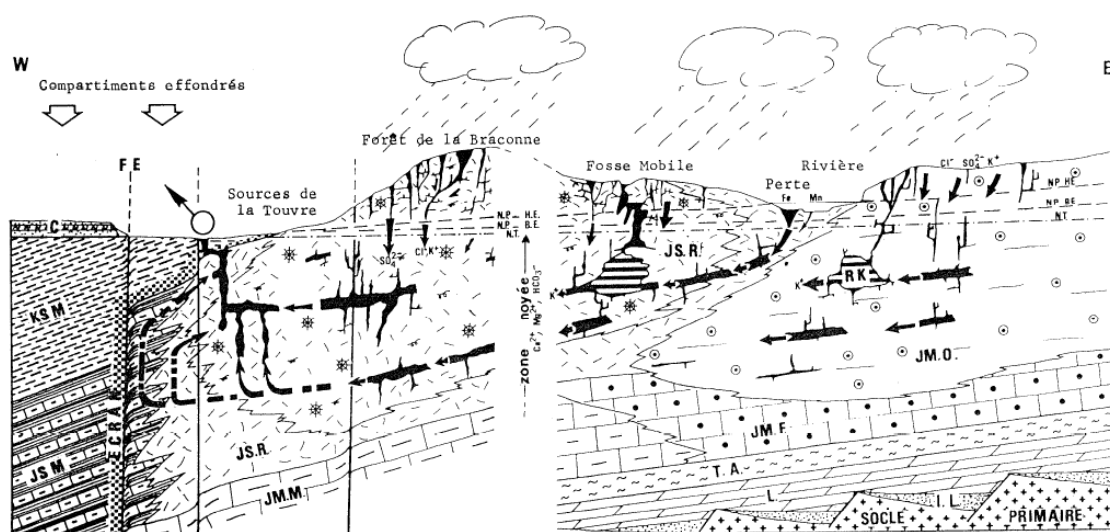
- le contexte géologique et structural,
- l'inventaire des phénomènes karstiques.

Le schéma hydrogéologique (Figure 2) permet d'illustrer le fonctionnement hydrogéologique du captage de la Touvre au Bouillant qui est le suivant :

- Alimentation par l'impluvium karstique : le « grand karst » où affleurent les terrains du Dogger au Kimméridgien. Les sources de la Touvre et la source de la Lèche sont les exutoires de l'aquifère karstique du Jurassique moyen et supérieur du karst de la Rochefoucauld qui s'étend principalement vers l'est. Ces résurgences émergent à la

faveur de la faille de l'Echelle qui met en contact les calcaires récifaux aquifères avec les marnes du Kimméridgien inférieur.

- Alimentation par les impluviums non karstiques : bassin versant des rivières Bonnieure, Tardoire et Bandiat ; qui se perdent en totalité ou en partie (en fonction de la période) lorsqu'elles rentrent en contact avec le massif calcaire karstique. Les pertes débutent à Feuillade sur le Bandiat et à Montbron sur la Tardoire.
- Ecoulement de la nappe vers le N-SO au nord de La Rochefoucauld et NO-SE dans la partie sud du territoire.



Légende : NP.HE : niveau piézométrique en hautes eaux, NP.BE : niveau piézométrique en basses eaux, NT : niveau de la Touvre, I.L : Infra Lias, L : Lias, T.A. : Toarcien-Aalénien, JM.F : Faciès fin du Jurassique moyen, JM.O : Jurassique moyen oolithique, JM.M : Jurassique moyen à tendance marneuse, JS.R : Jurassique supérieur récifal et périrécifal, JS.M : Faciès marneux du Jurassique supérieur, KS.M : Kimméridgien supérieur marneux, C : Crétacé, R.K : Remplissages karstiques argilo-sableux, F.E : Faille de l'Echelle.

Figure 2: Schéma synthétique des sources de la Touvre extrait de la thèse de D. ROUILLER

La portion de nappe alimentant le captage est cartographiée en Figure 3.

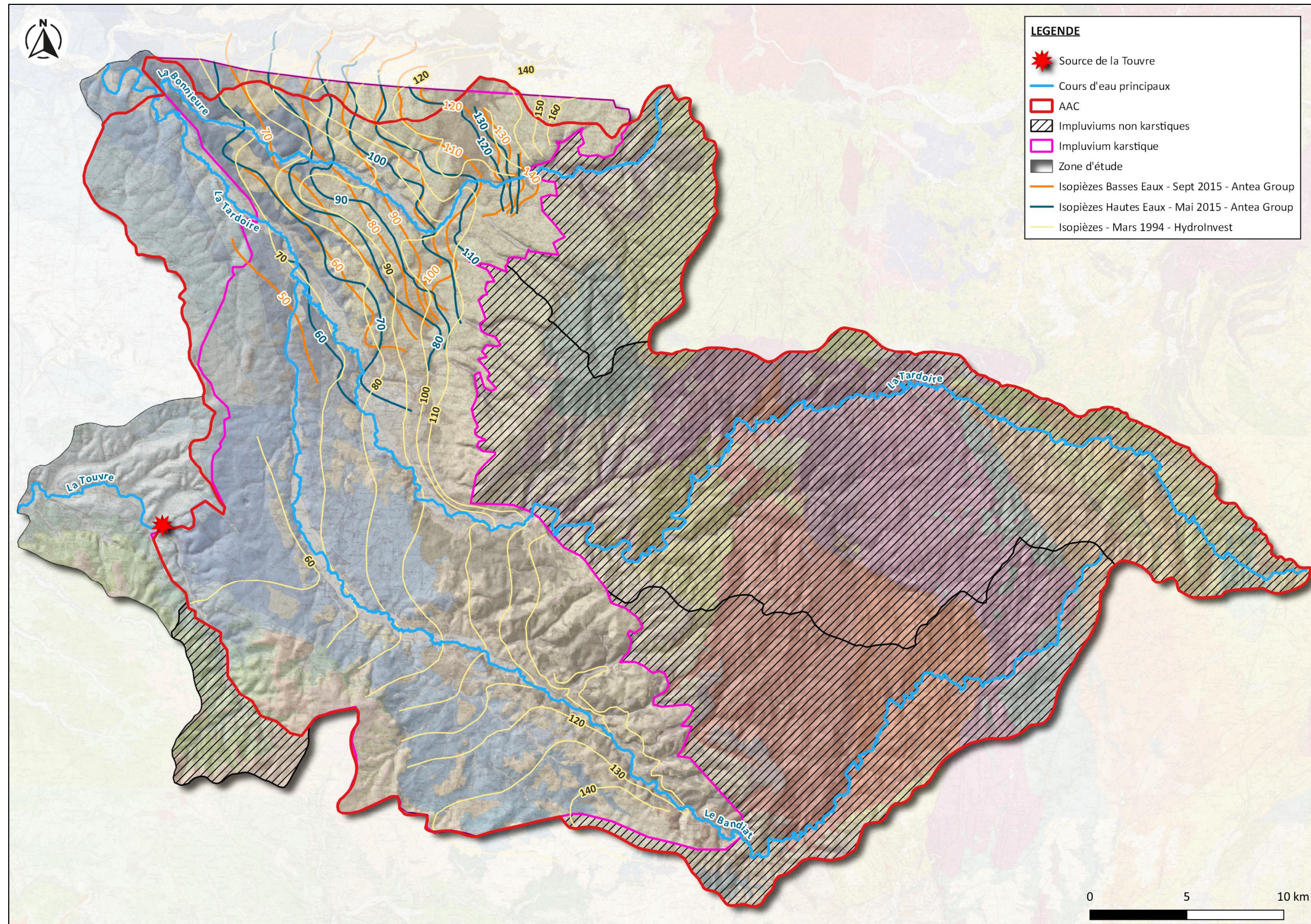


Figure 3: Zones d'alimentation du système de la Touvre

2.2.2. Détermination de l'AAC

La délimitation de l'AAC du captage de la Touvre au Bouillant a donc été effectuée à partir des éléments suivants :

- les traçages ;
- le suivi hydrologique de la source sur plusieurs cycles hydrologiques ;
- les jaugeages différentiels sur les cours d'eau susceptibles de se perdre ;
- une analyse des débits statistiques pour caractériser le type de système ;
- une interprétation des données physico-chimiques au cours du temps pour apporter des compléments à la détermination du type de système ;
- la topographie pour définir le bassin versant hydrologique.

Les limites sont justifiées selon les données géologiques (limites des calcaires karstifiés), hydrogéologiques (crêtes piézométriques) ou topographiques (traçages, bassin versant).

La **limite nord** est donnée par les relevés piézométriques et correspond à une crête piézométrique qui sépare les bassins versants du Son-Sonnette et de la Bonnieure.

La **limite ouest** correspond à la limite des faciès récifaux du Jurassique supérieur au-delà desquels les formations deviennent marneuses, et donc moins susceptibles de développer des réseaux karstiques est établie à partir des traçages. Les traçages effectués en amont des sources de la Touvre ont montré que les 3 sources de la Touvre présentant des réactions proches, les directions d'écoulements souterrains sont dirigées d'une part de la Tardoire et du cours aval du Bandiat vers les sources de la Touvre exclusivement, et d'autre part du cours amont du Bandiat.

La **limite Sud** correspond à la limite du bassin versant hydrologique du Bandiat et à la limite du bassin versant hydrogéologique du Grand Karst, délimitée par la faille de l'Echelle. Le BV de l'Echelle est donc hors périmètre de l'AAC.

La **limite Est** est délimitée par la transition entre les marnes du Toarcien-Alénien et les calcaires du Bajocien, correspondant aux zones amont des BV de la Tardoire et du Bandiat.

L'AAC est tracée sur la Figure 4.

Sa superficie est de l'ordre de 1 486 km².

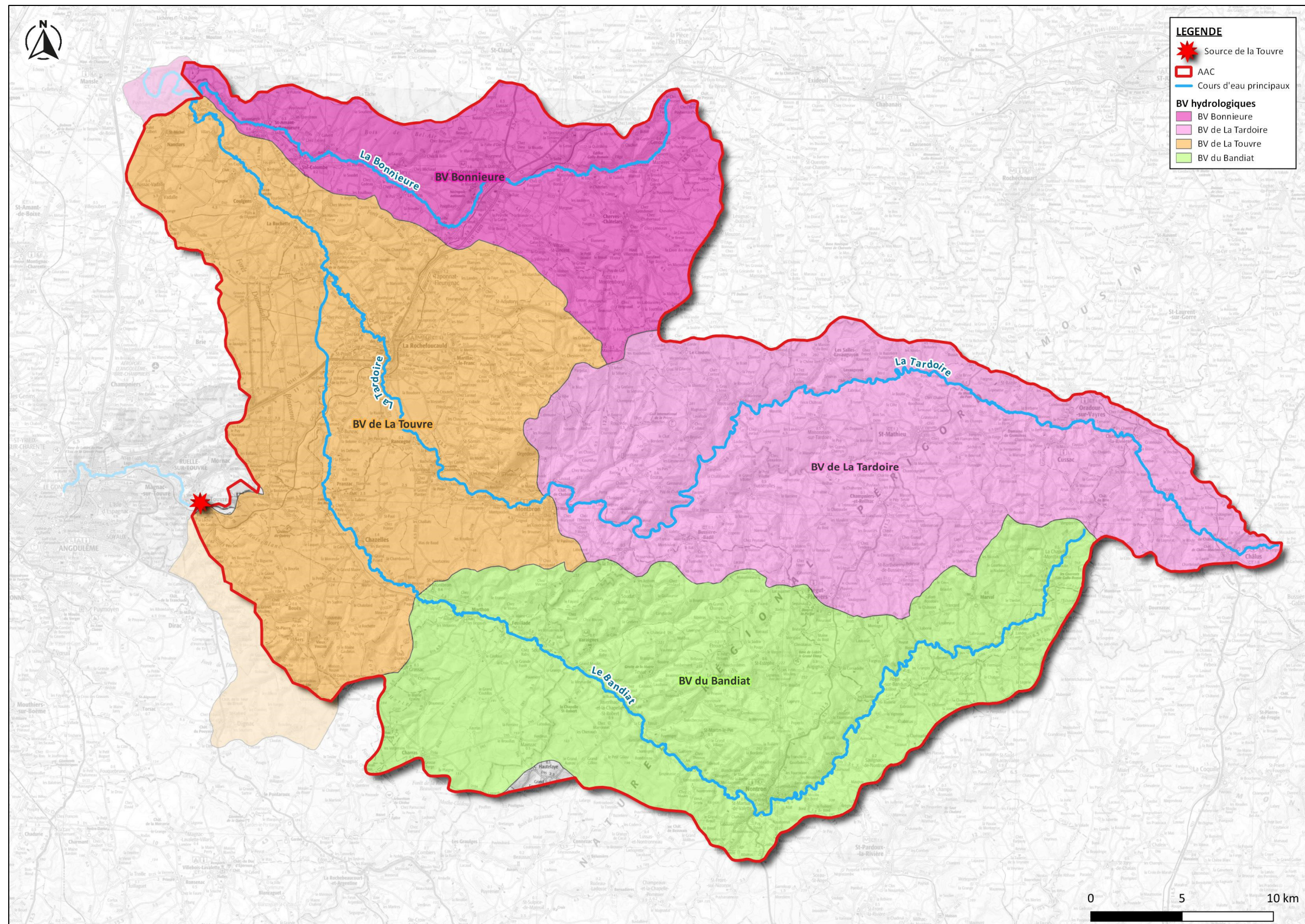
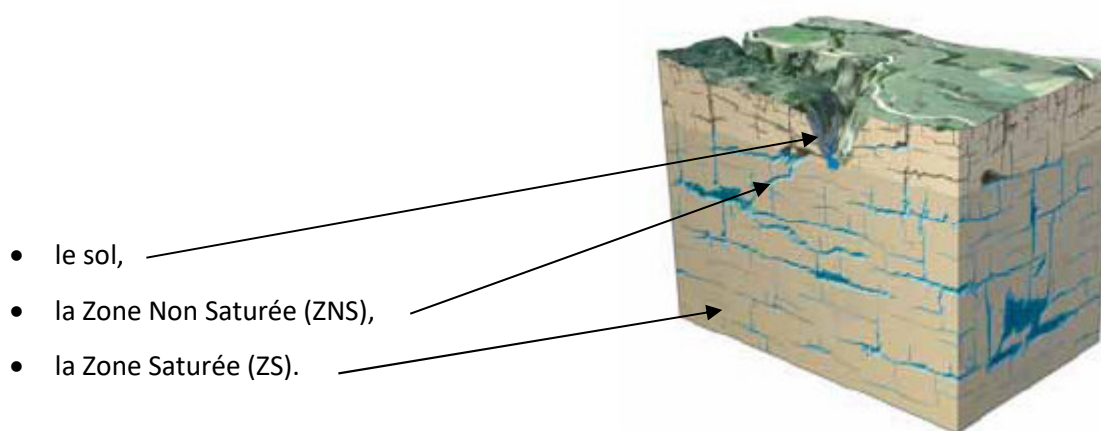


Figure 4: Délimitation du tracé de l'AAC proposé

3. Méthodologie générale appliquée aux aquifères karstiques de type binaire

L'appréciation de la vulnérabilité intrinsèque **d'un système karstique comme celui de la Touvre** repose sur la distinction de trois milieux bien définis, chacun jouant un rôle différent dans la migration d'un polluant (Cf. figure ci-dessous) :

Schéma d'un aquifère karstique [BRÜHLMAN et al., 2004]



Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques des transferts dans chacun de ces milieux.

| | Interface | Zone non saturée | Nappe |
|---------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------|
| Milieu | Terre végétale sol ou berges | Roche ± humide | Roche saturée |
| Sens de déplacement | ↓ et → (berges) | ↓ | → |
| Echelle | 0,1 à 1 m | 1 à 10 m | 10 m à plusieurs km |

La cartographie de la vulnérabilité sera élaborée par une analyse multicritères. La réalisation de cette phase s'appuiera sur la méthodologie développée par le BRGM.

- Vernoux J.F., Willeumier A., Dorfliger N. (2007b). Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses
- Clotaire CATALOGNE (Irstea) et al. Guide pour la délimitation et la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque d'Aires d'Alimentation de Captages à transferts mixtes.

Les méthodes mises en œuvre pour la détermination de la vulnérabilité sont des méthodes dites « de pondération et d'indexation des paramètres (PCSM) ».

Chaque index (paramètre influant sur la vulnérabilité intrinsèque) est affecté d'une pondération (coefficient multiplicateur). Ce système de pondération permet d'attribuer une importance relative plus importante à un paramètre par rapport aux autres dans l'évaluation générale de la vulnérabilité des eaux souterraines.

L'indice de vulnérabilité peut varier de 1 à 10 pour chacun des paramètres, défini en fonction d'intervalles de valeur. Plus la valeur de l'indice est petite, plus faible est la vulnérabilité à la contamination. Les intervalles de valeur pour chacun des paramètres seront définis après examen de l'éventail de valeurs pour chaque paramètre de chaque aquifère rencontré sur le projet, ceci afin d'éviter une mauvaise répartition des classes de valeur et de vulnérabilité.

Si les informations collectées ou discrétisables sont effectivement cartographiées, les cartes nécessaires à la méthode sont élaborées sous SIG et font l'objet d'une requête avec application du calcul de l'indice global de vulnérabilité de la méthode concernée.

Ces cartes de critères seront réalisées à l'aide des données existantes et des données collectées sur le terrain lors des investigations complémentaires.

Compte tenu de la contribution des pertes dans l'alimentation du karst, il est proposé une double approche de la vulnérabilité :

- une approche spécifique sur le périmètre Grand Karst à l'aide de la méthode appropriée (PAPRIKA).
- une approche globale sur les bassins versants hydrologiques amont (Bandiat et Tardoire). La méthodologie s'apparente à celle des prises d'eau de surface. Elle a été développée par le CEMAGREF ou l'AEAG dans le cadre des études BAC,

L'approche **PAPRIKA** est retenue comme méthode de référence par les guides nationaux et permet de disposer d'une méthode de cartographie standardisée, permettant notamment une meilleure prise en compte des transits rapides locaux liés aux axes de drainage, qui constituent une des particularités de l'aquifère karstique.

Pour toute référence, on se basera sur le guide suivant : Dörfliger N., Plagnes V. (2009) : Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa. BRGM RP-57527-FR.

4. Méthodologie utilisée pour la définition de la vulnérabilité d'un aquifère karstique : PAPRIKA

4.1.1. Méthodologie mise en œuvre

La méthodologie développée par le BRGM pour traiter de la vulnérabilité des AAC pour le **milieu aquifère discontinu karstique** est décrite dans le rapport RP-63311-FR pages 77 à 91, correspondant à la version révisée du guide de l'Onema et du BRGM de février 2014.

La vulnérabilité globale (Vg) est calculée comme la somme pondérée de plusieurs paramètres classifiés.

Avec :

$$V_{\text{karst}} = iI_{0-4} + rR_{1-4} + pP_{0-4} + kK_{1-4}$$

- I_{0-4} : conditions d'infiltration
- R_{1-4} : nature de la roche du réservoir aquifère
- P_{0-4} : protection de l'aquifère
- K_{1-4} : degré de karstification

La somme des poids affectés est égale à 1.

Les paramètres pris en compte sont fonction de la typologie de l'aquifère.

La typologie de l'aquifère mise en évidence lors de l'étape 1 et confirmée lors de l'étape 2 est la suivante : discontinu karstique. La méthodologie proposée par le guide méthodologique est adaptée de la méthode PaPRIKa. La méthode se déroule suivant 6 étapes après avoir délimité l'AAC :

- Séparation de l'aire en zones karstiques et non karstiques (dans le cas d'un système karstique binaire).
- Cartographie de chaque critère à l'échelle adaptée à la dimension de l'aire d'alimentation (1/10 000^{ème} à 1/50 000^{ème}) et suivant les données disponibles. Chaque critère est subdivisé en 5 classes matérialisées par un indice allant de 0 à 4 (à l'exception des critères R et K : 1-4).
- Discrétisation des cartes ainsi obtenues : la taille de la maille est définie en fonction du pas du Modèle Numérique de Terrain de la zone d'étude et des données disponibles (de préférence 25mx25m).
- Calcul de l'indice de vulnérabilité global Vg en chaque maille. L'indice de classe de chaque critère est multiplié par le facteur de pondération du critère considéré (qui traduit l'importance relative des critères entre eux et vis-à-vis de la vulnérabilité). Les valeurs obtenues pour les 4 critères sont ensuite additionnées pour obtenir l'indice de vulnérabilité global Vg. Cette étape revient à superposer les 4 cartes de critères indexés afin d'obtenir une représentation cartographique de la répartition de l'indice Vg.

- Etape de reclassification : la valeur de l'indice V_g est ensuite subdivisée en 5 classes équidistantes de vulnérabilité traduisant la sensibilité du milieu aux influences naturelles et anthropiques à un instant donné.
- Etape de vérification : confrontation de la carte de vulnérabilité avec les données de terrain (données ponctuelles brutes avant interpolation) et les cartes de chaque critère indexé afin de vérifier qu'il n'y ait pas d'incohérence flagrante. Cette étape importante permet de modifier au besoin les pondérations voire de s'affranchir d'un critère dont la cartographie s'est avérée délicate.

Les paramètres pris en compte sont présentés ci-après.

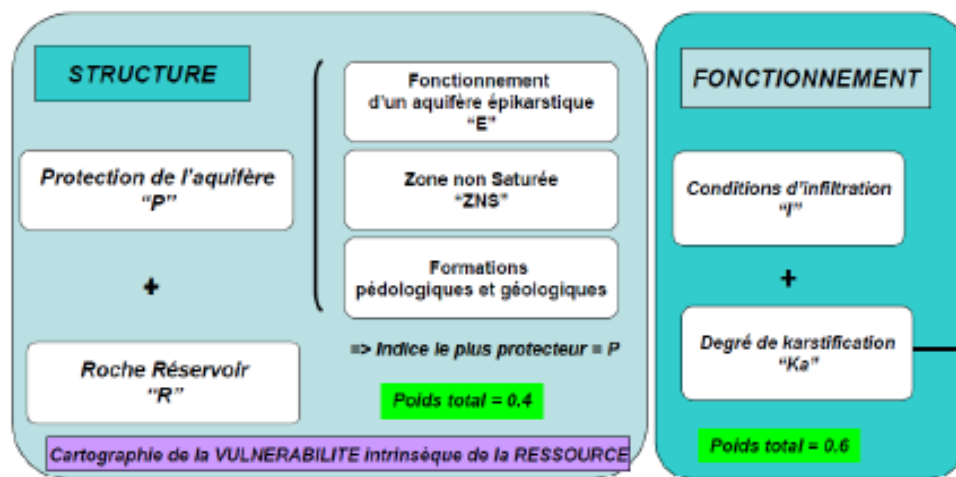


Figure 5: Organisation des différents critères de la méthode PaPRIKa en fonction de la structure et du fonctionnement des aquifères karstiques (Source : BRGM rapport RP-63311-FR février 2014)

Ces paramètres sont détaillés dans les paragraphes suivants.

4.1.2. Paramètres nécessaires au calcul de la vulnérabilité

4.1.2.1. Critère P

Le critère P est un critère de protection vis-à-vis de l'infiltration ; il caractérise l'aptitude à stocker de manière temporaire l'eau à proximité de la surface, celle-ci générant un effet de retard sur l'infiltration.

Il dépend de trois (sous)-critères : « sol ou couverture pédologique » (S), « aquifère épikarstique » (E) et « nature, épaisseur et fracturation de la zone non saturée » (ZNS). Le critère le plus protecteur vis-à-vis d'un transfert de contaminant vers la ressource ou vers la source est retenu parmi ces critères, dans le cas où l'ensemble des critères peut être caractérisé.

- *Sous-critère E aquifère épikarstique E*

| | |
|-----------|--|
| E1 | aquifère perché avec présence de puits et d'un niveau piézométrique, voire d'un lac temporaire ; |
| E2 | aquifère épikarstique continu latéralement avec des sources temporaires d'un débit de l'ordre du litre/seconde et existence de puits collectant les eaux ; effet de stockage vérifié ; |
| E3 | existence d'un aquifère avec présence de sources de débits peu importants et d'une continuité latérale plus ou moins bien représentée ; l'effet retard est limité ; |
| E4 | pas d'aquifère épikarstique |

Figure 6 : Indexation du sous-critère E - "aquifère épikarstique"

- *Sous-critère S (couverture pédologique et géologique)*

| | | TEXTURE | | |
|----------|----------|--------------------|--------------------------------|---------------------|
| | | Argile A > 12 % | Limons A < 12 % et S < 60 % | Sable S >= 60 %* |
| CAILLOUX | 0-15 % | 1 | 1 | 2 |
| | 30-60 % | 1 | 2 | 3 |
| | > 60 %** | 2 | 3 | 4 |

Figure 7 : Détermination de la nature d'un sol en fonction de sa texture et sa proportion de cailloux. * : définition des Arénosols, ** : définition des Peyrosols

| S | | NATURE DU SOL | | | | |
|------------------------|----------|---------------|----|----|----|----|
| | | Inconnue (Se) | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Zones imperméabilisées | | S0 | | | | |
| EPAISSEUR | > 5m | S1 | S1 | S1 | S2 | S3 |
| | 1-5m | S1 | S1 | S2 | S3 | S3 |
| | 60-100cm | S2 | S2 | S3 | S4 | S4 |
| | 30-60cm | S3 | S3 | S4 | S4 | S4 |
| | 0-30cm | S4 | S4 | S4 | S4 | S4 |

Figure 8 : Détermination des classes du critère S par croisement de la nature du sol et de son épaisseur

- *Sous-critère ZNS (caractéristiques de la zone non saturée)*

La zone non saturée de l'aquifère assure le transfert de l'eau infiltrée vers la zone saturée, lieu des écoulements souterrains. **La lithologie, l'épaisseur ainsi que le degré de fracturation/fissuration vont influencer la vitesse de transfert.** La vulnérabilité est d'autant plus importante que la roche est calcaire, l'épaisseur est faible et la fissuration importante.

| LITHOLOGIE de la ZNS (L _{ZNS}) | |
|--|---|
| L _{ZNS} 0 | Couches d'argiles de forte épaisseur |
| L _{ZNS} 1 | Marno-calcaires, craie |
| L _{ZNS} 2 | Calcaires en petits bancs et/ou avec intercalations d'argiles |
| L _{ZNS} 3 | Calcaires en gros bancs massifs |

Figure 9 : Description de la lithologie de la zone non saturée

Lorsque la zone non saturée est caractérisée par un ensemble hétérogène de lithologies différentes, on retient l'indice de la lithologie qui assure la plus grande protection.

| ZONE NON SATUREE (ZNS) | | EPAISSEUR | | |
|------------------------|---------------------------|---------------|---------------|-----------|
| | | > 15m | 15-50m | > 50m |
| Fracturation | Faible-moyenne | $L_{zns} + 1$ | L_{zns} | L_{zns} |
| | Importante | $L_{zns} + 1$ | $L_{zns} + 1$ | L_{zns} |
| | Forte au niveau de faille | 4 | 4 | 4 |

Figure 10 : Indexation du sous-critère ZNS en croisant les trois paramètres : épaisseur, lithologie et fracturation

4.1.2.2. Critère R

Le critère R « nature de la Roche du réservoir aquifère » caractérise la nature lithologique de la roche réservoir ; il est à apprécier en considérant d'une part la nature lithologique (calcaires à marnes) et d'autre part le caractère massif ou non des roches.

De plus, il prend en considération le rôle de la fracturation que ce soit à l'échelle de l'affleurement ou à l'échelle de grands accidents régionaux si des indices forts montrent que ces accidents jouent un rôle sur le drainage des écoulements souterrains.

Une zone de fracturation ou une zone de broyage au niveau d'un accident tectonique est prise en compte en considérant une zone tampon autour de la faille d'une dimension appropriée (50 à 100 m environ en fonction des observations de terrain). La nature lithologique du réservoir va influencer l'organisation des écoulements et le transfert des contaminants.

| Indice | Description |
|----------------------|---|
| R₁ | Cette classe regroupe les formations marno-calcaires (25-35% minéraux argileux) ainsi que la craie, affectée d'une fracturation faible qui auront une influence limitée en termes de vulnérabilité, les circulations d'eau restant relativement lentes. |
| R₂ | Cette classe regroupe les formations de calcaires marneux (la proportion argileuse est plus faible que pour la classe R₁ : 10-25%), et la craie affectée d'une fracturation forte ; Calcaires et dolomies en petits et gros bancs avec fracturation homogène. |
| R₃ | Cette classe regroupe les formations calcaires et dolomitiques, soit massives en gros bancs non fracturés, soit en petits bancs avec des intercalations argilo-marneuses avec une fracturation homogène. Ce type de formation permet des circulations relativement faciles et rapides. |
| R₄ | Cette classe regroupe les zones reconnues cartographiées ou de réseau de cavités et de zones de failles affectant le réservoir, parallèles au gradient hydraulique. Si la connaissance du réseau de conduits est incomplète, il peut être raisonnable de ne pas affecter d'indice R4 afin de ne pas introduire de biais dans la cartographie. |

Figure 11 : Indexation du critère R « réservoir roche aquifère »

4.1.2.3. Critère I

Le critère I permet de prendre en compte les conditions d'infiltration. Une des caractéristiques des aquifères karstiques est l'existence d'une dualité de l'infiltration à l'échelle de l'aire d'alimentation. L'infiltration peut se faire de manière diffuse au travers du sol ou du calcaire nu ou au contraire de manière concentrée d'eau de ruissellement superficiel au niveau de pertes temporaires ou pérennes ou de dolines/bassins fermés.

Les conditions d'infiltration dépendent d'une part de la pente et d'autre part de l'occupation et de la nature du sol. Plus la pente est importante et le sol argileux, plus l'infiltration sera faible. Il est toutefois important de s'assurer que le ruissellement quitte l'AAC, si ce n'est pas le cas la zone de ruissellement est au contraire très vulnérable puisqu'elle alimente des points d'infiltration préférentiels en aval. A contrario, plus la pente est faible et le sol caillouteux voir absent sur le calcaire mis à nu (lapiez), plus l'infiltration sera importante.

La nature de la couverture pédologique étant prise en considération au niveau du critère P, elle n'intervient pas dans la caractérisation du critère I afin d'éviter la redondance de critère et des biais lors de la pondération pour l'établissement de la carte de vulnérabilité globale. Par contre, des objets morphologiques ayant une influence sur les conditions d'infiltration sont pris en compte dans la définition du critère I. Ces objets morphologiques exokarstiques sont les vallées sèches, les dolines et poljés, les lapiez, les gouffres et les pertes.

Les indices karstiques cartographiés pour le système de la Touvre permettent de définir les zones d'infiltration préférentielle, qui vont jouer un rôle important dans la définition de la vulnérabilité.

| Indice | Description |
|-----------|--|
| I0 | Cette classe regroupe les zones de l'aire d'alimentation où les pentes sont très fortes (>50%), induisant un ruissellement de l'eau très important hors de l'AAC et une infiltration très faible. |
| I1 | Zones où les pentes sont fortes (15-50%) favorisant grandement le ruissellement hors de l'AAC et une infiltration faible. |
| I2 | Zones de l'aire d'alimentation où la pente est moyenne (5-15%) et/ou zones où le ruissellement est limité en terrains carbonatés (ex. vallées sèches, lapiez peu développé verticalement). |
| I3 | Zones à pente faible (0-5%) où le ruissellement est limité et l'infiltration beaucoup plus forte. Les zones avec dolines et poljés sont prises en compte dans cette classe. De plus, les lapiaz bien développés verticalement avec des cannelures métriques font partie de cette classe. |
| I4 | Infiltration concentrée au niveau des pertes : à la perte elle-même est associée le bassin versant du cours d'eau l'alimentant dont l'état de surface est caractérisé à l'aide de P. Celui-ci peut être calculé à partir du MNT et des outils spécifiques du SIG (fonction bassin versant dans ArcGis). Pour les karsts en région de montagne, les bassins ainsi déterminés seront systématiquement trop grands par rapport aux zones réelles de ruissellement. Les dimensions de ces bassins seront donc ajustées aux observations. |

Figure 12 : Indexation du critère I « condition d'infiltration »

4.1.2.4. Critère Ka

Le critère Ka « degré de karstification » est défini à partir :

- de la typologie des systèmes karstiques,
- des caractéristiques relatives à la fonctionnalité du système karstique : classification des systèmes karstiques selon l'analyse des courbes de récession des débits de source, vitesse et taux de restitution des essais de traçage, variabilité temporelle du débit et des paramètres physico-chimiques.

La fonctionnalité d'un système karstique traduit la structure des vides résultant de la karstification mais également de l'organisation des écoulements. L'aquifère est alors fonctionnel, caractérisé d'une part par l'existence de vitesses d'écoulement souterrain très rapides (jusqu'à quelques centaines de m/h) et par une variabilité spatio-temporelle des caractéristiques physiques et hydrauliques de l'aquifère.

| Critère | | Caractéristiques | | Indice |
|---------|----------------|------------------|--|--------|
| K | Karstification | K ₁ | Degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques du type 1 (<10km ² , Q moyen annuel faible, Illustration 9) et uniquement si le système karstique est caractérisé par un comportement peu fonctionnel (faible variabilité du débit et des paramètres physico-chimiques), et en l'absence de preuves ou d'indices de circulation rapide. | 1 |
| | | K ₂ | Degré de karstification correspondant soit aux systèmes karstiques de type 2 (> 10 km ²) ou de type 3, unaires et peu fonctionnels (sur la base d'indices caractérisant le degré de karstification tels que des vitesses de traçage artificiel rapides, la variabilité du débit et de la chimie de la source), soit à des systèmes complexes tels que définis dans la classification de Mangin (domaine de référence 1 ; cf. Illustration 42). | 2 |
| | | K ₃ | Degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques du type 2 ou 3, fonctionnels et binaires/unaires ; il s'agit soit de systèmes karstiques binaires peu fonctionnels ou unaires très fonctionnels . Le réseau karstique de ce type de systèmes karstiques est bien développé avec la présence d'un drain collecteur de petite taille connu connecté avec la surface. Les vitesses de transit mises en évidence à l'aide d'essais de traçages sont importantes (entre 50 et 100m/h). Domaine de référence 2 de la classification de Mangin (cf. Illustration 42). | 3 |
| | | K ₄ | Degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques binaires du type 2. Le réseau karstique très bien développé avec la présence d'un gros collecteur connecté avec la surface, comme l'atteste la fonctionnalité du système. Les vitesses de transit mises en évidence à l'aide d'essais de traçage sont importantes (> 100m/h). Domaines de référence 3 voire 4 de la classification de Mangin (cf. Illustration 42). | 4 |

Figure 13 : Indexation du critère Ka

4.1.3. Poids des paramètres et classes de vulnérabilité

Des valeurs de pondération sont données pour chacun des critères, avec la règle suivante : la somme des pondérations des critères relatifs au fonctionnement de l'aquifère karstique (K et I) est comprise entre 50 et 65% alors que la somme des pondérations des critères relatifs à la structure de l'aquifère karstique (P et R) est comprise entre 35 et 50%. Les valeurs ne sont pas uniques, mais des intervalles de valeurs sont proposés, permettant à l'utilisateur de faire des tests, afin d'évaluer la sensibilité des critères (Tableau 1).

| Critères | Abréviation | Pondération (%) Réservoir karstique |
|-----------------|-------------|--|
| Protection | P | 20-25 |
| Roche réservoir | R | 15-20 |
| Infiltration | I | 40-30 |
| Karstification | K | 20-30 |

Tableau 1 : Tableau des pondérations pour les différents critères de la méthode PaPRIKa

Reclassification de la vulnérabilité globale ($V_g = iI_{0-4} + rR_{1-4} + pP_{0-4} + kK_{1-4}$)

La valeur finale de vulnérabilité varie donc entre 0 (vulnérabilité minimale) et 4 (vulnérabilité maximale) (Tableau 2). Ces classes sont imposées pour être équidistantes. Il n'est pas nécessaire de chercher à faire apparaître toutes les classes de vulnérabilité sur la carte finale de vulnérabilité. Cette opération peut être réalisée sous un environnement SIG avec l'outil reclassification raster.

| Valeurs indice | Classe | Vulnérabilité |
|----------------|--------|---------------|
| 3,2 – 4,00 | 4 | Très élevée |
| 2,4 – 3,19 | 3 | Elevée |
| 1,6 – 2,39 | 2 | Modérée |
| 0,8 – 1,59 | 1 | Faible |
| 0,0 – 0,79 | 0 | Très faible |

Tableau 2 : Tableau des classes de vulnérabilité globale (Vg)

5. Méthodologie mise en œuvre et paramètres utilisés pour la définition de la vulnérabilité d'un aquifère superficiel

Compte-tenu de la contribution des pertes dans l'alimentation du karst, l'approche choisie sur les bassins versants superficiels amont s'apparente à celle des prises d'eau de surface.

5.1. Méthodologie mise en œuvre

La méthodologie proposée ici est une méthode de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère superficiel basée sur plusieurs critères qui sont ensuite pondérés. Cette méthodologie a été inspirée de la méthode IRSTEA (anciennement CEMAGREF) « *Guide pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque aux transferts hydriques de contaminants d'origine agricole dans le cas d'une Aire d'Alimentation de Captage à transferts mixtes* » (Catalogne et al., 2016). Dans le cadre des études d'AAC du bassin Adour Garonne portées par l'Agence de l'eau, le groupement CALLIGEE-ANTEA avait développé en 2010 cette méthodologie en l'adaptant à chaque cas particulier.

La **vulnérabilité intrinsèque de la ressource Vr** est, dans un premier temps, calculée :

Avec :

$$Vr = f D + g K + h Pi + i R$$

- D : Accessibilité aux cours d'eau (ou distance hydraulique aux cours d'eau)
- K : Fonctionnement hydrique du sol et du sous-sol (qui est fonction de l'IDPR (=Indice de Développement et de Persistance des réseaux), de la **pédologie** et de l'**occupation du sol**)
- Pi : Degré d'intensité des Pentes
- R : Erosivité des pluies

Où : $f+g+h+i = 1$

Cinq classes sont ensuite calculées à partir des valeurs de « Vr ». La valeur finale de vulnérabilité varie donc de 0 (vulnérabilité minimale) et 4 (vulnérabilité maximale) (Tableau 3) :

Tableau 3: Classes des indices de vulnérabilité de la ressource "Vr"

| Classe | Valeurs indice | Vulnérabilité |
|--------|----------------|---------------|
| 4 | 3,2 – 4 | Très élevée |
| 3 | 2,4 – 3,19 | Elevée |
| 2 | 1,6 – 2,39 | Modérée |
| 1 | 0,8 – 1,59 | Faible |
| 0 | 0 - 0,79 | Très faible |

Ensuite la notion de distance hydraulique au captage est ajoutée au calcul antérieur, donnant lieu à une cartographie de la **vulnérabilité intrinsèque du captage Vc** :

$Vc = j Vr + k Dc$

Avec :

- Vr : Vulnérabilité de la ressource
- Dc : Distance hydraulique du captage

Où : $j+k = 1$

Cinq classes sont ensuite calculées à partir des valeurs de « Vc ». La valeur finale de vulnérabilité varie donc de 0 (vulnérabilité minimale) et 4 (vulnérabilité maximale) (Tableau 4).

Tableau 4: Classes des indices de vulnérabilité du captage "Vc"

| Classe | Valeur Vc | Vulnérabilité |
|--------|------------|---------------|
| 4 | 3,2 - 4 | Très élevée |
| 3 | 2,4 – 3,19 | Elevée |
| 2 | 1,6 – 2,39 | Modérée |
| 1 | 0,8 – 1,59 | Faible |
| 0 | 0 - 0,79 | Très faible |

5.2. Paramètres nécessaires au calcul de la vulnérabilité

5.2.1. Critère D

La contamination des eaux de surface par les polluants est dépendante de la distance entre les sources de pollution et le milieu récepteur (Orhon, 1993). En effet, plus la source de pollution est éloignée du milieu récepteur, plus elle aura de chance d'être dégradée, adsorbée ou absorbée. Ainsi, les zones proches des cours d'eau sont plus vulnérables que les zones éloignées. Les distances hydrauliques de chaque point de l'espace au cours d'eau (permanent ou temporaire) le plus proche du bassin topographique sont déterminées à partir du MNT et de la banque de données BD Carthage.

Ainsi 5 classes de distance « D » sont définies pour la proximité aux cours d'eau (Tableau 5) :

Tableau 5: Classes des distances "D"

| Classes | Valeurs indice | Vulnérabilité |
|---------|----------------|---------------|
| 4 | 0 – 50 m | Très élevée |
| 3 | 50 -100 m | Elevée |
| 2 | 100 - 200 m | Modérée |
| 1 | 200 - 500 m | Faible |
| 0 | > 500 m | Très faible |

5.2.2. Critère K

Les facteurs en relation avec le fonctionnement hydrique du sol et du sous-sol « K » caractérisent la partition entre les eaux d'infiltration et les eaux de ruissellement.

La perméabilité du sol et du substratum joue un rôle sur la part des eaux précipitées qui participe au ruissellement mais également sur les temps de transit jusqu'au réseau hydrographique. Ainsi, plus le sol est imperméable, plus le ruissellement et le lessivage seront importants, avec des temps de transit courts. Plus un sol est perméable, plus la part alimentant le réseau superficiel est faible (si infiltration dans une nappe qui n'est pas drainée par le réseau superficiel) et plus les vitesses de transit sont faibles. Le sol joue alors un rôle de tampon, augmentant les phénomènes de dilution.

- Le paramètre de perméabilité engendré par la géologie est mis en évidence par l'**IDPR** (indice de développement et persistance des réseaux), développé par le BRGM. Cinq classes ont été ainsi définies à partir des valeurs d'IDPR (Tableau 6) :

Tableau 6: Classes du sous-critère "IDPR"

| Classe | Valeurs indice | | Vulnérabilité |
|--------|----------------|-------------------------------|---------------|
| 4 | > 2000 | Zones humides | Très élevée |
| 3 | 1500 - 2000 | Ruissellement majoritaire | Elevée |
| 2 | 1000 -1500 | Infiltration et ruissellement | Modérée |
| 1 | < 1000 | Infiltration majoritaire | Faible |
| 0 | | | Très faible |

- Le paramètre de perméabilité engendré par le paramètre pédologique est mis en évidence par le critère pédologie « **Sol** » déjà établi pour la méthode PaPRIKa (Tableau 7).

Tableau 7: Classes du sous-critère "Sol"

| Classes | Valeurs indice | Vulnérabilité |
|---------|----------------|---------------|
| 3 | S4 | Elevée |
| 2 | S3 | Modérée |
| 1 | S2 | Faible |
| 0 | S1 | Très faible |

- L'occupation du sol joue un rôle prépondérant dans le ruissellement des eaux, dans la retenue des matières en suspensions ainsi que dans l'absorption des polluants. Ainsi, une terre boisée aura tendance à retenir les eaux et les polluants et à augmenter l'infiltration, une terre nue ou imperméabilisée aura tendance à faire augmenter le ruissellement et l'érosion. Ainsi, 5 classes d'Occupation du Sol « Os » sont déterminées (Tableau 8).

A noter que le drainage agricole a un fort impact sur l'entraînement des particules épandues jusqu'au cours d'eau. Cependant, il est très difficile d'avoir un recensement exhaustif des parcelles drainées sur les territoires étudiés. Ce critère n'est donc pas intégré dans la cartographie de vulnérabilité. Par contre, ce critère sera pris en compte dans la phase de détermination des pressions agricoles.

Tableau 8: Classes du sous-critère "Os"

| Classe Os | Code et libellé CLC 06 | Terrain | Vulnérabilité |
|------------------------------------|--|--|---------------|
| 4 | 111 Tissu urbain continu | | Très élevée |
| | 121 Zones industrielles et commerciales | | |
| | 122 Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés | | |
| | 123 Zones portuaires | | |
| | 124 Aéroports | | |
| | 131 Extraction de matériaux | | |
| 3 | 332 Roches nues | | Elevée |
| | 112 Tissu urbain discontinu | | |
| | 132 Décharges | | |
| | 133 Chantiers | | |
| | 212 Périmètres irrigués en permanence | | |
| | 221 Vignobles | | |
| 2 | 223 Oliveraies | Surfaces agricoles ou prairies avec une densité de haies <50 m.l./ha | Modérée |
| | 323 Végétation sclérophylle | | |
| | 142 Equipements sportifs et de loisirs | | |
| | 211 Terres arables hors périmètres d'irrigation | | |
| 1 | 241 Cultures annuelles associées aux cultures permanentes | Prairies ou bocages avec une densité de haies >50 m.l./ha | Faible |
| | 242 Systèmes culturaux et parcellaires complexes | | |
| | 141 Espaces verts urbains | | |
| | 213 Rizières | | |
| | 222 Vergers et petits fruits | | |
| | 231 Prairies | | |
| | 243 Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants | | |
| | 244 Territoires agro-forestiers | | |
| 321 Pelouses et pâturages naturels | | | |
| 0 | 333 Végétation clairsemée | | Très faible |
| | 334 Zones incendiées | | |
| | 311 Forêts de feuillus | | |
| | 312 Forêts de conifères | | |
| | 313 Forêts mélangées | | |
| | 322 Landes et broussailles | | |
| | 324 Forêt et végétation arbustive en mutation | | |
| | 331 Plages, dunes et sable | | |
| | 335 Glaciers et neiges éternelles | | |
| | 411 Marais intérieurs | | |
| | 412 Tourbières | | |
| | 421 Marais maritimes | | |
| | 422 Marais salants | | |
| | 423 Zones intertidales | | |
| 511 Cours et voies d'eau | | | |
| 512 Plans d'eau | | | |
| 521 Lagunes littorales | | | |
| 522 Estuaires | | | |
| 523 Mers et océans | | | |

En conclusion, le critère « K » est fonction de l'IDPR, de la pédologie et de l'occupation du sol. 5 classes sont ensuite calculées à partir des valeurs de « K ». La valeur finale de vulnérabilité varie donc de 0 (vulnérabilité minimale) à 4 (vulnérabilité maximale) (Tableau 9).

Tableau 9: Classes du critère "K"

| Classe | Valeurs indice K | Vulnérabilité |
|--------|------------------|---------------|
| 4 | 3,2 - 4 | Très élevée |
| 3 | 2,4 – 3,19 | Elevée |
| 2 | 1,6 – 2,39 | Modérée |
| 1 | 0,8 – 1,59 | Faible |
| 0 | 0 - 0,79 | Très faible |

5.2.3. Critère Pi

L'intensité des pentes « Pi » joue un rôle sur la vitesse des écoulements superficiels. Une forte pente favorise les écoulements de surface et l'érosion alors qu'une pente plus douce favorise l'infiltration et la sédimentation. Les classes retenues pour l'intensité des pentes « Pi » sont récapitulées dans le Tableau 10 :

Tableau 10: Classes des intensités de pente "Pi"

| Classe | Valeurs indice Pi | Vulnérabilité |
|--------|-------------------|---------------|
| 4 | > 10° | Très élevée |
| 3 | 7 - 10° | Elevée |
| 2 | 3 - 7° | Modérée |
| 1 | 1,5 - 3° | Faible |
| 0 | < 1,5° | Très faible |

La définition de ces classes a été basée d'après un tableau de modèle d'évaluation de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique (Lavoie et Nolin, 1997).

5.2.4. Critère R

Les précipitations ne jouent pas le même rôle sur l'entraînement des particules polluantes suivant l'intensité des précipitations, la durée et l'époque. Ainsi, par exemple, même dans un secteur de pluviométrie annuelle faible, un orage d'été, après une période d'épandage d'azote ou de produits phytosanitaires, entraînera un lessivage des sols et une pollution du milieu aquatique alors qu'une pluie continue sur une longue période engendrera une dilution des substances polluantes. Ainsi, plus que le volume précipité, le facteur important est l'érosivité des pluies, influençant l'érosion hydrique, qui a pour conséquence l'entraînement des molécules polluantes jusque dans les cours d'eau.

D'après la méthode de RUSLE (travaux de Wischmeier et Smith-1965), l'érosivité des pluies R intègre dans son calcul l'intensité de la pluie, l'énergie délivrée durant l'épisode pluvieux et le volume d'eau mobilisable pour le ruissellement. Il est donc nécessaire de connaître la pluie totale et les intensités maximales sur 30 minutes des épisodes pluvieux sur une période de 30 ans. Ce second paramètre est rarement disponible. Renard et Freimund (1994) proposent une

formule simplifiée intégrant uniquement la hauteur de pluie annuelle moyenne (en mm) P, facilement obtenue auprès de Météo France.

Formule de Renard et Freimund : $R = 0,04830 P^{1.610}$

Avec :

- R : paramètre d'érosivité
- P : précipitation annuelle (mm)

Les données de R calculées sont interpolées suivant les 5 classes suivantes (Tableau 11) :

Tableau 11: Classes des indices d'érosivité des pluies "R"

| Classe | Erosivité R | | Vulnérabilité |
|--------|-------------|------------------|---------------|
| 4 | >5000 | Forte érosivité | Très élevée |
| 3 | 4000 à 5000 | | Elevée |
| 2 | 3000 à 4000 | | Modérée |
| 1 | 2000 à 3000 | | Faible |
| 0 | 0 à 2000 | Faible érosivité | Très faible |

5.2.5. Critère Dc

La vulnérabilité du captage en eau superficielle dépend à la fois de la vulnérabilité intrinsèque de la ressource définie précédemment par l'indice « Vr » ainsi que des phénomènes de dilution et de dégradation qui se produisent lors du cheminement dans le réseau hydrographique jusqu'au point de captage.

Dans cette méthodologie, il a été admis par simplification que plus la source de pollution est éloignée du point de captage, plus la pollution a de chance d'être diluée par des apports d'eau non polluée, dégradée, adsorbée... et par conséquent, plus la concentration de ce polluant a de chance de diminuer.

Un critère de distance hydraulique du captage « Dc » a ainsi été introduit pour définir la vulnérabilité du captage par rapport à la vulnérabilité du milieu aquatique en prenant en compte ces phénomènes de dégradation, dilution.

Cinq classes de distance du captage « Dc » ont été établies (Tableau 12) :

Tableau 12: Classes des distances au captage "Dc"

| Classe | Distance du captage | | Vulnérabilité |
|--------|---------------------|--------------------|---------------|
| 4 | 0 – 5 km | Faible dégradation | Très élevée |
| 3 | 5 – 10 km | | Elevée |
| 2 | 10 – 20 km | | Modérée |
| 1 | 20 – 100 km | | Faible |
| 0 | > 100 km | Forte dégradation | Très faible |

6. Détermination des critères de vulnérabilité

6.1. Détermination des critères de vulnérabilité d'un aquifère karstique par la méthode PaPRIKa

6.1.1. Critère « protection de l'aquifère » (P)

Le critère P est déterminé par le croisement des sous-critères « **sol ou couverture pédologique** » (S), « **aquifère épikarstique** » (E) et « **nature, épaisseur et fracturation de la zone non saturée** » (ZNS).

La zone d'infiltration du karst de La Rochefoucauld présente une zone de surface altérée, de forte perméabilité et située immédiatement sous le sol s'il existe. Dans cette zone, les carbonates proches de la surface sont fortement altérés et présentent une porosité de fractures/fissures qu'il est difficile d'évaluer mais qui pourrait être de l'ordre de 10 à 30 % en fonction du caractère dolomitisé de la roche. L'épaisseur de cet épikarst varie entre 1 mètre et une dizaine de mètres mais ces caractéristiques varient fortement selon la lithologie des calcaires et la morphologie de surface (absence de sols).

Cette porosité et perméabilité contraste fortement avec les zones inférieures et un stockage plus ou moins important peut avoir lieu et avoir un rôle de retard ou différé de la recharge, avant que l'infiltration massive ou différée ne se poursuive dans la zone d'infiltration.

Compte tenu de ces éléments, un indice de valeur 3 a été attribué au critère Epikarst.

Le sous-critère ZNS présente une répartition géographique avec des indices variant entre faible (1) et très forte (4). Ce sous-critère est basé sur la lithologie de la ZNS (considérant l'épaisseur de marnes, d'argiles et de calcaires), ainsi que le degré de fracturation des calcaires (Figure 14).

Une carte pédologique a été réalisée au cours de l'étape 2. Les résultats du sous-critère Sol pour le secteur du karst sont présentés à la Figure 15. Le sous-critère Sol a été déterminé sur la base des investigations de terrain lors de la réalisation des 75 sondages pédologiques : tel que mentionné dans la méthodologie du BRGM, le sous-critère Sol est établi en considérant 2 aspects de la pédologie :

- La Texture : les proportions d'argiles, limons et sables sont répertoriés pour chaque sondage et les sondages sont ensuite classés de 1 à 4 selon la proportion de cailloux présente dans les horizons pédologiques.
- La Nature du sol : la texture est croisée avec les épaisseurs de sols rencontrés, ce qui détermine les classes finales du sous-critère Sol, de S1 (faible vulnérabilité) à S4 (très forte vulnérabilité).

En croisant l'ensemble de ces données cartographiques, il est possible d'obtenir la carte du critère P (Figure 16).

6.1.2. Critère « nature de la roche du réservoir aquifère » (R)

La roche du réservoir est caractérisée par des alternances de gros bancs calcaires massifs où des circulations relativement rapides et faciles ont été mis en évidence par traçage et des affleurements rocheux. Le critère R présente une répartition des indices en fonction de la géologie (Figure 17).

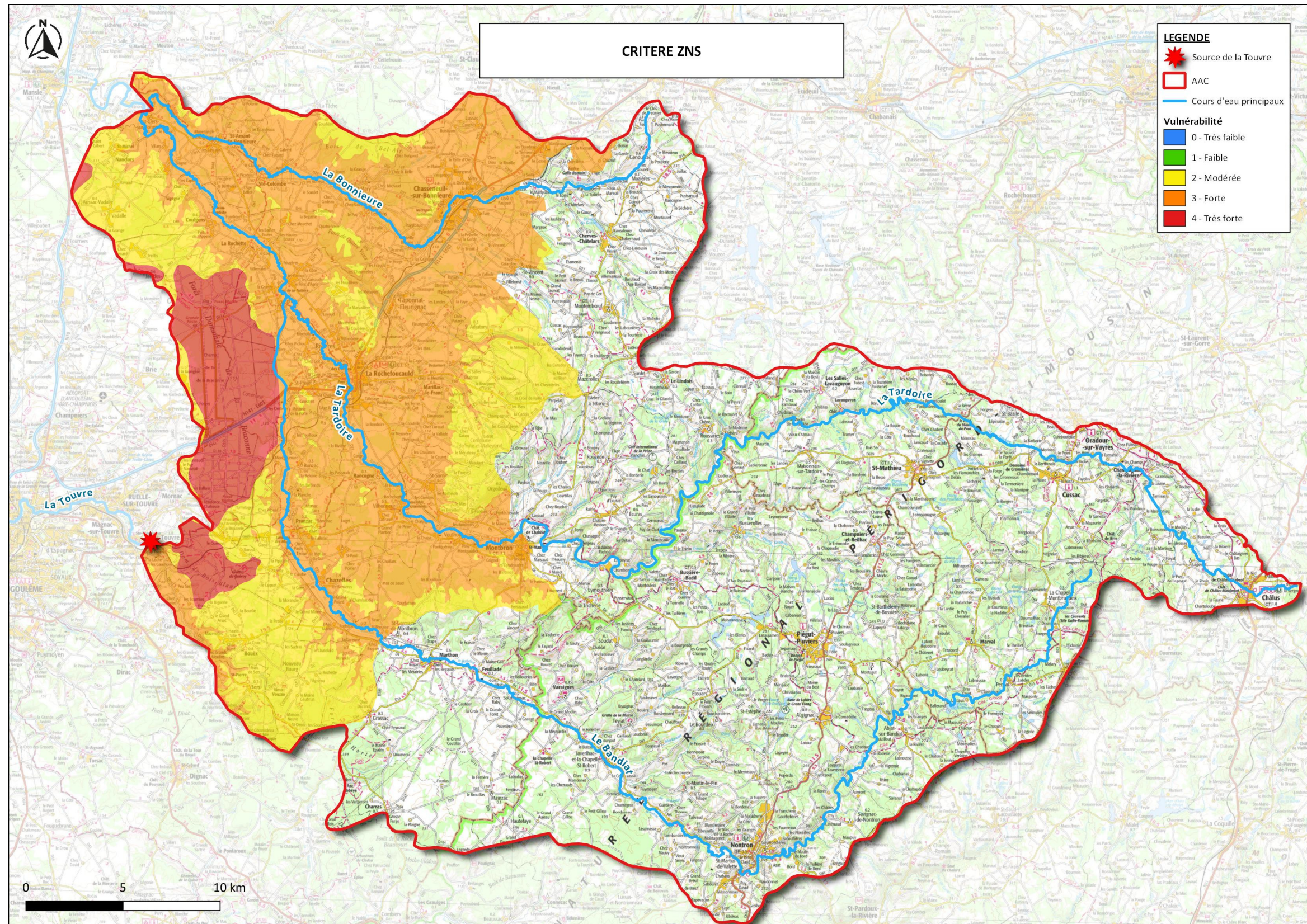


Figure 14: Carte du critère "ZNS"

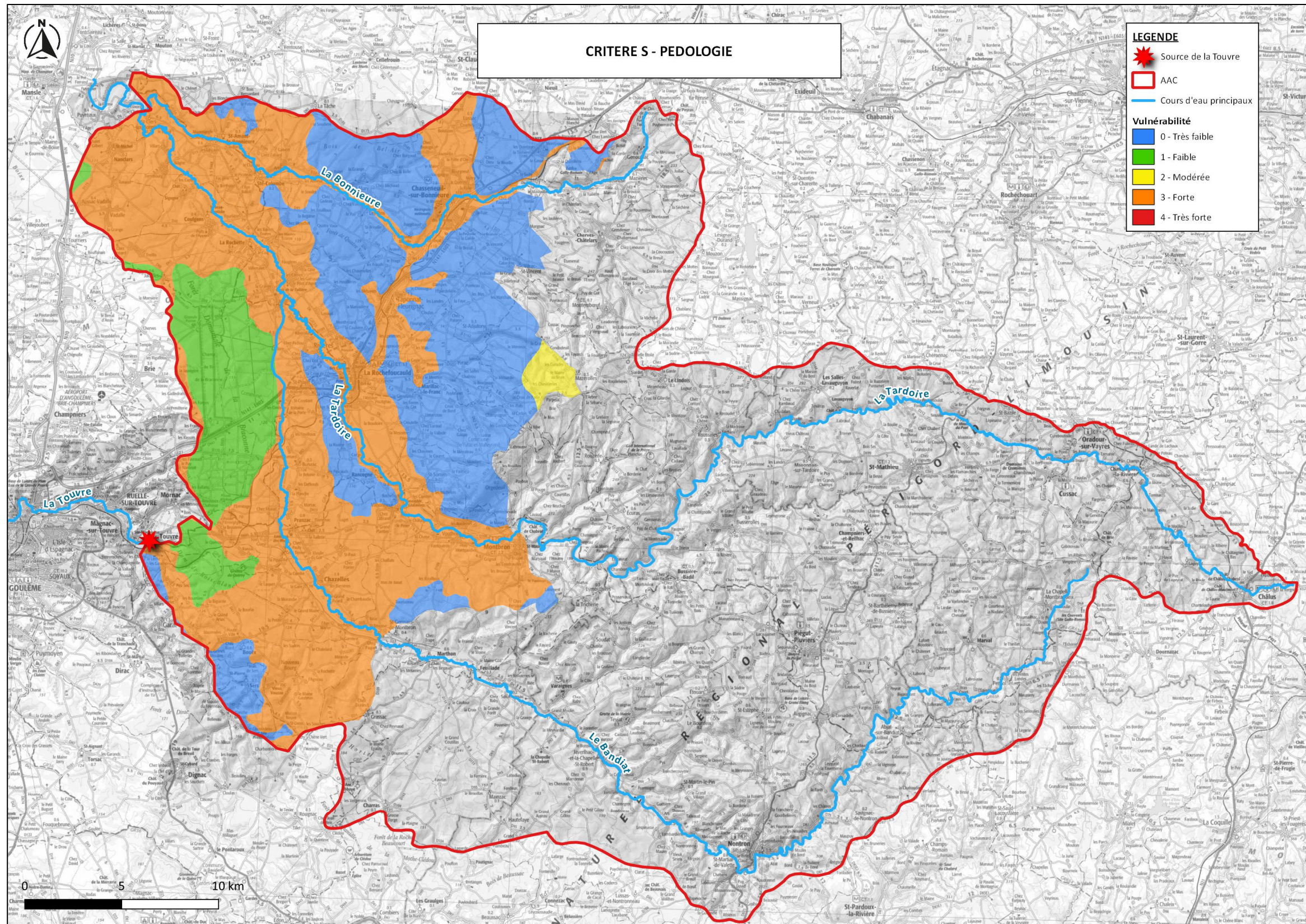


Figure 15: Carte des zonages pédologiques dans le secteur du karst

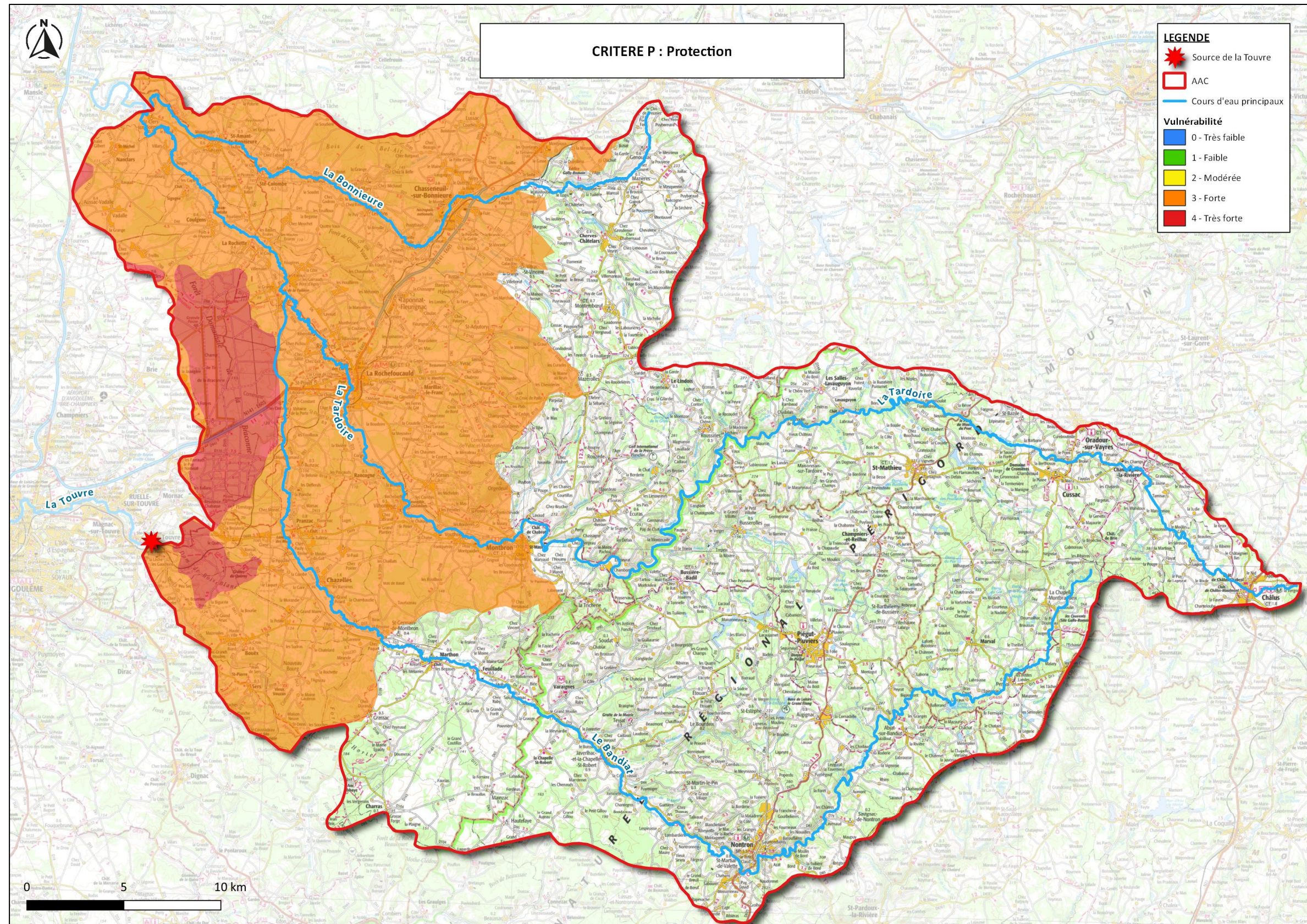


Figure 16: Carte du critère "P"

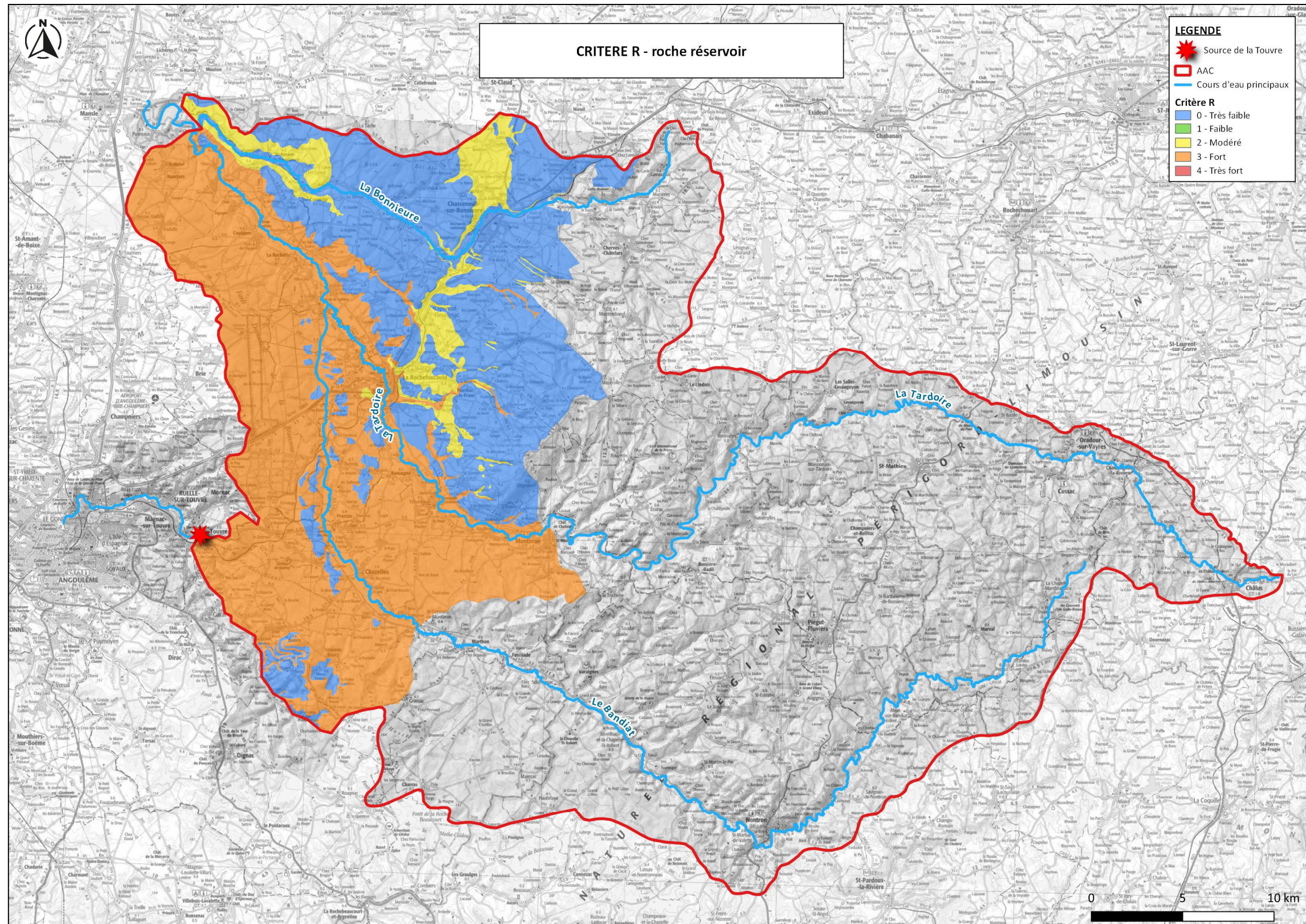


Figure 17: Carte du critère "R"

6.1.3. Critère « condition d'infiltration » (I)

L'indexation du critère I est construite selon la logique que plus le ruissellement est important, autrement dit plus les pentes sont fortes, plus l'indice d'indexation I est faible.

La prise en compte des indices karstiques qui correspondent à des zones d'infiltration préférentielle, dans le calcul du critère infiltration permet de mettre en évidence les points suivants (Figure 18):

- Au niveau des secteurs de vallée des cours d'eau, notamment dans la partie centrale du karst, au niveau de la vallée de la Tardoire et surtout du Bandiat où les pentes sont faibles (entre 0 et 5%), on note un indice plus fort (3 – 4).
- Les secteurs avec des indices karstiques sont marqués d'un indice élevé (3 – 4) en raison de l'infiltration préférentielle des eaux dans le karst.
- Au nord du karst, sur les berges de la Bonnière, on retrouve également des indices plus forts dans les zones où des indices karstiques ont été identifiés.
- Sur la partie la plus en amont du karst, il est possible de trouver au niveau du réseau de drainage des zones de cultures des zones où l'indice I à une valeur de 2. Les pentes sont modérées (entre 5 et 15%) et favorisent un ruissellement depuis les affluents de la Tardoire vers le cours d'eau.

6.1.4. Critère « degré de karstification » (Ka)

Le système karstique étant binaire et peu fonctionnel avec des vitesses de transit relativement rapide, le critère Ka a été affecté d'indice de valeur 3 sur toute la zone du karst (Figure 19).

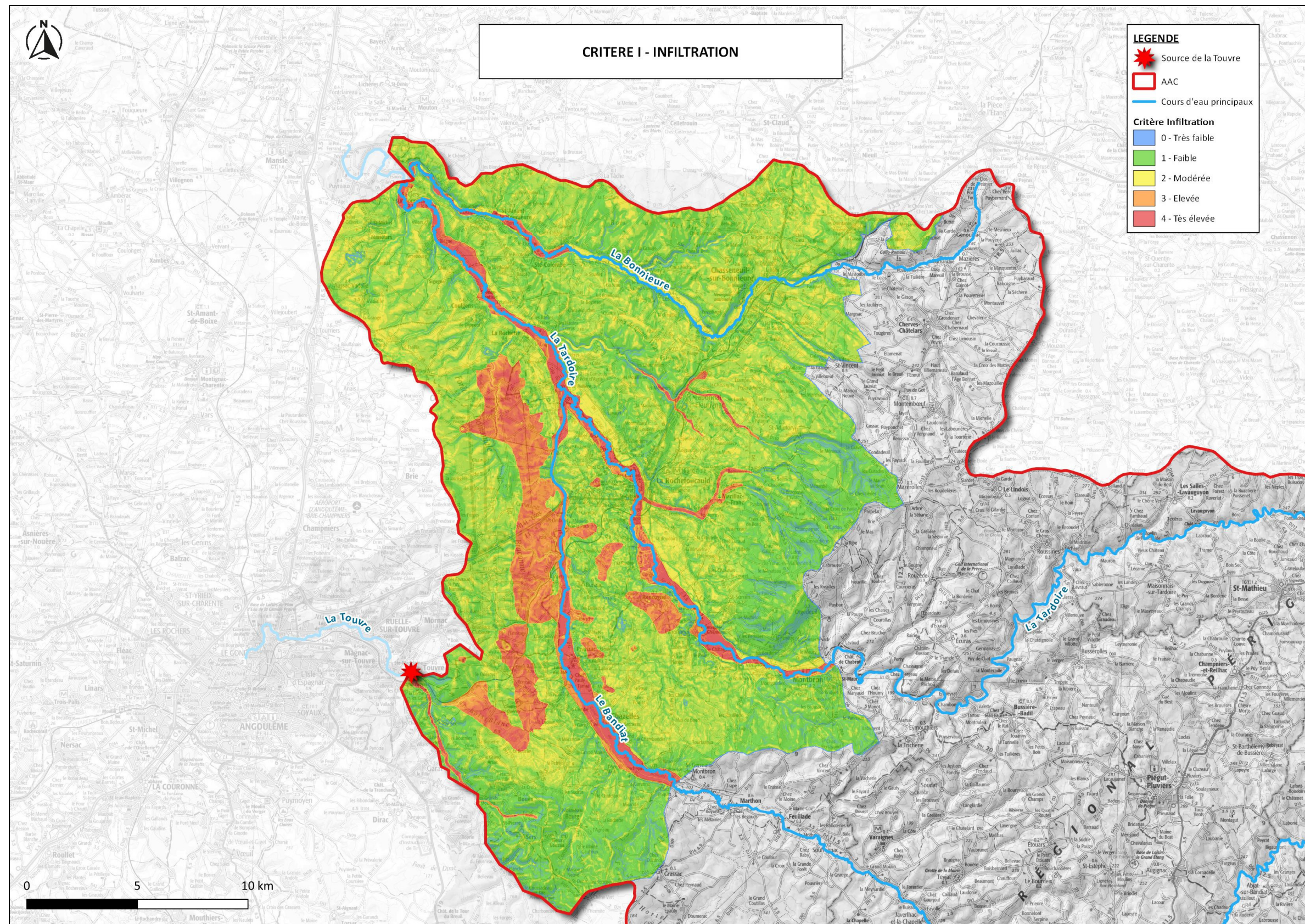


Figure 18: Carte du critère "I"

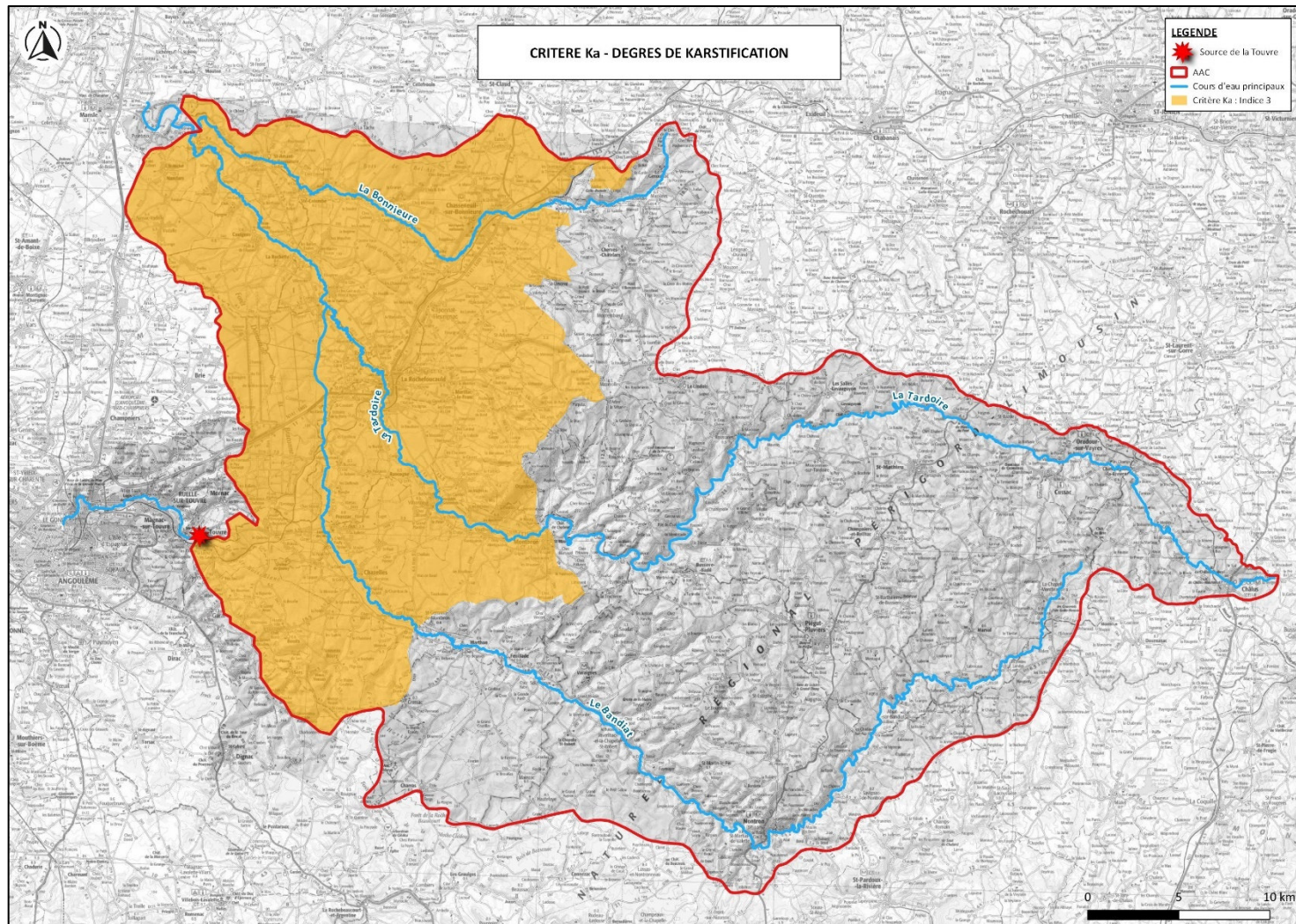


Figure 19: Carte du critère "Ka"

6.2. Détermination des critères de vulnérabilité d'un aquifère superficiel par la méthode CEMAGREF (adaptée)

6.2.1. Critère « accessibilité du milieu aquatique » : « distance hydraulique » (D)

Les distances hydrauliques de chaque point de l'espace au cours d'eau le plus proche des bassins topographiques montrent des valeurs d'indice plus élevées dans les zones tampon en bordure des cours d'eau principaux et de leurs affluents (Tardoire, Bonnieure et Bandiat) (Figure 20).

Plus la distance est faible, plus l'indice est fort. De manière générale les BV superficiels présentent un maillage hydrographique non homogène sur tout le territoire. Le BV de la Tardoire présente un réseau hydrographique plus dense (correspondant aux parcelles cultivées), en comparaison avec le BV du Bandiat autour duquel les affluents sont plutôt localisés en rive droite (au Nord du cours d'eau).

6.2.2. Critère « fonctionnement hydrique du sol et du sous-sol » (K)

Pour rappel, La perméabilité du sol et du substratum joue un rôle sur la part des eaux précipitées qui participe au ruissellement mais également sur les temps de transit jusqu'au réseau hydrographique. Ainsi, plus le sol est imperméable, plus le ruissellement et le lessivage seront importants, avec des temps de transit courts. Plus un sol est perméable, plus la part alimentant le réseau superficiel est faible (si infiltration dans une nappe qui n'est pas drainée par le réseau superficiel) et plus les vitesses de transit sont faibles. Le sol joue alors un rôle de tampon, augmentant les phénomènes de dilution.

Dans la Figure 21, on note que :

- Les 3 BV superficiels présentent globalement des indices de vulnérabilité très faible (0) à faible (1), notamment dans les zones proches des pertes, c'est-à-dire dans les secteurs où les eaux de ces BV superficiels se perdent dans le karst.
- Des indices modérés à forts (3 – 4) se retrouvent dans les secteurs avec présence d'activités agricoles.

6.2.3. Critère « physiographie du bassin versant » (Pi)

Les pentes sur les BV superficiels sont plus prononcées au niveau des talwegs des cours d'eau et de leurs affluents. Les indices les plus forts (3 – 4) sont retrouvés dans le secteur amont du Bandiat et dans le secteur central du BV de la Tardoire (Figure 22).

6.2.4. Critère « érosivité des pluies » (R)

La vulnérabilité à l'érosion des pluies sur la zone d'étude est relativement faible sur l'ensemble des BV superficiels (indice 1) (Figure 23).

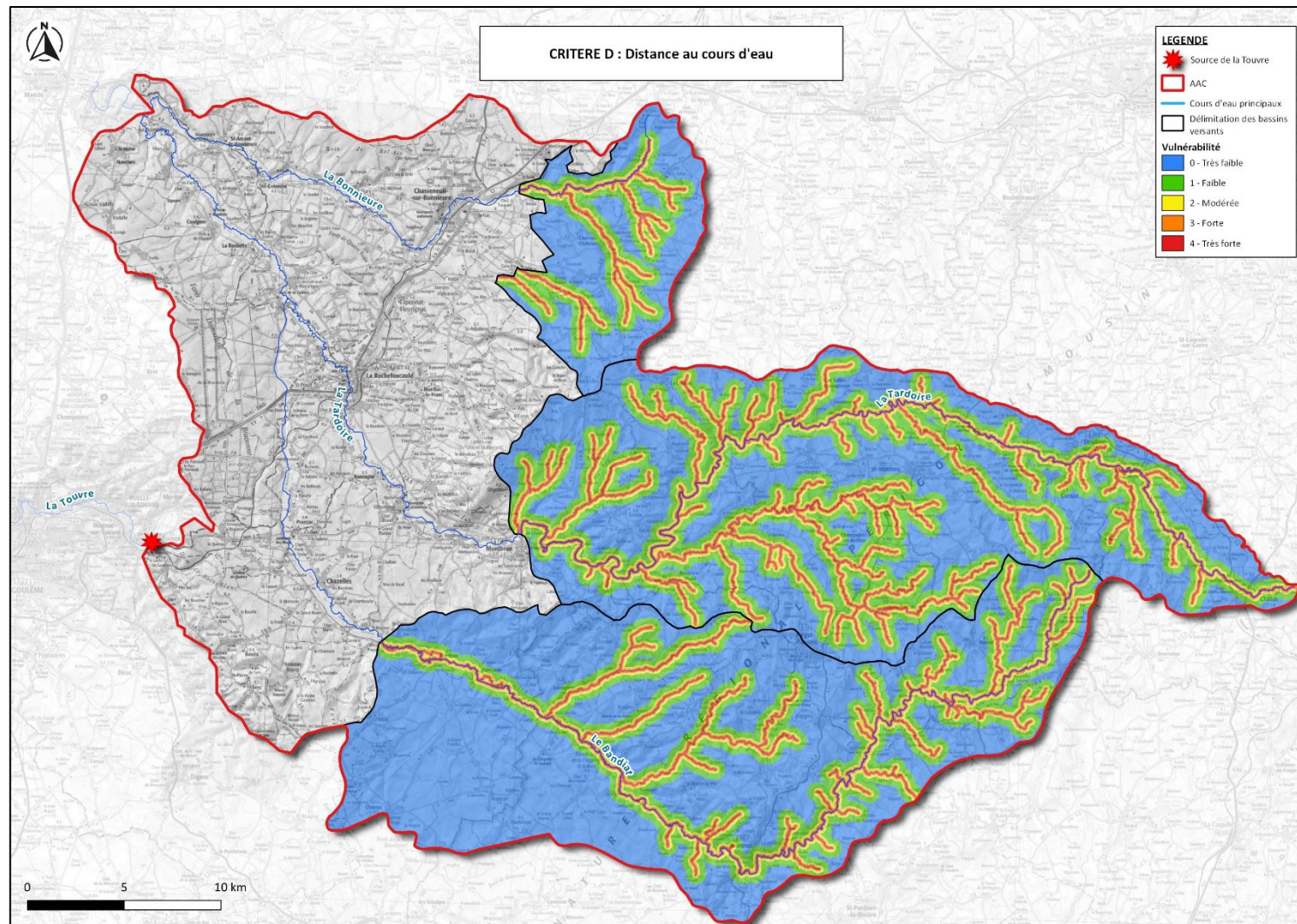


Figure 20: Carte du critère "D"

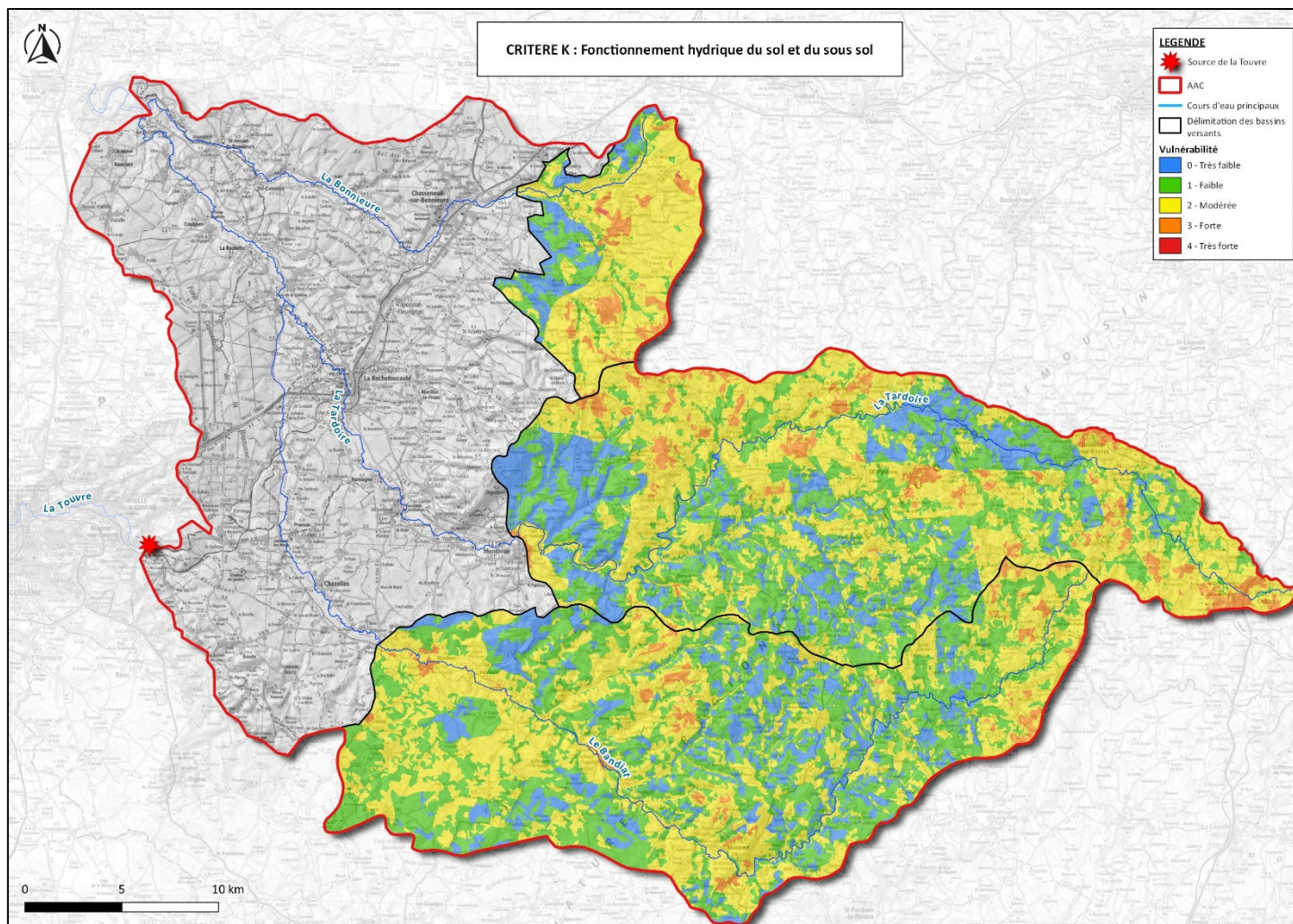


Figure 21: Carte du critère "K"

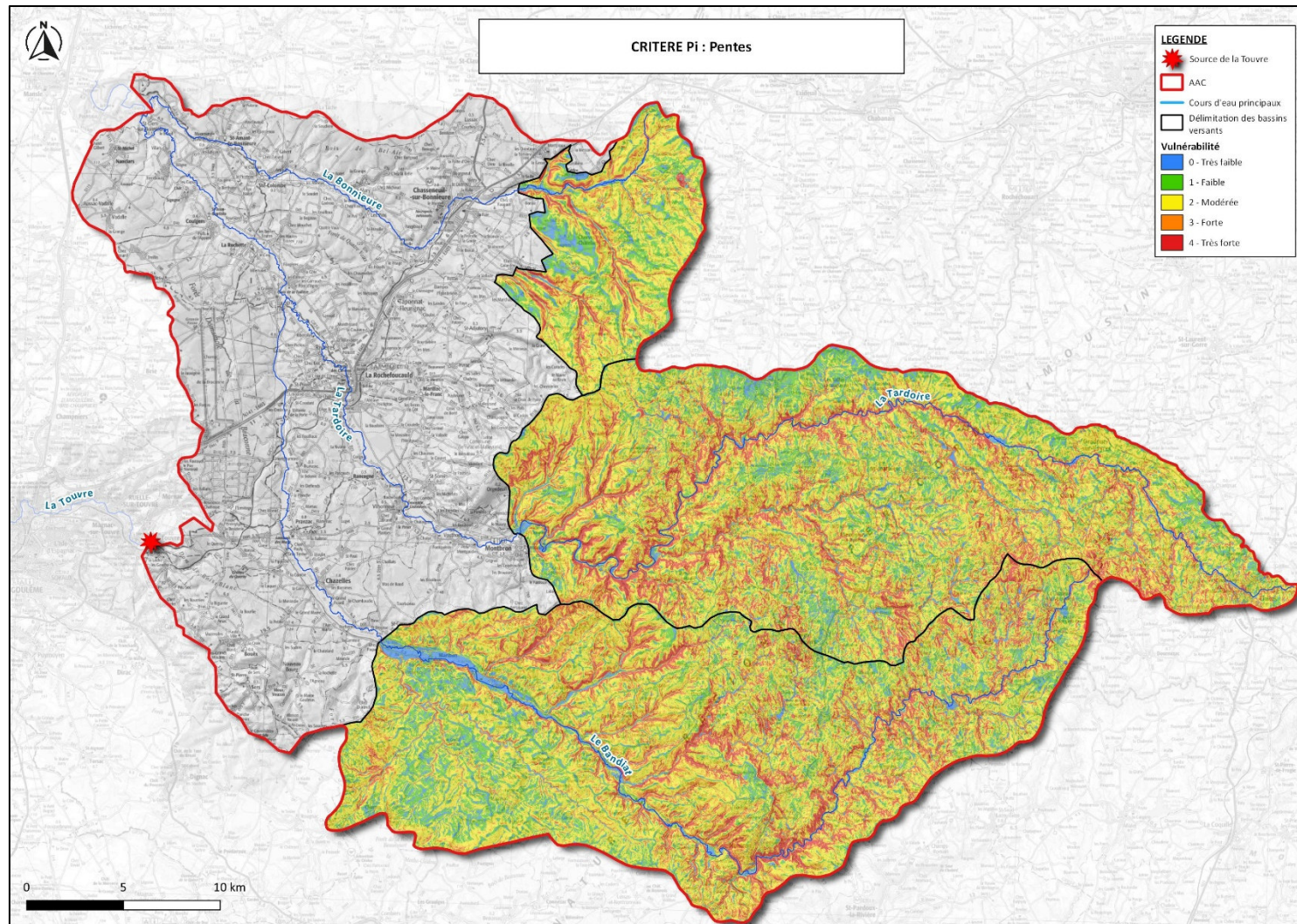


Figure 22: Carte du critère "Pi"

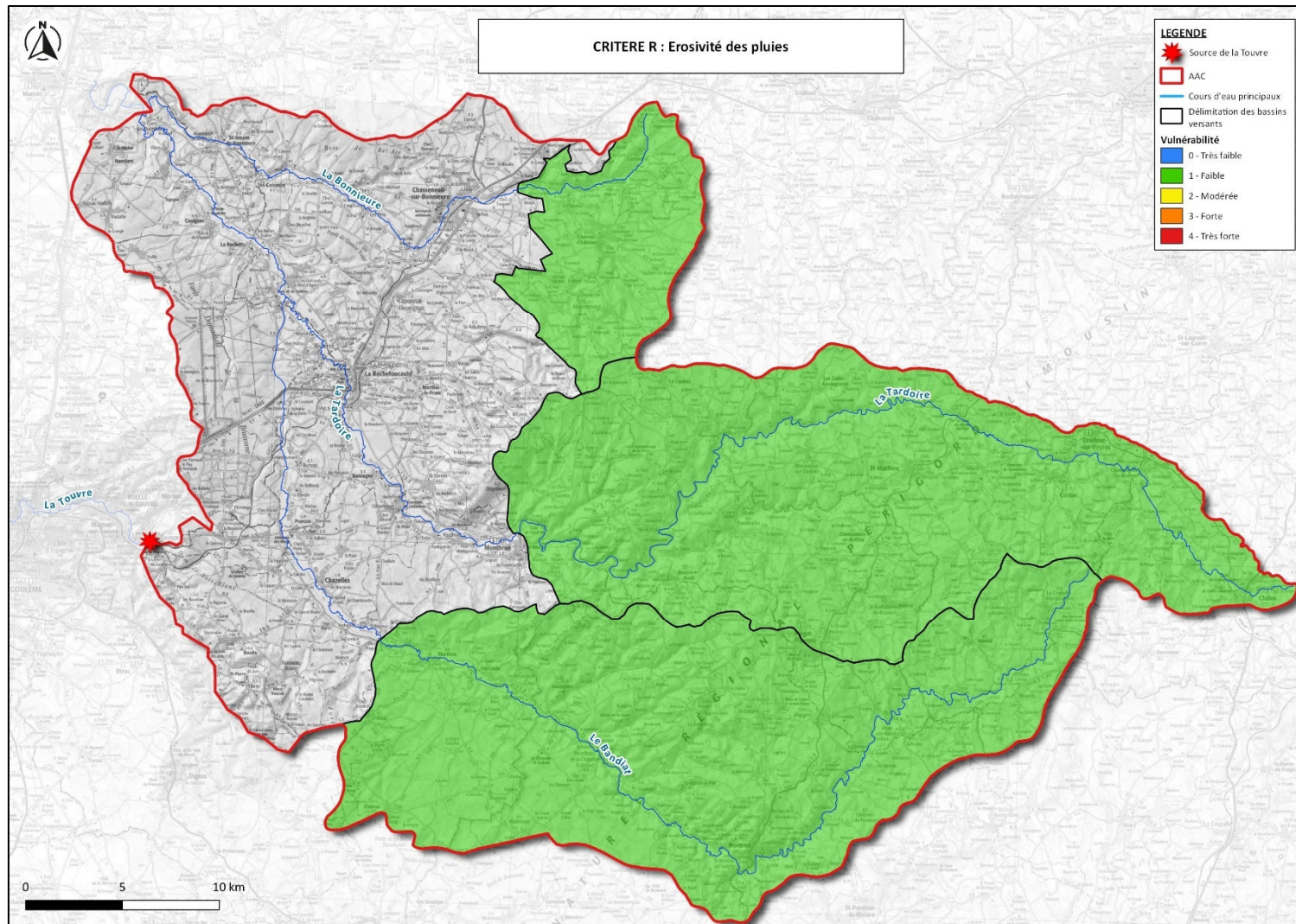


Figure 23: Carte du critère "R"

7. Calcul de la vulnérabilité intrinsèque et cartographie

7.1. Calcul de la vulnérabilité intrinsèque et cartographie pour la méthode PaPRIKa

7.1.1. Calcul de la vulnérabilité intrinsèque du karst

La carte de la vulnérabilité de la zone aquifère en milieu karstique est déterminée à partir d'une formule prenant en compte des paramètres affectés d'un poids. La somme des poids est égale à 1. Ils sont présentés sous forme de pourcentage dans le tableau ci-dessous :

Tableau 13: Poids des paramètres de la vulnérabilité intrinsèque du karst (Méthode PaPRIKa)

| Paramètre | Abréviation | Poids (%) |
|--|-------------|------------|
| Protection de l'aquifère | P | 22,5 |
| Nature de la roche du réservoir aquifère | R | 17,5 |
| Condition d'infiltration | I | 35 |
| Degré de karstification | K | 25 |
| TOTAL | | 100 |

En se basant sur cette pondération, la formule de calcul est la suivante :

$$\text{Vulnérabilité intrinsèque du karst} = 0.225 P + 0.175 R + 0.35 I + 0.25 K$$

Le poids le plus fort est attaché au critère infiltration ; c'est la capacité du milieu naturel à empêcher le polluant d'atteindre la nappe. Tel qu'il a été déjà expliqué dans les sections précédentes, les indices karstiques (avens, dolines, lapiez, gouffres) cartographiés sur le karst de la Touvre influencent ce critère puisqu'ils correspondent à des zones d'infiltration préférentielle.

La valeur finale de vulnérabilité varie donc entre 0 (vulnérabilité minimale) et 4 (vulnérabilité maximale).

| Valeurs indice | Classe | Vulnérabilité |
|----------------|--------|---------------|
| 3,2 – 4,00 | 4 | Très élevée |
| 2,4 – 3,19 | 3 | Elevée |
| 1,6 – 2,39 | 2 | Modérée |
| 0,8 – 1,59 | 1 | Faible |
| 0,0 – 0,79 | 0 | Très faible |

Tableau 14 : Classes de vulnérabilité du karst

7.1.2. Résultats – BV du Karst

La carte de vulnérabilité résultante met en évidence les éléments suivants (Figure 24) :

- l'indice de vulnérabilité de la carte varie entre 2 (vulnérabilité modérée en jaune) et 4 (vulnérabilité très forte en rouge) ;
- la majeure partie du karst présente une vulnérabilité forte, notamment dans la partie centrale entre la Tardoire et la Bonnieure (indice 3). Ceci est dû aux indices forts des critères Protection de l'aquifère « P » (influencé dans ces secteurs majoritairement par la faible épaisseur de la ZNS) et Roche réservoir « R » qui correspond à l'affleurement des calcaires oolithiques récifaux bioclastiques fissurés du Jurassique. Ainsi que dans les zones de pertes diffuses (indices karstiques) influençant une infiltration préférentielle.
- Les secteurs où une vulnérabilité très forte (indice 4) est rencontrée correspondent aux bords de la Tardoire et du Bandiat, dans les secteurs avec indices karstiques.

Compte tenu de ces observations, il apparaît que les zones à protéger prioritairement sont les zones dont l'indice est de 4 ; correspondant principalement aux abords de la Tardoire et du Bandiat dans les zones de pertes diffuses.

Les zones en indice 3 qui sont en vulnérabilité élevée nécessitent également la mise en place de protection. Cela concerne les zones d'affleurements des calcaires fissurés du Jurassique présentes au centre du karst ainsi que le réseau hydrographique et ses abords (zone tampon d'environ 500 m de part et d'autre des cours d'eau).

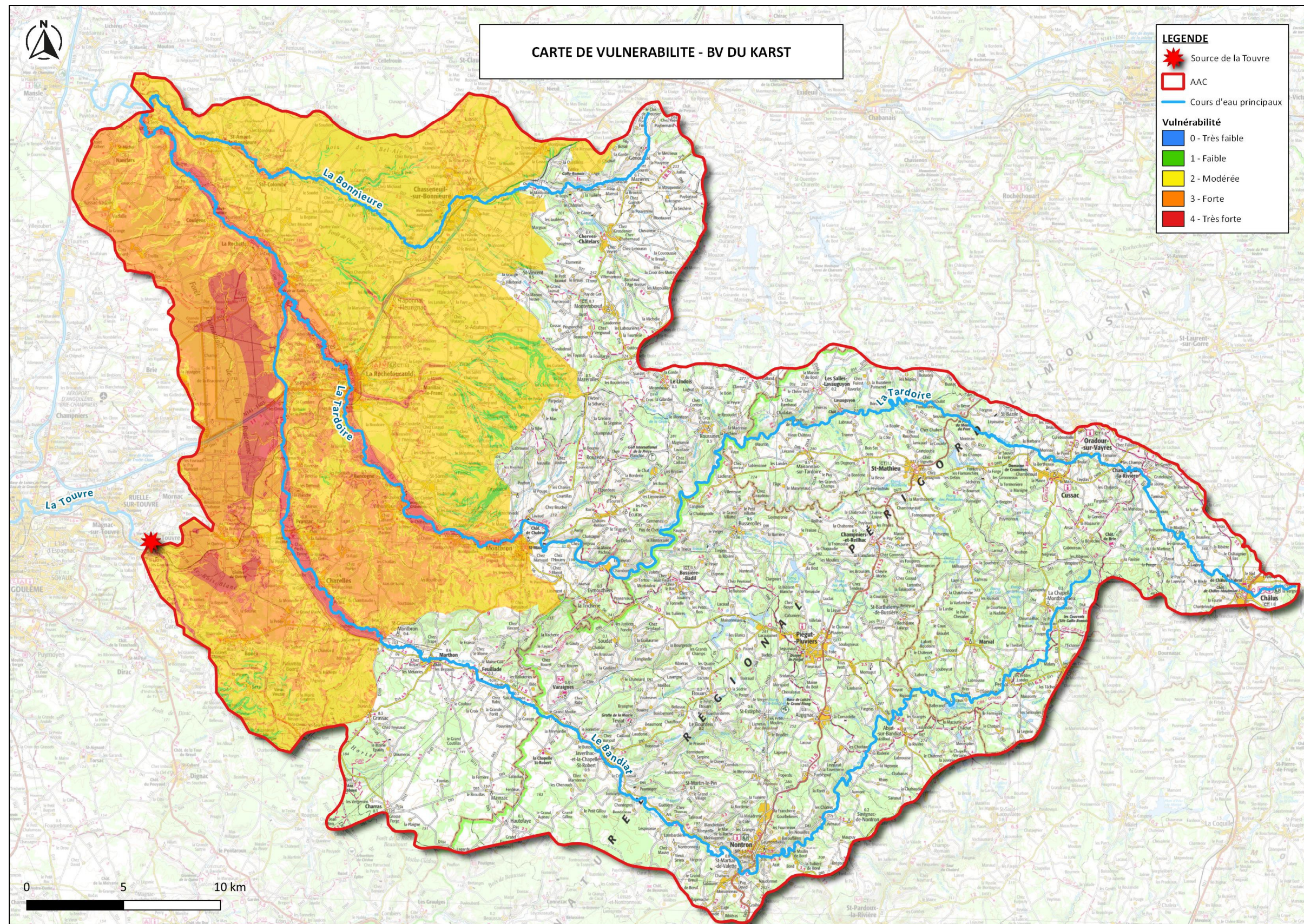


Figure 24: Vulnérabilité intrinsèque du karst par la méthode PaPRIKA

7.2. Calcul de la vulnérabilité intrinsèque et cartographie pour la méthode CEMAGREF (adaptée)

7.2.1. Calcul de la vulnérabilité hydrologique pour les BV superficiels

Les calculs de la vulnérabilité intrinsèque de la ressource et du captage sont présentés dans la section 3.1 du présent rapport.

7.2.1.1. Vulnérabilité intrinsèque de la ressource

Pour rappel la formule de calcul de cette vulnérabilité est la suivante :

$$V_r = f D + g K + h P_i + i R$$

Les indices de pondération choisis sont les suivants :

Tableau 15: Poids des paramètres de la vulnérabilité intrinsèque du karst (Méthode CALLIGEE/ANTEA)

| Paramètre | Abréviation | Poids (%) |
|---|-------------|------------|
| Accessibilité aux cours d'eau | D | 50 |
| Fonctionnement hydrique du sol et du sous-sol | R | 5 |
| Degré d'intensité des Pentes | K | 35 |
| Erosivité des pluies | P | 10 |
| TOTAL | | 100 |

En se basant sur cette pondération, la formule de calcul est la suivante :

$$\text{Vulnérabilité intrinsèque de la ressource} = 0.5 D + 0.35 K + 0.1 P + 0.05 R$$

7.2.1.2. Formule de vulnérabilité intrinsèque du captage

La vulnérabilité du captage en eau superficielle dépend à la fois de la vulnérabilité intrinsèque de la ressource définie précédemment par l'indice « Vr » ainsi que des phénomènes de dilution et de dégradation qui se produisent lors du cheminement dans le réseau hydrographique jusqu'au point de captage.

Pour rappel la formule de calcul de cette vulnérabilité est la suivante :

$$V_c = j V_r + k D_c$$

Les indices de pondération choisis sont les suivants :

Tableau 16: Poids des paramètres de la vulnérabilité intrinsèque du karst (Méthode CALLIGEE/ANTEA)

| Paramètre | Abréviation | Poids (%) |
|---------------------------------|-------------|------------|
| Vulnérabilité de la ressource | Vr | 55 |
| Distance hydraulique du captage | Dc | 45 |
| TOTAL | | 100 |

En se basant sur cette pondération, la formule de calcul est la suivante :

Vulnérabilité intrinsèque du captage = 0.55 Vr + 0.45 Dc

7.2.2. Résultats – BV superficiels

La carte de **vulnérabilité intrinsèque de la ressource** met en évidence les éléments suivants (Figure 25) :

- l'indice de vulnérabilité de la carte varie entre 2 (vulnérabilité modérée en jaune) et 4 (vulnérabilité très forte en rouge) ;
- les zones où la ressource apparaît plus vulnérable sont localisées en bordure des cours d'eau, dans les secteurs où l'activité agricole est concentrée.

La carte de **vulnérabilité intrinsèque du captage** met en évidence les éléments suivants (Figure 26) :

- l'indice de vulnérabilité de la carte varie entre 1 (vulnérabilité faible en vert) et 3 (vulnérabilité forte en orange) ;
- il apparaît que par rapport à la carte de vulnérabilité de la ressource, le fait d'intégrer la distance au captage fait diminuer les indices d'un facteur 1. Ce qui diminue les zones de forte vulnérabilité et les concentre plutôt autour des cours d'eau et moins dans les secteurs agricoles.

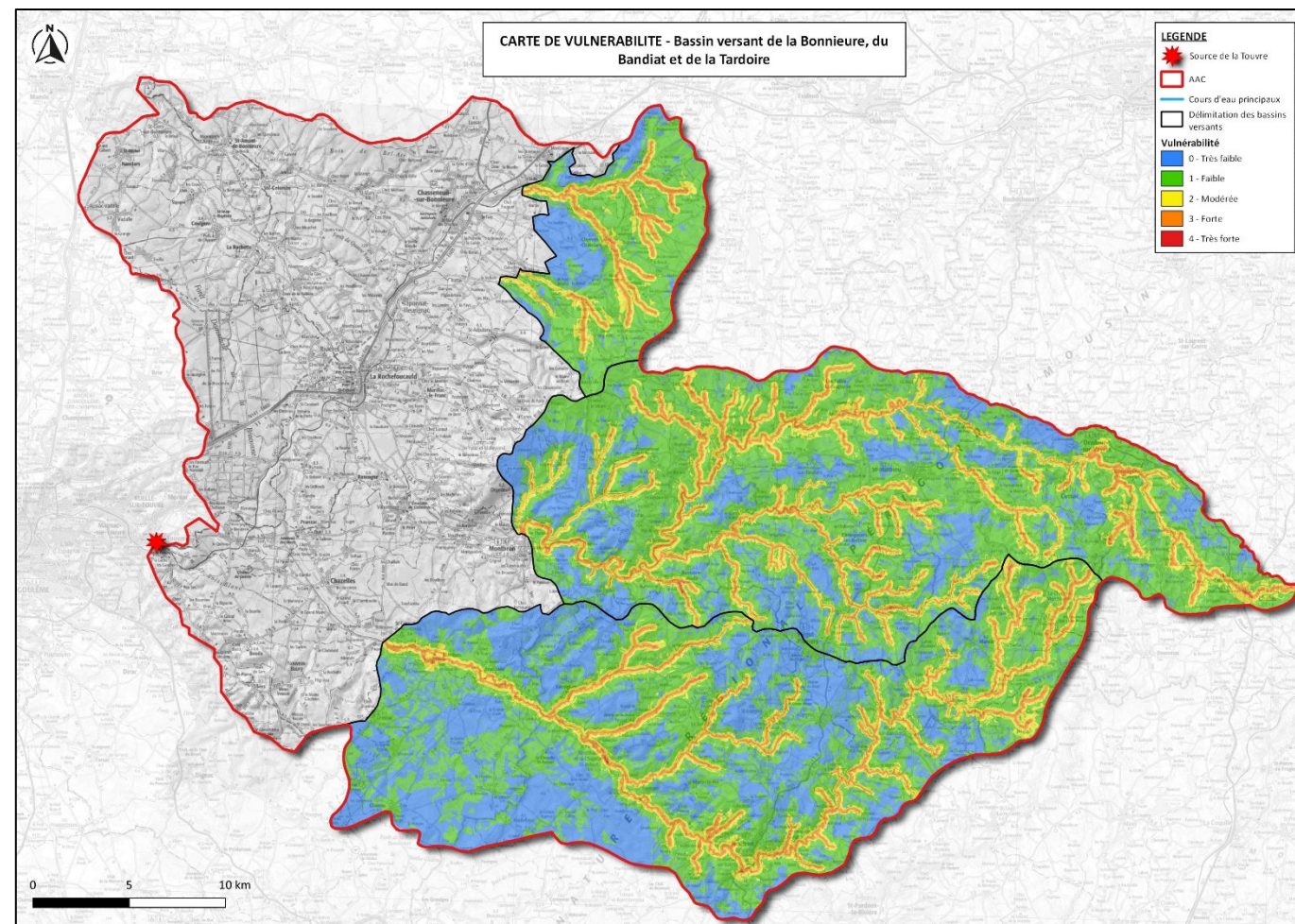


Figure 25: Carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource « Vr »

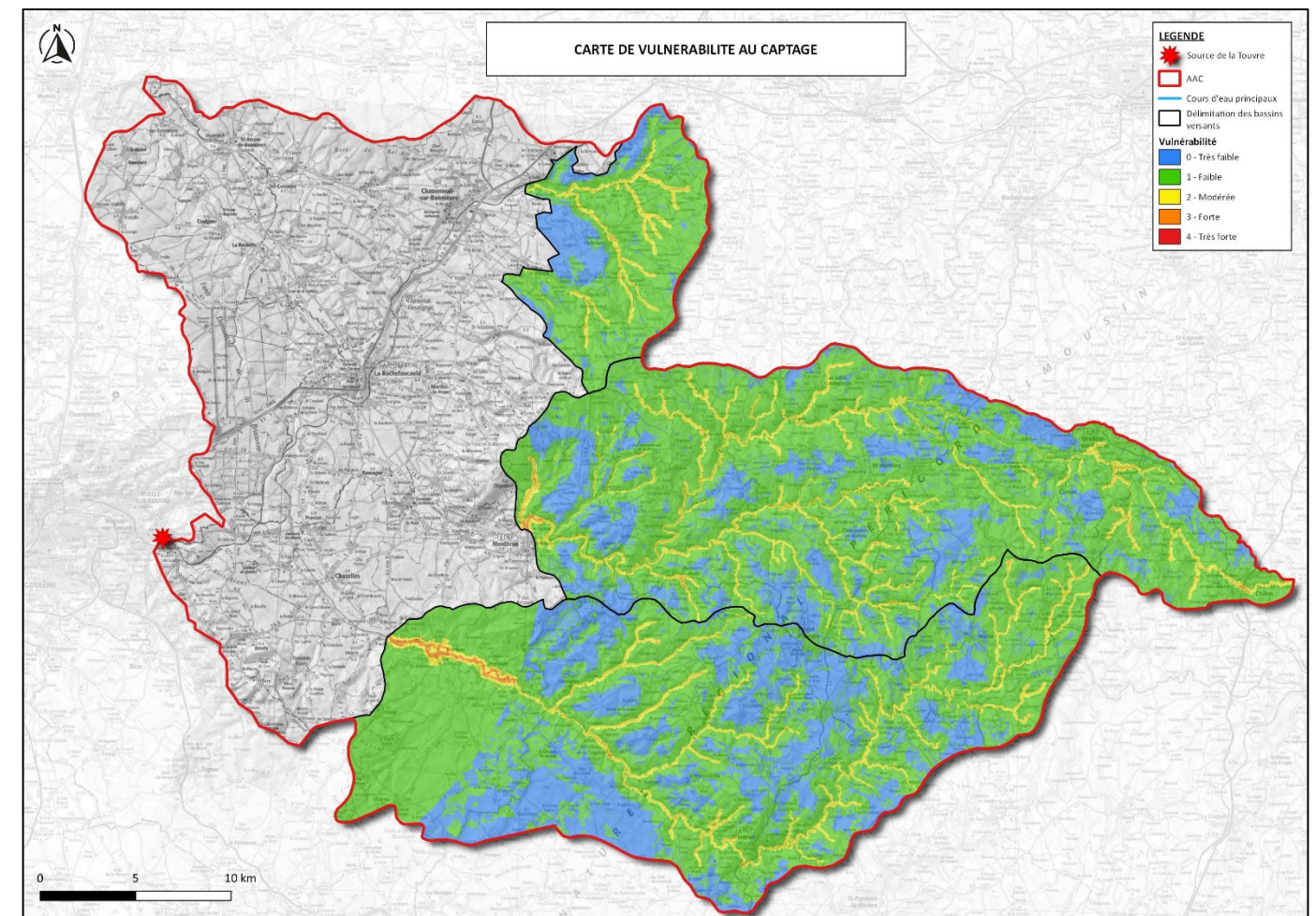


Figure 26: Carte de vulnérabilité intrinsèque du captage "Vc"

7.3. Cartes de vulnérabilité globale – Ressource et Captage

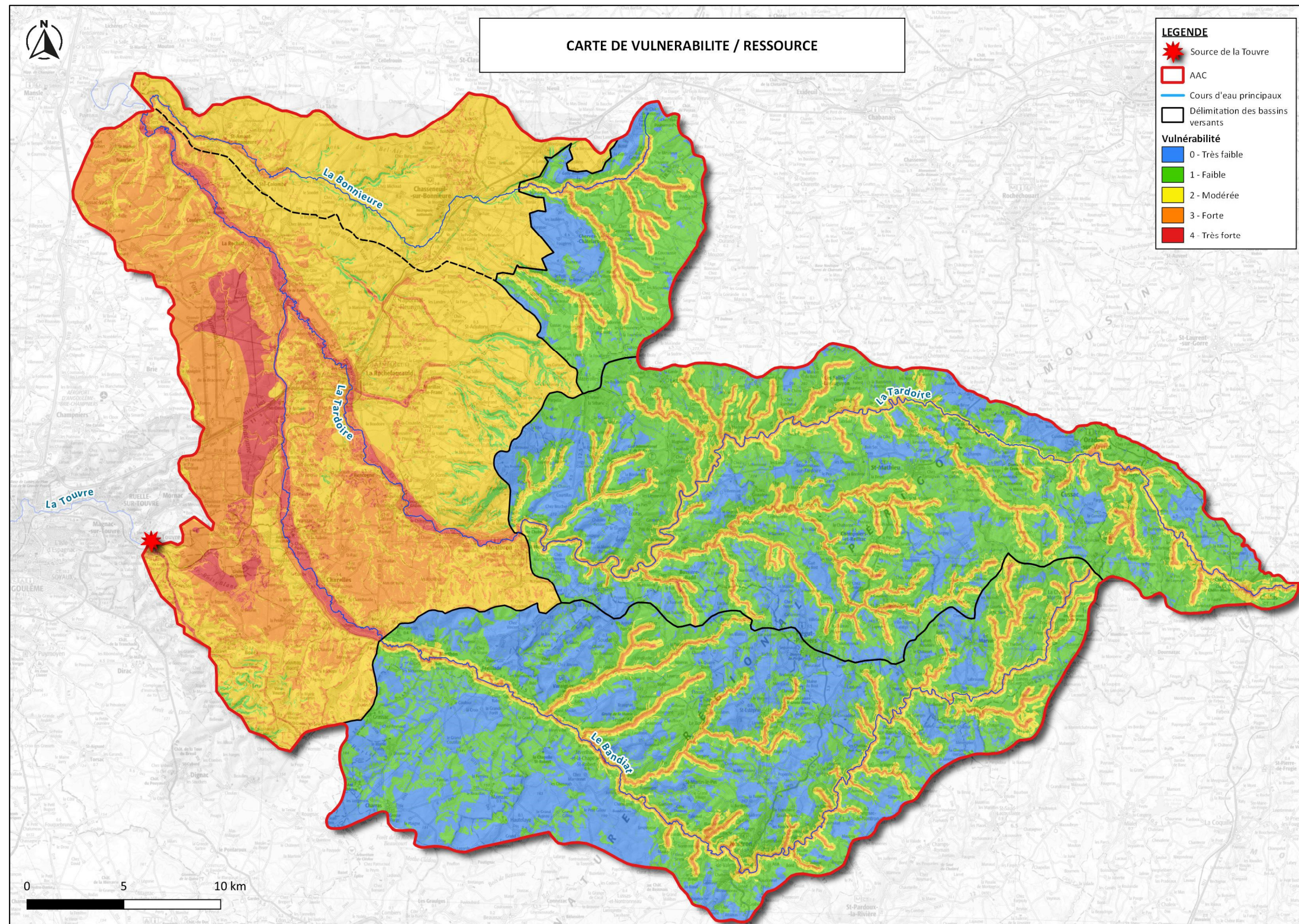


Figure 27: Carte de vulnérabilité globale de la ressource

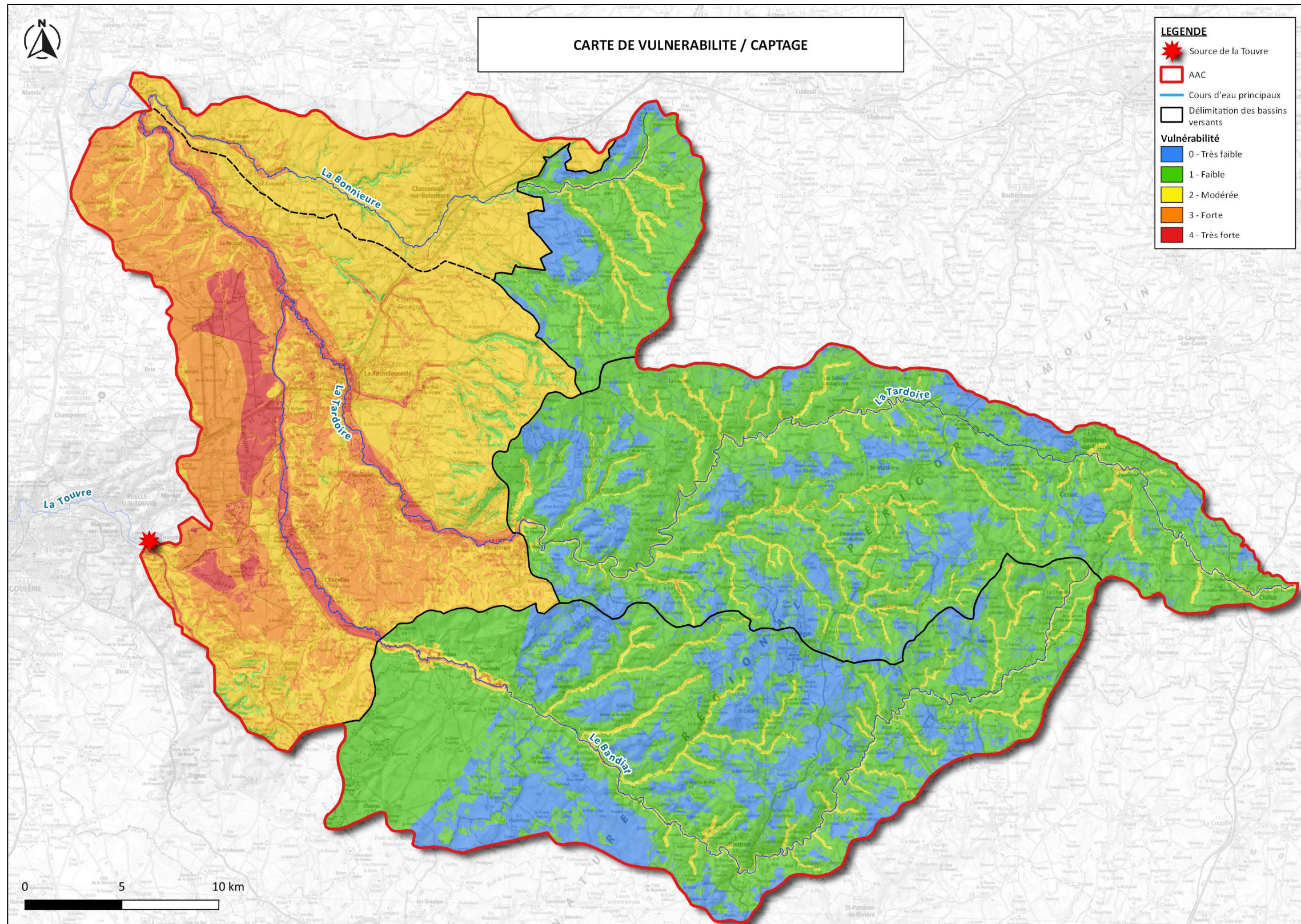


Figure 28: Carte de vulnérabilité globale du captage

8. Conclusions

La vulnérabilité intrinsèque de l'aire d'alimentation du captage de la Touvre au Bouillant a été déterminée à partir de :

- La méthodologie PaPRIKa développée par le BRGM et l'ONEMA. La typologie de l'aquifère captée est celle d'un milieu karstique binaire. La formule de calcul mise en œuvre comprend quatre paramètres : la protection de l'aquifère (P), la nature de la roche réservoir aquifère (R), les conditions d'infiltration (I) et le degré de karstification (K);
- La méthodologie développée par le groupement CALLIGEE-ANTEA en 2010, sur inspiration de la méthode IRSTEA (anciennement CEMAGREF). La formule de calcul mise en œuvre comprend également quatre paramètres : l'accessibilité aux cours d'eau, le fonctionnement hydrique du sol et du sous-sol, le degré d'intensité des Pentes et l'érosivité des pluies.

Les cartes de vulnérabilité globale de la Ressource et du Captage (Figure 27 et Figure 28) résultante ont mis en évidence les éléments suivants :

- L'indice de vulnérabilité de la carte varie entre 1 (vulnérabilité faible) et 4 (vulnérabilité très élevée);
- Dans les BV superficiels en amont des pertes dans le karst, les zones où la ressource apparaît plus vulnérable sont localisées en bordure des cours d'eau, dans les secteurs où l'activité agricole est concentrée. La vulnérabilité s'intensifie en entrant dans le karst ;
- Le BV de la Bonnieure présente une partie karstique et une partie non karstique : globalement ce secteur au nord de l'AAC démontre moins de vulnérabilité que le reste du territoire, notamment le karst dans les zones de pertes diffuses au droit des indices karstiques (centre du karst et aux abords de la Tardoire et du Bandiat).
- La vulnérabilité globale du captage reprend généralement les mêmes observations que la vulnérabilité globale de la ressource, à la différence que les indices se retrouvent diminués d'un facteur 1 ; diminuant ainsi les zones de forte vulnérabilité et les concentrant plutôt autour des cours d'eau et moins dans les secteurs agricoles.

Compte tenu de ces observations, il apparaît que les zones à protéger prioritairement sont les zones donc l'indice est de 3 et 4 sur la carte de vulnérabilité, correspondant aux secteurs où le karst est affleurant et aux secteurs agricoles des BV superficiels amont (Tardoire et Bandiat).

Observations sur l'utilisation du rapport

Ce rapport, ainsi que les cartes ou documents, et toutes autres pièces annexées constituent un ensemble indissociable. Les incertitudes ou les réserves qui seraient mentionnées dans la prise en compte des résultats et dans les conclusions font partie intégrante du rapport.

En conséquence, l'utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou d'une reproduction partielle de ce rapport et de ses annexes ainsi que toute interprétation au-delà des énonciations d'Antea Group ne sauraient engager la responsabilité de celui-ci. Il en est de même pour une éventuelle utilisation à d'autres fins que celles définies pour la présente prestation.

Les résultats des prestations et des investigations s'appuient sur un échantillonnage ; ce dispositif ne permet pas de lever la totalité des aléas liés à l'hétérogénéité des milieux naturels ou artificiels étudiés. Par ailleurs, la prestation a été réalisée à partir d'informations extérieures non garanties par Antea Group ; sa responsabilité ne saurait être engagée en la matière.

Antea Group s'est engagé à apporter tout le soin et la diligence nécessaire à l'exécution des prestations et s'est conformé aux usages de la profession. Antea Group conseille son Client avec pour objectif de l'éclairer au mieux. Cependant, le choix de la décision relève de la seule compétence de son Client.

Le Client autorise Antea Group à le nommer pour une référence scientifique ou commerciale. A défaut, Antea Group s'entendra avec le Client pour définir les modalités de l'usage commercial ou scientifique de la référence.

Ce rapport devient la propriété du Client après paiement intégral de la mission, son utilisation étant interdite jusqu'à ce paiement. A partir de ce moment, le Client devient libre d'utiliser le rapport et de le diffuser, sous réserve de respecter les limites d'utilisation décrites ci-dessus.

Pour rappel, les conditions générales de vente ainsi que les informations de présentation d'Antea Group sont consultables sur : <https://www.anteagroup.fr/fr/annexes>



Acteur majeur de l'ingénierie de l'environnement et de la valorisation des territoires



Références :

Logo
MASE



www.lne.fr



Portées
communiquées
sur demande

