

Septembre 2013

**IDENTIFICATION DES RESSOURCES KARSTIQUES
MAJEURES POUR L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE
EN VUE DE LEUR PROTECTION SUR UNE PARTIE DU
MASSIF DU JURA**

**Volume n°4 : Méthodologie de la cartographie
de la vulnérabilité RISK**

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.	4
2. REPARTITION DES RKM EN FONCTION DES METHODES RISK.	4
3. LA METHODE RISK.	6
3.1. LES MÉTHODES MULTICRITÈRES.....	6
3.2. LA MÉTHODE RISK	6
3.2.1. CRITÈRE R : ROCHE AQUIFÈRE	7
3.2.2. CRITÈRE I : CONDITIONS D’INFILTRATION	8
3.2.3. CRITÈRE S : SOL ET COUVERTURE PROTECTRICE	9
3.2.4. CRITÈRE K : KARSTIFICATION.....	12
3.2.5. INDICE GLOBAL DE VULNÉRABILITÉ IG.....	13
3.3. CARTOGRAPHIE DES PRESSIONS POLLUANTES.....	13
3.4. CARTOGRAPHIE DES RISQUES.....	14
3.5. NOTE SUR LA TERMINOLOGIE EMPLOYÉE.	14
1 Système Karstique Ain-Papeterie - Méthode RISK.....	37
1.1 Présentation de l’ensemble Ain-Papeterie	37
 Annexe 1 : Fiches pédologiques.....	 16
Annexe 2 : Méthodologie de détermination de l’indice S (sol) en milieu forestier.....	26
Annexe 3 : Comparaison des méthodes RISK et PaPRIKa sur l’exemple du BAC de la source de la Papeterie et source de l’Ain à Bourg de Sirod (39).....	36

1. INTRODUCTION.

La méthode RISK est une méthode de cartographie multicritères de la vulnérabilité des surfaces contribuant à la recharge de l'aquifère. Elle fournit une cartographie hiérarchisée en 5 classes de vulnérabilité.

Une cartographie des pressions polluantes ainsi que des risques de pollution vient compléter la cartographie de la vulnérabilité.

2. REPARTITION DES RKM EN FONCTION DES METHODES RISK.

N° de référence, ressource karstique majeure (RKM)	SYSTÈME KARSTIQUE : METHODE RISK NON APPLICABLE		Zone d'intérêt actuel ou futur
	Nom	surface	
		km2	
1	Karst sous couverture Belfort	53	ZIF
12	Karst profond de la vallée du Doubs	114	ZIA
29	Synclinal Val de Saint Point	81	ZIF
32	Synclinal Val de Rochejean_Métabief	50	ZIF
35	Source de la Saine	31	ZIF

Pour 4 RKM il s'agit de ressources profondes sous couverture qui ne feront pas l'objet d'une étude de vulnérabilité par la méthode RISK. En effet, il s'agit d'aquifères captifs qui ne sont pas (ou peu) renseignés, et dont les zones de recharges ne sont pas connues.

La Source de la Saine dont le bassin d'alimentation est très mal connu (absence de traçages dans ce secteur) n'a pas pu faire l'objet d'une méthode RISK.

N° de référence, ressource karstique majeure (RKM)	SYSTÈME KARSTIQUE : METHODE RISK EXISTANTE		Zone d'intérêt actuel ou futur
	Nom	surface	
		km 2	
2	Source des Beaumettes	19	ZIA
4	Fontaine du Crible	15	ZIA
17	Sources Arcier_Bergeret	113	ZIA
22	Source de la Tuffières	6	ZIA
28	Source de La Papeterie	121	ZIA

N° de référence, ressource karstique majeure (RKM)	SYSTÈME KARSTIQUE : METHODE RISK A REALISER		Zone d'intérêt actuel ou futur
	Nom	surface km2	
3	Source de Lougres	30	ZIF
5	Source du Val Trou de la Doux	18	ZIA
6	Sources Gourdeval_Sarre	20	ZIF
7	Source de la Doue_Forage Jean Burnin (sur Suisse)	19	ZIF
8	Sources de la Laronsse_Creuse_Forage du Vallon	12	ZIA
9	Source Ronde Fontaine (sur Suisse)	17	ZIF
10	Sources Œil de Bœuf_Oeuches	4	ZIA
11	Source Château de la Roche	5	ZIF
13	Sources Noire et Alloz	76	ZIF
14	Plateau de Chamesey_source de Froidefontaine	24	ZIA
15	Source du Bief de Brand	107	ZIF
16	Sources de Blanchefontaine_la Forge	18	ZIA
18	Source du Bief	77	ZIF
19	Sources du Maine_Ecoutot	313	ZIF
20	Sources du Dessoubre_Bief Ayroux	123	ZIF
21	Sources Bief Poutot_Grande Baume	38	ZIF
23	Plateau de Gilley_Les Combes	69	ZIF
24	Source Moulin Bournez_Puits Cinquin	7	ZIA
25	Source de Derrière le Mont	13	ZIA
26	Source de La Furieuse	9	ZIA
27	Source de Baume Archée	139	ZIF
30	Sources Schlumberger_Grande Source_Bleue	83	ZIA
31	Source Martin	23	ZIF
33	Source C Tunnel du Mont d'Or_La Creuse	125	ZIF
34	Source de Balerme et Bief de la Reculée	32	ZIF
36	Source du Doubs	68	ZIF
37	Source de Fontenu_du Moulin	28	ZIF
38	Sources des Gines_Le Pas	15	ZIA
39	Source de la Gongonne	46	ZIF
40	Source de l'Enragé	158	ZIF
41	Source de l'Arce	48	ZIA
42	Source du Pont des Arches	13	ZIA
43	Trou de l'Abîme	42	ZIF
44	Sources Foules_Montbrillant	37	ZIA
45	Bief Noir	12	ZIF

35 RKM ont fait l'objet d'une cartographie de la vulnérabilité par la méthode RISK.

3. LA METHODE RISK.

3.1. Les méthodes multicritères

Les méthodes multicritères permettent d'apprécier la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques en fonction de leurs caractéristiques de structures et de leur fonctionnement. Globalement, elles reposent toutes sur un modèle conceptuel hydrogéologique similaire :

La méthode **EPIK** (Suisse) de N. Dörfliger, élaborée en 1996 se base sur les critères : **Epikarst**, couverture **Protectrice**, **Infiltration** et réseau **Karstique** ;

Les méthodes **RISKE** et **RISKE2** (Anglo-saxonne) se basent sur les critères : **Réservoir** aquifère, **Infiltration**, **Sol**, **Karstification** et **Epikarst**. **RISKE2** prend en compte les phénomènes exo-karstiques tels que les dolines, avens et pertes ;

La méthode **RISK** élaborée par la DIREN de Franche-Comté et le BRGM se base sur les critères : **Réservoir** aquifère, **Infiltration**, **Sol** et **Karstification**. Elle s'inspire des méthodes **EPIK** et **RISKE** ;

La méthode **PaPRIKa**, élaborée par le BRGM, est une évolution de la méthode **RISKE2** afin de distinguer les critères associés à la structure, des critères associés au fonctionnement hydrogéologique. Elle signifie « **P**rotection des **a**quifères karstiques basée sur la **P**rotection, le **R**éservoir, l'**I**nfiltration et le degré de **K**arstification ». Elle se base donc dans un premier temps sur les critères : couverture **Protectrice**, **Réservoir** souterrain, **Infiltration**, degrés de **Karstification**. Dans un deuxième temps, le critère **Infiltration** est modifié avec la notion de vitesse de transfert au sein de l'aquifère permettant d'obtenir une carte de vulnérabilité du captage pouvant servir à la délimitation des périmètres de protection.

3.2. La méthode RISK

Comme définie en introduction, **RISK** est une méthode multicritères de cartographie intrinsèque d'un aquifère karstique. Elle prend en compte quatre critères :

la roche aquifère (R)

les conditions d'infiltrations (I)

La couverture protectrice ou sol (S)

La karstification (K)

Chaque critère est réparti en différentes classes, de 0 à 4, du moins vulnérable au plus vulnérable. Un facteur de pondération est attribué à chaque critère. Il traduira l'importance relative des critères entre eux.

La méthode est mise en œuvre selon 5 étapes principales pour cartographier la vulnérabilité globale :

Cartographie de chaque critère ;

Discrétisation des cartes ;

Calcul de la vulnérabilité globale V_g en chaque maille ;

Reclassification de l'indice V_g ;

Étape de vérification.

La méthodologie de la méthode RISK est décrite dans le guide du BRGM de Janvier 2005.

3.2.1. Critère R : Roche aquifère

Il traduit la nature des formations géologiques et la fracturation de ces formations. Ces paramètres ont une grande influence sur le type de circulations souterraines, et donc sur la vitesse de transfert d'un polluant dans l'aquifère.

Critère R : Nature de la Roche aquifère		
Critère	Caractéristiques	Indice
R ₀	Marnes (35-65% de minéraux argileux) – Faibles propriétés aquifères	0
R ₁	Marnes – Calcaires (35-65% de minéraux argileux) – faibles écoulements	1
R ₂	Calcaires avec intercalation de niveaux marneux, % de minéraux argileux < 10-25 %	2
R ₃	Calcaires massifs et/ou dolomites avec bancs épais sans fractures, calcaire en bancs minces avec fractures (fracturation homogène), écoulements souterrains faciles et rapides	3
R ₄	Calcaires massifs et/ou dolomites avec une forte intensité de fracturation et de karstification, écoulements souterrains faciles et rapides, contamination rapide	4

Dans le bassin versant d'une perte, les indices liés à la nature de la roche ont été inversés. En effet, plus la roche est imperméable (argileuse) plus les eaux de surface vont ruisseler

rapidement vers la perte. Au lieu d'être un facteur de protection de l'aquifère, la nature imperméable de la roche est- un facteur de plus grande vulnérabilité.

3.2.2. Critère I : Conditions d'infiltration

Les conditions d'infiltration de l'eau dans les aquifères karstiques sont très importantes dans la détermination de la vulnérabilité de l'aquifère. Elles tiennent compte de la pente (accélération du ruissellement) et de la présence de pertes (communication très rapide entre une perte et l'exutoire du réseau karstique).

Critère I : Conditions d'infiltration		
Critère	Caractéristiques	Indice
I ₀	Pente très forte > 50 %	0
I ₁	Pente forte 15 - 50 %	1
I ₂	Pente modérée 5 - 15 % et vallées sèches	2
I ₃	Faible pente 0 - 5 % et lapiez	3
I ₄	Pertes actives et leur bassin versant, accidents tectoniques (failles majeures et alignement de dolines)	4

Remarque sur l'épikarst :

Le critère I prend en compte la morphologie de l'épikarst en s'intéressant à la présence de « vallées sèches », « dolines » et « Lapiez ». Dans la méthode RISK, l'épikarst joue un rôle d'accélérateur de l'infiltration. Sa présence augmente la vulnérabilité.

À l'inverse, dans certain cas, l'épikarst a un rôle de protection vis-à-vis de l'aquifère. En effet, une nappe perchée peut se former dans l'épikarst et donner naissance à des sources temporaires. Dans ce cas, il joue un rôle de tampon et ralentit les infiltrations vers l'aquifère profond (voir chapitre 3.1.2 ci-dessous). Ce phénomène est connu dans la région des Causses, par exemple, où localement des puits exploitent cette nappe. Dans le Jura, ce phénomène est absent ou marginal, c'est pourquoi il a été considéré que l'épikarst ne jouait jamais un rôle protecteur.

3.2.3. Critère S : Sol et couverture protectrice

Les formations recouvrant les roches aquifères ont un rôle essentiel par rapport à la vulnérabilité d'un aquifère. Le critère S dépend de la présence ou non d'une « couverture protectrice » entre le sol et la roche (moraines par exemple), des données disponibles sur l'épaisseur du sol, sa texture (cailloux, matrice...), sa composition (argiles, limons...).

Détermination des classes de nature du sol

Trois classes de nature de sol sont définies, en fonction de la texture du sol (dominante argileuse, dominante limoneuse ou dominante sableuse) et en fonction de la proportion de cailloux. Les classes sont notées de 1 à 3 :

		Texture		
		1 (argiles)	2 (limons)	3 (sables)
Cailloux	1 (0-15%)	1	1	2
	2 (15-60%)	1	2	3
	3 (>60%)	2	3	3

Quatre classes de vulnérabilité sont ensuite définies en croisant la nature du sol avec l'épaisseur :

		Nature du sol			
		Inconnue	1	2	3
Épaisseur	1 (>100 cm)	S1	S1	S2	S3
	2 (20-100 cm)	S2	S2	S3	S4
	3 (0-20 cm)	S3	S3	S4	S4
	4 nulle	S4	S4	S4	S4

Lorsque la couverture protectrice est supérieure à 5m, alors la vulnérabilité du sol est S0 (très faible vulnérabilité).

Dans les bassins versant des pertes, le critère S a été classé dans l'ordre inverse du reste de la zone. En effet, dans ces zones, plus les sols sont imperméables, plus les écoulements se font rapidement vers la perte et le milieu souterrain et plus l'aquifère est vulnérable. Pour permettre de prendre en compte cette différence, le tableau du critère P « état de surface » de la méthode PaPRIKa a été utilisés (Cf. 3.1.4) :

État de surface dans les bassins versants des pertes	
S1	Sols caractérisés par de fortes perméabilités : graviers et conglomérats non cimentés
S2	Sols caractérisés par des perméabilités moyennes : arènes granitiques, sables, calcaires
S3	Sols caractérisés par des perméabilités faibles : grès peu fissurés, conglomérats cimentés, roches magmatiques et métamorphiques saines.
S4	Sols caractérisés par des perméabilités très faibles : argiles, marnes, zones de cours d'eau pérenne ou temporaire

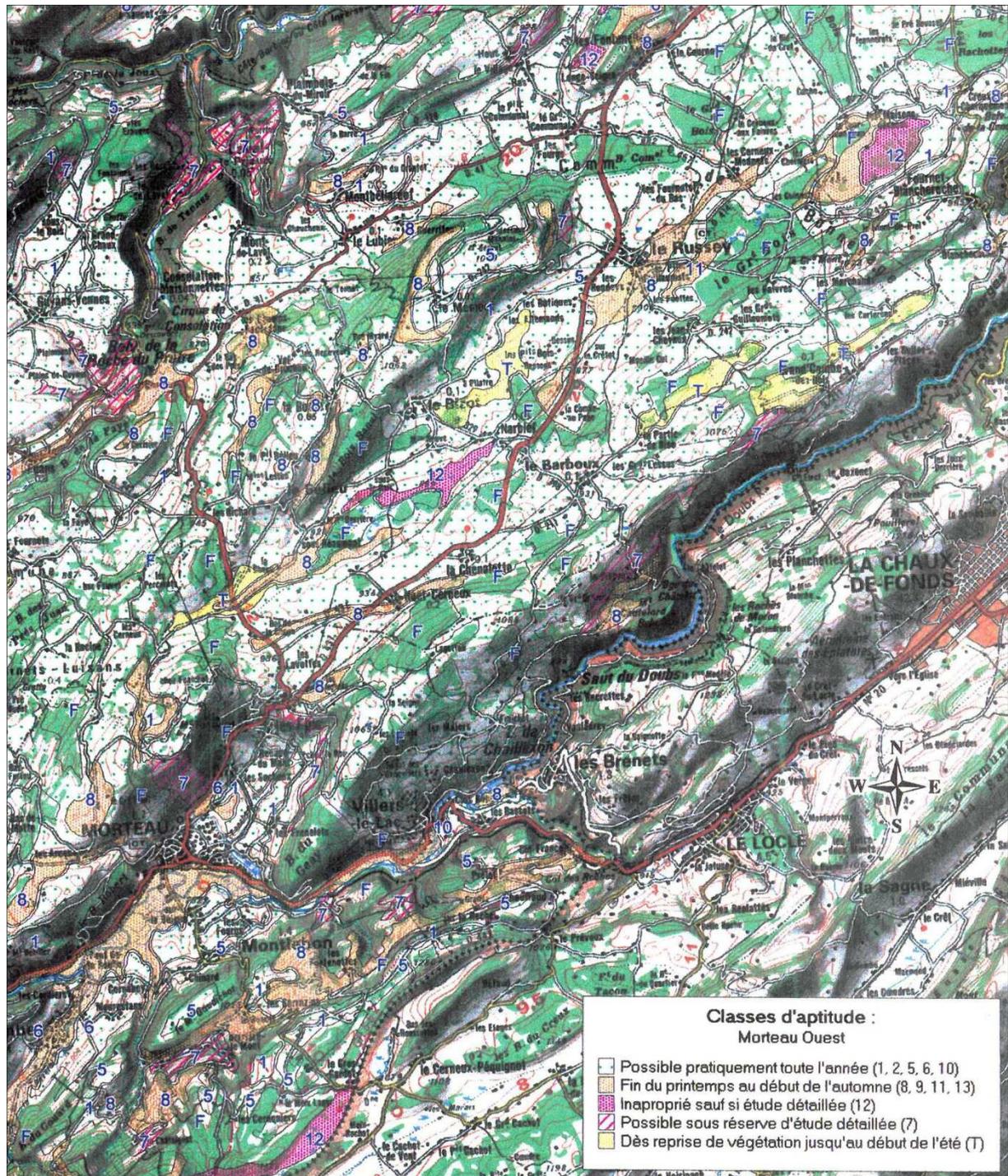
La nature des sols a été renseignée à partir de l'étude « Référentiel Régional Agronomique de Franche-Comté, sensibilité et aptitude du milieu à l'épandage », programmes 1996 à 1999, réalisé avec l'aide de la Région Franche-Comté et de l'Union Européenne. Cette étude est disponible sous la forme d'une cartographie au 1/100 000^{ème} répartie en 25 planches A₃.

C'est un travail de synthèse réalisé à partir des données de terrain (sondages à la tarière) avec les Chambres d'Agriculture du Doubs, de Haute-Saône et du Jura, la DIREN et le GRAP.

Sur ces cartes sont représentées les limites des différents types de sols avec la numérotation de référence qui renvoie aux fiches types (voir en annexe). Les sols sont regroupés en classes d'aptitude à l'épandage, voir carte Figure 1.

Les forêts ne sont pas prises en compte dans cette cartographie, la pédologie de ces secteurs a été renseignée à partir d'une clé de détermination qui repose sur des critères géographiques, topographique et de faciès géologique (roche mère), voir en annexe.

Figure 1 : Référentiel agronomique, extrait de la feuille Morteau Ouest au 1/100 000^{ème}.



3.2.4. Critère K : Karstification

Le critère de karstification évalue le développement du réseau karstique.

Critère K : Karstification		
Caractéristiques		Indice
K ₀	Aquifère plus ou moins fissuré	0
K ₁	Aquifère fissuré mais sans karstification	1
K ₂	Réseau karstique peu développé ou mal connecté avec la surface	2
K ₃	Réseau karstique bien développé et plus ou moins connecté avec la surface	3
K ₄	Réseau karstique très bien développé et connecté avec la surface	4

Dans le bassin versant hydrologique de perte, l'indice K choisi est 4 car on considère que les écoulements de surface se font aisément tout comme dans un réseau karstique très bien développé.

3.2.5. Indice global de vulnérabilité Ig

L'indice global de vulnérabilité est calculé à partir de la formule suivante :

$$I_g = 0,15R + 0,4I + 0,25S + 0,2K$$

→ R, I, S et K correspondent à la valeur des critères indexés.

La vulnérabilité est alors re-classifiée en 5 catégories :

Reclassification Ig	Indice	Vulnérabilité
3,2 - 4	4	Très élevée
2,4 - 3,19	3	Élevée
1,6 - 2,39	2	Modérée
0,8 - 1,59	1	Faible
0 - 0,79	0	Très faible

3.3. Cartographie des pressions polluantes.

Une carte des pressions polluantes est éditée à partir de la base de données en ligne Corine Land Cover 2006 qui fournit l'occupation du sol. Cette cartographie est vérifiée par rapport à notre connaissance du terrain, elle est éventuellement complétée ou actualisée. La carte des pressions polluantes est indicée en 5 classes de très faibles à très élevées. Le tableau de la Figure 2 donne les indices en fonction de l'occupation du sol, ces indices mesurent la probabilité et l'intensité d'une pollution éventuelle.

Des données ponctuelles sont ajoutées à la carte, il s'agit : des installations classées pour l'environnement (ICPE), des points de rejets des STEP, des décharges anciennes, des carrières, des routes.

Figure 2 : Tableau de classification des pressions polluantes représentées dans Corine Land Cover.

code_clc	libelle_fr	couleur	Classe des pressions polluantes
111	Tissu urbain continu		3
112	Tissu urbain discontinu		3
121	Zones industrielles et commerciales		4
122	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés		3
124	Aéroports		4
131	Extraction de matériaux		3
132	Décharges		4
133	Chantiers		4
141	Espaces verts urbains		1
142	Equipements sportifs et de loisirs		1
211	Terres arables hors périmètres d'irrigation		2
221	Vignobles		2
222	Vergers et petits fruits		2
231	Prairies		1
241	Cultures annuelles associées aux cultures permanentes		2
242	Systèmes culturaux et parcellaires complexes		2
243	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants		2
311	Forêts de feuillus		0
312	Forêts de conifères		0
313	Forêts mélangées		0
321	Pelouses et pâturages naturels		1
322	Landes et broussailles		0
324	Forêt et végétation arbustive en mutation		0
332	Roches nues		0
333	Végétation clairsemée		0
411	Marais intérieurs		0
412	Tourbières		0
512	Plans d'eau		0

3.4. Cartographie des risques.

La carte des risques provient du croisement de la carte des pressions polluantes et de la carte de vulnérabilité. Les risques sont à nouveau répartis en 5 classes de très faibles à très élevés.

3.5. Note sur la terminologie employée.

Les termes de vulnérabilité et de risque sont à préciser pour éviter toute ambiguïté sur leur signification.

Au préalable, il faut noter que le nom de la méthode « RISK » n'est pas très bien choisi car c'est une méthode de cartographie de la « vulnérabilité » et non du « risque ».

La vulnérabilité d'une ressource en eau souterraine désigne le défaut de protection ou de défense naturelle contre les menaces de pollution, en fonction des conditions hydrogéologiques locales. La vulnérabilité est donc liée aux caractéristiques physiques du milieu entre la surface et l'exutoire (source). Elle dépend de la nature des sols et de la roche, ainsi que de la topographie (pentes), et de l'état de développement du karst (pertes, cavités, drains...). Pour le milieu karstique on s'intéresse à la vulnérabilité intrinsèque qui est indépendante de la nature des polluants. La vulnérabilité est stable dans le temps à l'échelle humaine.

Le risque correspond à un danger dont on peut jusqu'à un certain point mesurer l'éventualité, que l'on peut plus ou moins prévoir. Il y a dans ce terme une notion de probabilité qu'un évènement néfaste puisse se produire. Dans le cas des ressources karstiques, on identifie les pollutions potentielles présentes dans le bassin d'alimentation d'une source et on prend en compte la capacité du milieu à transférer et à atténuer les flux de pollution. Il s'agit donc de croiser la « pression polluante » sur le bassin avec la « vulnérabilité » définie par la méthode RISK. Le risque est une notion qui évolue dans le temps en fonction des activités humaines et des modifications de l'occupation du sol.

Annexe 1 : Fiches pédologiques.

EPANDAGE : Epannage possible pratiquement toute l'année	CATEGORIE DE SOLS	Aéré Profond de Plateau
	Noms usuels	Terre profonde



Photo : 25 VE.Bre 1
Réf. biblio : typologie 25, 39

Critère de reconnaissance	
Du sommet au creux	Test de l'anneau
Pénétration facile Couleur : brun jaune à brun rouge	Pas d'effervescence

Caractéristiques principales			
Texture de surface	Limon ou limon argileux	pHeau	6.3 (médiane) borne : 5 à 7
Profondeur	Au moins 60 cm	Réserve hydrique	de 115 à 140 mm pour 60 cm selon texture
Hydromorphie	Néant	Signes particuliers	Pierrosité possible sous forme de chailles
Nature du sous-sol	Horizon tassé ancien, graveleux, argileux		

OBSERVATIONS

- Dans les unités où domine la catégorie Aéré Profond de Plateau, peuvent être rencontrés les sols de la catégorie Aéré Superficiel de Plateau et les sols Modérément Hydromorphes de Plateau argilo-limoneux, limono-argileux (calcaires ou non).
- Les creux sont généralement occupés par des sols plutôt limoneux.

CRITERES* ENVIRONNEMENTAUX		STRATEGIE D'EPANDAGE*													
Risque	Evaluation	Produit*	Cultures	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
Circulation verticale	Faible			Solide	Gde cult. d'aut.										
Ruissellement	Faible	Gde cult. de print.	(1)												(1)
Lessivage hivernal	Faible à moyen	Prairie													
Circulation latérale	Faible	Liquide	Gde cult. d'aut.												
Pouvoir épurateur : Bon			Gde cult. de print.												
			Prairie	(2)											

OBSERVATIONS

- Faible risque bactériologique.
 - Attention à la praticabilité en sortie d'hiver dans les creux et dépressions ou combes.
- (1) fumier possible si prairie non retournée
(2) Produit liquide inapproprié du 15/11 au 29/02 sur prairie

* voir définition en annexe



Zone de montagne

EPANDAGE : Epannage possible pratiquement toute l'année	CATEGORIE DE SOLS	Aéré Superficiel de Plateau
	Noms usuels	Argilo-calcaire



Photo : 25 VE.VII 1
Réf. biblio : typologie 25, 39

Critère de reconnaissance	
Sommet, pente	Test de l'anneau la al
Pénétration facile Couleur : brun jaune à brun rouge selon sous-sol	Effervescence possible

Caractéristiques principales			
Texture de surface	Limono-argileux à argilo-limoneuse	pHeau	Texture non calcaire : de 6.1 à 7.4 Texture calcaire : de 7.5 à 8.3
Profondeur	Inférieure à 35 cm	Réserve hydrique	de 35 à 60 mm pour 35 cm selon texture et pierrosité
Hydromorphie	Néant	Signes particuliers	- Pierrosité fréquente sur sol cultivé. - Les horizons tassés argileux sont moins représentés.
Nature du sous-sol	Banc de calcaire dur, calcaire poudreux, mameux voire horizon tassé argileux		

OBSERVATIONS

- Dans les unités où domine cette catégorie, les creux ou bas de pente sont généralement occupés par des sols APP.I ou APP.Ia ; dans cette unité peuvent être également rencontrés les sols limono-argileux ou argilo-limoneux, calcaires ou non de la catégorie MHP.
- Des sols très superficiels avec affleurement sont possibles sur certaines positions hautes du paysage (sommet, rupture de pente).

CRITERES* ENVIRONNEMENTAUX		STRATEGIE D'EPANDAGE*													
Risque	Evaluation	Produit*	Cultures	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
Circulation verticale	Elevée	Solide	Gde cult. d'aut.												
Ruissellement	Faible à moyen		Gde cult. de print.	(1)											(1)
Lessivage hivernal	Elevé à moyen		Prairie												
Circulation latérale	Non	Liquide	Gde cult. d'aut.												
Pouvoir épurateur : Moyen à faible			Gde cult. de print.												
			Prairie	(2)											

OBSERVATIONS

- Risque bactériologique moyen.
- Pas d'épandage sur sol très superficiel avec affleurement.

(1) fumier possible si prairie non retournée
(2) Produit liquide inapproprié du 15/11 au 29/02 sur prairie

* voir définition en annexe



Zone de montagne

EPANDAGE : Epanchage possible pratiquement toute l'année	CATEGORIE DE SOLS	Aéré Superficiel de Colline Glaciaire
	Noms usuels	/



Photo : 39 Cl.Uxe 4
Réf. biblio : typologie 25, 39

Critère de reconnaissance	
Sommet, pente Pente généralement faible Murgets constitués de blocs et pierres arrondis	Test de l'anneau la al
Pénétration facile Couleur : brun foncé à noir	Effervescence généralement forte

Caractéristiques principales			
Texture de surface	Limono-argileux à argilo-limoneux	pHeau	Texture non calcaire : de 6.1 à 7.5 Texture calcaire : de 7.1 à 7.9
Profondeur	Inférieure à 35 cm	Réserve hydrique	de 35 à 60 mm pour 35 cm selon texture et pierrosité
Hydromorphie	Néant	Signes particuliers	- Pierrosité fréquente sur sol cultivé. - Cailloux arrondis en cas de retournement. - Blocs de taille parfois importante peuvent affleurer.
Nature du sous-sol	- Moraine - Argile sur moraine		

OBSERVATIONS
- Les creux et bas de pente sont occupés par les sols APP.I ou APP.Ia - On peut rencontrer les sols limono-argileux ou argilo-limoneux, calcaires ou non de la catégorie MHCG - Des creux peuvent être également occupés par les sols de la catégorie FHCG

CRITERES* ENVIRONNEMENTAUX		STRATEGIE D'EPANDAGE*														
Risque	Evaluation	Produit*	Cultures	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	
Circulation verticale	Faible	Solide	Gde cult. d'aut.													
Ruissellement	Faible		Gde cult. de print.	(1)												(1)
Lessivage hivernal	Faible		Prairie													
Circulation latérale	Non	Liquide	Gde cult. d'aut.													
Pouvoir épurateur : Bon			Gde cult. de print.													
			Prairie	(2)												

OBSERVATIONS
- Faible risque bactériologique - Pas d'épandage fumier à l'automne sur sol inférieur à 20 cm de profondeur - Ponctuellement seront évités les zones avec mouillères, pente forte ou avec affleurement (1) fumier possible si prairie non retournée (2) produit liquide inapproprié du 15/11 au 29/02 sur prairie

* voir définition en annexe



Zone de montagne

EPANDAGE : Possible dès la reprise de végétation jusqu'au début de l'été	CATEGORIE DE SOLS	Aéré Superficiel de Colline Glaciaire
	Noms usuels	/



Photo : 39 Cl.Uxe 3
Réf. biblio : typologie 25, 39

Critère de reconnaissance	
<p> Sommet, pente Murgets constitués de blocs et pierres arrondis Affleurement de blocs morainiques possibles</p>	<p> Test de l'anneau</p> <p>la al</p>
<p> Pénétration difficile (pierrosité) Couleur : brun foncé à noir</p>	<p> Effervescence généralement</p>

Caractéristiques principales			
Texture de surface	argilo-limoneux à limono-argileux, humifère	pHeau	Médiane : 7,6 Bornes : 7 à 7,9
Profondeur	Inférieure à 20 cm	Réserve hydrique	35 mm pour 20 cm de profondeur
Hydromorphie	Néant	Signes particuliers	Blocs de taille parfois importante pouvant affleurer
Nature du sous-sol	Moraine		

OBSERVATIONS

- Les creux et bas de pente sont occupés par les sols généralement non calcaires et plus profonds.

CRITERES* ENVIRONNEMENTAUX		STRATEGIE D'EPANDAGE*												
Risque	Evaluation	Produit*	Cultures	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N
Circulation verticale	Faible	Solide	Gde cult. d'aut.											
Ruissellement	Faible		Gde cult. de print.											
Lessivage hivernal	Elevé		Prairie											
Circulation latérale	Non	Liquide	Gde cult. d'aut.											
Pouvoir épurateur : Faible			Gde cult. de print.											
			Prairie						(1)					

OBSERVATIONS

- Faible risque bactériologique
- Pas d'épandage de produit liquide sur sol très superficiel avec affleurement

(1) pas d'épandage si arrêt de la végétation en été (déficit hydrique)

* voir définition en annexe



Zone de montagne

EPANDAGE : Préférer les épandages de la fin du printemps au début de l'automne	CATEGORIE DE SOLS	Modérément Hydromorphe de Plateau
	Noms usuels	Terre lourde, terre forte, marne



Photo : 25 VE.Dom 1
Réf. biblio : typologie 25, 39, 70

Critère de reconnaissance	
Position haute dans le relief Présence possible de sorties d'eau ou mouillères dans les pentes	Test de l'anneau la a, al
Pénétration facile Couleur : brun à brun jaunâtre Tâches rouilles fines sous la couche de surface	Effervescence possible

Caractéristiques principales			
Texture de surface	Limono-argileux à argilo-limoneux	pHeau	de 6 à 7.8 (> 7.3 pour les sols calcaires)
Profondeur	Entre 55 et 60 cm	Réserve hydrique	100 mm pour 45 cm de sol et texture la
Hydromorphie	Modérée	Signes particuliers	Parfois caillouteux
Nature du sous-sol	Argile, marne, calcaire marneux		

OBSERVATIONS

- Ces sols occupent les sommets et pentes
- Les creux ou bas de pente peuvent être occupés par des sols plus limoneux de la catégorie MHP ou FHP
- Les sols de la catégorie ASP peuvent être rencontrés en sommet ou rupture de pente
- Parfois séchants en été (fentes de retrait visibles)

CRITERES* ENVIRONNEMENTAUX		STRATEGIE D'EPANDAGE*														
Risque	Evalua-tion	Produit*	Cultures	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	
Circulation verticale	Moyen	Solide	Gde cult. d'aut.													
Ruissellement	Selon pente		Gde cult. de print.											(1)		
Lessivage hivernal	Faible		Prairie							(2)						
Circulation latérale	Moyenne	Liquide	Gde cult. d'aut.													
Pouvoir épurateur : Moyen			Gde cult. de print.													
			Prairie													

OBSERVATIONS

- Attention au ressuyage des sols notamment en sortie d'hiver.
 - Respecter une distance minimum aux fossés.
 - Attention aux éventuelles sorties d'eau ou mouillères : précaution à prendre pour les zones situées en amont.
 - En cas d'hydromorphie très modérée, l'épandage sera possible pratiquement toute l'année.
- (1) enfouissement immédiat
(2) toute l'année si fumier composté

* voir définition en annexe



Zone de montagne

EPANDAGE : Préférer les épandages de la fin du printemps au début de l'automne	CATEGORIE DE SOLS	Modérément Hydromorphe de Colline Glaciaire
	Noms usuels	/



Photo : 39 Cl.Uxe 3
Réf. biblio : typologie 25, 39

Critère de reconnaissance	
Sommet, pente - Murgets, haies constituées de blocs arrondis - Mouillères et zones plus humides	Test de l'anneau a, al
Pénétration difficile Couleur : brun foncé à noir	Généralement pas d'effervescence

Caractéristiques principales			
Texture de surface	argileux, argilo-limoneux, humifère	pHeau	Bornes : 6.2 à 7.2 Médiane : 6.7
Profondeur	Autour de 35 cm	Réserve hydrique	65 mm pour 35 cm de profondeur
Hydromorphie	Modérée	Signes particuliers	Des sorties d'eau ou mouillères fréquentes
Nature du sous-sol	- Moraine		

OBSERVATIONS

- Dans les unités où domine cette catégorie peuvent être rencontrés des sols sains (catégorie ASCG) et/ou plus hydromorphes (catégorie FHCG).

CRITERES* ENVIRONNEMENTAUX		STRATEGIE D'EPANDAGE*														
Risque	Evaluation	Produit*	Cultures	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	
Circulation verticale	Faible	Solide	Gde cult. d'aut.													
Ruissellement	Selon pente		Gde cult. de print.	(1)										(1)		
Lessivage hivernal	Faible		Prairie							(2)						
Circulation latérale	Moyen à élevé	Liquide	Gde cult. d'aut.													
Pouvoir épurateur : Moyen à bon			Gde cult. de print.													
			Prairie													

OBSERVATIONS

- Attention au ressuyage des sols notamment en sortie d'hiver
- Respecter une distance minimum aux fossés (5 m)
- Attention aux éventuelles sorties d'eau, mouillères ou zones basses humides : précautions à prendre pour les épandages effectués à proximité

(1) enfouissement immédiat
(2) toute l'année si fumier composté

* voir définition en annexe



Zone de montagne

EPANDAGE : inapproprié sauf étude détaillée	CATEGORIE DE SOLS	Fortement Hydromorphe de Colline Glaciaire
	Noms usuels	/

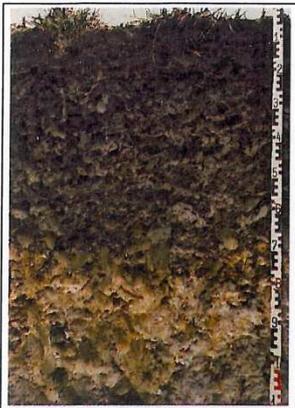


Photo : 39 Cl.Poi 2
Réf. biblio : typologie 25, 39

Critère de reconnaissance	
Bas de pente, creux, plus rarement en partie sommitale	Test de l'anneau a, al
Pénétration facile Couleur : noirâtre, tachetée de rouille	Généralement pas d'effervescence

Caractéristiques principales			
Texture de surface	argilo-limoneux à tourbeux	pHeau	Médiane : 6.9 Bornes : 6.1 à 7
Profondeur	Inférieure à 35 cm	Réserve hydrique	Sol engorgé
Hydromorphie	Forte	Signes particuliers	/
Nature du sous-sol	- Argile, moraine		

OBSERVATIONS
- Les sols de cette unité occupent principalement les zones basses du paysage - Ces sols correspondent aux zones de mouillères ou sorties d'eau dans l'unité où domine la catégorie Modérément Hydromorphe de Colline Glaciaire

CRITERES* ENVIRONNEMENTAUX		STRATEGIE D'EPANDAGE*												
Risque	Evaluation	Produit*	Cultures	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N
Circulation verticale	Faible	Solide	Gde cult. d'aut.											
			Gde cult. de print.											
			Prairie									(1)		
Lessivage hivernal	Sol engorgé													
Circulation latérale	Selon pente	Liquide	Gde cult. d'aut.											
			Gde cult. de print.											
			Prairie											
Pouvoir épurateur : Faible à inopérant														

OBSERVATIONS
- Respecter les distances aux fossés. - Il est préférable d'éviter totalement les épandages. (1) si fumier composté

* voir définition en annexe



Zone de montagne

EPANDAGE : Inapproprié sauf étude détaillée	CATEGORIE DE SOLS	Fortement Hydromorphe de Vallée
	Noms usuels	Sols de vallée



Photo : 39 Cl Ux 2
Réf. Biblio : typologie 25, 39

Critère de reconnaissance	
Réseau de fossés	Test de l'anneau
Pénétration facile Couleur : brun foncé à brun noir Taches rouilles dès la surface Hétérogène sous la couche de surface	Généralement pas d'effervescence

Caractéristiques principales			
Texture de surface	Argilo-limoneux à argileux	pHeau	Médiane : 6.5 Bornes : 5.5 à 7.3
Profondeur	Supérieure à 35 cm	Réserve hydrique	70 mm pour 35 cm de sol ressuyé
Hydromorphie	Forte	Signes particuliers	Parfois inondable Souvent humifère Parfois calcaire
Nature du sous-sol	Argile, varve, cailloutis...		

OBSERVATIONS

- Dans ce type de paysage, les sols « Modérément Hydromorphes de Vallée » peuvent être rencontrés ainsi que les sols « Aérés Profonds de Vallée » qui occupent les bourrelets de berge.

CRITERES* ENVIRONNEMENTAUX		STRATEGIE D'EPANDAGE*												
Risque	Evaluation	Produit*	Cultures	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	
Circulation verticale	Non	Solide	Gde cult. d'aut.											
Ruissellement	Entraînement latéral important		Gde cult. de print.			(1)						(2)		
Lessivage hivernal	Sol engorgé		Prairie			(3)								
Circulation latérale	Selon inondation et / ou engorgement	Liquide	Gde cult. d'aut.											
Pouvoir épurateur : Bon à moyen			Gde cult. de print.		(4)									
			Prairie											

OBSERVATIONS

- Respecter les distances aux fossés, cours d'eau...
- Si zone inondable, pas d'épandage sur prairie avant juin et enfouissement immédiat pour la fertilisation des cultures des cultures.

- (1) enfouissement immédiat en zone inondable
- (2) si fumier composté
- (3) enfouissement rapide
- (4) juste avant semis

* voir définition en annexe



Zone de montagne

K, c

EPANDAGE : Possible dès la reprise de végétation jusqu'au début de l'été	CATEGORIE DE SOLS	Aéré Superficiel de Plateau
	Noms usuels	Sols séchants, « communaux »



Photo : 25 VE.Ouv.1
Réf. biblio : typologie 25, 39

Critère de reconnaissance	
Position haute dans le relief	Test de l'anneau
Brun foncé à brun	Généralement pas d'effervescence

Caractéristiques principales			
Texture de surface	Limono-argileux à argilo-limoneux	pHeau	Médiane : 6.5 borne : 6.1 - 7.4
Profondeur	Inférieure à 20 cm	Réserve hydrique	40 mm pour 20 cm de profondeur
Hydromorphie	Néant	Signes particuliers	Affleurements rocheux possibles
Nature du sous-sol	Banc de calcaire dur		

OBSERVATIONS

- Dans les unités où domine cette catégorie, les creux ou bas de pente sont plus profonds.
- Les affleurements rocheux sont possibles, fréquents dans les unités "c".

CRITERES* ENVIRONNEMENTAUX		STRATEGIE D'EPANDAGE*												
Risque	Evaluation	Produit*	Cultures	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N
Circulation verticale	Elevée	Solide	Gde cult. d'aut.											
Ruissellement	Faible à fort		Gde cult. de print.											
Lessivage hivernal	Elevé		Prairie											
Circulation latérale	Non	Liquide	Gde cult. d'aut.											
Pouvoir épurateur : Faible à inopérant			Gde cult. de print.											
			Prairie					(1)						

OBSERVATIONS

- Risque bactériologique élevé.
- Pas d'épandage sur sol très superficiel avec affleurement (unité c).

(1) fumier possible si prairie non retournée

* voir définition en annexe



Zone de montagne

Annexe 2 : Méthodologie de détermination de l'indice S (sol) en milieu forestier.

Sols forestiers

Vulnérabilité hydrogéologique

Les sols modifient peu ou prou le comportement hydraulique des formations géologiques qui les portent. Plusieurs facteurs interviennent dans cette action : l'épaisseur, la proportion de fines (limons fins et argiles) et la nature minéralogique de ces fines. Les matières organiques jouent un rôle non négligeable dans la mesure où elles modifient la vitesse de percolation. Dans les sols forestiers, les MO sont de type litière et leur rôle ne dépend pas de la nature du sous-sol mais du type de végétation : les feuillus donnant des litières biologiquement actives permettant le développement de colloïdes ayant une fonction éponge assez forte. Les résineux donnent des litières fibreuses dont le rôle hydraulique est moindre (peu de colloïdes « éponges », faible capacité en eau).

Dans le massif jurassien, la lithodépendance des sols est très marquée et on peut à partir d'une bonne connaissance des faciès déterminer la probabilité de vulnérabilité des formations sol sous-sol.

Plusieurs lois régissent la répartition des forêts dans le massif jurassien :

Loi de géographie humaine : les massifs forestiers sont généralement développés sur les secteurs à vocation agricole moindre ou impossible (forte pente, sol minces ou discontinus = ruptures, érosion, faiblesse de la rétention d'eau, exposition au gel). Les sols agricoles sont par contre modifiés par les cultures (outre l'épierrement qui a diminué la porosité héritée, le lessivage des particules fines qui est accentué par les labours et autres façons culturales entraîne un colmatage avec une nette diminution de la vitesse de ressuyage. Par contre dans les zones humides, les drainages et autres aménagements hydrauliques accélèrent la circulation de l'eau.

Si on dispose des cartes topo antérieures à 1970, la répartition des forêts est assez bien corrélée avec les secteurs à potentiel non agricole. À partir de 1970, l'utilisation des terres change sensiblement en raison de la déprise agricole qui voit le développement de friches (coteaux) et de forêts plantées dans d'anciennes terres agricoles. Cela concerne aussi les alpages et pré-bois qui régressent aujourd'hui au profit d'une végétation fermée (forêts).

Une exception de taille : le Revermont. Dans le Revermont le retour à la friche et à l'emboisement date de la crise phylloxérique. Ainsi toutes les pentes d'éboulis du Revermont autrefois cultivées en vignes sont aujourd'hui couvertes de forêts et bosquets. Ainsi la corrélation « forêt et zone non agricole » disparaît. Même les pentes marneuses du sud Jura, mais aussi la région entre Salins et Quingey sont occupées aujourd'hui occupées par des bois et forêts qui ont remplacé vignes et vergers dès le début du vingtième siècle.

La vallée de la Loue a subi la même évolution : les forêts de résineux devenus majoritaires correspondent en fait à des vignes et vergers disparus à la fin du 19^e siècle. (Les cerises et le kirsch de Mouthier Haute pierre étaient réputés).

La loi de topodépendance.

Ce processus répartit les sols en chaînes qui suivent le relief : l'érosion rajeunit systématiquement les sommets et les pentes au profit d'un empatement (comblement) des zones en creux, combes et bas-fonds et de toute zone subhorizontale où l'atterrissement peut se faire (dolines, vires, méplat). On peut donc dire que selon la topographie, les sols seront plus ou moins épais. L'épaisseur définit une partie importante de la fertilité et le rôle protecteur vis à vis des zones profondes. Dans la région, les sols profonds sont généralement exploités (cultivés) et les sols minces ou ruptiques (discontinus) sont réservés traditionnellement à la friche et à la forêt. Et ce, y compris dans les massifs montagneux escarpés.

Lorsque les combes, les dolines et les bas-fonds sont plantés de bois, ceux-ci poussent vite et donnent des forêts rapidement exploitables mais de moindre qualité. Leur développement végétatif est rapide. Ce point tend à maintenir la répartition traditionnelle entre cultures et forêts.

Dans les forêts, le principe de topodépendance s'applique d'autant plus que le mode d'exploitation forestière ne modifie pratiquement pas la redistribution des particules et des solutions dans le cycle superficiel proche de la surface.

Donc à données granulométriques égales, l'épaisseur du sol constitue le facteur déterminant le rôle protecteur ou non vis-à-vis du sol. La vulnérabilité du sous-sol est d'autant plus grande que l'épaisseur du sol est faible. Les sommets de relief sont donc plus vulnérables que les zones en creux (combes, bas-fonds).

Faciès et types de sols.

La connaissance de la composition minéralogique des faciès permet de se faire une idée précise du type dol qui naît de l'altération de ce faciès. Le paramètre le plus important est la probabilité de présence des « argiles » dans les produits d'altération de chaque roche ou faciès. On peut entendre le terme argile dans son sens granulométrique (particule de taille inférieure à deux microns) ou minéralogique (silicates hydratés d'alumine à structure en feuillets). Généralement c'est le terme granulométrique qui est utilisé et il faut le regretter.

Pour la présente note, j'ai donc utilisé le terme « argile » comme synonyme de « fines » ou particules de taille fine ayant une capacité de fixation d'autant plus grande que leur surface développée est grande. Mais ces particules peuvent être d'autant plus facilement entraînées par l'érosion que leur taille est petite. On rejoint donc la notion de topodépendance. Il faut compléter l'information par la donnée suivante : sachant que les particules fines peuvent participer à des colmatages de fissures dès lors qu'elles sont

entraînées « verticalement » par l'eau. Ce colmatage diminue notablement la vulnérabilité d'un calcaire fissuré. C'est le cas des karsts *fermés* moins vulnérables que les karsts *ouverts* (très vulnérables). Ce point a été retenu pour la détermination préalable de vulnérabilité : présence de particules fines, colmatages éventuels de faciès de calcaires fissurés.

Voici un résumé par grands faciès / étage du log stratigraphique de la chaîne jurassienne.

On ajoutera les moraines et formations détritiques récentes (alluvions et colluvions de pentes).

Keuper et Rhétien : série marneuse et marno calcaire donnant par altération des sols « argileux » peu ou pas pierreux. Souvent minces (inf à 30 cm) ces sols reposent sur des niveaux où le gradient d'altération assure une imperméabilité quasi totale. Très bonne protection des aquifères sous-jacents.

Affleurements principaux : Revermont, Salins Nans sous Sainte Anne.

Correspondance

Texture : argile indice 1 /pierrosité inf à 15% indice 1 (sauf pour certains affleurements du Rhétien où la pierrosité peut atteindre 25 % indice 2).

Note : pour ces sols sur marnes, il faut prendre l'épaisseur sup à 100 en confondant les sols et les altérites supérieures.

Indice de Vulnérabilité : S1.

Sinémurien :

Calcaires gris, limoneux à gryphées. Présence MO ou d charbon. Donne des limons et très peu d'argiles à l'altération. Particules facilement entraînées par l'érosion. Altération rapide donnant des sols souvent épais, mais très sensibles au rajeunissement dans les pentes.

Protection des aquifères : bonne dans les sols épais, médiocre dans les sols minces.

Affleurements peu fréquents : Revermont.

Correspondance

Texture : limons et silts indice 2 /pierrosité qui peut atteindre 35 % indice 2).

Indice de Vulnérabilité : S3, en faible pente ou en plat

Indice de vulnérabilité : S4, dans les pentes rajeunies.

Lias marneux : (Pliensbachien Toarcien)

Série marneuse et quelques marno calcaires assez « sableux » donnant par altération des sols limono argileux, à passées sableuses. Souvent épais (sup à 35 cm) ces sols ont une pierrosité faible. Assez bonne protection des aquifères sous-jacents.

Affleurements principaux : Haute Saône, Baume les Dames, piémonts

Correspondance

Texture : limons et argiles indice 2 /pierrosité environ 15 % indice 1.

Indice de Vulnérabilité : S2.

Calcaires oolithique (Aalénien, Bajocien inf)

Série de calcaires peu structurés, facilement démembrés et donnant à l'altération des limons grossiers et des sables fins. La teneur en fer génère une grande quantité de particules fines d'oxydes donnant une allure « argileuse » mais dont le coefficient de fixation reste faible. À classer dans les silts et limons. Épaisseur forte (sup à 35 cm) dans les creux (comblement), irrégulière dans les fissures et très faible (inf à 10 cm) dans les pentes en raison de la vulnérabilité à l'érosion.

Affleurements : haute Saône, Besançon, partie médiane du Revermont,

Correspondance

Texture : limons indice 2 /pierrosité environ 35 % indice 2.

Indice de Vulnérabilité : S3.

Marnes « vésuliennes ».

Marnes sableuses et silteuses donnant de sols limoneux très fins, et très sensible à l'érosion. Sols épais dans les points en creux et les bas-fonds, très minces voire absent dans les pentes. Mais la formation reste globalement peu perméable et protège les niveaux sous-jacents. Ce faciès est souvent absent dans la série bajocienne (en raison de variation latérales plus calcaires).

Correspondance

Texture : limons argileux indice 2 /pierrosité moins de 15 % indice1.

Indice de Vulnérabilité : S2.

Grande oolithe.

Niveau très poreux du Bajocien formant de puissants affleurements. S'altère assez rapidement en donnant des particules limoneuses et des sables fins. En fait c'est le résidu de décarbonatation des oolithes ou noyau qui reste présent dans le sol. Peu ou pas d'argiles minérales ce qui définit des Coefficients de fixation très faibles.

Sols épais dans les combes et très minces voire ruptiques dans les pentes. Au droit des affleurements la pierrosité est forte (sup à 60%, mais dans les systèmes colluvionnés, le pourcentage de cailloux reste très faible (inf à 15%). Il faut donc distinguer les zones de piémont immédiat des affleurements (éboulis) et les zones de colluvionnement de fines (limons de plateau ou de remplissage).

Correspondance

Éboulis : texture limono sableuse indice 3 / pierrosité >60% indice 3 sol mince.

Vulnérabilité : S4

Colluvions : texture limoneuse indice 2 pierrosité inf à 15% indice 1. Sol épais

Vulnérabilité S2

Entablement calcaire, sans limons de plateau : sol mince

Vulnérabilité S4

Bathonien

Calcaire massifs souvent ferrugineux donnant par altération des limons « rougeâtres » et quelques argiles héritées (chlorites ferrugineuses). La ferrolyse entraîne souvent la décarbonatation et les sols sont peu structurés ; mais assez résistants à l'érosion en raison de la prise en masse des limons fins. Seuls les reliefs très prononcés subissent un rajeunissement des sols. Le colluvionnement donne des remplissages importants.

C'est souvent la roche mère des entablements du premier plateau. Sur ce plateau, les bois et forêts couvrent souvent les zones de sols minces et quelques dolines.

Correspondance

Éboulis : texture limoneuse indice 3 / pierrosité <60% indice 2 sol assez mince.

Vulnérabilité : S3

Colluvions (limons de plateau) : texture limono argileuse indice 1 pierrosité inf à 15% indice 1. Sol épais

Vulnérabilité S2

Entablement calcaire, sans limons de plateau : sol mince

Vulnérabilité S4

Callovien

Souvent affleurant sous le faciès « dalle nacrée » il est aussi présent sous forme de calcaires ferrugineux, le Callovien présente les mêmes caractéristique que le Bathonien mais la proportion d'argiles est plus forte (chlorites et illites) mais aussi celle des sables (au détriment de la fraction limoneuse qui est toujours inf à 30 %)

Correspondance

Texture limono argileuse indice 1 pierrosité de 15 à 30 % indice 2. Épaisseur irrégulière.

Vulnérabilité S2

Oxfordien sensu stricto = marnes

Ce faciès classique est marneux avec une proportion d'argiles de 60 % (mais dont seulement une moitié est constituée d'argiles minéralogiques de type illites et quelques chlorites gonflantes. De ce fait le coefficient de fixation des sols est moindre qu'en sols à argiles vraies. Dans les creux (stations confinantes) la transformation des argiles héritées en argiles gonflantes est assez fréquente. Cela donne des sols argileux, imperméables. Dans l'estimation de la vulnérabilité, l'épaisseur du sol est en fait l'épaisseur sol +altérites : elle dépasse souvent 1 mètre. La protection des niveaux sous-jacents et donc très bonne.

Correspondance

Texture : argile indice 1 /pierrosité inf à 15% indice 1. Épaisseur sup à 1 m

Indice de Vulnérabilité : S1.

Argovien Rauracien

Faciès de calcaires irréguliers (alternance de calcaires durs et de calcaires tendres souvent ferrugineux ou argileux). De petites passées fines donnent une granulométrie plus limono argileuse dans certains affleurements. Le sommet de la série se termine par des marnes sableuses (autrefois attribuées au Séquanien)

Altération rapide avec fort reliquat de limons ferrugineux et d'argiles « granulaires » (kaolinites, chlorites). Particules très sensibles à l'érosion avec redistribution : les pentes portent des sols très minces (parfois ruptiques = discontinu avec des plaques de calcaires lissé) et les combes, creux et bas-fonds de sols épais, parfois hydromorphes lorsque la décarbonatation est totale.

Correspondance

Texture : limon plus ou moins argileux : indice 2 /pierrosité irrégulière mais souvent sup à 30% indice 2. Épaisseur 0-20

Indice de Vulnérabilité : S3.

Kimmeridgien

Calcaires massifs à rares passées de fines notamment dans la partie inférieure (attribuée autrefois au Séquanien). Rapidement les calcaires massifs forment des reliefs très marqués (falaises) avec talus d'éboulis. Sur les entablements se développent des surfaces à dolines qui sont progressivement comblées par les produits d'altération. Mais les sols demeurent de faible épaisseur, à dominante limoneuses et parfois des passées sableuses remarquables.

Correspondance

Texture : limon plus ou moins grossier : indice 2 /pierrosité faible (sauf dans les éboulis) mais souvent sup à 30% indice 2. Épaisseur 0-50 dans les combes et inf à 10 cm dans les pentes.

Indice de vulnérabilité dans les éboulis : S4.

Indice de vulnérabilité dans les combes : S2

Indice de vulnérabilité sur les entablements calcaires sans limons de plateau : S3

Portlandien

Calcaire fins (sublithographiques) donnant un faible reliquat de décarbonatation constitué de limons et de sables fins. Les argiles sont généralement absentes de la granulométrie. Les particules sont lentement structurés et de ce fait facilement colluvionnées : elles forment des sols épais dans les creux et les combes mais jamais dans les pentes où les forêts sont généralement bien développées. Le relief formé par ces calcaires massifs alimentent des éboulis et colluvions de pentes caractéristiques du paysage haut jurassien ;

Correspondance

Texture : limon plus ou moins sableux : indice 3 /pierrosité irrégulière mais souvent sup à 30% indice 2. Épaisseur 0-50 dans les combes et inf à 10 cm dans les pentes.

Indice de Vulnérabilité dans les pentes : S4.

Indice de vulnérabilité dans les combes : S2

Indice de vulnérabilité sur les entablements calcaires sans limons de plateau : S3

Purbeckien

Petit niveau qui reste le plus souvent anecdotique et joue un rôle mineur dans les sols. Il est constitué de calcaires à grains fins et d'argiles « granulaires » ainsi que des calcaires saumâtres à silts. Les produits d'altération sont le plus souvent mêlés aux produits d'altération des autres formations qui encadrent cet étage.

Correspondance

Texture : limon: indice 2 /pierrosité très faible : indice 1. Épaisseur 0-20 dans les combes et inf à 10 cm dans les pentes.

Indice de Vulnérabilité : S3.

Valanginien : marbre batard

Cette roche à grain fin est marquée par une minéralisation post diagénétique donnant l'allure de marmorisations. Ces calcaires s'altèrent assez rapidement sous climat lessivant pour donner des sols limoneux, (très pauvres en argile) et ferrugineux. Très sensibles à l'érosion ces sols sont épais dans les combes et les creux mais très minces dans les pentes.

Les affleurements sont rarement importants.

Correspondance

Texture : limon: indice 2 /pierrosité sup à 30% indice 2. Épaisseur 0-40

Indice de Vulnérabilité : S2.

Valanginien « roux »

Calcaire « roux » riches en glauconie et autres argiles héritées. Les sols sont minces, argileux emballant des cailloux de petite taille. Les passées les plus riches en fines sont souvent appelées marnes (marnes d'Arzier) en fait il s'agit le plus souvent d'un remaniement de fines.

Très peu sensibles à l'érosion, les sols donnent par évolution verticale des zones colmatées parois hydromorphes. La circulation de l'eau est anarchique et donne naissance à de nombreux suintements.

Correspondance

Texture : argileux et argilo limoneux : indice 1 /pierrosité irrégulière 25 %. Indice 2. Épaisseur 0-50.

Indice de Vulnérabilité : S2.

Hauterivien

Marnes et marno calcaires à argiles « micacées » (glaucanie, chlorites, illites) : les sols sont souvent argileux mais avec un pourcentage de sables assez élevé et des multitudes petits graviers. La pierrosité est donc forte mais de petite taille : rares blocs. Particules peu sensibles à la migration même en pente marquée. Sol d'épaisseur moyenne à forte sans jamais dépasser 40 cm.

Correspondance

Texture : limon argileux et argiles limoneuses : indice 1 /pierrosité irrégulière mais souvent sup à 30% indice 2. Épaisseur 40 à 60 (inclut la zone d'altération)

Indice de vulnérabilité : S1

Barrémien :

Calcaire à grain grossier (sableux) et limoneux (siltstone des auteurs anglais). Faible pierrosité mais rares argiles. Sols souvent épais et peu colluvionnés.

Correspondance

Texture : limon plus ou moins sableux : indice 2 /pierrosité : 20 % indice 2. Épaisseur 0-50.

Indice de vulnérabilité : S2

Moraines glaciaires :

Très sableuses et silteuses elles ne comportent pratiquement pas d'argiles minéralogiques. Les argiles granulométriques sont souvent calcaires et donnent à l'altération des couches plastiques, peu perméables mais sujettes au fluage.

Très bon réservoir d'eau, ces zones morainiques sont le plus généralement couvertes de prairies et de cultures, notamment dans la haute chaîne et les plateaux. Les quelques forêts qui se sont développées sont de médiocre qualité et de moindre importance. La vulnérabilité des sols morainiques est peu marquée car la vitesse de percolation reste faible.

Sols sableux avec nombreux galets usés, et lentilles de fines calcitiques imperméables.

Correspondance

Texture : sable limoneux : indice 3 /pierrosité irrégulière mais souvent sup à 30% indice 2. Épaisseur 0-20.

Indice de Vulnérabilité : S2.

Annexe 3 : Comparaison des méthodes RISK et PaPRIKa sur l'exemple du BAC de la source de la Papeterie et source de l'Ain à Bourg de Sirod (39).

1 Système Karstique Ain-Papeterie - Méthode RISK

1.1 Présentation de l'ensemble Ain-Papeterie

La source de l'Ain et la source de la Papeterie se situent à l'Est de Champagnole, respectivement sur les communes de Conte et de Sirod.

L'ensemble Ain-Papeterie est étudié depuis plusieurs années et à la suite de nombreux traçages, il a été mis en évidence, que la source de l'Ain et la source de la Papeterie étaient les exutoires d'un même ensemble drainant le plateau de Nozeroy. La source de l'Ain est reconnue comme étant le trop plein de ce système.

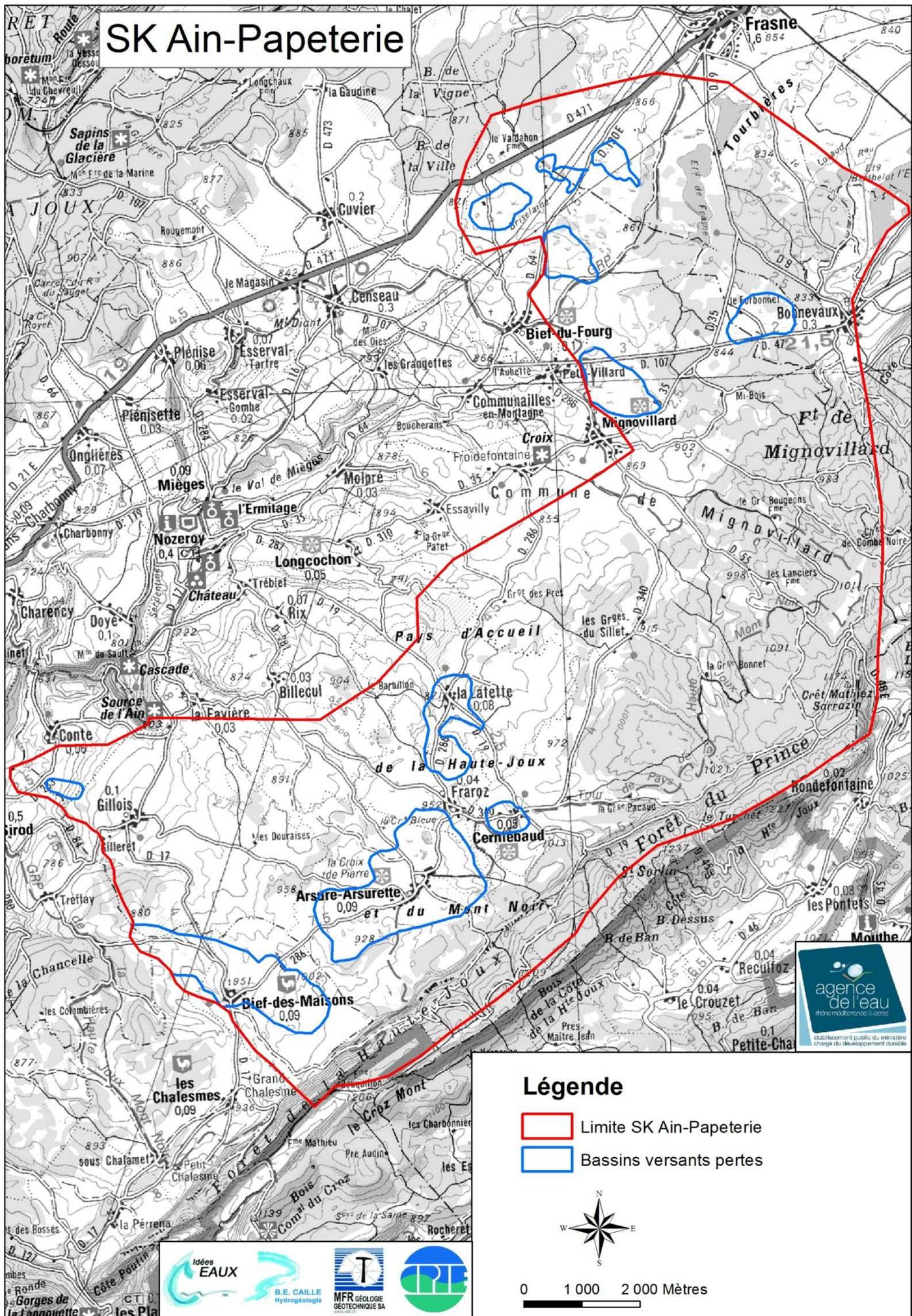
Les différents calculs du bilan hydrologique (SRAE, BE Caille) donnent une surface estimée de bassin d'alimentation entre 130 km² et 190 km² alors que la surface dessinée à partir des données de traçage est de 110 km². Pour expliquer cette différence, l'hypothèse principale est une alimentation par le Nord-Est masquée par les formations superficielles fluvioglaciales, à la limite des versants du Lison, du Dugeon et de la Loue. L'hypothèse la plus probable est une alimentation par des circulations sous-glaciaire, par le biais d'une ancienne vallée du Doubs occupée aujourd'hui par le Dugeons et les marais de Frasne.

D'après les études de débits menées sur le Dugeon, il est possible qu'une partie du secteur de Frasne-Bonnevaux alimente le bassin versant de l'Ain-Papeterie. C'est pourquoi, dans le cadre de cette étude, les limites connues dessinées dans les études antérieures ont été modifiées sur ce secteur pour intégrer la zone de tourbière. Cette hypothèse devra être validée par des traçages, entre-autre depuis l'étang de l'Entonnoir (Bouverans) avec des conditions de sécheresse favorables à l'infiltration directe des eaux vers le milieu souterrain.

Le bassin d'alimentation ainsi dessiné a une surface de 121 km² (voir figure suivante).



SK Ain-Papeterie



Légende

- Limite SK Ain-Papeterie
- Bassins versants pertes



0 1 000 2 000 Mètres



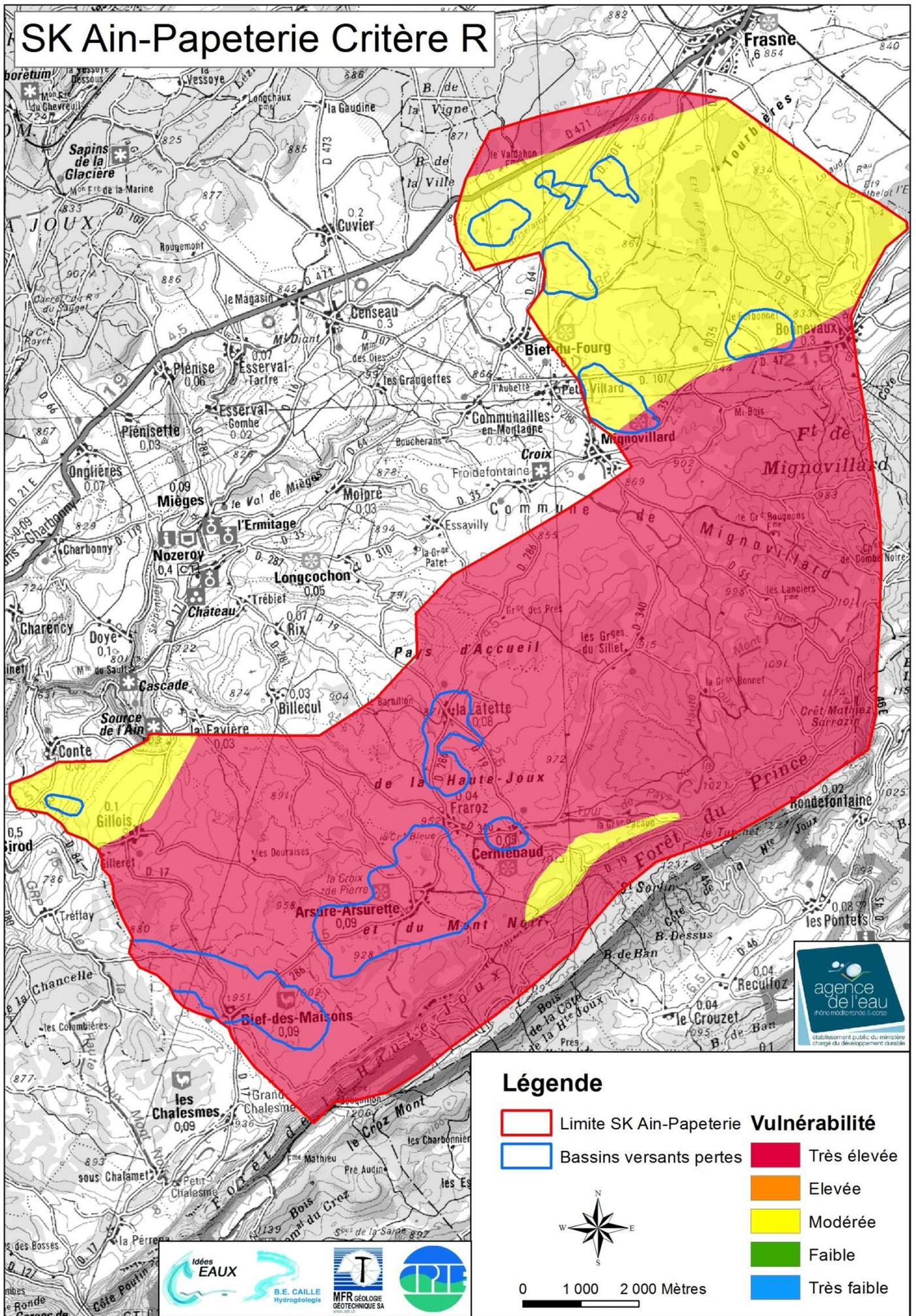
Critère R : Roche aquifère

Les sources sont principalement alimentées par les calcaires massifs du Jurassique supérieur, le Portlandien. Il se présente sous forme de bancs massifs, fracturés et karstifiés. Ils seront donc cartographiés avec l'indice 4.

Le Crétacé affleure à certains endroits. Les traçages ont démontrés que ces calcaires peuvent communiquer avec le niveau Portlandien. Ils seront donc cartographiés avec l'indice 2.

Critère R : Nature de la Roche aquifère		
Critère	Caractéristiques	Indice
R ₀	Marnes (35-65% de minéraux argileux) – Faibles propriétés aquifères	0
R ₁	Marnes – Calcaires (35-65% de minéraux argileux) – faibles écoulements	1
R ₂	Calcaires avec intercalation de niveaux marneux, % de minéraux argileux < 10-25 %	2
R ₃	Calcaires massifs et/ou dolomites avec bancs épais sans fractures, calcaire en bancs minces avec fractures (fracturation homogène), écoulements souterrains faciles et rapides	3
R ₄	Calcaires massifs et/ou dolomites avec une forte intensité de fracturation et de karstification, écoulements souterrains faciles et rapides, contamination rapide	4

SK Ain-Papeterie Critère R



Légende

- | | | |
|---|-------------------------|---|
|  | Limite SK Ain-Papeterie | Vulnérabilité |
|  | Bassins versants pertes |  Très élevée |
| | |  Elevée |
| | |  Modérée |
| | |  Faible |
| | |  Très faible |



0 1 000 2 000 Mètres



Critère I : Conditions d'infiltration

Comme pour la méthode RISK, la carte du Critère I a été réalisée suivant ces différentes étapes :

Découpage du MNT (model numérique de terrain, maille 50m x 50m) de Franche-Comté par les contours du système karstique Ain-Papeterie ;

Calcul des pentes et classification en 4 classes (Cf. tableau ci-dessous)

Ré-échantillonnage de ce résultat pour obtenir une maille de 5 par 5 mètres ;

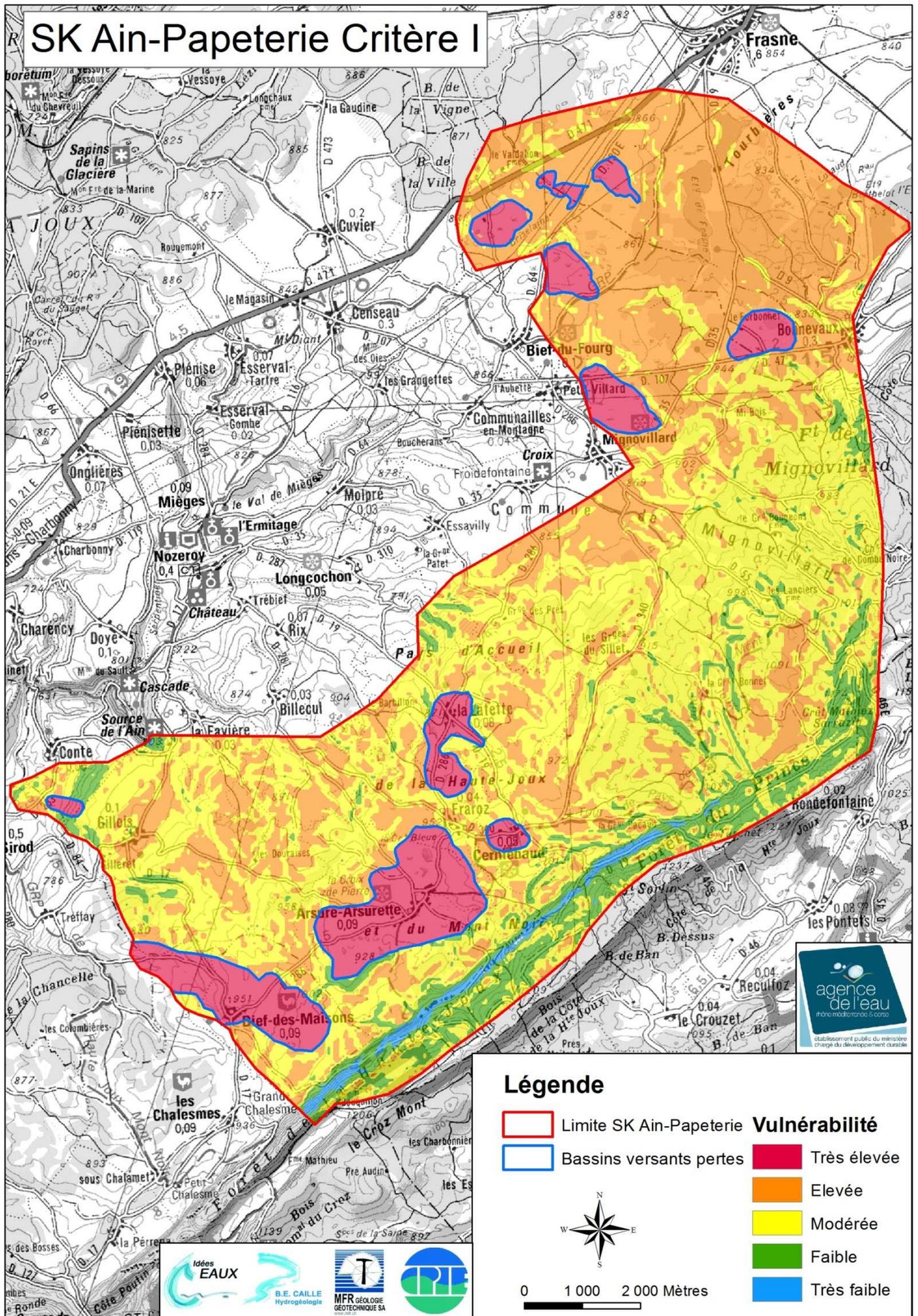
Relevé des informations de surface de type vallées sèches, dolines et bassins versants de pertes et affectation des valeurs RISK (vallée sèche = 2, lapiez = 3 et perte active = 4) ;

Finalisation de la couche Critère I avec les pentes classées en 4 classes (Cf. tableau ci-dessous) et l'interprétation des informations de surface.

Ainsi, les cinq classes I suivantes ont été définies :

Critère I : Conditions d'infiltration		
Critère	Caractéristiques	Indice
I ₀	Pente très forte > 50 %	0
I ₁	Pente forte 15 - 50 %	1
I ₂	Pente modérée 5 - 15 % et vallées sèches	2
I ₃	Faible pente 0 - 5 % et lapiez	3
I ₄	Pertes actives et leur bassin versant, accidents tectoniques (failles majeures et alignement de dolines)	4

SK Ain-Papeterie Critère I



Légende

- | | | |
|---|-------------------------|---|
|  | Limite SK Ain-Papeterie | Vulnérabilité |
|  | Bassins versants pertes |  Très élevée |
| | |  Elevée |
| | |  Modérée |
| | |  Faible |
| | |  Très faible |



0 1 000 2 000 Mètres



Critère S : Sol et couverture protectrice

La couche S, couverture pédologique et géologique, a été réalisée à partir des cartes d'aptitude des terrains agricoles à l'épandage du GRAP sur le plateau de Nozeroy, des cartes d'aptitude des terrains agricoles à l'épandage de fertilisants organiques de la Chambre d'agriculture à l'échelle 1/110 000^{ème} et de la carte géologique.

La carte des sols a donc été réalisée à partir de la classification suivante :

Type de recouvrement géologique et de sols*	Classification RISK
Moraines > 5 m	0
1m < Moraines < 5 m	1
1 8 8M 12	2
5 9 13	3
6 6k 7 k, c	4

*Les fiches descriptives des sols de la chambre d'agriculture sont présentées en annexe

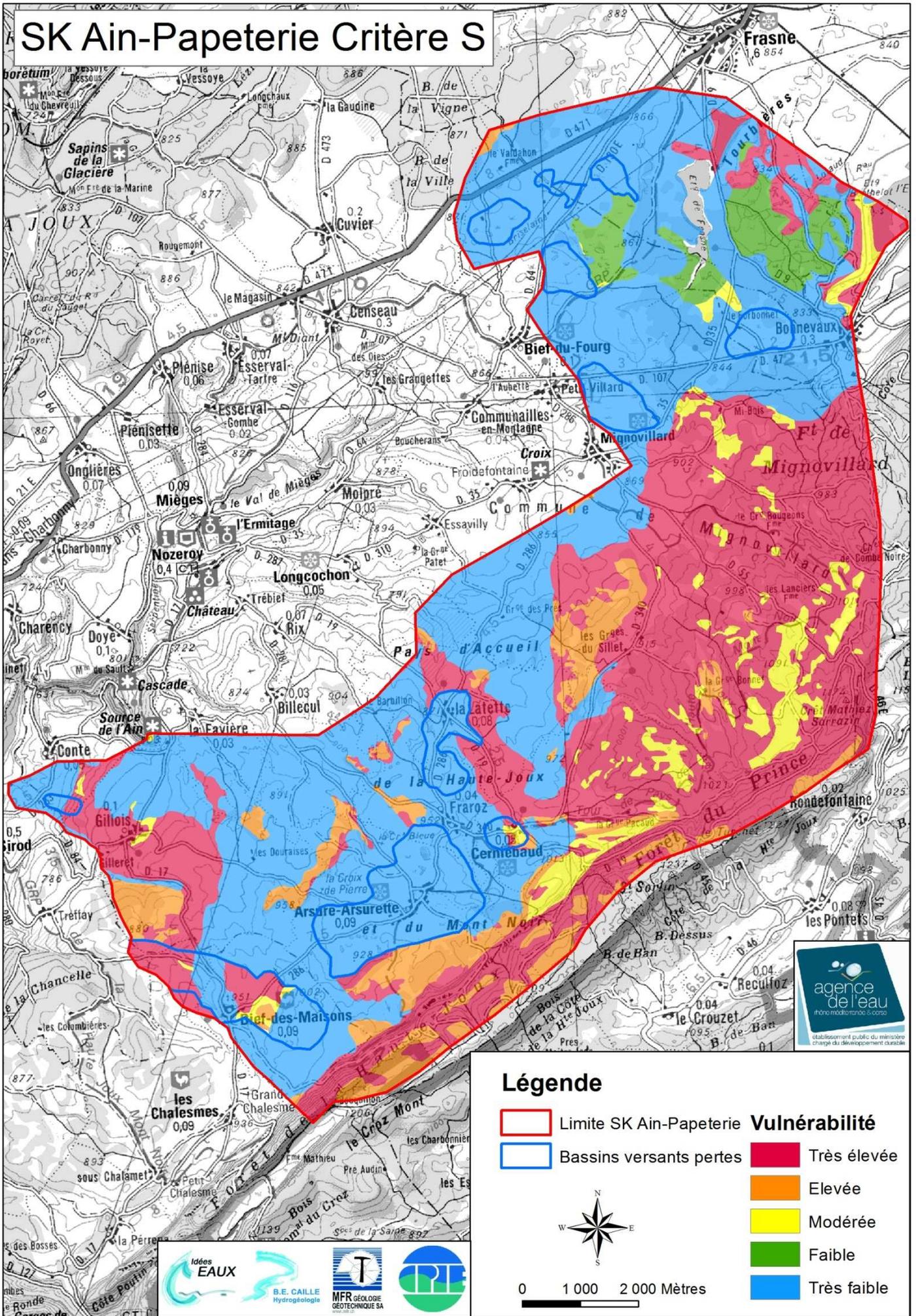
Cas particulier des forêts

Les sols forestiers ne sont pas cartographiés dans les cartes d'aptitude des terrains agricoles à l'épandage. Cependant, d'après Y. Hérody, pédologue dans le jura, il est possible de d'extrapoler la couverture pédologique forestière à partir de la géologie, de la morphologie du terrain (pente, combe,...) et de la couverture végétale et de la classer suivant les critères définis plus haut (Cf. annexe).

Ainsi, sur les calcaires portlandiens, l'indice du critère S est S2, S3 ou S4 en fonction de la pente. Dans la forêt de Mignovillard et la Forêt du Prince, les sols ont été classés en S2 dans les combes et en S4 pour le reste car une grande partie de ces forêts sont en lapiez.

Afin de mettre en évidence les différences entre la méthode PaPRIKa et la méthode RISK pour cet exemple, le bassin versant des pertes ne sera pas cartographié avec le critère P comme expliqué précédemment.

SK Ain-Papeterie Critère S



Légende

- | | | | |
|---|-------------------------|---|-------------|
|  | Limite SK Ain-Papeterie | Vulnérabilité | |
|  | Bassins versants pertes |  | Très élevée |
| | |  | Elevée |
| | |  | Modérée |
| | |  | Faible |
| | |  | Très faible |



0 1 000 2 000 Mètres



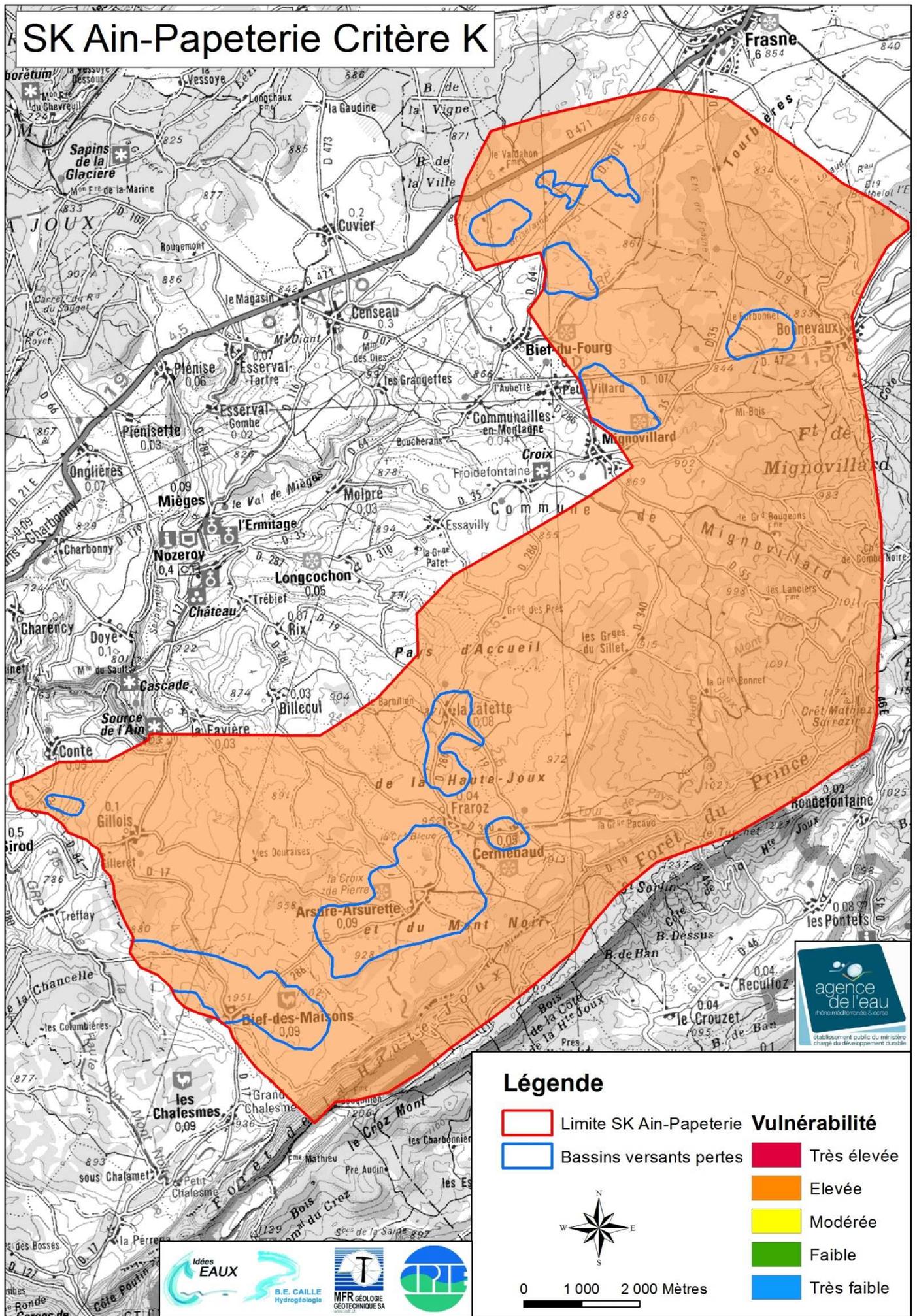
Critère K : Karstification

Les affleurements de Jurassique supérieur montrent un réseau de fracture assez développé. Les ouvertures sont centimétriques à décimétriques. De nombreux lapiaz sont présents dans la forêt de Mignovillard, ainsi que des gouffres.

Le critère de karstification est choisi homogène pour l'ensemble, $k = 3$.

Critère K : Karstification		
Caractéristiques		Indice
K ₀	Aquifère plus ou moins fissuré	0
K ₁	Aquifère fissuré mais sans karstification	1
K ₂	Réseau karstique peu développé ou mal connecté avec la surface	2
K ₃	Réseau karstique bien développé et plus ou moins connecté avec la surface	3
K ₄	Réseau karstique très bien développé et connecté avec la surface	4

SK Ain-Papeterie Critère K



Légende

- | | | |
|---|-------------------------|---|
|  | Limite SK Ain-Papeterie | Vulnérabilité |
|  | Bassins versants pertes |  Très élevée |
| | |  Élevée |
| | |  Modérée |
| | |  Faible |
| | |  Très faible |



0 1 000 2 000 Mètres



Indice global de vulnérabilité Ig

L'indice global de vulnérabilité est calculé à partir de la formule suivante :

$$I_g = 0,15R + 0,4I + 0,25S + 0,2K$$

→ R, I, S et K correspondent à la valeur des critères indexés.

La vulnérabilité est alors reclassifiée en 5 catégories :

Reclassification	Indice	Vulnérabilité
3,2 - 4	4	Très élevée
2,4 - 3,19	3	Élevée
1,6 - 2,39	2	Modérée
0,8 - 1,59	1	Faible
0 - 0,79	0	Très faible

Résultat de la méthode RISK

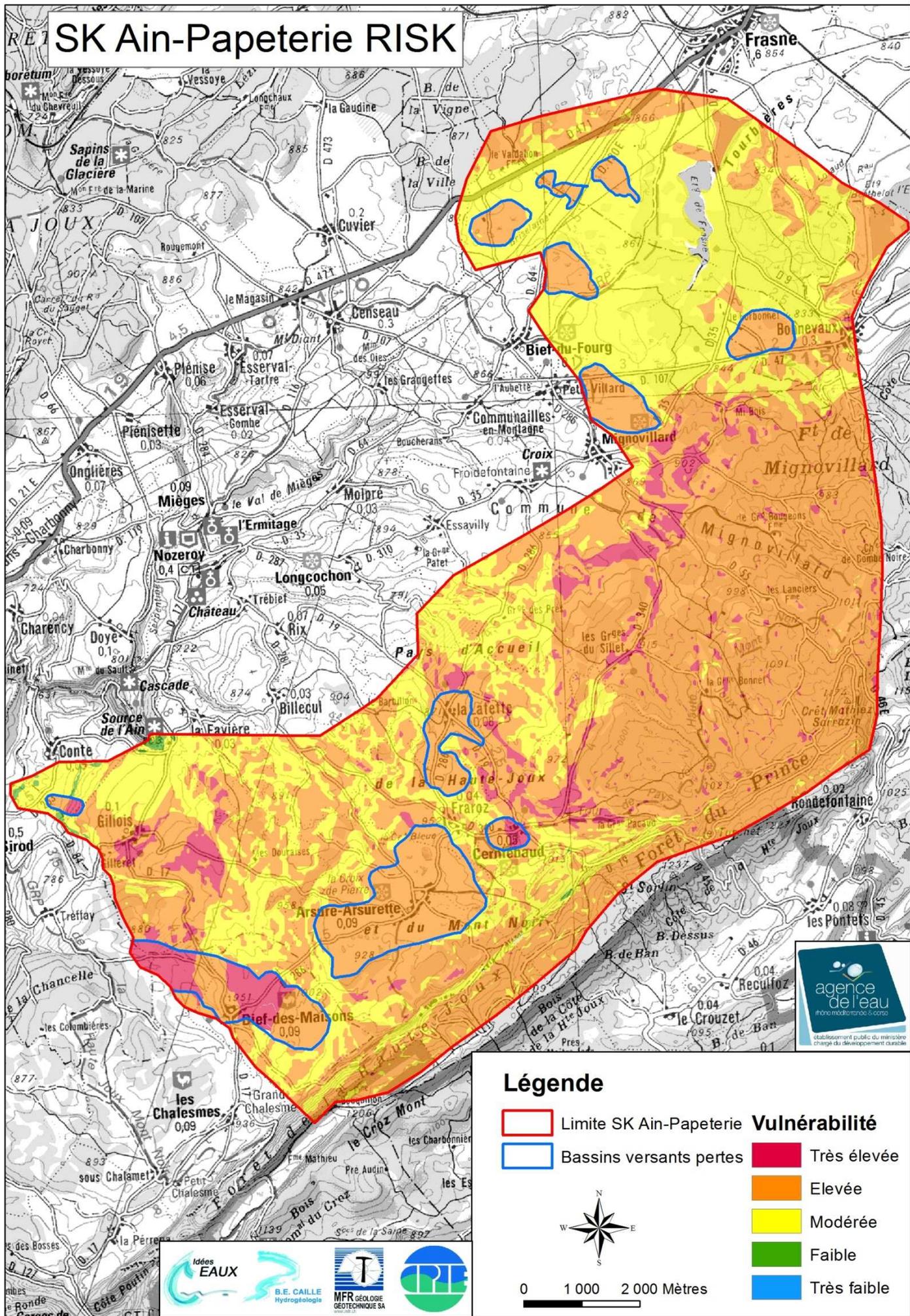
La vulnérabilité intrinsèque du système karstique Ain-Papeterie se répartie entre 4 classes :

Vulnérabilité	Surface en km ²	Proportion
Très élevée	6,97	5,81 %
Élevée	72,72	60,51 %
Modérée	40,25	33,49 %
Faible	0,23	0,19 %
Très faible	0	0

Plus de 66 % de l'ensemble karstique Ain-Papeterie est cartographié en vulnérabilité élevée et très élevée. Les forêts sont naturellement implantées sur ces zones. Les sols, généralement peu épais sur ces secteurs, n'ont pas permis le développement de l'agriculture.

Les recouvrements morainiques, en dehors des bassins versants de pertes, protègent l'aquifère. Ces secteurs sont cartographiés en vulnérabilité modéré, voir faible sur le Crétacé.

SK Ain-Papeterie RISK



Légende

- | | | | |
|---|-------------------------|---|-------------|
|  | Limite SK Ain-Papeterie | Vulnérabilité | |
|  | Bassins versants pertes |  | Très élevée |
| | |  | Elevée |
| | |  | Modérée |
| | |  | Faible |
| | |  | Très faible |



0 1 000 2 000 Mètres



La méthode PaPRIKa

PaPRIka est une méthode multicritère de cartographie intrinsèque d'un aquifère karstique. C'est une évolution de la méthode RISKE2. Elle prend en compte quatre critères :

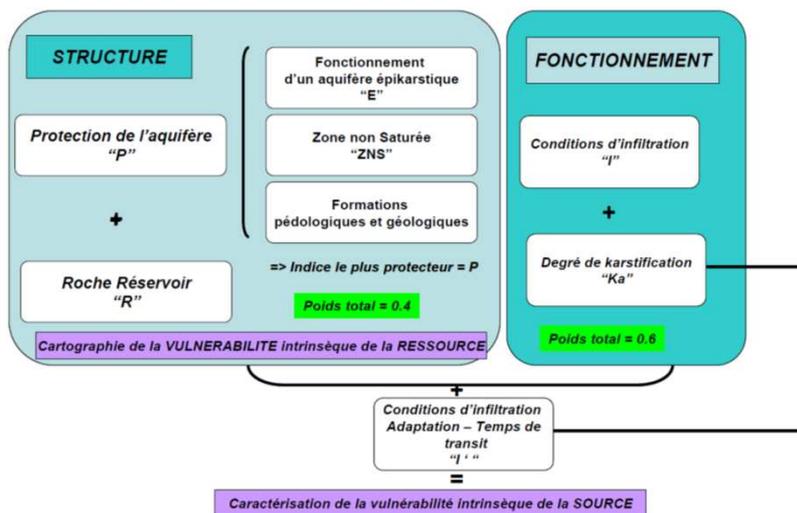
la protection vis-à-vis de l'infiltration (P)

la nature de la roche du réservoir aquifère (R)

les conditions d'infiltrations (I)

le degré de karstification (Ka)

Ainsi, deux critères caractérisent la structure et deux critères caractérisent le fonctionnement des aquifères karstiques :



Source : BRGM

La deuxième partie de la méthode qui intègre les vitesses de circulation jusqu'au captage et caractérise la vulnérabilité intrinsèque de la source ne concerne pas notre étude et ne sera donc pas appliquée.

Chaque critère est réparti en 5 classes, de 0 à 4, du moins vulnérable au plus vulnérable. Un facteur de pondération est attribué à chaque critère. Il traduira l'importance relative des critères entre eux.

La méthode est mise en œuvre selon 6 étapes principales pour cartographier la vulnérabilité **de la ressource** :

Séparation du bassin en zones karstiques et non karstiques (cas des systèmes binaires).

Cartographie de chaque critère

Discretisation des cartes.

Calcul de la vulnérabilité globale V_g en chaque maille.

Reclassification de l'indice V_g .

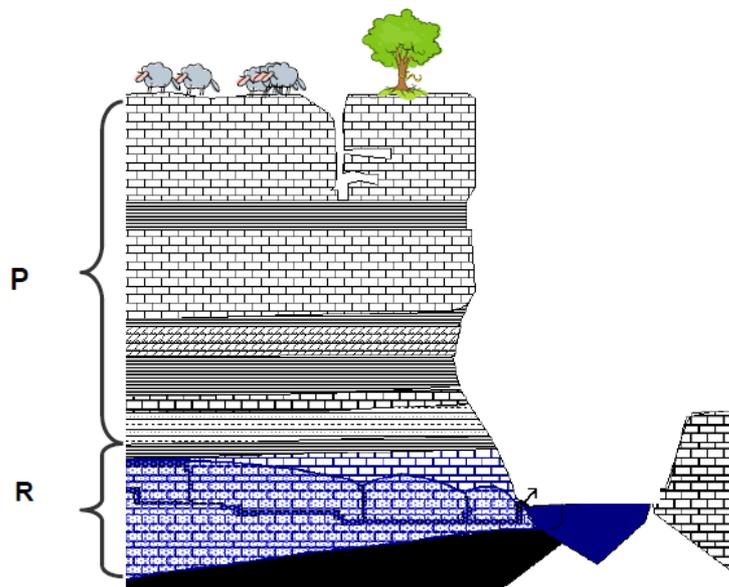
Étape de vérification.

La méthodologie de la méthode PaPRIKa est décrite dans le guide RP-57527-FR du BRGM.

Critère P : Protection vis-à-vis de l'infiltration

« P » se rapporte à la partie supérieure de l'aquifère, à la tranche située au-dessus de la roche aquifère et de la zone noyée. Ce critère caractérise la protection induite par un retard éventuel de l'infiltration.

Source : BRGM



Ainsi, trois « sous-critères » vont influencer ce retard :

S : « couverture pédologique et géologique » (S),

E « aquifère épikarstique »

ZNS « caractéristique de la zone non saturée » (nature, épaisseur et fracturation).

C'est le sous-critère le plus protecteur qui est alors retenu.

En revanche, dans les bassins versants des pertes, le critère P caractérise l'état de surface vis-à-vis du refus à l'infiltration.

S : Couverture pédologique et géologique

S est une couche protectrice de surface qui correspond à l'épaisseur recouvrant l'épikarst, s'il existe, ou recouvrant les roches réservoir du système karstique. La couche S est donc caractérisée, par la couverture pédologique (sol) ou par les formations superficielles (moraine, limons de plateau,...).

Dans un premier temps, la *nature de sol* est définie en croisant la *texture* (dominante argileuse, dominante limoneuse ou dominante sableuse) et la *pierrosité* d'après les classes du tableau suivant :

		Texture		
		1 (argiles)	2 (limons)	3 (sables)
Cailloux	1 (0-30%)	1	1	2
	2 (30-60%)	1	2	3
	3 (>60%)	2	3	4

Ensuite, la *nature du sol* est croisée avec l'*épaisseur* pour obtenir cinq catégories, S0 à S4 :

		Nature du sol				
		Inconnue	1	2	3	4
Zones imperméabilisées		S0				
Épaisseur	> 5 m	S1	S1	S1	S2	S3
	1-5 m	S1	S1	S2	S3	S3
	60-100 cm	S2	S2	S3	S4	S4
	30-60 cm	S3	S3	S4	S4	S4
	0-30 cm	S4	S4	S4	S4	S4

E : Aquifère épikarstique

L'épikarst correspond à la partie superficielle d'une formation carbonatée fortement altérée située directement sous la couverture pédologique lorsqu'elle est présente. La porosité et la perméabilité sont plus fortes à proximité de la surface, ces paramètres hydrodynamiques diminuent avec la profondeur. Ainsi, l'eau d'infiltration des précipitations peut-être être stockée au niveau de la base de l'épikarst et constituer un aquifère perché. Ce stockage temporaire peut donc constituer un retard à l'infiltration.

Quatre classes E sont ainsi définies dans la méthode :

Critère E : aquifère épikarstique	
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 de retard est limité ;
E4	Pas d'aquifère épikarstique

ZNS : Caractéristique de la zone non-saturée

La zone non-saturée de l'aquifère assure le transfert de l'eau vers la zone saturée. La vitesse de ce transfert va donc dépendre de la lithologie, de l'épaisseur ainsi que du degré de fracturation/fissuration.

Quatre classes sont tout d'abord définies en fonction de la lithologie :

Lithologie de la ZNS (L_{ZNS})	
L_{ZNS0}	Couches d'argiles de forte épaisseur
L_{ZNS1}	Marno-calcaires, craie
L_{ZNS2}	Calcaires en petits bancs et/ou intercalation d'argiles
L_{ZNS3}	Calcaires en gros bancs massifs

Ces quatre classes sont ensuite complétées avec les données de fracturation et d'épaisseur telle qu'indiqué dans le tableau suivant pour obtenir cinq classes caractérisant la zone non saturée :

		Épaisseur		
		> 15 m	15-50 m	> 50 m
Fracturation	Faible-moyenne	L _{ZNS} +1	L _{ZNS}	L _{ZNS}
	Importante	L _{ZNS} +1	L _{ZNS} +1	L _{ZNS} +1
	Forte au niveau de faille	4	4	4

L'état de surface (uniquement pour les bassins versants des pertes)

Ce critère est le seul critère à renseigner au niveau des bassins versants des pertes temporaires ou pérennes.

A l'inverse du critère S, plus les terrains de surface sont imperméabilisés, plus l'état de surface peut favoriser le ruissellement vers une perte.

Quatre classes P sont ainsi définies dans la méthode :

État de surface dans les bassins versants des pertes	
P1	Terrains caractérisés par de fortes perméabilités : graviers et conglomérats non cimentés
P2	Terrains caractérisés par des perméabilités moyennes : arènes granitiques, sables, calcaires
P3	Terrains caractérisés par des perméabilités faibles : grès peu fissurés, conglomérats cimentés, roches magmatiques et métamorphiques saines.
P4	Terrains caractérisés par des perméabilités très faibles : argiles, marnes, zones de cours d'eau pérenne ou temporaire

Carte du Critère P

Le critère P résulte du croisement des cartes S, E et ZNS pour les zones karstiques et de la carte « état de surface » pour les zones de pertes.

En chaque point, c'est le critère le plus protecteur qui est retenu, pour tracer la carte P.

Critère R : Nature de la roche réservoir

Ce critère caractérise la nature de la roche réservoir en considérant d'une part la nature lithologique (calcaires à marnes) et d'autre part le caractère massif ou non de la roche et l'état de fracturation locale à régionale.

La cartographie de ce critère est réalisée à partir de la carte géologique du BRGM (1/50 000^e), des coupes géologiques réalisées au niveau des systèmes karstiques étudiés et par des connaissances du terrain.

Quatre classes R sont ainsi définies dans la méthode :

Critère R : Nature de la roche réservoir	
Indice	Description
R₁	Cette classe regroupe les formations marno-calcaires (25-35% de minéraux argileux) ainsi que la craie, affectée d'une déformation faible qui auront une influence limitée en termes de vulnérabilité, les circulations d'eau restant là encore relativement lentes.
R₂	Cette classe regroupe les formations de calcaires marneux (la proportion argileuse est plus faible que pour la classe R ₁ : 10-25%), craie affectée d'une fracturation forte ; calcaires et dolomies en petits et gros bancs avec fracturation homogène et pendage ou contre pendage inférieur à 45°, dont le sens est favorable à un écoulement en direction du captage comme cela l'est confirmé par ailleurs lors de la délimitation préalable du bassin d'alimentation.
R₃	Cette classe regroupe les formations calcaires et dolomitiques, soit massives en gros bancs fracturés, soit en plus petits bancs avec des intercalations argilo-marneuses avec une fracturation homogène. Ce type de formation permet des circulations relativement faciles et rapides :

	Calcaires et dolomies massif en gros bancs fracturés et karstifiés, Calcaires et dolomies en gros bancs avec un pendage ou contre pendage supérieur à 45° par rapport à la localisation de la source.
R ₄	Cette classe regroupe les zones reconnues cartographiées ou présumées de réseau de cavités et de zones de failles affectant le réservoir, parallèles au gradient hydraulique.

Critère I : Conditions d'infiltration

Le critère I caractérise l'infiltration. Dans le karst, l'infiltration est à la fois diffuse et concentrée en certains points (pertes). Par définition, l'infiltration dépend à la fois de la pente des terrains et également de leur nature. Dans la méthode PaPRIKa, le critère I ne s'intéresse qu'à la notion de pente, le critère P caractérisant déjà la nature des terrains de couverture.

Ainsi, cinq classes I sont définies dans la méthode :

Critère I : Conditions d'infiltration	
Indice	Description
I0	Cette classe regroupe les zones du bassin où les pentes sont très fortes (>50%) induisant un ruissellement de l'eau très important (vers d'autres aquifères ou la mer etc...) et une infiltration négligeable voire même nulle.
I1	Zones où les pentes sont fortes (15-50%) favorisant grandement le ruissellement.
I2	Zones du bassin où la pente est moyenne (5-15%) et/ou zones où le ruissellement est limité en terrains carbonatés.
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 lapiez bien développés verticalement avec des cannelures métriques font partie de cette classe.
I4	Manifestations de l'infiltration concentrée au niveau des pertes. Ne sont retenues quand la classification « perte » que les pertes situées sur un cours d'eau pérenne ou temporaire. 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.

Le critère I4 s'intéresse plus particulièrement aux pertes.

Critère Ka : degré de karstification

Ce critère Ka définit le degré de développement du karst. La fonctionnalité d'un système traduit la structure des vides résultants de la karstification mais également de l'organisation des écoulements. L'aquifère est alors fonctionnel, caractérisé par l'existence de vitesses d'écoulement souterrain très rapides (jusqu'à quelques centaines de mètres par heure) et par une vulnérabilité spatio-temporelle des caractéristiques physiques et hydrauliques de l'aquifère.

Le caractère unaire ou binaire du système karstique est également pris en compte dans la définition de ce critère.

Critère Ka : degré de karstification	
Indice	Caractéristiques
Ka1	Degré de karstification correspondant aux systèmes de type 1 (ayant une aire d'alimentation <10 km ² et un débit moyen annuel faible) 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.
Ka2	Degré de karstification de type 2 (aire d'alimentation >10 km ²) ou de type 3 unaire et peu fonctionnel (la fonctionnalité est appréciée à partir d'indices caractérisant le degré de karstification tels que des vitesses de traçages 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)
Ka3	Degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques du type 2 ou 3, fonctionnels et binaires/unaires ; il s'agit soit de systèmes 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 50-100 m/h). Domaine de référence 2 de la classification de Mangin.
Ka4	Degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques binaires de 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 (>100 m/h). Domaines de référence 3 voire 4 de la classification de Mangin.

Poids des paramètres et classes de vulnérabilité

L'indice de la vulnérabilité globale V_g se calcule par la formule suivante :

$$V_g = iI_{0-4} + rR_{1-4} + pP_{0-4} + kKa_{1-4}$$

→ i , r , p et k correspondent au poids des critères,

→ I_{0-4} , R_{1-4} , P_{0-4} et Ka_{1-4} correspondent à la valeur des critères indexés.

La pondération se fait selon 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%.

Pour les bassins versants des pertes seuls les critères I et P sont pris en considération selon la pondération suivante : 50% I et 50% P .

Les valeurs ne sont pas uniques, des intervalles de valeurs sont proposés afin d'évaluer la sensibilité des critères, ils sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Critères	Abréviation	Pondération (%) pour le réservoir karstique	Pondération (%) pour le bassin amont des pertes
Protection	P	20-25	50
Roche réservoir	R	15-20	/
Infiltration	I	40-30	50
Karstification	Ka	20-30	/

Des classes de vulnérabilité sont alors définies en 5 catégories :

Reclassification	Indice	Vulnérabilité
3,2 - 4	4	Très élevée
2,4 – 3,19	3	Élevée
1,6 – 2,39	2	Modérée
0,8 – 1,59	1	Faible
0 – 0,79	0	Très faible

Système Karstique Ain-Papeterie - Méthode PaPRIKa

Critère P : Protection vis-à-vis de l'infiltration

S : Couverture pédologique et géologique

Comme pour la méthode RISK appliquée précédemment, la couche S, couverture pédologique et géologique, a été réalisée à partir des cartes d'aptitude des terrains agricoles à l'épandage du GRAP sur le plateau de Nozeroy, des cartes d'aptitude des terrains agricoles à l'épandage de fertilisants organiques de la Chambre d'agriculture à l'échelle 1/110 000^{ème} et de la carte géologique.

La carte des sols a donc été réalisée à partir de la classification suivante :

Type de recouvrement géologique et de sols*	Classification PaPRIKa
Moraines	1
1 8 8M	2
9 13	3
5 6 6k 7 12 k, c	4

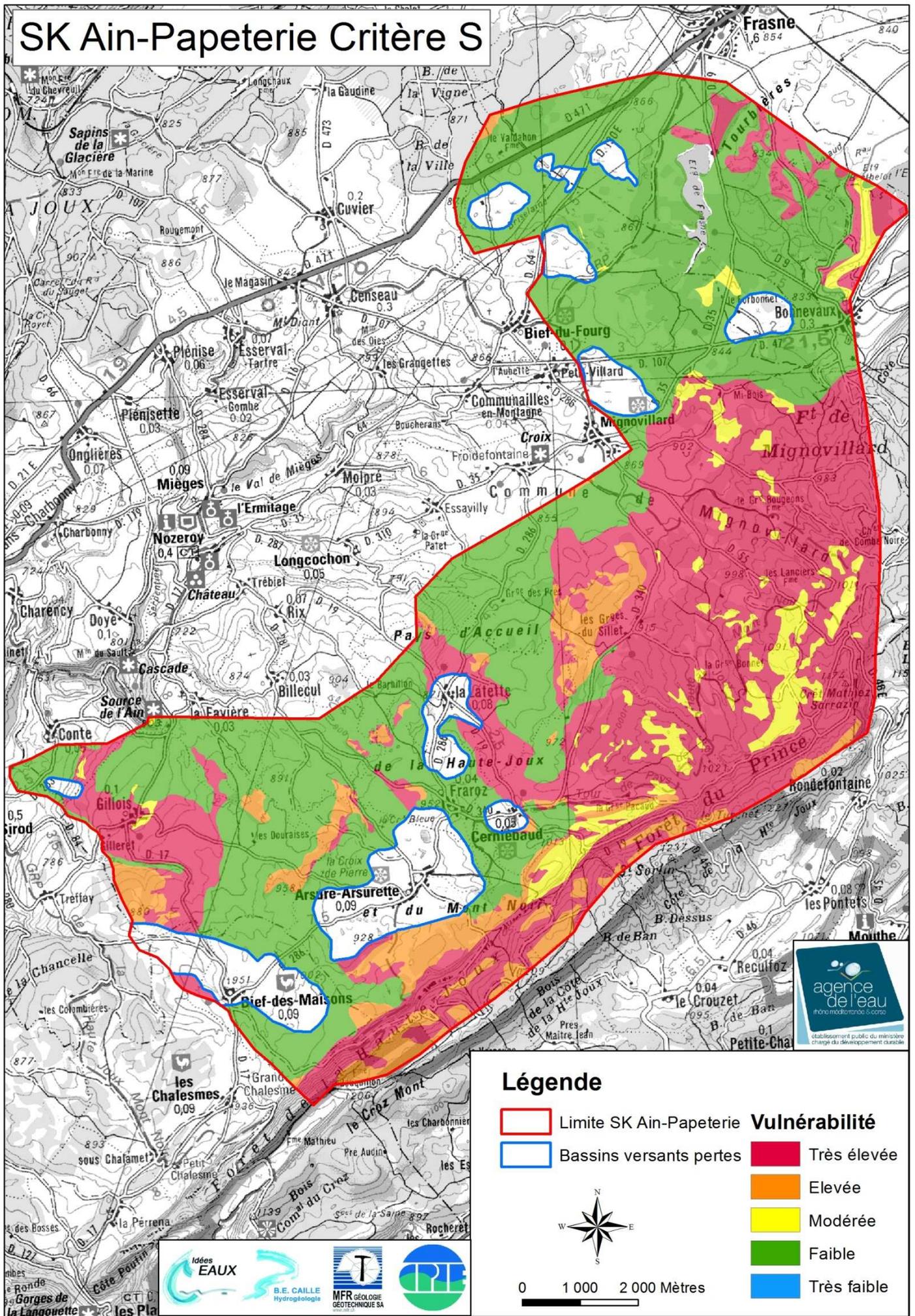
*Les fiches descriptives des sols de la chambre d'agriculture sont présentées en annexe

Remarques : les classes de sol sont légèrement différentes entre la méthode RISK et la méthode PaPRIKa. Les moraines sont ainsi classées S=1 même lorsqu'elles sont supérieures à 5 m.

Cas particulier des forêts

Les sols forestiers ont été classés comme dans la méthode RISK.

SK Ain-Papeterie Critère S



Légende

- | | | |
|---|-------------------------|---|
|  | Limite SK Ain-Papeterie | Vulnérabilité |
|  | Bassins versants pertes |  Très élevée |
| | |  Élevée |
| | |  Modérée |
| | |  Faible |
| | |  Très faible |



0 1 000 2 000 Mètres



E : Aquifère épikarstique

Sur le bassin versant de l'Ain-Papeterie, le critère épikarst est considéré homogène et de valeur E4. Les observations de terrain n'ont pas montré la présence de sources temporaires ou d'autres éléments prouvant son existence.

Critère E : aquifère épikarstique	
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 de retard est limité ;
E4	Pas d'aquifère épikarstique

ZNS : Caractéristique de la zone non-saturée

La zone non saturée peut atteindre 250 m. Il s'agit sur la plus grande partie du bassin des calcaires portlandiens, massifs, fortement fracturés. Les placages de moraine sont pris en compte dans le critère S. Sur certains secteurs, les calcaires crétacés se superposent aux calcaires portlandiens. L'indice ZNS ne sera donc pas identique.

La zone ZNS est donc caractérisée par :

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 intercalation d'argiles → Calcaires crétacés
L _{ZNS} 3	Calcaires en gros bancs massifs → Calcaire portlandiens

		Épaisseur		
		> 15 m	15-50 m	> 50 m
Fracturation	Faible-moyenne	L _{ZNS} +1	L _{ZNS}	L _{ZNS}
	Importante	L _{ZNS} +1	L _{ZNS} +1	L _{ZNS} +1
	Forte au niveau de faille	4	4	4

Deux zones géographiques sont donc dessinées en ZNS=3 et ZNS=4

L'état de surface (uniquement pour les bassins versants des pertes)

Ce critère est le seul critère renseigné au niveau des bassins versants des pertes temporaires ou pérennes.

Les bassins versants des pertes s'étendent, soit sur les moraines et sont alors renseignés P4, soit sur les calcaires et sont alors renseignés P2

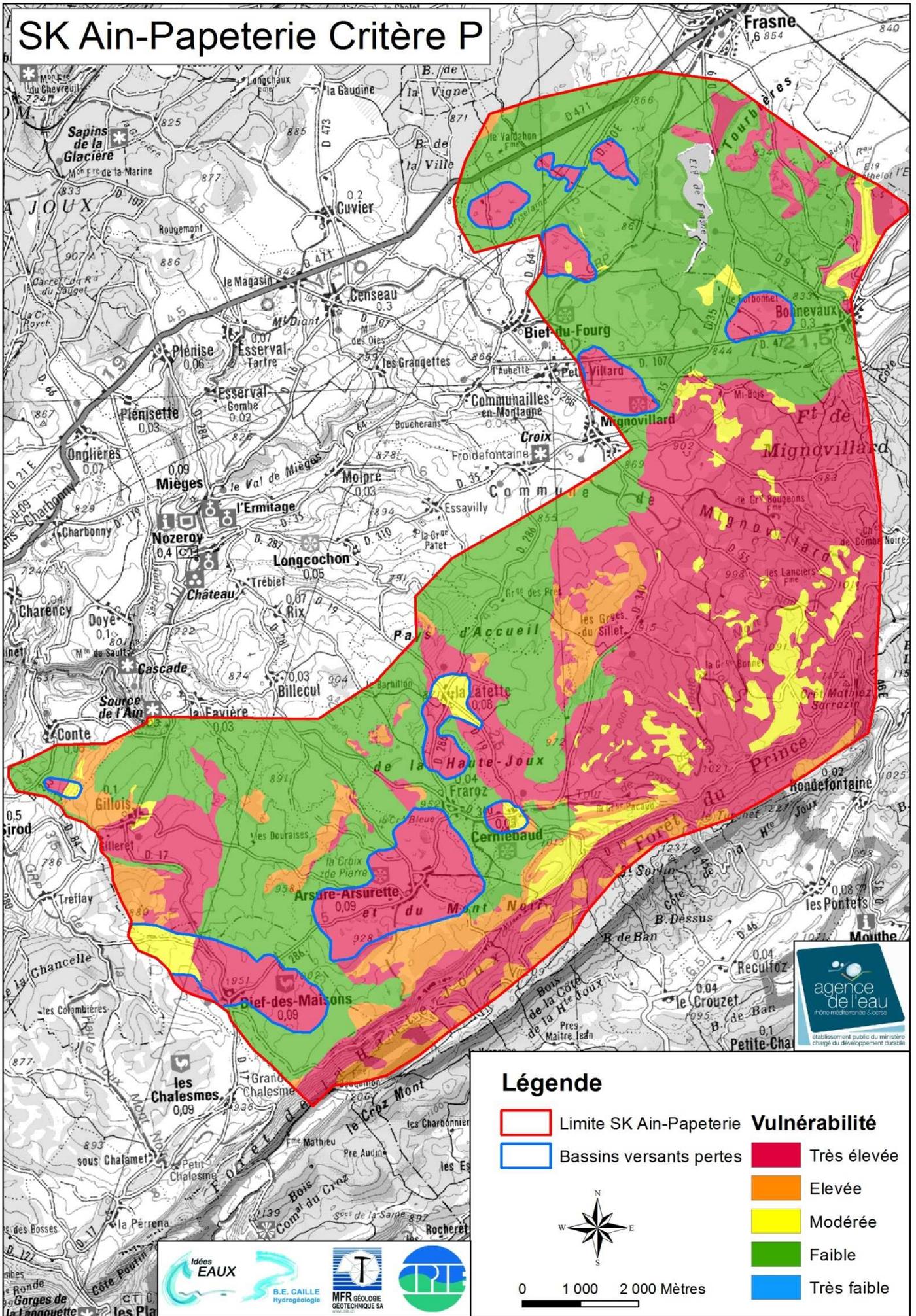
État de surface dans les bassins versants des pertes	
P1	Terrains caractérisés par de fortes perméabilités : graviers et conglomérats non cimentés
P2	Terrains caractérisés par des perméabilités moyennes : arènes granitiques, sables, calcaires
P3	Terrains caractérisés par des perméabilités faibles : grès peu fissurés, conglomérats cimentés, roches magmatiques et métamorphiques saines.
P4	Terrains caractérisés par des perméabilités très faibles : argiles, marnes, zones de cours d'eau pérenne ou temporaire

Carte du Critère P

Le critère P résulte du croisement des cartes S, E et ZNS pour les zones karstiques et de la carte « état de surface » pour les zones de pertes.

En chaque point, c'est le critère le plus protecteur qui a été retenu, pour tracer la carte P.

SK Ain-Papeterie Critère P



Légende

- | | | |
|---|-------------------------|---|
|  | Limite SK Ain-Papeterie | Vulnérabilité |
|  | Bassins versants pertes |  Très élevée |
| | |  Élevée |
| | |  Modérée |
| | |  Faible |
| | |  Très faible |



0 1 000 2 000 Mètres



Critère R : Nature de la roche réservoir

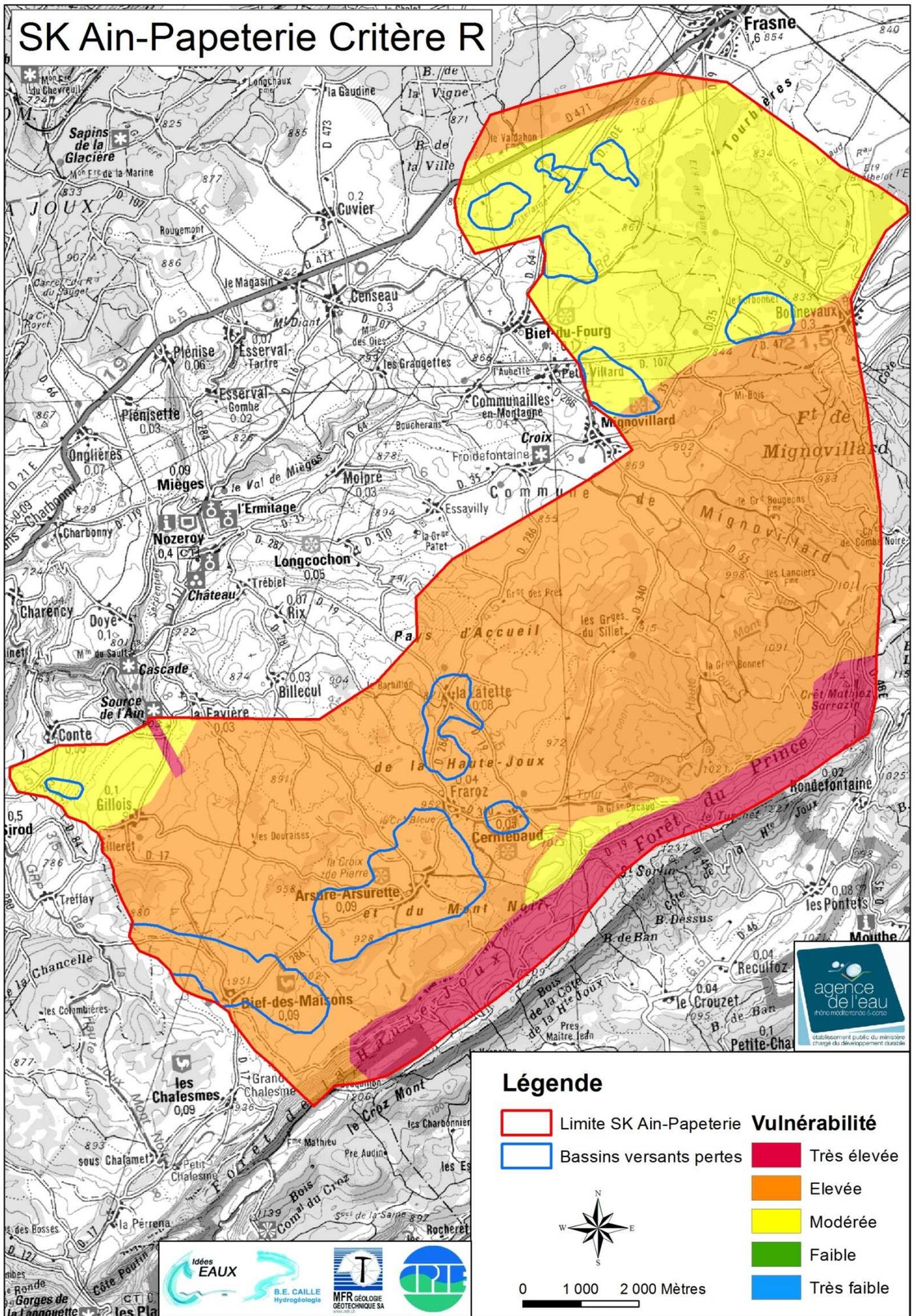
La source de la Papeterie est principalement alimentée par les calcaires massifs du Jurassique supérieur, le Portlandien. Il se présente sous forme de bancs massifs, fracturés et karstifiés. Ils seront donc cartographiés avec l'indice 3.

Le Crétacé affleure à certains endroits. Les traçages ont démontrés que ces calcaires peuvent communiquer avec le niveau Portlandien. Ils seront donc cartographiés avec l'indice 2.

Les galeries reconnues, cartographiée comme le réseau de la source de l'Ain, sont reportés et cartographiées avec l'indice 4. La zone Sud à Sud-est qui s'étend de la forêt de la Haute Joux à la forêt du Prince, à forte densité de cavité et de gouffre est également cartographiée avec l'indice 4.

Critère R : Nature de la roche réservoir	
Indice	Description
R ₁	Cette classe regroupe les formations marno-calcaires (25-35% de minéraux argileux) ainsi que la craie, affectée d'une déformation faible qui auront une influence limitée en termes de vulnérabilité, les circulations d'eau restant là encore relativement lentes.
R ₂	Cette classe regroupe les formations de calcaires marneux (la proportion argileuse est plus faible que pour la classe R ₁ : 10-25%), craie affectée d'une fracturation forte ; calcaires et dolomies en petits et gros bancs avec fracturation homogène et pendage ou contre pendage inférieur à 45°, dont le sens est favorable à un écoulement en direction du captage comme cela l'est confirmé par ailleurs lors de la délimitation préalable du bassin d'alimentation.
R ₃	Cette classe regroupe les formations calcaires et dolomitiques, soit massives en gros bancs fracturés, soit en plus petits bancs avec des intercalations argilo-marneuses avec une fracturation homogène. Ce type de formation permet des circulations relativement faciles et rapides : Calcaires et dolomies massif en gros bancs fracturés et karstifiés, Calcaires et dolomies en gros bancs avec un pendage ou contre pendage supérieur à 45° par rapport à la localisation de la source.
R ₄	Cette classe regroupe les zones reconnues cartographiées ou présumées de réseau de cavités et de zones de failles affectant le réservoir, parallèles au gradient hydraulique.

SK Ain-Papeterie Critère R



Légende

- | | | |
|---|-------------------------|---|
|  | Limite SK Ain-Papeterie | Vulnérabilité |
|  | Bassins versants pertes |  Très élevée |
| | |  Elevée |
| | |  Modérée |
| | |  Faible |
| | |  Très faible |



0 1 000 2 000 Mètres



Critère I : Conditions d'infiltration

Comme pour la méthode RISK, la carte du Critère I a été réalisée suivant ces différentes étapes :

Découpage du MNT (model numérique de terrain, maille 50m x 50m) de Franche-Comté par les contours du système karstique Ain-Papeterie ;

Calcul des pentes et classification en 4 classes (Cf. tableau ci-dessous)

Ré-échantillonnage de ce résultat pour obtenir une maille de 5 par 5 mètres ;

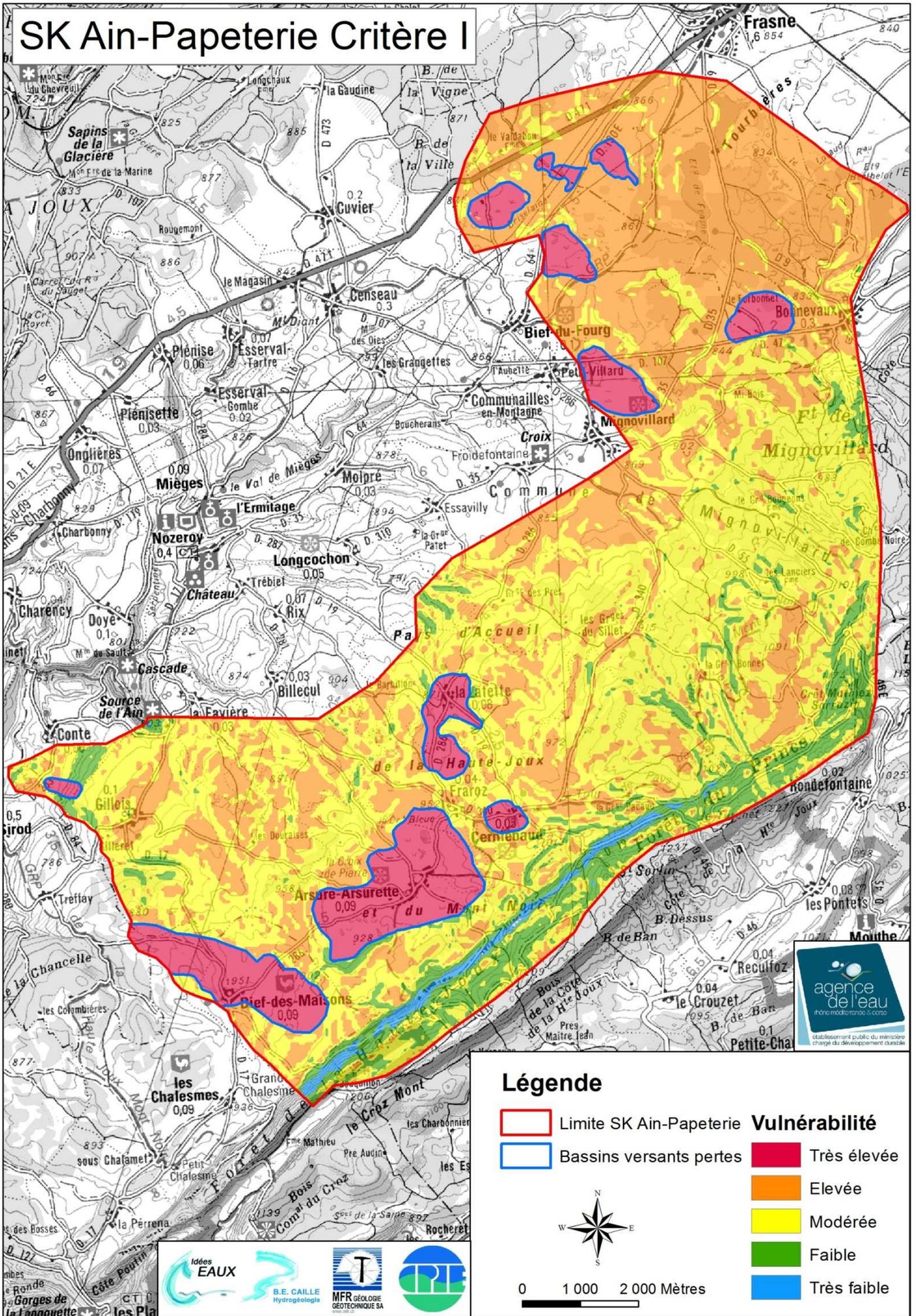
Relevé des informations de surface de type vallées sèches, dolines et bassins versants de pertes et affectation des valeurs PaPRIKa (vallée sèche = 2, doline = 3 et perte active = 4) ;

Finalisation de la couche Critère I avec pentes classées en 4 classes (Cf. tableau ci-dessous) et les informations de surface classées.

Ainsi, les cinq classes I suivantes ont été définies :

Critère I : Conditions d'infiltration	
Indice	Description
10	Cette classe regroupe les zones du bassin où les pentes sont très fortes (>50%) induisant un ruissellement de l'eau très important (vers d'autres aquifères ou la mer etc...) et une infiltration négligeable voire même nulle.
11	Zones où les pentes sont fortes (15-50%) favorisant grandement le ruissellement.
12	Zones du bassin où la pente est moyenne (5-15%) et/ou zones où le ruissellement est limité en terrains carbonatés.
13	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 lapiez bien développés verticalement avec des cannelures métriques font partie de cette classe.
14	Manifestations de l'infiltration concentrée au niveau des pertes. Ne sont retenues quand la classification « perte » que les pertes situées sur un cours d'eau pérenne ou temporaire. 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.

SK Ain-Papeterie Critère I



Légende

- | | | |
|---|-------------------------|---|
|  | Limite SK Ain-Papeterie | Vulnérabilité |
|  | Bassins versants pertes |  Très élevée |
| | |  Élevée |
| | |  Modérée |
| | |  Faible |
| | |  Très faible |



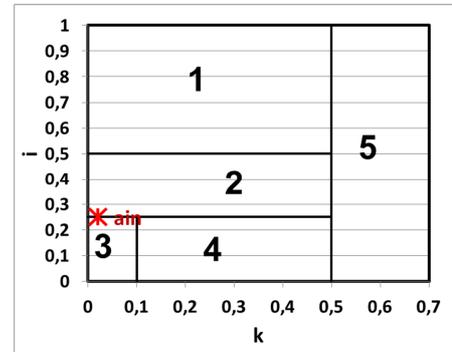
0 1 000 2 000 Mètres



Critère Ka : degré de karstification

D'après la typologie des systèmes aquifères karstiques telle que définie dans le guide Technic'eau, l'aquifère Ain-Papeterie est de type 2, > 10 km² avec un débit annuel moyen fort.

La classification de Mangin pour la source de l'Ain est la suivante :

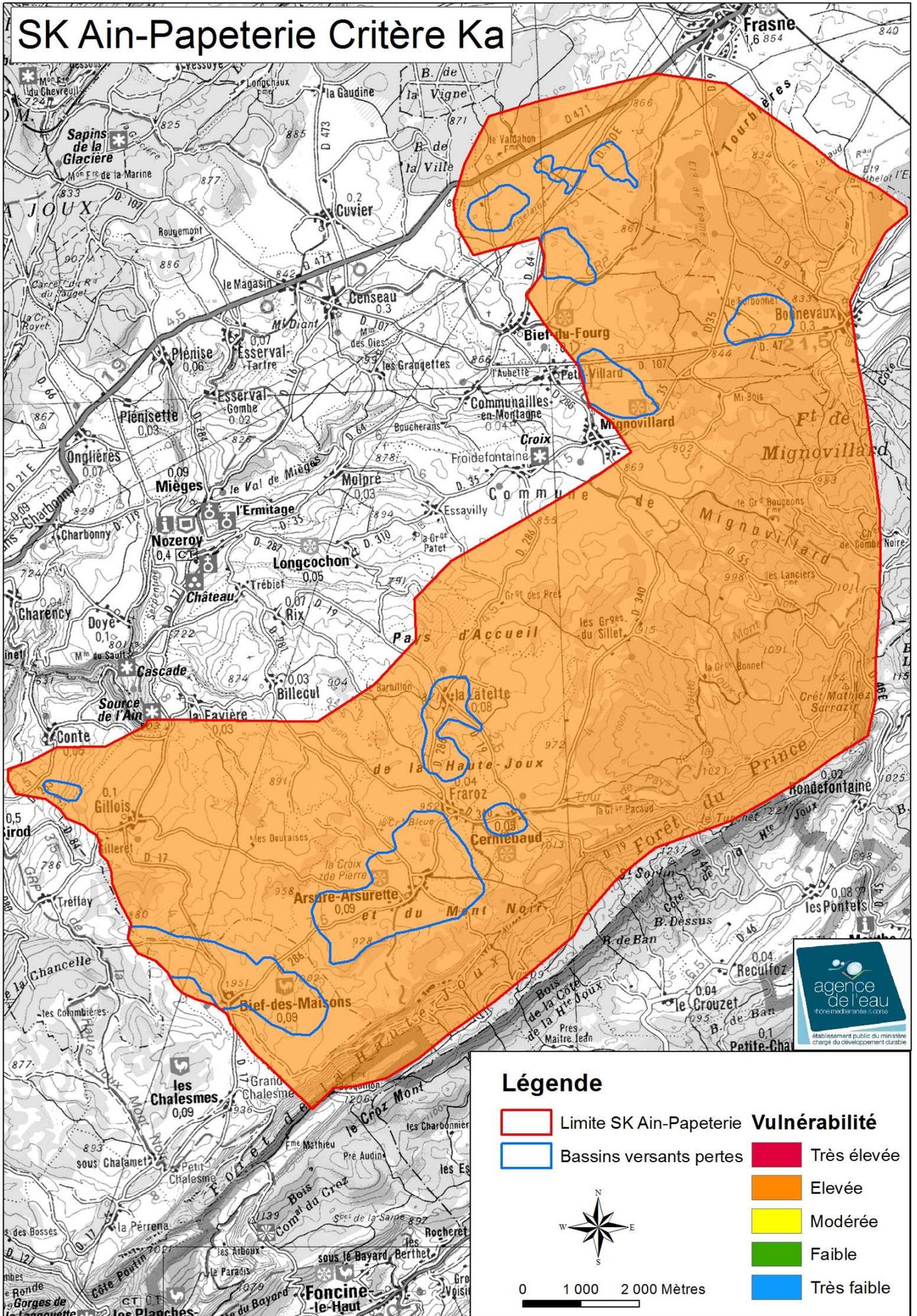


Le Critère Ka retenu pour l'ensemble du système est :

Critère Ka : degré de karstification	
Indice	Caractéristiques
Ka1	Degré de karstification correspondant aux systèmes de type 1 (ayant une aire d'alimentation <10 km ² et un débit moyen annuel faible) 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.
Ka2	Degré de karstification de type 2 (aire d'alimentation >10 km ²) ou de type 3 unaire et peu fonctionnels (la fonctionnalité est appréciée à partir d'indices caractérisant le degré de karstification tels que des vitesses de traçages 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)
Ka3	Degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques du type 2 ou 3, fonctionnels et binaires/unaires ; il s'agit soit de systèmes 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 50-100 m/h). Domaine de référence 2 de la classification de Mangin.
Ka4	Degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques binaires de type 2. Le réseau karstique très bien développé avec la présence d'un gros collecteur connecté avec la surface, comme l'atteste la fonctionnalité

	<p>du système. Les vitesses de transit mises en évidence à l'aide d'essais de traçage sont importantes (>100 m/h). Domaines de référence 3 voire 4 de la classification de Mangin.</p>
--	---

SK Ain-Papeterie Critère Ka



Poids des paramètres et classes de vulnérabilité

L'indice de la vulnérabilité globale V_g se calcule par la formule suivante :

$$V_g = iI_{0-4} + rR_{1-4} + pP_{0-4} + kKa_{1-4}$$

→ i , r , p et k correspondent au poids des critères,

→ I_{0-4} , R_{1-4} , P_{0-4} et Ka_{1-4} correspondent à la valeur des critères indexés.

La pondération se fait selon 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%.

Pour les bassins versants des pertes, seuls les critères I et P sont pris en considération selon la pondération suivante : 50% I et 50% P.

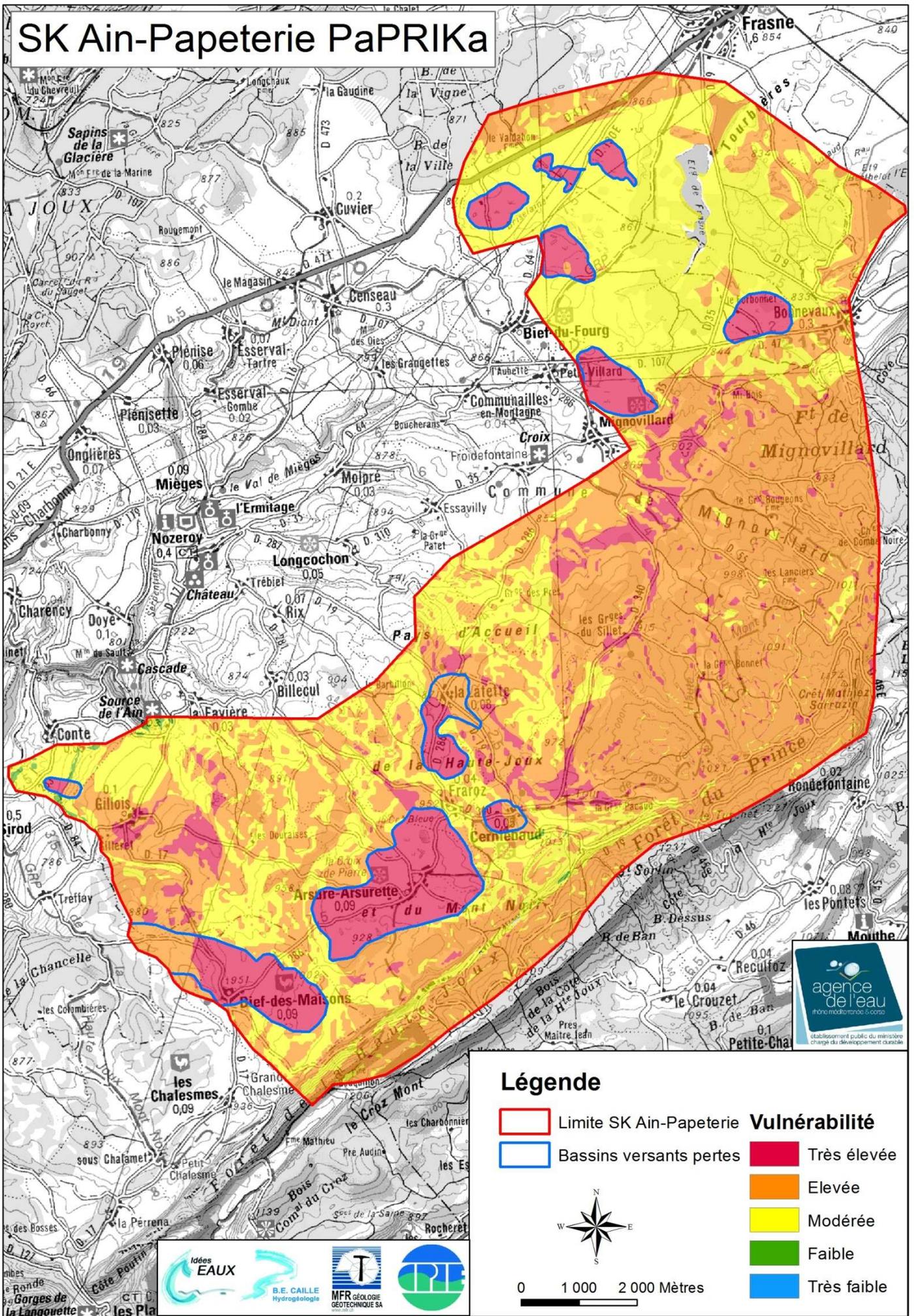
Les pondérations choisies après plusieurs essais sont les suivantes :

Critères	Abréviation	Pondération (%) pour le réservoir karstique	Pondération (%) pour le bassin amont des pertes
Protection	P	25	50
Roche réservoir	R	15	/
Infiltration	I	40	50
Karstification	Ka	20	/

Des classes de vulnérabilité sont alors définies en 5 catégories :

Reclassification	Indice	Vulnérabilité
3,2 - 4	4	Très élevée
2,4 - 3,19	3	Élevée
1,6 - 2,39	2	Modérée
0,8 - 1,59	1	Faible
0 - 0,79	0	Très faible

SK Ain-Papeterie PaPRIKa



Légende

- | | | | |
|---|-------------------------|---|-------------|
|  | Limite SK Ain-Papeterie | Vulnérabilité | |
|  | Bassins versants pertes |  | Très élevée |
| | |  | Elevée |
| | |  | Modérée |
| | |  | Faible |
| | |  | Très faible |



0 1 000 2 000 Mètres



Résultats de la méthode PaPRIKa

La vulnérabilité intrinsèque du système karstique Ain-Papeterie obtenue par la méthode PaPRIKa se répartie entre 4 classes :

Vulnérabilité	Surface en km ²	Proportion
Très élevée	15,87	13,21 %
Élevée	63,41	52,78 %
Modérée	40,66	33,84 %
Faible	0,2	0,17 %
Très faible	0	0

Plus de 66 % de l'ensemble karstique Ain-Papeterie est cartographié en vulnérabilité élevée et très élevée.

Les observations sont les mêmes que pour la vulnérabilité avec la méthode RISK : Les forêts sont naturellement implantées sur les zones de vulnérabilité élevée. Les secteurs de recouvrements morainiques sont cartographiés en vulnérabilité modérée voire faible sur le Crétacé.

Les bassins versants des pertes sont en majorité cartographiés en vulnérabilité très élevée car ils sont, pour la plupart, tapissés de moraine glaciaire épaisse et imperméable.

Comparaison des 2 méthodes.

Vulnérabilité	Proportion PaPRIKa	Proportion RISK
Très élevée	13,21 %	5,81 %
Élevée	52,78 %	60,51 %
Modérée	33,84 %	33,49 %
Faible	0,17 %	0,19 %
Très faible	0	0

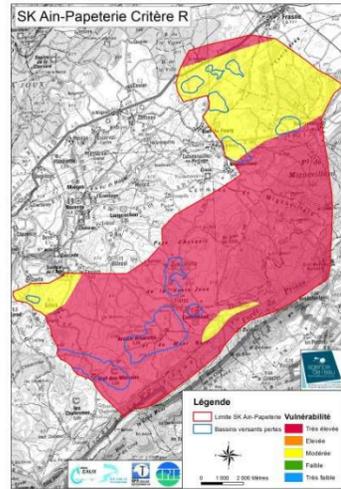
On observe peu de différences entre la carte de vulnérabilité obtenue par l'application de la méthode RISK et la carte de vulnérabilité obtenue par l'application de la méthode PaPRIKa.

La différence majeure se situe au niveau des bassins versants de pertes. En effet dans PaPRIKa, le critère P, État de surface, permet de prendre en compte la vulnérabilité liée à la concentration plus rapide des ruissellements vers les zones de perte en présence de terrains imperméables (marnes, moraines). Ainsi les bassins versants de ces pertes sont plus vulnérables dans la méthode PaPRIKa que dans la méthode RISK.

Malgré les différences dans la cartographie des critères R et S entre PaPRIKa et RISK, sur l'ensemble Ain-Papeterie (voir comparatif ci-dessous), ces différences influencent peu le résultat de la cartographie de la vulnérabilité.

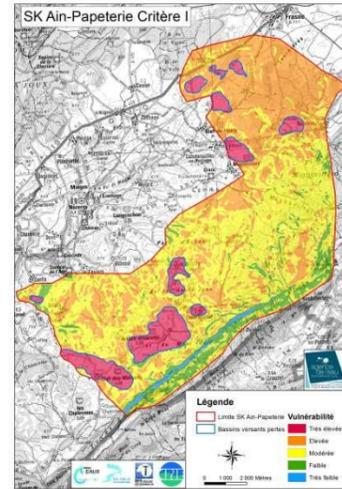
Vulnérabilité
Très élevée
Élevée
Modérée
Faible
Très faible

Critère R



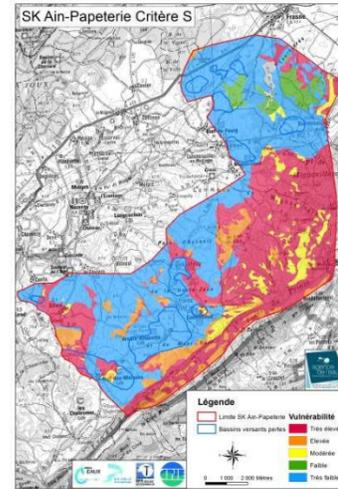
0,15

Critère I



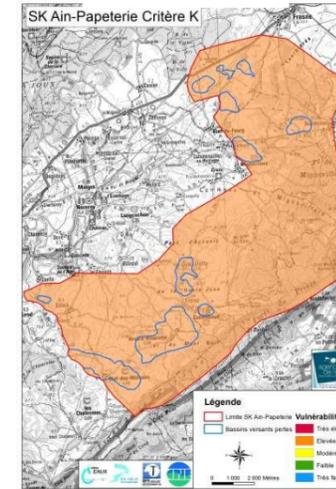
0,40

Critère S



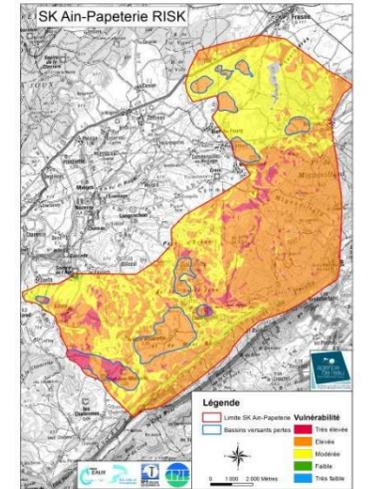
0,25

Critère K

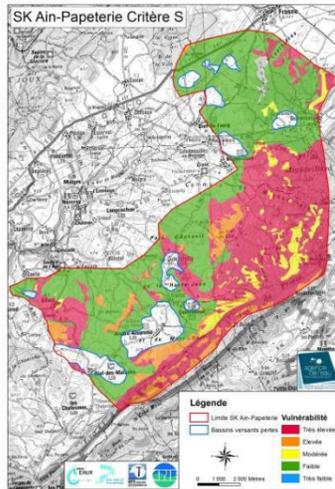


0,20

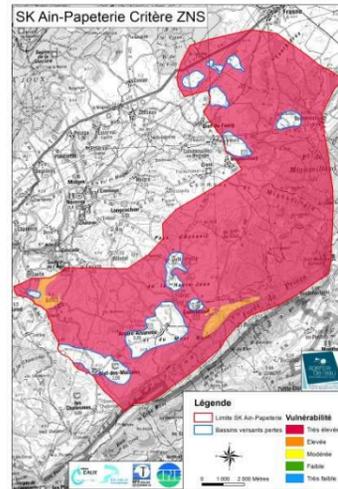
RISK



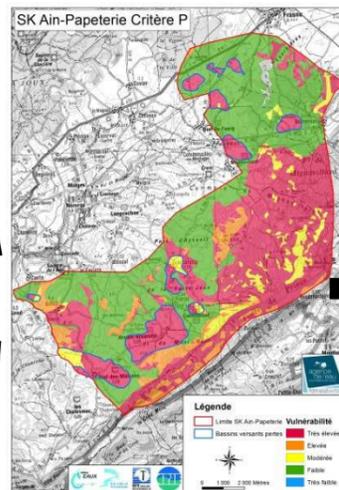
Critère S



Critère ZNS

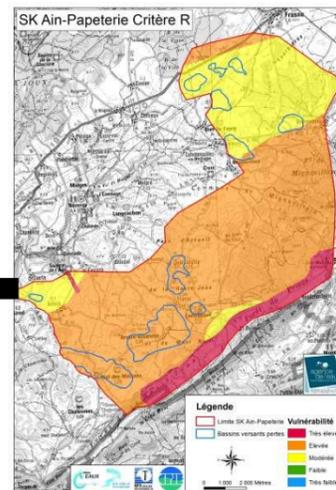


Critère P



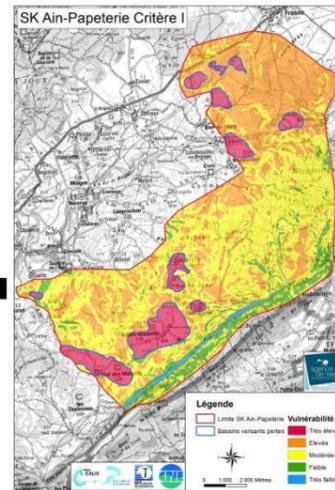
0,25

Critère R



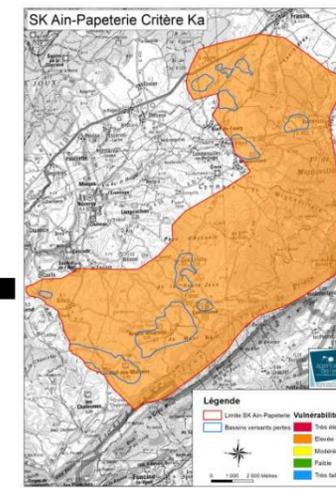
0,15

Critère I

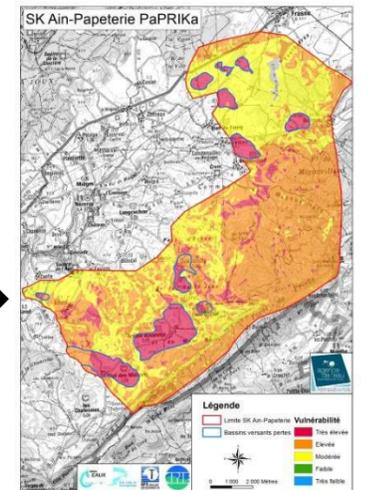


0,40

Critère Ka

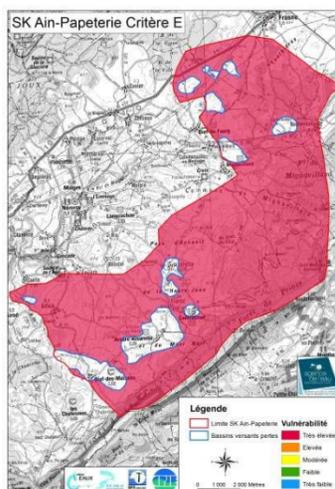


0,20

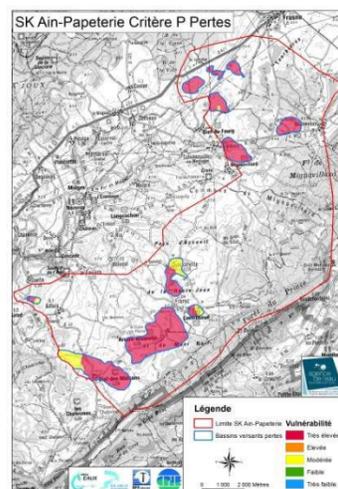


PaPRIka

Critère E



Critère P Pertes



Choix d'une méthode pour l'étude de la vulnérabilité des systèmes karstiques

La méthode PaPRIKa est une méthode qui nécessite une bonne connaissance du terrain pour renseigner le Critère ZNS ainsi qu'une bonne connaissance des fonctionnements souterrains et des vitesses de circulation pour renseigner le critère Ka. Elle nécessite donc une connaissance plus approfondie du terrain et des conditions de circulation des eaux souterraines.

Comme nous l'avons vu dans l'exemple de la source de la Papeterie, les cartes de vulnérabilité obtenues par les 2 méthodes sont similaires. La seule différence sensible concerne les bassins versants des pertes qui sont classés en vulnérabilité supérieure par la méthode PaPRIKa.

N'ayant pas toutes les informations de terrain nécessaires pour l'application de la méthode PaPRIKa, la méthode RISK semble la mieux indiquée dans le cadre de cette étude pour caractériser la vulnérabilité des ressources karstiques majeures.

Dans le cas particulier des bassins versants de pertes, et afin de mieux prendre en compte l'extrême vulnérabilité de ces zones, le critère S de la méthode RISK sera défini comme le critère P « état de surface » de la méthode PaPRIKa. C'est à dire que la vulnérabilité liée au critère sol dans les BV des pertes est classée de façon inverse que dans le reste des bassins d'alimentation des ressources majeures. Les bassins versants des pertes étant définis sur des critères topographiques, mais en excluant les zones où les ruissellements de surface sont impossibles (Lapiez). Une reconnaissance de terrain des principales pertes sera effectuée pour une délimitation au plus juste de leurs bassins versants. Cette visite de terrain permettra également de

Cas des ressources majeures dont les bassins d'alimentation sont principalement forestiers.

Le bassin d'alimentation de la source de La Papeterie comporte de vastes surfaces de forêt. Dans ces zones, les cartographies concernant la pédologie sont souvent absentes. En effet, les études pédologiques disponibles s'intéressent uniquement aux surfaces cultivées et sont utilisées pour fixer les modalités d'épandage sur les parcelles agricoles. Il y a donc une difficulté particulière pour ces zones à mettre en pratique la méthode RISK, pour laquelle le sol joue un rôle de protection important.

Aussi pour palier à ce manque d'information, une méthodologie de détermination des caractéristiques pédologique des sols forestiers a été mise au point. Les données pédologiques nécessaires à la mise en pratique de la méthode RISK sont assez basiques, il s'agit de l'épaisseur du sol, de la proportion argile/limon/sable et de la pierrosité. Tous les types de sol sont classés en seulement 5 classes de vulnérabilité. Les ressources karstiques situées en zone de forêt se trouvent toutes dans la haute chaîne du Jura, elles sont soumises à des conditions météorologiques identiques. Les sols sont influencés par la

topographie et par la nature géologique de la roche formant le substratum. Ces caractéristiques sont également homogènes sur l'ensemble de la zone concernée. L'analyse de ces paramètres est facile à mettre en œuvre en utilisant le SIG ou s'affiche simultanément la topographie, la géologie et l'occupation du sol.

L'intérêt de réaliser les cartographies de la vulnérabilité de l'ensemble des ressources karstiques majeures, est de donner une vision globale permettant la comparaison de toutes ces ressources.

La méthodologie de détermination de la vulnérabilité est identique pour toutes les ressources et évite les biais liés à l'utilisation de la méthode (classification des paramètres, pondération...).