

Sciences de la Terre et Evolution des Milieux Naturels

D.E.S. Sciences de la Vie, Santé, Terre, Univers

Test sur un secteur karstique d'une méthodologie de protection de la ressource en eau :
Application de la méthode RISKE 2 - PaPRIKa aux sources de l'Aygue Blanche et de
l'Aygue Nègre (Pyrénées Occidentales, vallée de l'Ouzoum, chaînons béarnais)



Série urgonienne lapiazée, entre la Pène de l'Ouste et le col du Jaut. Bassin de l'Aygue Blanche

Auteur : François CARRIERE

Directeur de stage :
Thierry LESUR

Tuteur UPMC :
Hocine BENDJOUDI

Novembre 2008



Remerciements

Je les adresse :

- à M. Bendjoudi, maître de conférence UPMC, qui a bien voulu se porter garant de moi pour que je puisse m'inscrire en D.E.S. sciences de la Vie, Santé, Terre et Univers et ainsi obtenir la convention de stage indispensable à l'exécution de cette étude ;
- à M. Lesur pour m'avoir accueilli et d'avoir supporté ma personnalité un peu particulière ;
- à M. Prévost et à M. Marchet de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne pour leur disponibilité et leur soutien ;
- à M. Oller pour avoir bien voulu nous communiquer les limites des bassins d'alimentation, sans lesquelles il aurait été impossible de travailler ;
- aux membres du Comité Départemental de Spéléologie du 64 pour avoir bien voulu donner de leur temps et pour avoir partagé leurs données.

Si j'oublie des gens, je m'en excuse.

Résumé

La méthode multicritères RISKE 2 (PaPRIKa) permet de tracer les cartes de vulnérabilité intrinsèque du bassin d'alimentation d'un aquifère karstique donné. La vulnérabilité intrinsèque est à comprendre comme étant la "vulnérabilité à l'infiltration des eaux météoriques". Ce paramètre, sans unités et non mesurable, dépend des seules caractéristiques géologiques, hydrogéologiques et morphologiques du lieu étudié.

L'utilisation de la méthode RISKE 2 a été préconisée par le BRGM, et a reçu le soutien du MEDAD, pour contribuer à la mise en place du tracé de zones de protection des aires d'alimentation de captages en milieu karstique. Ce qu'il est possible de réaliser en croisant carte de vulnérabilité et carte des activités anthropiques.

La présente étude traite de l'application de la méthode RISKE 2 aux bassins d'alimentation des sources de l'Aygue Nègre et de l'Aygue Blanche, situées en vallée de l'Ouzoum, dans les Pyrénées occidentales (chaînons Béarnais). La méthode étant encore au stade expérimental, nous avons testé un certain nombre de facteurs, directement liés ou non au tracé des cartes (densité de relevés de terrain). Des facteurs périphériques au tracé des cartes ont aussi été testés. L'utilisation de logiciels à licence libres (SIG et convertisseur de format de fichier) appliqués à la méthode RISKE 2 est un exemple. Ayant permis de déterminer jusque quel point il est possible de limiter les coûts liés à la mise en application de la méthode RISKE 2 par des bureaux d'étude.

La cohérence des cartes obtenues et ce qu'elles reflètent a été particulièrement analysé. La conclusion propose un ensemble de perspectives, d'ordre méthodologique, dans le but d'améliorer l'utilisation faite de la méthode. Elle présente aussi la synthèse des avantages et inconvénients liés à l'utilisation des logiciels à licence libre pour la méthode RISKE 2.

Sommaire

Page de garde	1
Résumé	2
Sommaire	3
Liste des figures	4
Introduction	6
I. Présentation générale.....	6
1) Cadre et objectifs de l'étude.....	6
2) Rappel sur les aquifères karstiques	7
II. Présentation des terrains étudiés	13
1) Les Pyrénées Occidentales et leur piémont.....	13
1) Géographie	13
2) Contexte structural	13
3) Histoire géologique	15
2) Les sources d'Aygue Nègre et d'Aygue Blanche	17
1) Localisation géographique et usage des ressources	17
2) Stratigraphie des formations rencontrées	19
3) Contexte structural	23
4) Contexte hydrogéologique	24
III. La méthode multicritères d'étude des karsts RISKE 2.....	29
1) Principe de la méthode	29
2) Procédure de construction des cartes de vulnérabilité intrinsèque.....	32
IV. Application de la méthode RISKE 2 aux bassins de l'Aygue Nègre et de l'Aygue Blanche.....	34
1) Acquisition des données terrain : procédure suivie et difficultés rencontrées	34
1) Etapes initiales.....	34
2) Procédure d'acquisition.....	35
3) Difficultés rencontrées	35
2) Tracé des cartes de vulnérabilité intrinsèque	36
1) Méthodes utilisées	36
2) Tests effectués	38
3) Présentation des cartes obtenues	39
1) Aygue Nègre	40
2) Aygue Blanche	53
3) Cartes finales de vulnérabilité	61
Conclusion générale et perspectives.....	65
Références bibliographiques	68
Annexes.....	70

Liste des figures

Figure 1 : Carte des formations carbonatées de France (Marsaud, 1996).....	7
Figure 2 : Bloc-diagramme 3D schématique d'un système karstique (Bakalowicz, 1999).....	9
Figure 3 : Organisation hydrogéologique d'un karst (Dörfliger et <i>al</i> , 2004).....	10
Figure 4 : schéma fonctionnel d'un aquifère karstique (Bakalowicz, 1999).....	11
Figure 5 : schémas fonctionnels des types de karsts possibles (Rey, 2007 ; d'après Marsaud, 1996).....	12
Figure 6 : Cadre géographique de l'étude (Rey, 2007).....	13
Figure 7 : Schéma structural simplifié des Pyrénées occidentales (<i>in</i> Rey, 2007 ; d'après Lenoble, 1992 et James et Canérot, 2000). Encadré rouge : zone d'étude.	14
Figure 8 : Coupes structurales décrivant l'évolution des Pyrénées selon Desegloux et <i>al</i> , du Crétacé à l'Actuel (<i>in</i> Klarica, 1997).....	17
Figure 9 : Situation régionale des bassins d'étude, carte IGN au 1/100 000.....	18
Figure 10 : Stratigraphie des formations rencontrées en vallée de l'Ouzoum (<i>in</i> Klarica, 1997 ; d'après Godechot, 1962).....	19
Figure 11 : Exemple d'affleurement urgonien, Soum de las Escures, Aygue Nègre (hauteur : 20-30 m).....	20
Figure 12 : Marnes calcaires de Sainte Suzanne, Clots de Granquet, bassin de l'Aygue Nègre.....	21
Figure 13 : Barre de Barrémien au Nord du bassin de l'Aygue Blanche. Vue depuis le chemin menant au Soum d'Arangou, bassin de l'Aygue Nègre.....	21
Figure 14 : Coupe géologique interprétative N-S du bassin de l'Aygue Blanche Le point rouge à la limite des calcaires urgoniens et des marnes de Sainte Suzanne représentent la position supposée de la source.	22
Figure 15 : Coupe géologique interprétative N-S du bassin de l'Aygue Nègre. Le point rouge à la limite des calcaires urgoniens et des marnes de Sainte Suzanne représentent la position supposée de la source.	22
Figure 16 : Schéma structural général de la zone d'étude sur fond topo IGN au 1/25 000.....	23
Figure 17 : Contexte géologique du bassin de l'Aygue Blanche (Bichot, 2007).....	24
Figure 18 : Limites du bassin de l'Aygue Blanche définies par F. Bichot (trait rouge) et par S. Klarica (trait rouge + zone en bleue) sur fond topo et contours géologiques au 1/25 000.....	25
Figure 19 : Campagne de traçage réalisée par le Cabinet BERRE, Aygue Nègre (Bichot, 2007).....	26
Figure 20 : Proposition de délimitation de la partie orientale du bassin de l'Aygue Nègre (en bleu). Limites proposées par l'hydrogéologue agréé en rouge (1/89 100).....	27
Figure 21 : Limites du bassin de l'Aygue Nègre définies par F. Bichot sur fond topo et contours géologiques au 1/25 000.....	27
Figure 22 : schéma conceptuel définissant la situation in-situ des critères RISKEP (Pranville, 2007).....	30
Figure 23 : Indexation des critères RISKE 2.....	31
Figure 24 : Critère P et combinaisons de S et E.....	32
Figure 25 : Relation entre valeurs numériques et valeurs entières d'Ig.....	33
Figure 26 : Allure des courbes de niveau, Soum de Conques, bassin de l'Aygue Nègre.....	34
Figure 27 : Illustration d'une zone à forte pente et au sol glissant. Flan Nord du Pic de Monbula. Aygue Nègre.	35
Figure 28 : La crête de Monbula par temps brumeux, reliant le plateau de Monbula et le Pic de l'Estibète, cernée de part et d'autre par des pentes supérieures à 50%. Aygue Nègre.	36
Figure 29 : Allure de la base de données descriptive.....	37
Figure 30 : Allure de la base de données fonctionnelle.....	37

Figure 31 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.3-r0.25-p0.25-k0.2, Aygue Nègre	42
Figure 32 : zoom sur les zones explicitant l'influence prépondérante du critère I	42
Figure 33 : Commentaire sur le plateau du Monbula, carte d'Ig	43
Figure 34 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.35-r0.25-p0.2-k0.2, Aygue Nègre	44
Figure 35 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.35-r0.3-p0.2-k0.15, Aygue Nègre	44
Figure 36 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.35-r0.3-p0.25-k0.15, Aygue Nègre	45
Figure 37 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.4-r0.2-p0.2-k0.2, Aygue Nègre	46
Figure 38 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.4-r0.35-p0.15-k0.1, Aygue Nègre	47
Figure 39 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.45-r0.2-p0.2-k0.15, Aygue Nègre	47
Figure 40 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.45-r0.35-p0.1-k0.1, Aygue Nègre	48
Figure 41 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.55-r0.15-p0.15-k0.15, Aygue Nègre	49
Figure 42 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.55-r0.2-p0.15-k0.1, Aygue Nègre	50
Figure 43 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.55-r0.25-p0.1-k0.1, Aygue Nègre	50
Figure 44 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.6-r0.2-p0.1-k0.1, Aygue Nègre	51
Figure 45 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.7-r0.1-p0.1-k0.1, Aygue Nègre	52
Figure 46 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.3-r0.25-p0.25-k0.2, Aygue Blanche	54
Figure 47 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.35-r0.25-p0.2-k0.2, Aygue Blanche	55
Figure 48 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.35-r0.25-p0.25-k0.15, Aygue Blanche	56
Figure 49 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.35-r0.3-p0.25-k0.1, Aygue Blanche	57
Figure 50 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.4-r0.2-p0.2-k0.2, Aygue Blanche	57
Figure 51 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.4-r0.3-p0.2-k0.1, Aygue Blanche	58
Figure 52 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.5-r0.2-p0.2-k0.1, Aygue Blanche	59
Figure 53 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.5-r0.3-p0.1-k0.1, Aygue Blanche	59
Figure 54 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.55-r0.2-p0.15-k0.1, Aygue Blanche	60
Figure 55 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.55-r0.15-p0.15-k0.15, Aygue Blanche	60
Figure 56 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.6-r0.15-p0.15-k0.1, Aygue Blanche	60
Figure 57 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.7-r0.1-p0.1-k0.1, Aygue Blanche	61
Figure 58 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.3-r0.25-p0.25-k0.2 modifiée, Aygue Nègre	62
Figure 59 : carte de vulnérabilité intrinsèque, groupe i0.4-r0.3-p0.2-k0.1, Aygue Blanche ...	62
Figure 60 : Système alternant de perte/résurgence au sein d'un même thalweg. Ruisseau de Yerse, Aygue Nègre.	63
Figure 61 : Observations effectuées au niveau de la zone centrale du bassin de l'Aygue Blanche. Epikarst et sol à gauche, puits à droite.....	64

Introduction

I. Présentation générale

1) *Cadre et objectifs de l'étude*

Les eaux souterraines karstiques sont une composante importante des ressources en eau. De nombreuses sources karstiques sont captées pour l'alimentation en eau potable. En France, 25% des eaux souterraines destinées à l'alimentation en eau potable sont d'origine karstique.

Cependant, c'est précisément dans ce type d'aquifère que la procédure réglementaire (article L1321-2 du Code de la Santé Publique) de mise en place des périmètres de protection a le plus de retard. En effet, la complexité du milieu et la taille généralement importante de l'aire d'alimentation conjuguent de nombreuses difficultés. Les exigences, issues de la Directive Cadre européenne sur l'Eau et de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA) du 30/12/2006, tendent de plus à renforcer les dispositifs de maîtrise des pollutions diffuses par la création de zones de protection des aires d'alimentation de captages. La disponibilité d'une méthode à l'échelle nationale faciliterait la mise en œuvre d'une telle protection.

Un guide méthodologique de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses a été réalisé par le BRGM. Celui-ci a reçu l'aide financière du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire (MEDAD) et de l'Agence de l'eau Seine-Normandie. Pour le karst, il préconise la méthode RISKE 2 (aujourd'hui PaPRIKa), dont l'acronyme traduit les critères sur lesquels seront basés l'analyse : Roche, Infiltration, Sol, Karstification, Epikarst.

Concrètement, la méthode RISKE 2 - PaPRIKa permet le tracé de cartes de vulnérabilité intrinsèque (à l'infiltration de l'eau de pluie), dépendante des seules caractéristiques géologiques, hydrogéologiques et hydromorphologiques du bassin d'alimentation d'un aquifère karstique donné. L'utilisation de la vulnérabilité intrinsèque est indépendante de la pression anthropique. Cette cartographie de la vulnérabilité intrinsèque est indispensable à l'élaboration d'une carte des risques (croisement de la pression - pollution et de la vulnérabilité). La carte ainsi obtenue peut constituer elle-même une aide à la décision pour la mise en place de mesures de protection.

Le guide méthodologique accompagne une circulaire conjointe MEDAD-SANTE-AGRICULTURE, explicitant l'article L211.3, II-5° du Code de l'Environnement et son décret d'application du 14 mai 2007. Elle participe à une démarche visant à agir rapidement sur les captages les plus impactés par les pollutions diffuses, dits "captages prioritaires", dont plus du tiers sont en milieu karstiques et situés dans le bassin hydrographique français Adour-Garonne.

L'Agence de l'Eau Adour-Garonne réalise par ailleurs une étude intitulée : "Stratégies de protection des ressources en eau dans les secteurs karstiques". Initiée en juillet 2007, elle s'achèvera par la réalisation d'un guide méthodologique général. Celui-ci, détaillé et illustré, spécifique à la cartographie de la vulnérabilité par la méthode RISKE 2 - PaPRIKa va être réalisé par le BRGM (Nathalie DORFLIGER) en collaboration avec Valérie PLAGNES de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6).

Ce guide tiendra compte des avancées et interrogations amenées par la campagne de test de la méthode menée par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Cette campagne coordonnée par l'Agence est réalisée par divers bureaux d'études. L'Agence apporte un soutien technique et financier. Pour s'assurer au mieux d'une possible standardisation de la méthode, applicable avec un rendement maximal (optimisation des modes opératoires pour des coûts abordables), et ce, indépendamment du contexte d'étude du milieu karstique considéré, les bureaux d'étude ont appliqué la méthode sur des sites caractérisés par des contextes géographiques, géologiques et environnementaux différents (plateau, moyenne montagne, couvert végétal, sol ...). C'est ainsi que le cabinet 2AE s'est vu attribuer l'étude des bassins d'alimentation de l'Aygue Nègre et de l'Aygue Blanche, objets du présent rapport.

L'acronyme "RISKE 2" a évolué en "PaPRIKa", notamment pour éviter toute confusion entre aléas (risques anthropiques) et vulnérabilité (intrinsèque en ce qui nous concerne). PaPRIKa se définit comme une méthode relative à la **Protection des aquifères**. Cela nécessite d'acquérir par des sources bibliographiques et par des investigations de terrain des données intrinsèques au milieu concernant la **Protection** prise en charge par les sols et l'épikarst, la roche **Réservoir**, les modalités d'**Infiltration** à travers les pentes et les morphologies de surface et ainsi que l'état de **Karstification** du système concerné.

2) Rappel sur les aquifères karstiques

Afin de rendre accessible la lecture du présent rapport à qui le souhaiterait, nous rappellerons rapidement les notions qui seront utilisées plus loin. Nous aborderons les aquifères karstiques, leur mode de formation, leur organisation spatiale et les types de morphologies spécifiques que l'on peut y rencontrer.

En France, comme évoqué ci-dessus, 25 % des eaux souterraines destinées à l'alimentation en eau potable sont d'origine karstique et certaines grandes villes comme Montpellier, Besançon, Angoulême, Périgueux et Poitiers sont en grande partie alimentées par des eaux issues de résurgences karstiques (Figure 1).

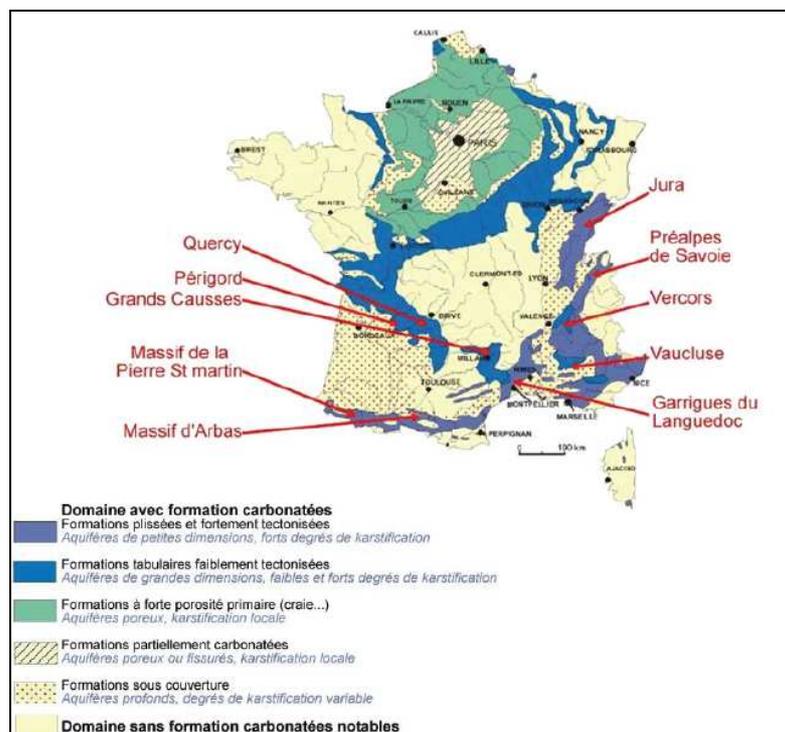


Figure 1 : Carte des formations carbonatées de France (Marsaud, 1996)

Les ressources en eau des aquifères karstiques restent sous-exploitées. Leur caractère vulnérable impose une protection élevée. Cet objectif nécessite une connaissance de la structure et du fonctionnement de ces systèmes hydrogéologiques complexes.

Le karst tire son nom de plateaux calcaires situés à la frontière de l'Italie, de la Slovénie et de la Croatie (en italien Carso, en slovène Kras, en croate Krs).

C'est un paysage, original, résultant d'un processus particulier d'érosion : la karstification. Elle consiste en la dissolution des roches surtout carbonatées (calcaires ou dolomies) par les eaux météoriques, rendues acides (chargement en CO₂ à l'état gazeux) par la présence de végétaux et l'existence de nombreux phénomènes pédologiques ayant lieu à la surface (respiration des micro-organismes vivant dans les sols, dégradation de la matière organique). Cette dissolution se produit lors de l'infiltration dans ces roches, préférentiellement au niveau de discontinuités pré-existantes (diaclasses, joints de stratification, ...).

L'intensité du processus de karstification est déterminée par des facteurs fixant l'architecture du milieu, précédant la mise en place des processus de karstification eux-mêmes. L'ensemble de ces facteurs sont regroupés sous un terme global, appelé "potentiel de karstification", qui comprend :

- le climat qui fixe les précipitations et le couvert végétal, dont dépendent le débit d'eau traversant l'aquifère et la quantité de CO₂ disponible (flux de solvant)
- la géologie, qui fixe :
 - o la lithologie (roche carbonatée, dans la très grande majorité des cas)
 - o la géométrie de la formation aquifère, qui peut intervenir sur la transition entre infiltration et ruissellement (pente, plateau, cuvette, ...)
 - o la fracturation initiale des roches, définissant les vides originels qui seront par la suite élargis par dissolution
- la géomorphologie, qui détermine :
 - o l'énergie nécessaire à l'écoulement pour le transport des matières dissoutes (= gradient hydraulique)
 - o l'épaisseur de la zone d'infiltration : l'eau souterraine conserve d'autant plus d'aptitude à dissoudre le calcaire en profondeur que la zone d'infiltration est peu épaisse.

Le potentiel de karstification traduit le cadre dans lequel le karst a pu se développer, mais ne fournit aucune information exploitable sur l'organisation karstique, ni sur son fonctionnement.

A l'échelle des temps géologiques, il a été constaté que la formation et le développement d'un aquifère karstique peuvent être rapides. Des durées de quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'années sont couramment admises.

Ce sont des variations d'amplitude, même légères, entre le niveau de base, où est localisée la source, et la surface de l'impluvium du bassin d'alimentation dudit karst, qui vont influencer le développement par étapes, mais progressif, d'un karst donné.

Ces variations entre niveau de base et impluvium peuvent être reliées à des influences externes (locales ou régionales) tels que variations d'ordre climatique (précipitations, niveau marin), morphologiques (tectonique, couvert végétal), influences externes qui vont contribuer à définir des variations du potentiel de karstification.

Nous retiendrons cependant que l'action de la karstification est progressive (retour à une situation d'équilibre, suite à une sollicitation "ponctuelle" à l'échelle des temps géologiques).

Le processus de karstification va définir le modelé d'une structure karstique. Nous trouverons en surface des morphologies caractéristiques d'un massif karstique (lapiatz, dolines, vallées sèches, gouffres, ...) et en profondeur, le tracé d'un réseau de conduits (horizontaux ou verticaux) et de cavités, pouvant être pénétrables par l'homme, et qui seront fonctionnels ou non.

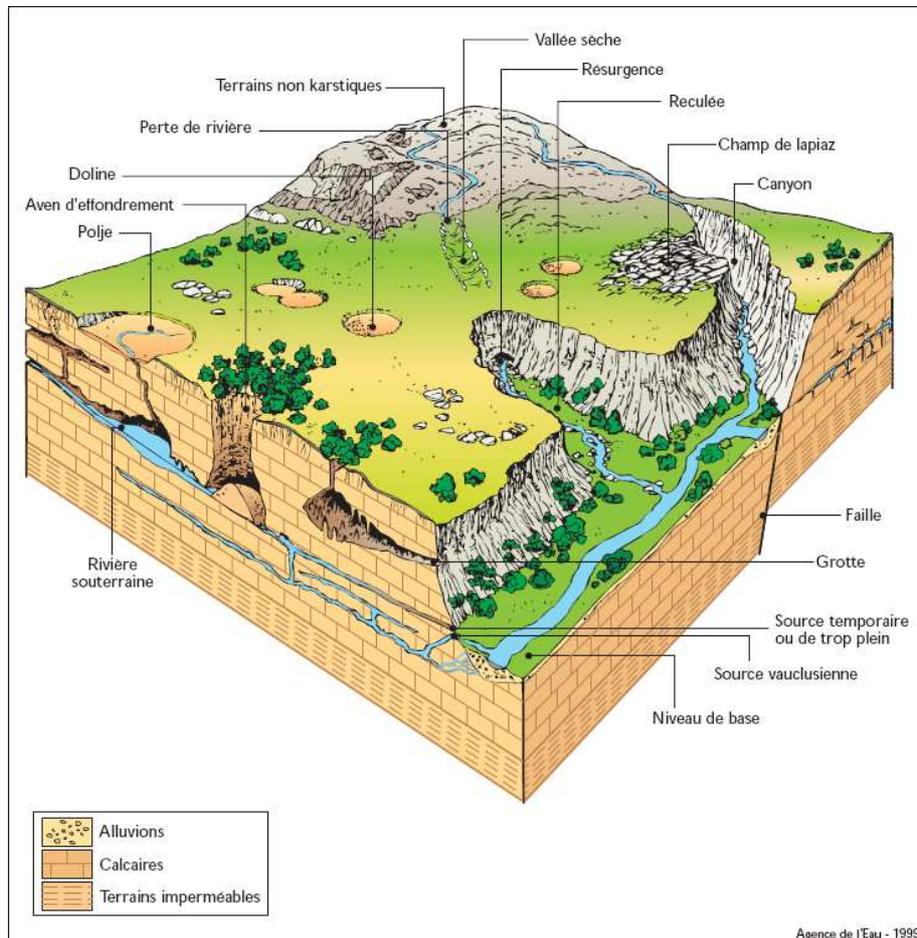


Figure 2 : Bloc-diagramme 3D schématique d'un système karstique (Bakalowicz, 1999)

En fonction de l'état de développement de la karstification, une grande variété d'aquifères karstiques va ressortir. On pourra aller du pôle aquifère fissuré jusqu'au pôle aquifère karstique pur (très fonctionnel et donc très creusé). Cette variété traduit d'un point de vue fonctionnel (hydrogéologie) :

- une variabilité spatiale et temporelle importante des paramètres physico-chimiques et hydrodynamiques du milieu aussi bien dans la zone d'infiltration que dans la zone noyée
- l'existence de forts contrastes de perméabilités (fissures d'ouverture micrométrique et longues de plusieurs mètres jusqu'à des conduits de quelques dizaines de mètres de section et longs de plusieurs kilomètres)
- l'existence de vitesses d'écoulement souterrain très rapides, quelques centaines de m/h, d'où un temps de séjour de la majorité des eaux, de l'ordre de quelques jours à quelques semaines
- des crues importantes et brutales, de fortes intensité, suivie d'une décrue rapide et d'un long tarissement

- des mises en charge importantes peuvent provoquer l'inondation de réseaux supérieurs, habituellement sans écoulement, et la mise en fonctionnement de sources temporaires de trop plein

L'aquifère karstique est donc le seul type d'aquifère pour lequel la circulation de l'eau dans la formation géologique façonne les vides de l'aquifère et induit des caractéristiques aquifères spécifiques.

Un système karstique s'organise, verticalement, de la façon suivante :

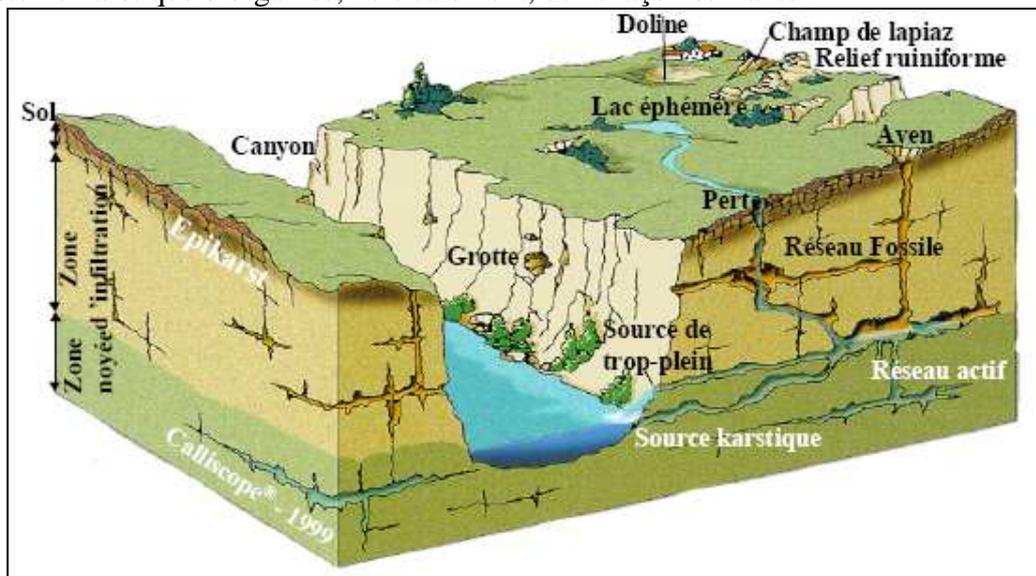


Figure 3 : Organisation hydrogéologique d'un karst (Dörfliger et al, 2004)

Trois zones distinctes ressortent :

- l'épikarst ou zone épikarstique (ou zone de dégazage) se situe en subsurface. Il recouvre approximativement la première dizaine de mètres sous la surface du sol. Zone sous-cutanée fortement fissurée, sa puissance peut être de l'ordre de quelques centimètres à plusieurs mètres, quand il est présent. L'épikarst peut rassembler l'eau d'infiltration et constituer ainsi, localement, une nappe perchée temporaire discontinue. Sa présence diffère l'infiltration en profondeur de façon plus ou moins marquée, selon la géométrie qui le caractérise (continuité, épaisseur, taille des vides, ...). La vitesse d'infiltration et de transit de l'eau dans cette zone conditionne le développement du réseau karstique dans le reste du massif. Plus l'infiltration et le transit de l'eau seront rapides dans l'épikarst, plus le potentiel de karstification sera élevé en profondeur. Tout comme dans un milieu poreux, les eaux stockées en sub-surface peuvent être reconcentrées par évapotranspiration ce qui peut entraîner une augmentation des teneurs en éléments dissous (Na^+ et Cl^- , notamment)
- la zone non saturée (ou zone d'infiltration) est très hétérogène. Elle assure le transfert des eaux d'infiltration dans le massif karstique par un nombre réduit de conduits karstiques. L'infiltration sera plus ou moins rapide en fonction de la taille et de la verticalité des conduits empruntés. Les conduits verticaux sont préférentiellement élargis par karstification à partir de la fissuration originelle. La zone non saturée peut également être un lieu d'accumulation par le biais de la microfissuration de la matrice calcaire et dans les conduits peu karstifiés. Cette zone peut également jouer un rôle important dans la dynamique de certains aquifères karstiques en période d'étiage

- la zone saturée (ou zone noyée) correspond globalement à la "nappe" dans un aquifère poreux. Alimentée par l'intermédiaire des conduits de la zone d'infiltration, elle se développe principalement à l'aval du système. Structurellement, elle est constituée comme un milieu à double porosité avec une matrice micro-fissurée (porosité primaire et secondaire) capacitive et peu perméable, en connexion avec des conduits drainants très perméables assurant l'écoulement vers l'exutoire (écoulements rapides). Fonctionnellement, le stockage est principalement assuré par les systèmes annexes au drainage (SAD), zones à fortes pertes de charges, qui sont de grands vides connectés au réseau de conduits (écoulements occasionnels).

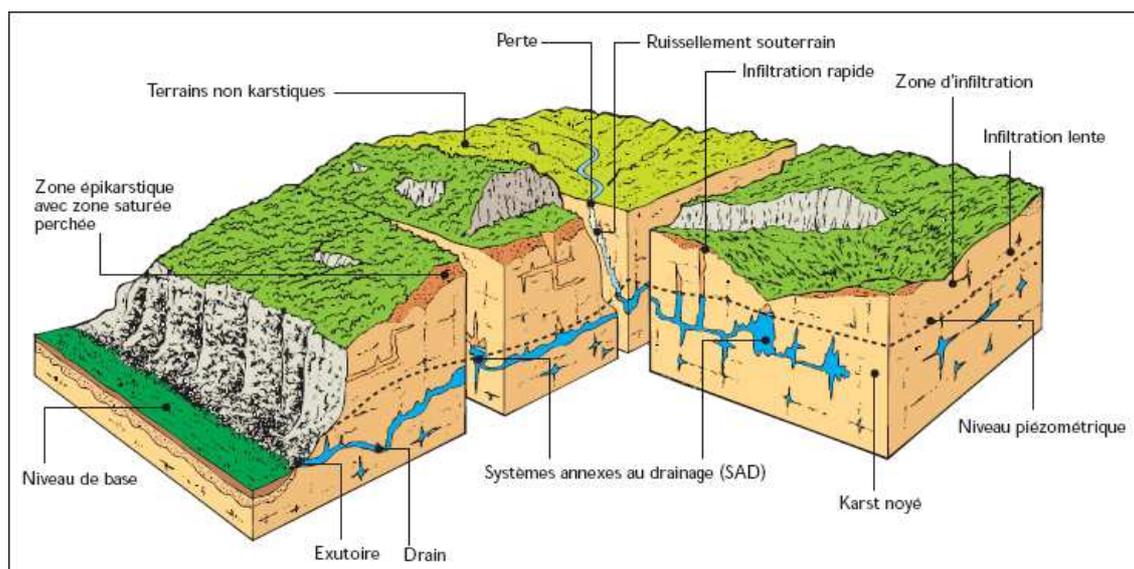


Figure 4 : schéma fonctionnel d'un aquifère karstique (Bakalowicz, 1999)

Selon la nature de l'impluvium (Figure 5), on distingue deux configurations de systèmes karstiques [Bakalowicz, 1999] :

- les karsts unaires, pour lesquels l'ensemble de l'impluvium est constitué de terrains karstiques. L'infiltration diffuse à l'échelle du massif peut être lente ou rapide
- les karsts binaires, pour lesquels l'impluvium comprend des terrains non karstiques et imperméables qui sont le plus souvent le siège d'un ruissellement. Au contact des formations imperméables et du calcaire constitutif du karst, des pertes absorbent les écoulements de surface et constituent une alimentation directe par ruissellement à fort débit de la zone noyée. Lorsque des écoulements de surface contribuent à l'alimentation de la zone noyée à partir de pertes, l'aquifère karstique au sens strict n'est qu'une partie du système karstique, puisque ce dernier est alors constitué de l'aquifère proprement dit et du bassin de surface drainé par des pertes.

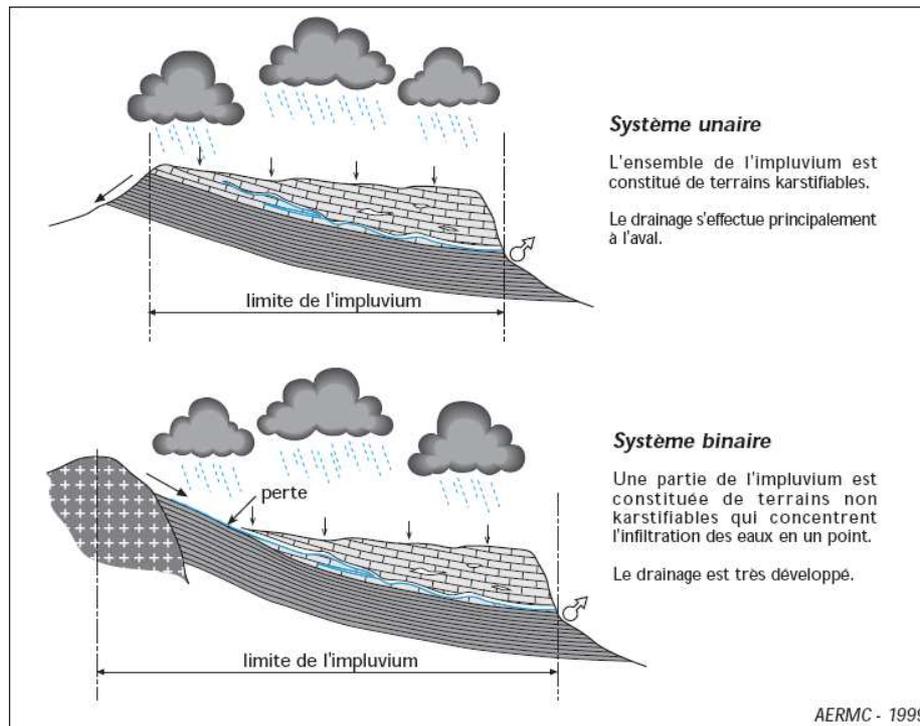


Figure 5 : schémas fonctionnels des types de karsts possibles (Rey, 2007 ; d'après Marsaud, 1996)

Le karst est réputé très vulnérable aux pollutions par comparaison avec les autres aquifères, du fait des caractères suivants :

- faible rôle filtrant de la zone d'infiltration ;
- faible effet de la dispersion et de la dilution lié à l'organisation des écoulements et du temps de séjour de l'eau trop court pour qu'un effet auto-épurateur intervienne au sein de l'aquifère ;
- importante variabilité temporelle de la qualité de l'eau (turbidité rapidement évacuée après un orage, plus problématique après un déboisement)

La vulnérabilité du karst présente en contrepartie certains caractères intéressants qui doivent être pris en compte dans les projets de mise en valeur :

- élimination généralement rapide des pollutions accidentelles ;
- effets retardateurs (adsorption, dispersion) en général réduits ;
- amélioration rapide (à l'échelle du cycle hydrologique) de la qualité de l'eau à l'exutoire à la suite de changements dans les rejets de pollutions chroniques ou saisonnières (modifications des pratiques, mise en place de stations de traitement), c'est-à-dire que les effets cumulatifs d'un cycle sur le suivant sont faibles ou négligeables, du fait du temps de séjour très inférieur à un an ;
- nette différence de qualité et de comportement entre les périodes d'étiage (fonctionnement capacitif, temps de séjour long) et de crue ou de hautes eaux (fonctionnement transmissif, temps de séjour court).

Les aquifères karstiques se caractérisent par un ensemble de paramètres qui leur sont propres. Compte tenu de leurs spécificités, ils doivent être abordés au moyen d'un ensemble d'outils de reconnaissance et d'exploration adaptés et complémentaires. La méthode d'étude des karsts RISKE 2 - PaPRIKa s'inscrit dans cette optique.

II. Présentation des terrains étudiés

1) Les Pyrénées Occidentales et leur piémont

1) Géographie

La chaîne des Pyrénées représente une véritable frontière naturelle entre la France et l'Espagne (Cf. figure). Elle s'étend sur près de 450 km entre l'Océan Atlantique à l'Ouest et la Mer Méditerranée à l'Est. Elle sépare deux grands bassins sédimentaires, le bassin aquitain au Nord et le bassin de l'Ebre au Sud. En France, les Pyrénées recoupent plusieurs départements, d'Ouest en Est il s'agit des Pyrénées-Atlantiques (lui-même divisé en deux provinces socioculturelles bien distinctes, le Pays Basque à l'Ouest et le Béarn à l'Est), des Hautes-Pyrénées, de la Haute-Garonne, de l'Ariège et des Pyrénées-Orientales. Montagnes massives, peu dégagées par les glaciers, d'extension limitée, les Pyrénées ne sont guère franchissables, si ce n'est à l'Ouest et en bordure de la Méditerranée (Col du Perthus, 290 m). L'ensemble des reliefs définit en effet une bande d'une largeur variant de 5 à 150 km, avec des sommets dépassant 3000 m (point culminant : le Pic d'Aneto, 3404 m d'altitude).

Le massif présente un climat varié, tiède et humide à l'Ouest sur le versant français. La pluviométrie peut atteindre 2000 mm/an dans certaines zones du pays basque français (de l'ordre de 1500 mm/an dans notre zone d'étude). Le climat permet le développement d'une couverture végétale très dense où les bois occupent souvent une place importante. Il devient rigoureux et enneigé au centre et prend des nuances continentales sur le versant espagnol. Les vallées des Pyrénées occidentales sont presque toutes perpendiculaires à l'axe de la chaîne (S-N) et l'isolement explique la difficulté de communication de certaines vallées.

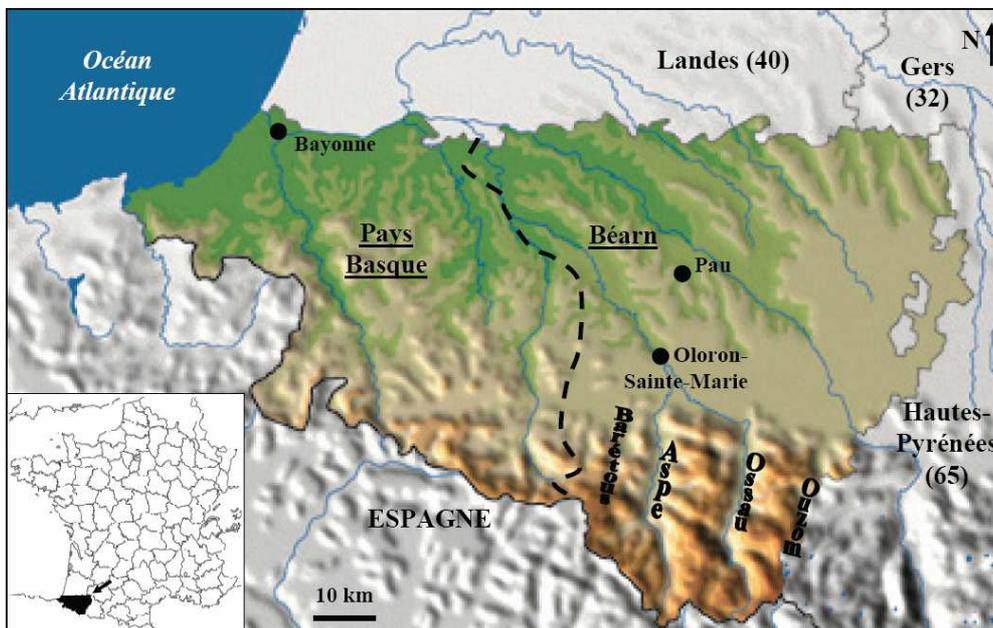


Figure 6 : Cadre géographique de l'étude (Rey, 2007)

2) Contexte structural

La chaîne Pyrénéenne est orientée N110°E et représente un des meilleurs exemples de la superposition du plissement alpin à un fragment de l'orogène hercynien. Globalement, elle est le résultat de la compression d'une région étroite séparant la plaque Europe occidentale et le craton ibérique. Les deux blocs continentaux couissent, puis s'affrontent à la faveur de la subduction de l'Ibérie sous l'Europe. On aboutit structurellement à une compartimentation en

trois grands ensembles géologiques, la Haute Chaîne, formant le cœur du massif, entourée des zones Nord et Sud-Pyrénéenne. Ces deux dernières sont elles-mêmes cernées respectivement par les bassins Aquitain au Nord et de l'Ebre au Sud, constituant l'avant-pays pyrénéen. Le tout s'organise de la façon suivante :

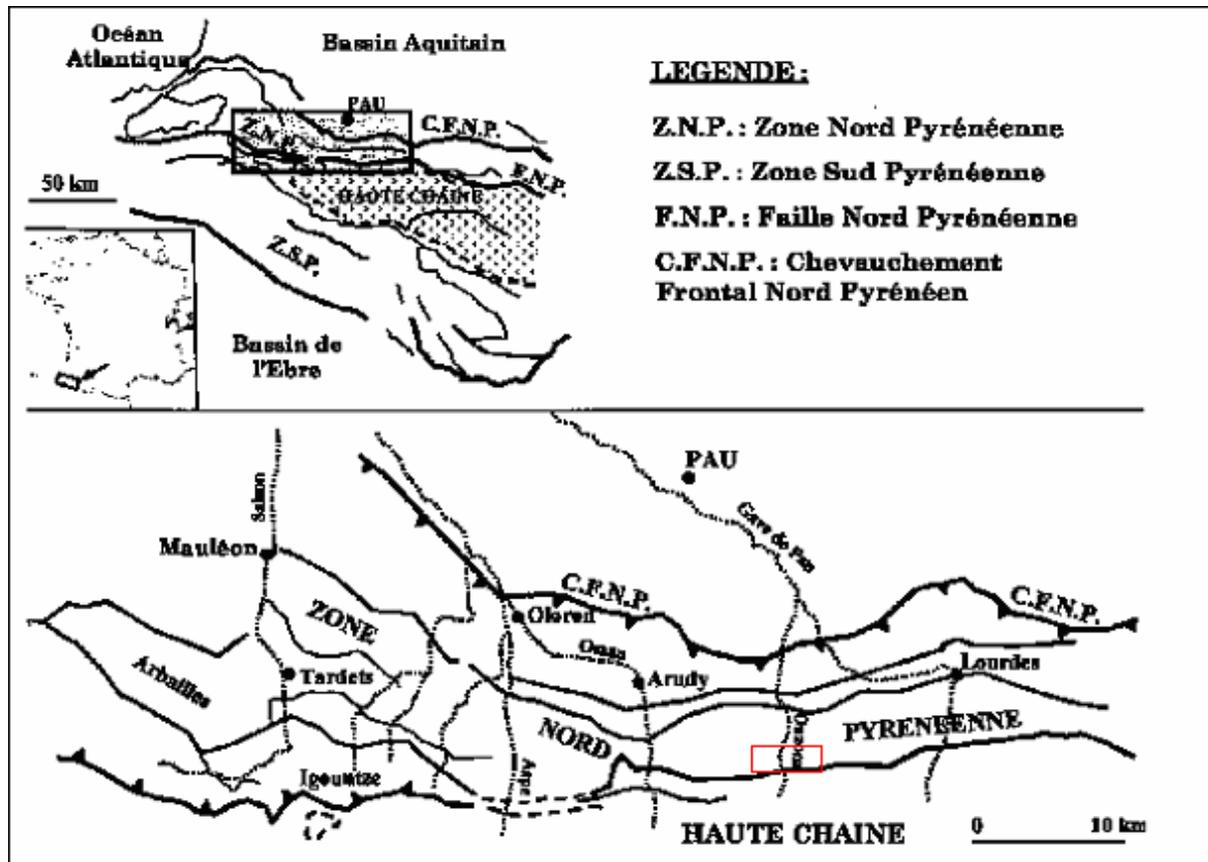


Figure 7 : Schéma structural simplifié des Pyrénées occidentales (in Rey, 2007 ; d'après Lenoble, 1992 et James et Canérot, 2000). Encadré rouge : zone d'étude.

- La partie méridionale du bassin Aquitain constitue à proprement parler l'avant-pays Nord Pyrénéen ou Zone Sous-Pyrénéenne Nord. Tout comme l'avant-pays Sud pyrénéen, il est caractérisé par des reliefs relativement doux, dont l'altitude moyenne ne dépasse pas 400 m (Coteaux du Béarn). Cet avant-pays Nord est constitué d'une succession de terrains autochtones d'âges Mésozoïque et Cénozoïque ("pays des flyschs"), dont les couches présentent un pendage général de quelques degrés vers le Nord ;
- La Zone Nord-Pyrénéenne est limitée au Nord par le Chevauchement Frontal Nord-Pyrénéen et au sud par la Faille Nord-Pyrénéenne, récemment appelée "Couloir de Décrochement de Bielle-Accous". Cette zone sépare la plaque européenne de la plaque ibérique. Elle est constituée de chaînons calcaires et dolomitiques, plus accidentés, déformés et plissés que l'avant-pays, d'altitude moyenne qui peut atteindre localement les 2000 m (2050 m pour le Pic du Moule de Jaut), entrecoupés de creux constitués de formations marneuses. L'ensemble de ces matériaux date du Jurassique et du Crétacé inférieur. Dans la région étudiée, la Zone Nord-Pyrénéenne est le siège aujourd'hui encore d'une sismicité discrète qui se situe à proximité de la limite entre la plaine et les reliefs. Nous avons nous-mêmes pu faire l'expérience sur le terrain du séisme du 16 juillet 2008, de magnitude 4.3, enregistré à 22h23 selon l'Observatoire des Sciences de la Terre à Toulouse (épïcêtre : Arudy, à l'entrée de la Vallée d'Ossau) ;

- la Haute Chaîne, ou Zone Axiale, constituée essentiellement de terrains d'âge Paléozoïque, constitue l'axe orographique de la chaîne. Elle est limitée au Nord par la Faille Nord-Pyrénéenne et au sud par la Faille Sud-Pyrénéenne et constitue la ligne de suture des plaques européenne et ibérique. Les hauts sommets sont taillés dans des roches allant du Dévonien au Carbonifère, ainsi que dans des roches métamorphiques et magmatiques. Le Paléozoïque est recouvert en discordance angulaire par des calcaires de plate-forme du Crétacé supérieur où l'on trouve des intrusions d'origine magmatique. Localement, du Trias s'intercale entre le socle et la couverture. Difficilement franchissable, cette Haute Chaîne regroupe les principaux sommets tels le Vignemale (3298 m), le Mont Perdu (3355 m) et le Pic d'Aneto (3404 m), point culminant de la chaîne. En Béarn, le point culminant est le Pic du Midi d'Ossau (2884 m). Ces sommets sont séparés par des cols, ou ports, élevés (Pourtalet, 1794 m ; Somport, 1632 m) et surcreusés de cirques glaciaires (Gavarnie) ;
- la Zone Sud-Pyrénéenne est composée de formations sédimentaires d'âge Crétacé-Tertiaire qui trouvent leur origine dans la Zone Axiale, glissées et décollées vers le sud. Ces unités chevauchantes s'étendent vers le sud jusqu'au Chevauchement Frontal Sud-Pyrénéen ;
- le bassin de l'Ebre (plus précisément, sa partie septentrionale) constitue l'avant pays-Sud (ou Zone Sous-Pyrénéenne Sud). Situé en avant du Chevauchement Frontal Sud-Pyrénéen, il représente l'avant fosse ultime des Pyrénées. Ce bassin s'est développé sur le flanc Sud-Ouest des Pyrénées durant l'Oligo-Miocène avec un remplissage très important de matériaux divers issus de l'érosion de la chaîne, toujours en cours de formation. Il se caractérise dans le paysage lui aussi par des reliefs relativement doux, mais qui eux, ne dépassent pas 500 m d'altitude.

Notre étude est focalisée en Béarn, sur la partie occidentale et septentrionale de la chaîne des Pyrénées. Le massif du Jaout – Prat dou Rey fait partie des Chaînons Béarnais de la Zone Nord-Pyrénéenne (2^{ème} chaînon).

3) Histoire géologique

L'architecture crustale des Pyrénées est le résultat d'une évolution structurale qui a débuté au Paléozoïque avec la formation du socle hercynien. Mais son histoire tectonique ne débute vraiment qu'au Trias par une première phase de distension, conduisant à un amincissement de la croûte continentale et au dépôt d'une épaisse série d'évaporites dans un large bassin subsident, orienté NW-SE et lié à l'ouverture de la Téthys. La région du Bassin Aquitain est alors limitée au Nord par un accident nord-aquitain et au Sud par un accident nord-pyrénéen ; c'est à cette période que la Zone Nord-Pyrénéenne va s'individualiser en se distinguant des autres unités. Cette phase de distension conduit également à la mise en place de matériel magmatique tholéïtique liée à des accidents crustaux majeurs.

C'est à partir du Lias que la région est envahie par le dépôt de carbonates marins (calcaires, dolomies, marnes et marno-calcaires), formant une plate-forme stable, annexe de la Téthys. Le Haut-Fond occitan est une structure NE-SW liée au début de l'ouverture de la Téthys ligurienne. Les variations de faciès et d'épaisseur traduisent le jeu de blocs crustaux basculés en réponse à une distension régionale NW-SE.

Au Dogger, les variations de dépôts (calcaires à microfilaments puis dolomies) traduisent le passage de la plate-forme externe, ouverte, à la plate-forme moyenne puis interne. La réduction des épaisseurs témoigne d'une accélération de la distension NW-SE.

Le Jurassique supérieur (Oxfordien et Kimméridgien) correspond à une phase de distension et d'instabilité de la plate-forme. La succession de dépôts marno-calcaires, de marnes à l'Oxfordien et au Kimméridgien puis de calcaires et de dolomies au Portlandien, traduit l'envoyage graduel de la plate-forme jurassique sous l'effet conjugué de l'eustatisme positif et de la tectonique d'ouverture de l'Atlantique.

A la fin du Jurassique supérieur, la formation de sédiments de plate-forme interne (dolomies) et le Jurassique sous-jacent sont portés à émergence et exposés à l'érosion, suite à une régression mondiale généralisée et à l'accélération de la dérive vers l'Est de l'Ibérie par rapport à l'Europe.

Au Crétacé, la sédimentation ne reprend qu'au Barrémien et l'intervalle Berriasien-Barrémien correspond à une longue période d'émergence. Les formations jurassiques sont alors soumises à l'érosion karstique accompagnée de dépôts de croûtes bauxitiques. A partir de l'Aptien inférieur et jusqu'à l'Albien, une configuration typique de plate-forme/bassin est en place, accompagnée d'un développement de constructions carbonatées récifales (faciès urgonien). Le rift pyrénéen nouvellement mis en place par l'écartement des plaques Ibérie et Europe a pour conséquence le développement de bassins rhomboédriques orientés N110°E à N140°E et limités par des accidents transverses N030°E à N080°E.

A la fin du Crétacé inférieur, une accélération de la distension (phase clansayésienne), associée à une nouvelle transgression, provoque l'immersion de la région et le passage d'une sédimentation carbonatée urgonienne à une sédimentation silico-clastique des marnes à Spicules de l'Albien. A l'Albien débute l'ouverture du Golfe de Gascogne qui marque le paroxysme de la phase extensive et la mise en place d'une zone transformante au sein du rift éocétacé. Elle correspond à la brusque accélération du déplacement relatif senestre de l'Ibérie par rapport à l'Europe. Des bassins s'ouvrent suivant des accidents N060°E décrochants dextres, les accidents N140°E jouant en failles normales ou décrochements sénestres et sont comblés par des "flyschs noirs" (bassin de Mauléon).

Au cours de l'Albien supérieur et du Cénomaniens, cette fosse turbiditique s'élargit, des sédiments détritiques grossiers remaniant divers éléments de la couverture mésozoïque antéalbienne, voire du socle paléozoïque (formations des poudingues de Mendibelza). L'amincissement crustal, résultant des mouvements coulissants de la plaque ibérique surimposés aux mouvements distensifs, favorise le développement d'un magmatisme alcalin (voire tholéitique) et d'un métamorphisme thermique lié à la circulation de fluides de hautes températures.

La convergence de l'Ibérie et de l'Europe dès la fin du Crétacé supérieur, plus précoce à l'Est qu'à l'Ouest, entraîne la fermeture progressive du bassin de flyschs. La phase majeure de compression pyrénéenne est placée selon les auteurs à la fin de l'Eocène inférieur, moyen ou supérieur.

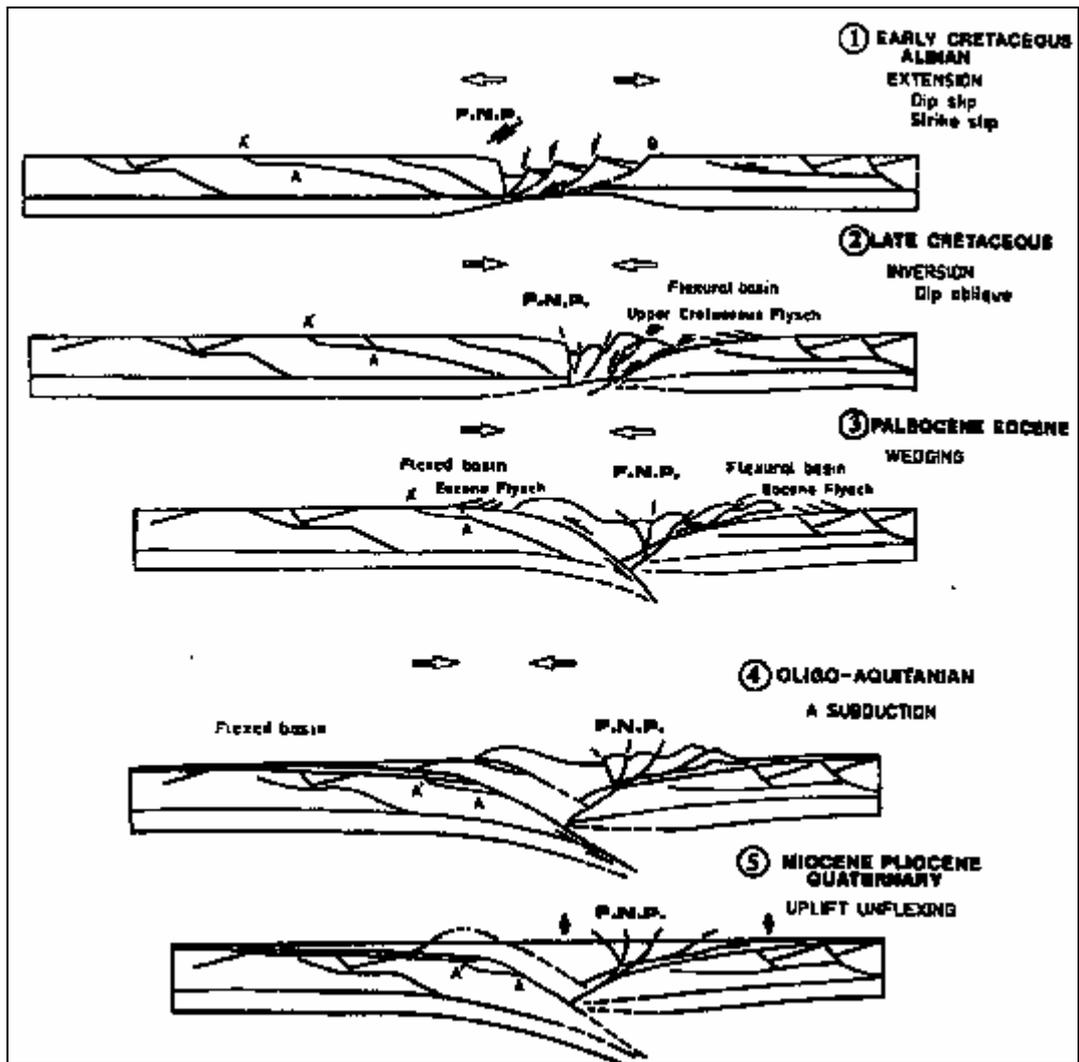


Figure 8 : Coupes structurales décrivant l'évolution des Pyrénées selon Desegloux et al, du Crétacé à l'Actuel (in Klarica, 1997)

2) Les sources d'Aygue Nègre et d'Aygue Blanche

1) Localisation géographique et usage des ressources

Les deux sources se situent à la limite des Hautes-Pyrénées et des Pyrénées Atlantiques, de part et d'autre de la vallée de l'Ouzo(u)m. Elles sont captées pour l'alimentation en eau potable du Syndicat Mixte du Nord-Est de Pau (SMNEP). Il s'agit de la 4^{ème} principale vallée du Béarn située la plus à l'Est du pays et limitrophe avec le département des Hautes-Pyrénées (au Sud-Ouest de la France).



Figure 9 : Situation régionale des bassins d'étude, carte IGN au 1/100 000

La source de l'Aygue Blanche (littéralement : "eau blanche", en béarnais ; 615m NGF) est localisée en rive gauche de l'Ouzom, sur la commune de Louvie-Juzon. La prise d'eau, installée sur celui des deux principaux exutoires qui apparaît pérenne, date de 1967 et semble en bon état de fonctionnement. L'accès à la source, difficile, s'effectue par un cheminement très abrupt, au-dessus de la route départementale 126 et le long du cours d'eau issu de la source. Malgré la présence d'autres sources qui semblent jaillir du même bassin (trop-plein repéré à 715 m), il semblerait que la source de l'Aygue Blanche concentrerait une grande partie des eaux de l'aquifère.

La source de l'Aygue Nègre ("eau noire" ; 612m NGF) est localisée en rive droite de l'Ouzom, à la limite des communes d'Asson et de Ferrières. On y accède à pied par un chemin assez long s'élevant progressivement au-dessus du hameau de la Herrère. La prise d'eau date de 1960. Le dispositif de captage serait à rénover, ne serait-ce que pour améliorer le rendement de la prise en limitant les pertes environnantes.

Les prélèvements aux sources des Aygues (de 234m³/h à l'étiage à 630 m³/h maximum) rejoignent gravitairement dans la vallée un poste de stérilisation ("Calibet", désinfection simple par chloration, 417 m NGF). Seul le débit global des 2 sources est actuellement mesuré par un débitmètre installé au poste de Calibet.

En 2006, les 2 sources produisaient presque 40% des eaux distribuées par le Syndicat Mixte AEP du Nord-Est de Pau. Soit 4 Mm³.

2) Stratigraphie des formations rencontrées

Les formations observées au niveau du synclinal Jaut – Prat d'Ourey, qui définissent les bassins d'alimentation des deux sources sont les suivantes :

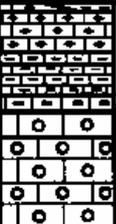
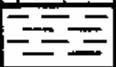
Epaisseur	Age	Lithologie	Description
600 m	Albo-Aptien		schistes noirs et calcaires schisteux
450 à 800 m	Aptien supérieur Urgonien		calcaire massif gris cristallin calcaire schisteux noir niveau à chailles calcaire gris rose cristallin
150 m	Aptien et Bédoulien		marnes schisteuses noires
100 m	Bédoulien à Valanginien		calcaires noirs marneux, argiles gris, grès ferrugineux rouges
200 m	Portlandien		dolomies grises
250 m	Kimméridgien		calcaires noirs compacts
350 à 400 m	Callovo-Oxfordien		Dolomies noires cristallines Dolomies graveleuses

Figure 10 : Stratigraphie des formations rencontrées en vallée de l'Ouzoum (*in* Klarica, 1997 ; d'après Godechot, 1962)

- Les formations du Quaternaire (E) sont surtout présentes dans des petites vallées, à l'amont d'un thalweg, au pied d'une barre calcaire (Urgonien, voire Barrémien dans notre cas), ... Ce sont principalement des éboulis ou des dépôts de remaniement ;
- Les formations de l'Albien sont constituées de marnes dites de "saint Palais" (c1). Ces marnes forment les belles prairies des plateaux de Jaut et de Monbula dans l'axe du synclinal de Prat d'Ourey-Jaut. Il s'agit de marnes calcaires schisteuses et de calcaires marneux schisteux noirs, gris-bleuté ou gris qui n'ont fourni que des articles à Crinoïdes et des spicules de Spongiaires, mais en abondance (le terme de "marnes à spicules" a même été spécialement créé par Cuvillier et Debourle en 1954). On ne les attribue à l'Albien que parce qu'elles surmontent les calcaires de l'Aptien supérieur. Leur épaisseur peut atteindre 600 mètres au cœur du synclinal du Jaut (Klarica, 1997). A noter que localement (flanc nord de la montagne de Jaut, notamment), la partie inférieure de ces schistes, notée n6m, qui passe par indentations aux calcaires de faciès urgonien, est, comme ceux-ci, d'âge gargasien. Le dispositif de passage des schistes aux calcaires est notamment bien visible à l'Ouest du col de Jaut par une alternance de faciès qui semble ne pas s'exprimer au niveau du synclinal du Prat d'Ouray (bassin de l'Aygue Nègre) ;

- Les formations de l'Aptien supérieur se traduisent par des massifs calcaires subrécifaux (n6) et constituent le réservoir des deux sources objets du présent rapport. Epais d'environ 400 à 600 mètres, ces calcaires massifs de faciès urgonien contiennent de nombreuses *Toucasia*. Ces calcaires forment les hautes reliefs bordant le synclinal de la montagne de Jaut et se prolongeant à l'Est de l'Ouzom dans la chaîne Pic de Monbula – Estibète – Soum d'Andorre – Prat d'Ourey. Plus généralement, ils forment les plus hauts reliefs des chaînons béarnais. Il a été remarqué (N'Da Loukou, 1984) que cette formation urgonienne se compose de 4 séquences traduisant de rapides passages latéraux de faciès, qui confirment le caractère récifal de la formation :
 - o calcaires inférieurs à rudistes (séquence U1) ;
 - o calcaires à Mésorbitolines (U2) ;
 - o calcaires supérieurs à rudistes (U2) ;
 - o calcaires récifaux à polypiers et algues de Vinport (U3 et U4).

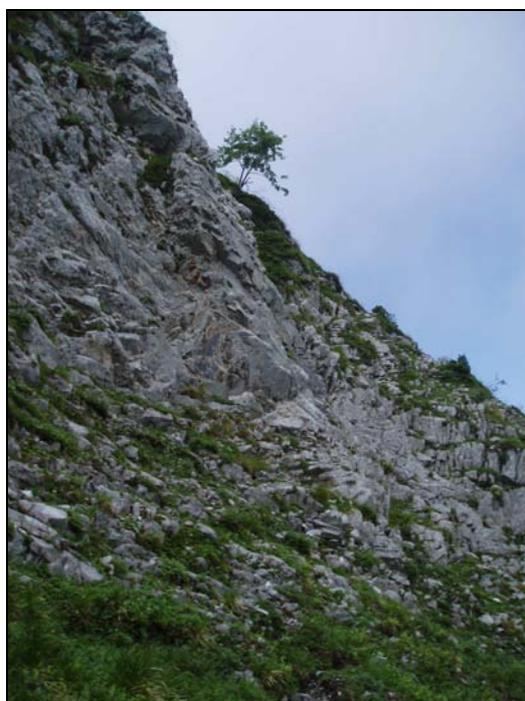


Figure 11 : Exemple d'affleurement urgonien, Soum de las Escures, Aygue Nègre (hauteur : 20-30 m)

- Les formations de l'Aptien inférieur sont représentées par les marnes de "Sainte Suzanne" (formation décrite par Leymerie en 1862 au village de Sainte-Suzanne, près d'Orthez au nord du Béarn ; n5). C'est un ensemble de marnes, parfois gréseuse, finement litées, parfois à débit ardoisier, gris bleuté à roux, parfois de patine jaune sale, caractéristique, dans lequel des passées plus carbonatées à Orbitolines (faune bédoulienne) sont présentes. Quelques cubes de pyrite, tronqués ou non, ont été observés. L'épaisseur de cet ensemble varie ici de 50 à 250-300 mètres et se trouve être facilement reconnaissable dans le paysage par les creusements marqués du relief qui traduisent sa présence. Nous nous sommes servis dans un premier temps de ces marnes de "Sainte Suzanne" pour caler, sur nos terrains, la reconnaissance de l'ensemble des formations environnantes observables. Cette approche semble avoir été utilisée par le passé, notamment pour caler les calcaires subrécifaux de l'Urgonien (Gargasien) qui, bien que très zoogènes, ne renferment pas de faune biostratigraphiquement exploitable ;



Figure 12 : Marnes calcaires de Sainte Suzanne, Clots de Granquet, bassin de l'Aygue Nègre

- Sous les marnes de sainte Suzanne, et après une zone intermédiaire de quelques mètres où des calcaires alternent avec des marnes à Orbitolines, la base du Crétacé est représentée par une série de calcaires à Annelides du Néocomien (Barrémien à Valanginien, n4-2), de 60 à 100 m de puissance. Ils forment dans le paysage une barre très visible. Ces calcaires surmontent un niveau discontinu de grès siliceux, non observé sur notre terrain, qui serait épais de 15 mètres maximum ;



Figure 13 : Barre de Barrémien au Nord du bassin de l'Aygue Blanche. Vue depuis le chemin menant au Soum d'Arangou, bassin de l'Aygue Nègre

- Les formations du Portlandien (Tithonien ; j9) sont représentées par des dolomies épaisses de 150 mètres maximum. Elles sont reconnaissables à leur grain fin, à leur couleur gris clair, avec des niveaux oolithiques et de brèches intraformationnelles. La faune contenue dans les intercalations de calcaires dolomitiques (Ibérines) a permis d'attribuer cette formation au Portlandien ;
- Les formations du Kimméridgien (j8) d'une puissance de 200 à 300 m, sont composées d'un complexe de calcaires noirs à pâte fine, parfois dolomités, bien lités, alternant avec des niveaux peu épais de calcaires marneux noirs et aussi de marnes schisteuses noires. De façon générale, ce niveau est attribué au Kimméridgien en raison de la présence de coquilles de petits exogyres et de quelques pseudocyclammines spécifiques. Ces calcaires

occupent eux aussi un espace relativement restreint au niveau de nos terrains. On ne les observe qu'au niveau du bassin de l'Aygue Nègre, au Soum de Granquet et au cirque de la Toue.

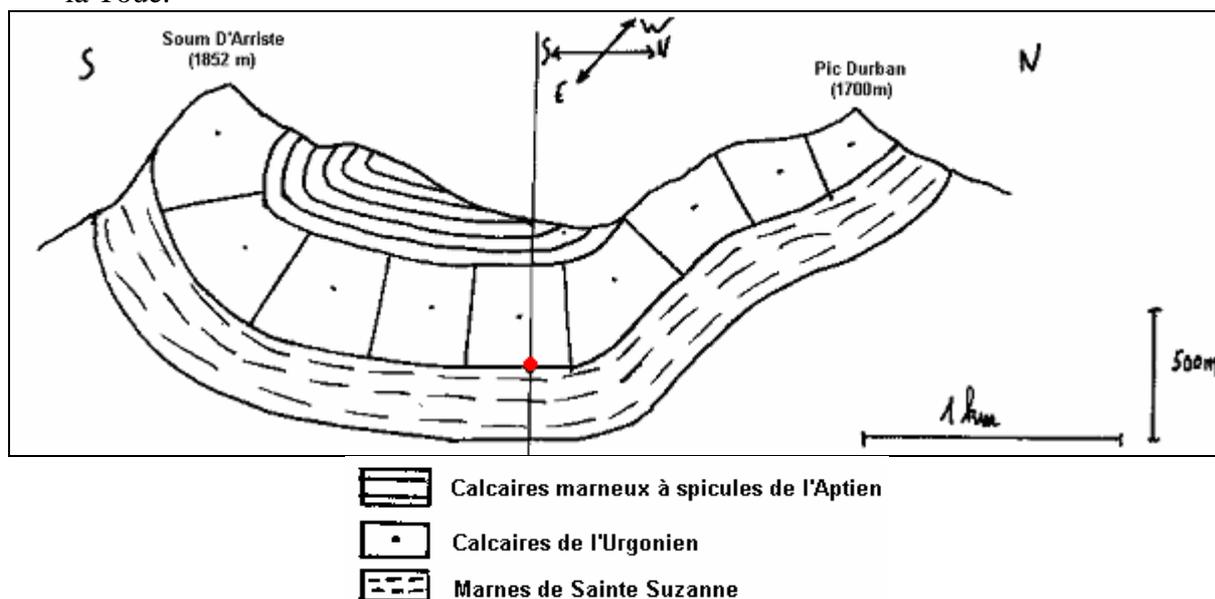


Figure 14 : Coupe géologique interprétative N-S du bassin de l'Aygue Blanche Le point rouge à la limite des calcaires urgoniens et des marnes de Sainte Suzanne représentent la position supposée de la source.

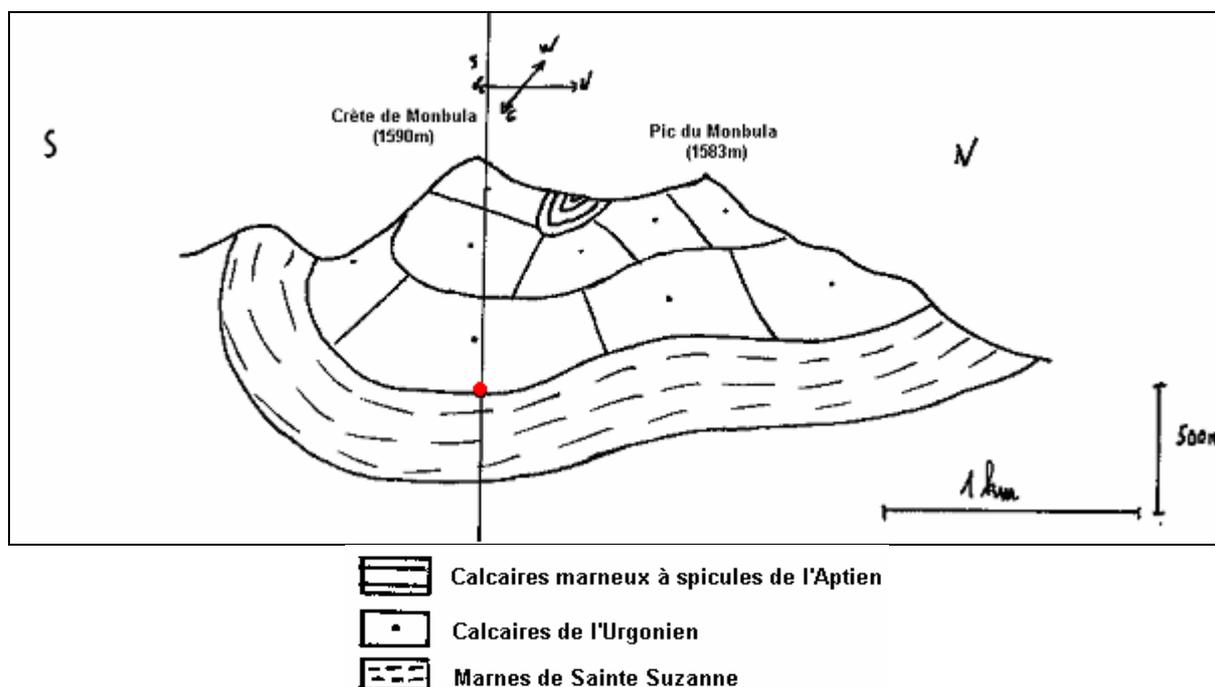


Figure 15 : Coupe géologique interprétative N-S du bassin de l'Aygue Nègre. Le point rouge à la limite des calcaires urgoniens et des marnes de Sainte Suzanne représentent la position supposée de la source.

Les formations carbonatées du Crétacé inférieur et du Jurassique (calcaires et dolomies), possèdent un certain potentiel hydrogéologique en tant que réservoir fissuré voire karstique.

3) Contexte structural

Les bassins objets de notre étude appartiennent à un même ensemble, le synclinal perché du Jaut - Prat dou Rey, qui se prolonge de part et d'autre de la vallée de l'Ouzoum. Ce pli est dissymétrique et déversé vers le Nord. Le milieu est extrêmement fracturé, du fait de l'histoire géologique. Un certain nombre de familles de fracture a été mis en évidence (Klarica, 1997) et que nous avons nous-mêmes observées sur le terrain. Ces directions de fracturations sont : N-S, N020°E à N040°E, N030°E à N060°E, N150°E à N160°E et E-W. Pour le bassin de l'Aygue Blanche, il est possible de les repérer à proximité du col du Jaut, là où les marnes albiennes sont moins épaisses. Ce repérage est possible à l'aide des directions d'alignement des nombreuses dolines que l'on y trouve.

Pour nos bassins, l'Urgonien forme l'ossature du synclinal et constitue le réservoir qui alimente la source à la base de la série calcaire. Il est limité à la base par les marnes de Sainte Suzanne, considérées imperméables quand elles ne sont pas fracturées. Son cœur est formé par les marnes schisteuses à spicules de l'Albien. Le tout peut se concevoir, d'un point de vue fonctionnel, comme une gouttière qui drainerait respectivement et préférentiellement les écoulements souterrains en direction de chacune des deux résurgences étudiées au cours de ce stage, pour un bassin donné.

Cette organisation en gouttière, orientée E-W, ressort mieux à la surface du bassin de l'Aygue Blanche, ce qui se traduit au niveau des écoulements correspondants. Tandis que pour le bassin de l'Aygue Nègre, les écoulements de surface prépondérants sont de direction N-S (confirmation par le MNT).

En effet, bien qu'appartenant au même synclinal, chaque bassin se caractérise par des propriétés structurales qui leur sont propres.

Le synclinal de Jaut se "pince" au niveau de la vallée de l'Ouzoum, ce qui se traduit par un rétrécissement des formations urgoniennes d'où l'Aygue Blanche jaillit. Tandis que celui du Prat dou Rey, de direction E-W à l'Est, semble obliquer vers le NNW (N 170) vers la vallée (observations de terrain, des orthophotos disponibles et sous Géoportail). La famille de fracture rattachée (N 170) semble aussi avoir été à l'origine de la formation du Soum de Granquet (un cirque), d'où l'on peut deviner un linéament de même direction (N170) à sa jonction avec l'Estibète.

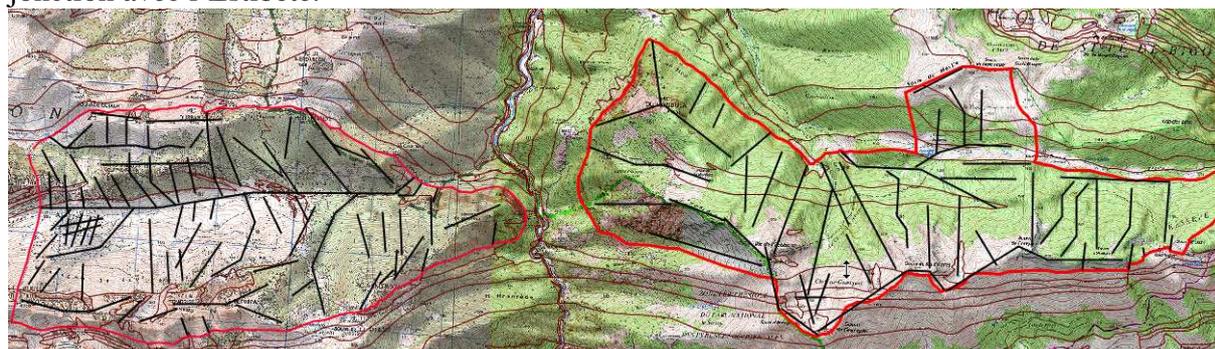


Figure 16 : Schéma structural général de la zone d'étude sur fond topo IGN au 1/25 000.

Nous pouvons remarquer un plus grand nombre d'informations du point de vue structural au niveau du bassin de l'Aygue Blanche, plus particulièrement pour les anomalies de taille moindre. Le bassin de l'Aygue Blanche semble organisé en un seul bloc massif, tandis que le bassin de l'Aygue Nègre semble découpé selon des directions N-S en une série de petits compartiments.

4) Contexte hydrogéologique

a) Aygue Blanche

La source d'Aygue Blanche émerge au niveau de l'extrémité Est de l'axe du synclinal dissymétrique du Jaut, déversé vers le Nord, "pincée" au niveau de la vallée de l'Ouzom.

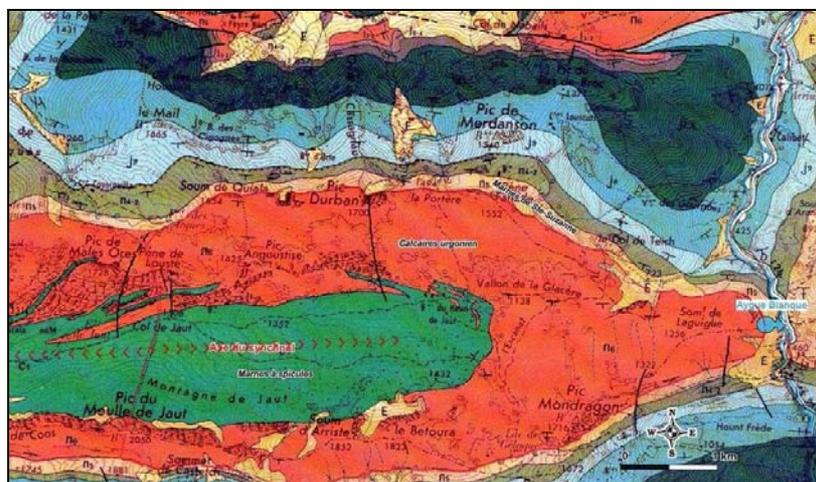


Figure 17 : Contexte géologique du bassin de l'Aygue Blanche (Bichot, 2007)

L'ossature du synclinal du Jaut est formée par les calcaires subécifaux de l'Urgonien, fortement karstifiés. Ces calcaires constituent le réservoir qui alimente la source à la base de la série calcaire. Le passage des marnes à spicules aux calcaires se fait progressivement par intercalation de barres calcaires dans la série marneuse. Les marnes de sainte Suzanne sont sous-jacentes aux calcaires. Considérées imperméables quand elles sont exemptes de toute fracturation, elles constituent le mur de l'aquifère urgonien. Ces marnes affleurent au fond et sur les flancs de la vallée de l'Ouzom au pied des deux sources.

La direction générale des écoulements dépend de la direction des fractures assurant le transfert de l'eau au sein de l'aquifère (N-S, N020°E à N040°E, N030°E à N060°E, N150°E à N160°E et E-W). En profondeur, ils s'organisent préférentiellement selon la direction de l'axe du synclinal (E-W) comme à l'intérieur d'une gouttière. Ainsi, le niveau des marnes de Sainte Suzanne imperméables définit la base de la gouttière synclinale orientée vers l'Est et formée par l'aquifère des calcaires urgoniens du massif du Jaut. C'est cette disposition qui va permettre un écoulement des eaux suivant un gradient hydraulique principal d'orientation Est-Ouest, accordant à l'aquifère karstique du Jaut un caractère original dans le contexte régional.

S. Klarica (1997), en déterminant le réseau de fracture préférentiellement emprunté pour l'écoulement des eaux (analyse de la fracturation et microtectonique) et en établissant la relation qui existe entre tectonique, fracturation et karstification (lithologie, analyses chimiques, traçages) a proposé une première délimitation de l'impluvium du bassin d'alimentation de l'Aygue Blanche.

L'impluvium semble limité, à l'Ouest du bassin, par le col du Jaut car le pendage du synclinal change de direction à ce niveau. De pendage Ouest à l'Ouest du col, il devient de pendage Est à l'Est dudit col. Le partage des eaux, tant en surface qu'en profondeur, entre la partie orientale et la partie occidentale du synclinal se ferait donc à ce niveau.

La similitude de l'extension entre les limites du bassin de l'Aygue Blanche proposées par S. Klarica et celle proposée par M. Bichot (2007) est assez remarquable. Ils ne sont en désaccord

qu'au niveau de la partie Sud du bassin. S. Klarica prolonge ces limites vers le Sud en se basant sur l'extension des éboulis quaternaires au Sud de la crête allant du Pic du Moule de Jaut au Pic Mondragon. Elle se base aussi sur la longueur en surface des deux principales failles entre le Pic Mondragon et en contrebas SE du Sommet de Laguigue (Figure 18).

Par commodité, nous avons fait le choix de ne garder que les limites du bassin qui ont déterminées par l'hydrogéologue agréé, bien que nous pensons qu'effectivement, du fait de la fracturation, l'eau pourrait très bien transiter dans les niveaux inférieurs à ceux des marnes de sainte Suzanne. Ce qui représente une superficie de 14.5 km.

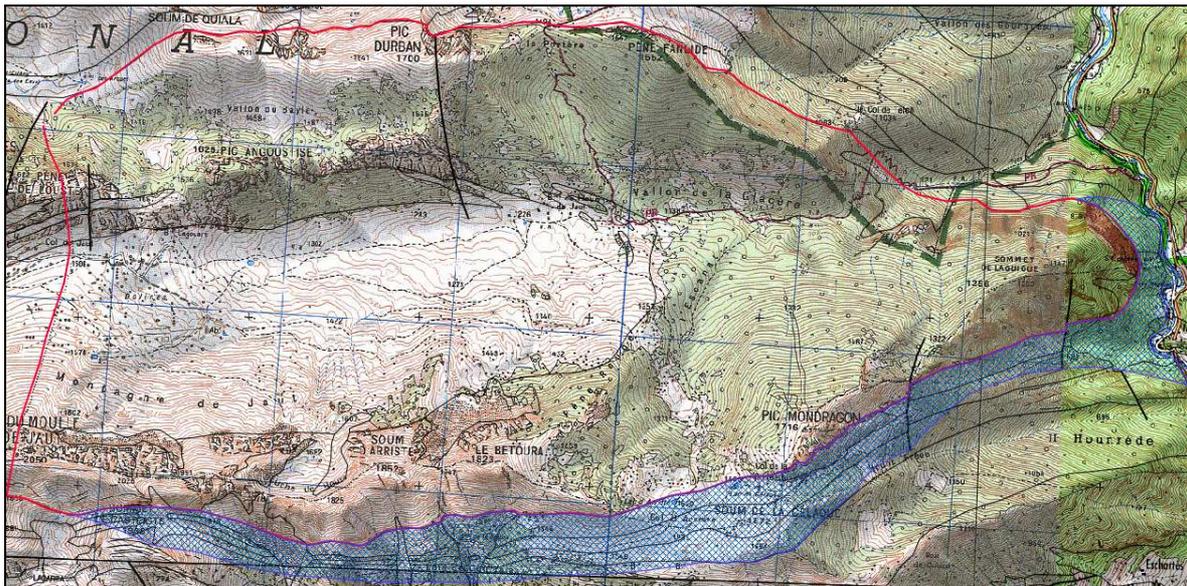


Figure 18 : Limites du bassin de l'Aygue Blanque définies par F. Bichot (trait rouge) et par S. Klarica (trait rouge + zone en bleue) sur fond topo et contours géologiques au 1/25 000

En première approche, l'aquifère qui alimente l'Aygue Blanque apparaît extrêmement vulnérable, malgré une extension non négligeable des marnes à spicules, qui filtrent naturellement l'eau. La seule activité recensée dans le bassin d'alimentation correspond à des pâturages d'été sur le plateau de Jaut. Pour la protection du captage, il conviendra donc de prendre quelques précautions pour limiter l'impact de cette activité sur la qualité des eaux.

La source d'Aygue Blanque ne fait actuellement l'objet d'aucun suivi des débits, ni du débit total, ni des volumes prélevés qui sont globalisés avec la source d'Aygue Nègre. Une campagne de mesures a été réalisée en 1970 sur les deux sources. Cette campagne montre une fluctuation rapide des débits, caractéristique du caractère karstique de l'aquifère, avec un facteur de l'ordre de 3 entre débit d'étiage et débit de crue. L'étude préalable fait par ailleurs état de variations beaucoup plus importantes pour Aygue Blanque avec un débit d'étiage de 108 m³/h et un débit de crue de 1800 m³/h. Des mesures plus anciennes ont été réalisées entre 1956 et 1964. Le débit d'étiage le plus faible enregistré alors (le 27 août 1964) est de 108 m³/h. Au mois d'août 1956, on enregistrait en revanche 324 m³/h.

Les résultats des analyses chimiques issues de la thèse de S. Klarica (mars 1995 à juin 1996, pas d'échantillonnage trimestriel), et la synthèse issue du rapport de l'hydrogéologue agréé (21 analyses de la D.D.A.S.S. des Pyrénées Atlantiques, de 1988 à 2005), permettent d'indiquer que nous sommes en présence d'eaux douces (dureté ne dépassant pas 12.1 °fr), de type bicarbonatées calciques, très faiblement minéralisées. De plus, des concentrations en Mg²⁺ assez basses, traduisent un temps de transit relativement rapide de l'eau au sein de

l'aquifère. On notera par ailleurs que la température de l'eau à l'exutoire, inférieure à 10 °C, confirme une mise en charge en altitude de l'eau. Enfin, le pH relativement élevé (au plus 8.15), traduit une certaine agressivité vis-à-vis de la roche.

La présence fréquente de Coliformes à la source est à relier avec l'activité pastorale. Cette présence est parfois détectée plus d'un mois après l'abandon des estives par les bergers. Mis à part ces problèmes bactériologiques, les eaux de la source d'Aygue Blanche sont de bonne qualité. Aucun produit phytosanitaire, aucun paramètre indésirable n'y ont été détectés. Le caractère karstique du réservoir fait toutefois craindre des turbidités excessives après les pluies abondantes.

A noter qu'une future exploitation forestière semble envisagée dans la partie Est du bassin, à l'aplomb de la source.

b) Aygue Nègre

Le contexte géologique, hydrogéologique et structural (au moins pour les directions de fracturation) de la source d'Aygue Nègre semble, en première approche, similaire et symétrique à celui d'Aygue Blanche. La couverture boisée, plus étendue et plus dense, et la topographie, plus accidentée, y rendent les observations souvent moins aisées. La source sort à la base de la série urgonienne, au contact avec les marnes bédouliennes. Au point le plus bas desdits calcaires, pratiquement à la même côte que la source d'Aygue Blanche. D'un point de vue fonctionnel, le système est plus riche en alternance pertes/résurgences (bassin plus vulnérable), mais un nombre similaire de gouffres a été observé par rapport au bassin de l'Aygue Blanche. Enfin, le bassin comprend deux sous-bassins composés de formations d'âge jurassique et crétacé inférieur (Soum de Granquet, la Toue), qui drainent de possibles écoulements de surface lors de fortes pluies vers de pertes au contact de l'Urgonien (Soum de Moule, par exemple).

Des traçages à la fluorescéine et à la rhodamine ont été réalisés, afin de préciser les limites du bassin d'alimentation (cabinet BERRE). La carte suivante présente la position des points d'injection et de mesure.

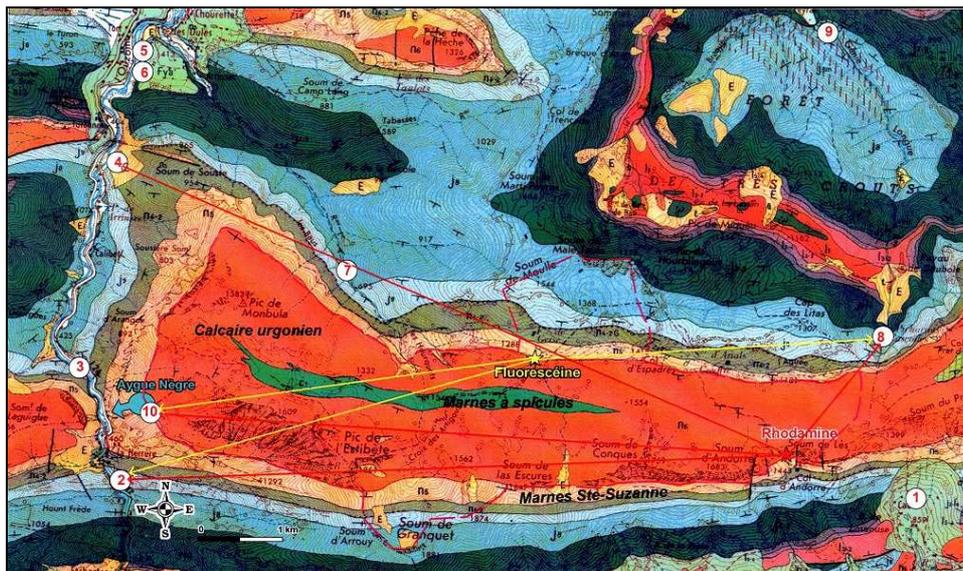


Figure 19 : Campagne de traçage réalisée par le Cabinet BERRE, Aygue Nègre (Bichot, 2007)

Les traçages ne semblent pas avoir été réalisés dans des conditions optimales. Les résultats du traçage à la rhodamine le suggèrent (phénomène de trifluence). Cela nous a poussé à émettre nos propres hypothèses quant à la délimitation de ce bassin.

En complément de nos observations de terrain, les cartes des écoulements de surface obtenues à partir du MNT, nous font penser qu'il pourrait être bienvenu de réduire l'étendue du bassin d'alimentation initialement proposée par F. Bichot. N'ayant pu réaliser de traçages de quelque nature que ce soit, nous garderons la configuration proposée par l'hydrogéologue agréé. Il pourrait être intéressant de développer par la suite.

A l'image de la limite Ouest du bassin de l'Aygue Blanche, déterminée d'après une ligne de partage des eaux, il pourrait être intéressant de vérifier si la limite Est du Bassin de l'Aygue Nègre pourrait correspondre à la ligne de partage des eaux définie par la ligne de crête reliant le Soum de Conques au Col d'Espades (Figure 20). Des mesures de pendage des couches de part et d'autres de cette ligne de crête pourraient être intéressantes à réaliser.

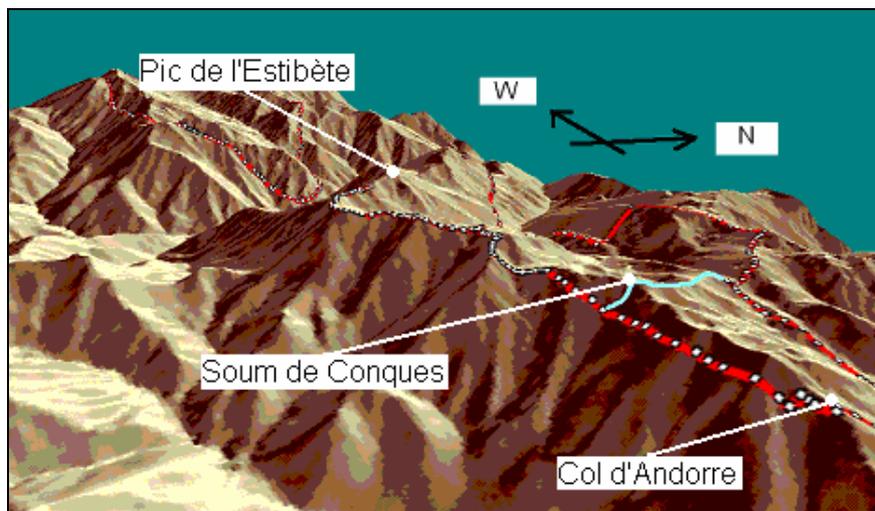


Figure 20 : Proposition de délimitation de la partie orientale du bassin de l'Aygue Nègre (en bleu). Limites proposées par l'hydrogéologue agréé en rouge (1/89 100).

La superficie du bassin d'alimentation de l'Aygue Nègre serait de l'ordre de 15.3 km² (équivalent à celui d'Aygue Blanche). Ce qui inclut le Pic du Monbula, ses contreforts et son plateau l'extension vers le Sud de la crête partant du Soum de Leiz, situé à l'extrémité Sud-Est du bassin.

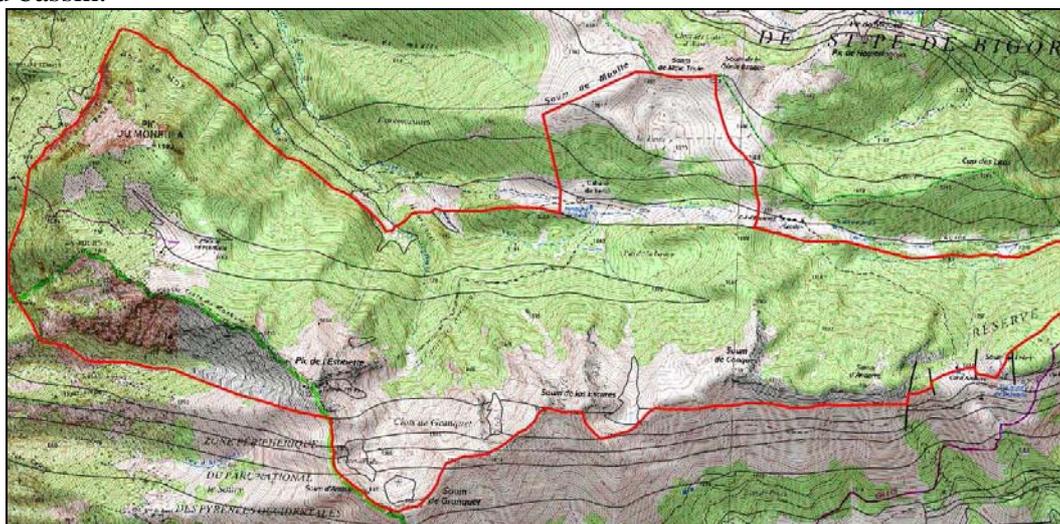


Figure 21 : Limites du bassin de l'Aygue Nègre définies par F. Bichot sur fond topo et contours géologiques au 1/25 000

Les observations de terrain montrent que la crête correspondant à la limite Est du bassin est assez peu marquée. Du seul point de vue hydrologique, la définition du bassin à cet endroit semble hasardeuse. Du fait de l'absence de traçages adéquats, il ne nous est pas possible de la confirmer ou non.

La source d'Aygue Nègre ne fait actuellement l'objet d'aucun suivi du débit total, ni des volumes prélevés qui sont globalisés avec la source d'Aygue Blanche.

Les débits de la source d'Aygue Nègre ont été suivis entre 1928 et 1937 pour des besoins hydroélectriques. Le tracé des hydrogrammes, bien que peu précis, montre un débit d'étiage de l'ordre de 300 m³/h et un débit maximal de crue de l'ordre de 20 000m³/H, pour des précipitations de l'ordre de 1750 mm/an. Les hydrogrammes montrent un pic en avril/mai (fonte des neiges) et un autre en novembre.

En matière de qualité, 21 analyses réalisées entre 1988 et 2005 (toujours issues des données de la D.D.A.S.S.) montrent des eaux très comparables à celles d'Aygue Blanche avec un faciès bicarbonaté calcique faiblement minéralisé. Les eaux sont de bonne qualité physico-chimique sans éléments préjudiciables (phytosanitaires, hydrocarbures, ...). En revanche, les analyses bactériologiques sont très variables passant de l'absence de bactéries à des concentrations excessives de Coliformes, comme en août 1991 par exemple. La turbidité est également très fluctuante, plus particulièrement après un orage, et peut être un facteur déclassant.

Le bassin de l'Aygue Nègre apparaît aussi extrêmement vulnérable, plus même encore que celui de l'Aygue Blanche. L'extension des calcaires schisteux à spicule moins importante minimise l'effet retard par un stockage en surface dans une possible zone épikarstique. Cependant le risque y est aussi moins grand car l'activité pastorale, seule activité praticable, y est beaucoup moins développée que sur le bassin de l'Aygue Blanche. La principale raison étant justement une ressource en eau disponible plus limitée. Le plus grand couvert végétal (forêts de feuillus ou de conifères) va aussi jouer, mais dans une moindre mesure. Le pastoralisme est limité au Soum de Granquet, au cirque de la Toue et aux pâturages de la cabane de Yerse en contrebas, ainsi qu'au Col d'Andorre pour ce seul bassin.

III. La méthode multicritères d'étude des karsts RISKE 2

1) Principe de la méthode

La méthode d'étude multicritères "RISKE 2" (Roche, Infiltration, Sol, Karstification et Epikarst) permet le tracé de cartes de vulnérabilité intrinsèque d'un système karstique donné. Elle est basée sur la somme pondérée des cartes des 5 critères définissant son acronyme. Ces critères seront considérés indépendants les uns des autres en première approche.

Pour éviter toute confusion entre "RISKE" et "vulnérabilité", la méthode RISKE 2 a évolué en PaPRIKa, tel que définit en I.1).

La vulnérabilité intrinsèque est une propriété générale, non mesurable et sans dimension. Elle est dépendante des seules caractéristiques géologiques, hydrogéologiques et hydromorphologiques naturelles d'un bassin donné et traduit la facilité qu'aura une goutte d'eau à s'infiltrer au sein de l'aquifère. On parlera dès lors de vulnérabilité intrinsèque à l'infiltration des eaux météoriques.

L'application de la méthode RISKE 2 au niveau du bassin d'alimentation d'un système karstique donné permet de déterminer les zones dudit bassin qui seraient les favorables à l'infiltration de quelque contaminant que ce soit pour la ressource souterraine.

Les critères RISKE 2 se définissent par :

- R (Roche) : Ce critère est basé sur la/les lithologie(s) dominante(s) rencontrée(s) en un point donné. L'épaisseur va permettre une première distinction. Le degré de fracturation est l'autre paramètre qui va aider à définir la valeur de l'indice R au même point ;
- I (Infiltration) : Ce critère intègre la valeur de la pente topographique, et la présence ou non de morphologies karstiques de surface. La zone d'influence de ces morphologies peut être étendue aux bassins versants les contenant. De façon générale, le critère I est basé sur le caractère diffus ou concentré de l'infiltration des eaux météoriques ;
- P (Protection) : Fonction de protection vis-à-vis de l'infiltration. Elle se traduit par un stockage temporaire de l'eau à proximité de la surface (effet retard sur l'infiltration). La fonction de protection P dépend de la combinaison de deux sous-critères, S et E, et permet de donner une information continue de la protection en sub-surface de l'aquifère :
 - o S (Sol) : Epaisseur et nature (texture et proportion de cailloux) d'un sol et/ou d'un ou plusieurs horizons pédologiques entre la surface et la roche ;
 - o E (Epikarst) : Dans RISKE 2, l'épikarst sera plus considéré pour son rôle hydrogéologique (aquifère temporaire) que morphologique (contrairement à RISKE). Le critère correspondant traduira la possibilité ou non de stockage en sub-surface. Les caractéristiques physiques et spatiales (épaisseur, fracturation, remplissage, continuité latérale) de l'épikarst seront prises en compte dans la définition du nouveau critère E.
- K (Karstification) : Critère global caractérisant le degré et l'intensité de fonctionnement du bassin d'alimentation du karst étudié (unaire/binaire ; fonctionnel/pas ou peu fonctionnel). Ce critère est le seul qui soit déterminé de façon indirecte, par des

observations spéléologiques, des traçages artificiels, des chroniques de débit, d'hydrochimie et de relations pluies-débits.

La répartition des différents critères est traduite dans l'espace par le schéma suivant :

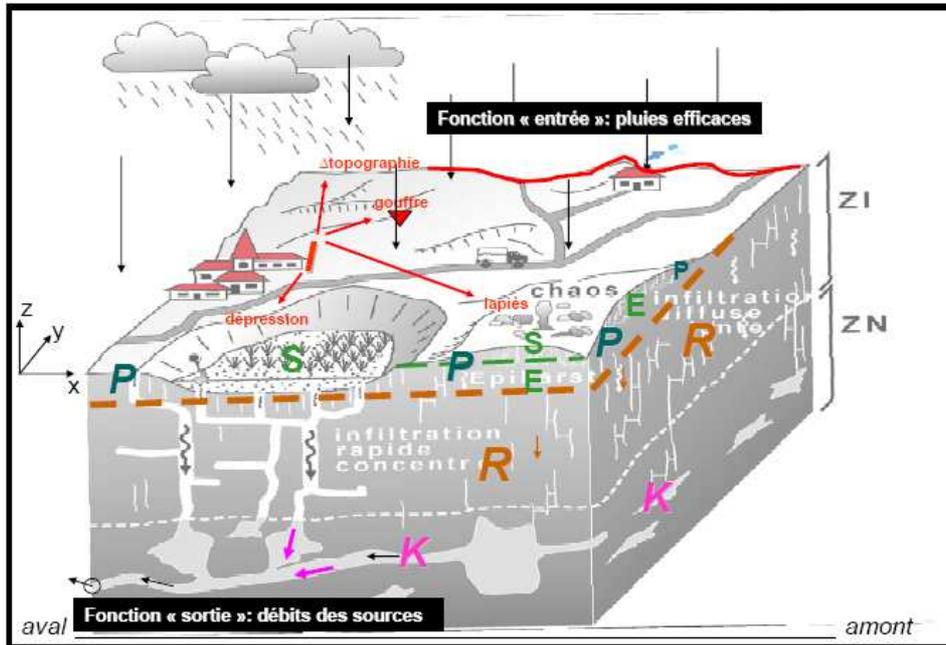


Figure 22 : schéma conceptuel définissant la situation in-situ des critères RISKEP (Pranville, 2007)

Les critères sont cotés selon la grille ci-après :

<p><i>Roche</i> Lithologie et fracturation</p>	<p><i>Infiltration</i> Classes de pentes et morphologies karstiques de surface</p>	<p><i>Sols</i> Texture, épaisseur, pierrosité</p>	<p><i>Karstification</i> Développement du réseau de drainage</p>	<p><i>Epikarst</i></p>																																																																			
<p>R0 : Formations marneuses (35-65% minéraux argileux), ne permettant que des circulations très lentes si elles sont aquifères</p> <p>R1 : Formations marnocalcaires (25-35% de minéraux argileux), ne permettant que des circulations lentes</p> <p>R2 : Formations de calcaires marneux (10-25% de minéraux argileux), fissurés ou pouvant être affectés d'une fracturation homogène mais peu développée</p> <p>R3 : Formations calcaires et dolomitiques, soit massives en gros bancs non fracturé, soit en petit bancs avec interlits argilo-marneux et affectés par une fracturation homogène. Ces formations permettent des circulations faciles à rapides</p> <p>R4 : Formations calcaires en gros bancs massifs affectés d'une fracturation en grand</p>	<p>I0 : Pas d'infiltration possible dans le milieu et/ou zones du bassin où les pentes sont supérieures à 50%</p> <p>I1 : Absence de morphologie karstique sur terrains calcaires et/ou zones du bassin où les pentes sont fortes (15%-50%)</p> <p>I2 : Zone où le ruissellement est limité. Zones avec présence de morphologies karstiques sur terrains calcaires, en dehors des dolines et des dépressions et/ou les pentes sont moyennes (5%-15%) et permettent une infiltration lente</p> <p>I3 : Zones avec présence de dolines et dépressions. Les zones d'alignements de dolines (Ouvales) et leur bassin d'alimentation peuvent être cartographiés dans cette classe d'indexation forte</p> <p>I4 : Zones où sont présents les gouffres (igues) ou les pertes, ainsi que les bassins d'alimentation qui drainent les eaux vers ces points d'infiltration concentrée et directe vers l'aquifère. Les dolines de type effondrements pourront être identifiées à cette classe, si elles ont été reconnues et décrites comme telles.</p>	<table border="1" data-bbox="662 427 954 1131"> <tr> <td rowspan="4">Texture</td> <td>1 (argiles)</td> <td>2 (limon)</td> <td>3 (sable)</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>1 (0-15%)</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>2 (15-60%)</td> <td>3</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td colspan="4">% cailloux</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2</td> <td>3</td> <td>3</td> </tr> </table> <table border="1" data-bbox="630 1400 986 1962"> <tr> <td rowspan="4">Nature du sol</td> <td>?</td> <td>S1</td> <td>S2</td> <td>S3</td> <td>S4</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>S1</td> <td>S2</td> <td>S3</td> <td>S4</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>S2</td> <td>S3</td> <td>S4</td> <td>S4</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>S3</td> <td>S4</td> <td>S4</td> <td>S4</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">épaisseur du sol (cm)</td> <td>> 100 cm</td> <td>S1</td> <td>S2</td> <td>S3</td> <td>S4</td> </tr> <tr> <td>20-100 cm</td> <td>S2</td> <td>S3</td> <td>S4</td> <td>S4</td> </tr> <tr> <td>0-20 cm</td> <td>S3</td> <td>S4</td> <td>S4</td> <td>S4</td> </tr> <tr> <td>∅</td> <td>S4</td> <td>S4</td> <td>S4</td> <td>S4</td> </tr> </table>	Texture	1 (argiles)	2 (limon)	3 (sable)	1	1	2	1 (0-15%)	2	3	2 (15-60%)	3	3	% cailloux					1	2	3		2	3	3	Nature du sol	?	S1	S2	S3	S4	1	S1	S2	S3	S4	2	S2	S3	S4	S4	3	S3	S4	S4	S4	épaisseur du sol (cm)	> 100 cm	S1	S2	S3	S4	20-100 cm	S2	S3	S4	S4	0-20 cm	S3	S4	S4	S4	∅	S4	S4	S4	S4	<p>K0 : Karst unaire peu fonctionnel. Récupération nulle à très faible des traceurs artificiels. Karstification qui ne permet pas un fonctionnement hydrogéologique karstique</p> <p>K1 : Karst unaire peu/moyennement fonctionnel avec des vitesses de traçage artificiel lentes et des temps de séjours longs</p> <p>K2 : Karst unaire fonctionnel, avec des indices de karstification développés : des vitesses de traçage artificiel rapides, une forte variabilité du débit et de la chimie de la source ou karst binaire pas/peu fonctionnel</p> <p>K3 : Karst binaire peu/moyennement fonctionnel</p> <p>K4 : Karst binaire très fonctionnel</p>	<p>E0 : existence d'un épikarst épais (>1m) continu latéralement et très bien développé, présentant des figures de dissolution horizontales et verticales témoignant de dissolution en milieu noyé</p> <p>E1 : épikarst moins épais (50 cm à 1m), plus ou moins continu latéralement, pouvant stocker temporairement de l'eau à proximité de la surface</p> <p>E2 : épikarst peu épais (20 à 50 cm), moyennement développé et discontinu, avec une capacité de stockage temporaire</p> <p>E3 : épikarst peu épais (<20 cm) ou absent localement, discontinu et peu développé, avec une faible possibilité de stockage temporaire</p> <p>E4 : pas d'épikarst, donc aucune possibilité de stockage temporaire en sub-surface</p>
Texture	1 (argiles)	2 (limon)		3 (sable)																																																																			
	1	1		2																																																																			
	1 (0-15%)	2		3																																																																			
	2 (15-60%)	3	3																																																																				
% cailloux																																																																							
	1	2	3																																																																				
	2	3	3																																																																				
Nature du sol	?	S1	S2	S3	S4																																																																		
	1	S1	S2	S3	S4																																																																		
	2	S2	S3	S4	S4																																																																		
	3	S3	S4	S4	S4																																																																		
épaisseur du sol (cm)	> 100 cm	S1	S2	S3	S4																																																																		
	20-100 cm	S2	S3	S4	S4																																																																		
	0-20 cm	S3	S4	S4	S4																																																																		
	∅	S4	S4	S4	S4																																																																		

Figure 23 : Indexation des critères RISKE 2

Le tableau ci-après présente les valeurs de P en fonction de S et E :

P	S	E
P0	S0	E0 à E4
	S0 à S4	E0
P1	S1	E1 à E4
	S1 à S4	E1
P2	S2	E2 à E4
	S2 à S4	E2
P3	S3	E3, E4
	S3, S4	E3
P4	S4	E4

Figure 24 : Critère P et combinaisons de S et E

Pour P=0, si S=0 alors $0 \leq E \leq 4$. Inversement, toujours quand P=0, si E=0 alors $0 \leq S \leq 4$. Le tout est de conserver, entre S et E, la valeur du critère le plus protecteur (le plus faible, donc) en un même point donné.

La valeur de la vulnérabilité intrinsèque I_g en un point donné est définie par la combinaison linéaire des critères R, I, P et K en ce point, selon la relation suivante :

$$I_g = rR_{0-4} + iI_{0-4} + pP_{0-4} + kK_{0-4}$$

Avec r, i, p et k indices respectifs des critères R, I, P et K.

Ce calcul est soumis à deux conditions :

$$i > r \geq p \geq k \geq 0.1$$

$$\Sigma (\text{indices de pondération}) = 1$$

Les valeurs des indices de classe de certains critères seront soumises à certaines corrections selon des contextes particuliers qui seront définis plus loin.

2) Procédure de construction des cartes de vulnérabilité intrinsèque

Cette procédure se déroule en cinq étapes essentielles :

(1) Cartographie de chaque critère (au 1/25 000 pour le secteur étudié). Chaque critère est, comme présenté ci-dessus, subdivisé en classes matérialisées par un indice allant de 0 à 4 inclus. Les critères sont saisis dans la base de données associée à un SIG ("Saga", dans notre cas). La restitution des cartes résultantes est de forme vectorielle.

(2) Discrétisation (rasterisation) des cartes ainsi obtenues au pas de 25 m : maille de 25m sur 25m (guidée par le pas du Modèle Numérique de Terrain disponible sur la zone d'étude).

(3) Calcul de l'indice de vulnérabilité global I_g de chaque maille. L'indice de classe de chaque critère est multiplié par le facteur de pondération du critère considéré. Celui-ci traduit l'importance relative des critères entre eux vis-à-vis de la vulnérabilité. Les valeurs obtenues pour les 5 critères sont ensuite additionnées pour obtenir l'indice de Vulnérabilité global I_g . Cette étape revient à superposer les 5 cartes des critères indexés et pondérés afin d'obtenir une représentation cartographique de la répartition de l'indice I_g (outil utilisé : "Map Calculator", sous Saga)

(4) Etape de régionalisation. La valeur de l'indice I_g ainsi calculée est ensuite subdivisée en 5 classes de vulnérabilité traduisant la sensibilité relative du milieu

I_g	Indices de vulnérabilité
0 - 0.79	0
0.8 - 1.59	1
1.6 - 2.39	2
2.4 - 3.19	3
3.2 - 4	4

Figure 25 : Relation entre valeurs numériques et valeurs entières d' I_g

(5) Etape de vérification. Les cartes de vulnérabilité obtenues sont confrontées avec les cartes de chaque critère indexé afin d'en vérifier la cohérence. Une comparaison directe sur le terrain depuis un point haut entre les différentes cartes est une possibilité intéressante à appliquer, notamment à l'aide de la connaissance du terrain acquise au cours du stage.

IV. Application de la méthode RISKE 2 aux bassins de l'Aygue Nègre et de l'Aygue Blanche

1) Acquisition des données terrain : procédure suivie et difficultés rencontrées

1) Etapes initiales

Les sorties terrain ont été relativement bien préparées à chaque fois (exceptée ma première sortie en solo), de telle sorte que nous obtenions la densité de points la plus homogène possible au niveau de chacune des deux zones d'étude. Voici comment nous avons procédé.

Une fois la prise en main des modules de base des SIG utilisés (gvSIG et Saga en majorité), nous avons découpé chacun des deux bassins en zones qualifiées d'homogènes, au sens où les critères géologiques (lithologie, présence ou non de dolines), topographiques (pente, exposition, accessibilité) et d'occupation des sols (zone boisée/zone de pâturage) y sont considérés comme peu variables. Les données qui ont servi de support à ce travail initial sont le scan de la carte IGN, au 1/25 000, les données orthophotos des bassins, la carte géologique vectorisée du BRGM.

De la même façon, au sein de chacune des zones, nous avons déterminés les endroits qu'il serait bon d'étudier sur le terrain en nous basant sur le scan de la carte IGN au 1/25 000 et sur les données orthophotos. Le but en est de repérer les morphologies karstiques les plus remarquables. Les orthophotos, combinées au scan IGN (irrégularité des courbes de niveau) permettent de les repérer de façon sûre en zone dégagée, le scan IGN se révèle particulièrement utile pour mener un tel repérage en zone boisée. La figure suivante présente un tel exemple, de part et d'autre du Soum de Conques, extrémité S-SE du bassin de l'Aygue Nègre. Concrètement, cela nous a permis de faire de relevés de terrain au niveau de dolines, pertes, gouffres, avaloirs, ... dans la majorité des cas.

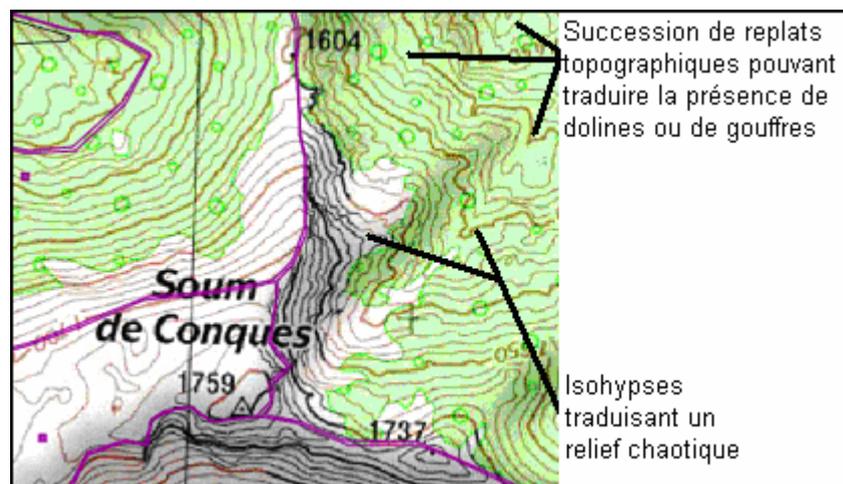


Figure 26 : Allure des courbes de niveau, Soum de Conques, bassin de l'Aygue Nègre

A noter que nous nous sommes permis de prendre autant de temps pour réaliser une telle opération à cause des conditions météo, très mauvaises lors des premières semaines de ce stage (1 à 1 mois et demi).

Enfin, un autre facteur, tout aussi déterminant a été pris en compte lors de ce repérage initial : l'accessibilité. Il fallait tâcher de repérer le parcours le moins contraignant, qui nous permettrait tout de même de réaliser les relevés des points repérés.

2) Procédure d'acquisition

Les coordonnées des points à explorer sont repérées sous SIG (gvSIG, pour son interface claire et conviviale) dans le système de projection NTF-Paris Lambert II étendu et rentrées dans un classeur Excel. Une conversion des coordonnées desdits points dans le système de projection WGS84 UTM 30°N a été nécessaire, pour des raisons de commodité (via le logiciel "Circé" de l'IGN). En effet, il a été jugé plus aisé de se fier sur le terrain, si besoin est, à ce système de projection qu'utilisent les cartes papier IGN. Les coordonnées des points, ainsi converties au format WGS 84 sont obtenues dans un fichier texte d'extension .csv (le point virgule est utilisé comme séparateur de colonne). Il est ensuite nécessaire de convertir le format du fichier d'entrée, .csv, en un format reconnaissable par le GPS que nous utilisons : fichiers .gpx dans un GPS de randonnée de type GARMIN60. Cette opération est réalisée à l'aide du logiciel GPSBabelGUI.

Sur le terrain, l'activation de la fonction "proximité" du GPS, applicable à chacun des points de mesure, nous permet de nous repérer de façon plus aisée au sens où un signal sonore retentit dès l'instant où nous entrons dans un certain rayon, dont nous déterminons la valeur, autour d'un point à relever.

Et c'est ainsi que le pointage sur le terrain est réalisé en coordonnées WGS84 UTM 30°N. Coordonnées qui seront par la suite converties dans le système de projection NTF-PARIS Lambert II étendu (logiciel CIRCE), pour leur utilisation sans risque sous SIG.

Enfin, l'ensemble des relevés RISKE 2 a été effectué à chacun des points de mesure. Cette procédure d'acquisition a été motivée par les difficultés rencontrées dans un contexte de moyenne montagne. Contexte où il est d'autant plus laborieux de repasser plusieurs fois aux mêmes endroits qu'en situation de plaine ou de plateau.

3) Difficultés rencontrées

Les conditions d'accès se sont révélées parfois difficiles, que ce soit pour parvenir au terrain (montée depuis le col de Spandelles jusqu'au Pic de l'Estibète par exemple) ou sur le terrain lui-même, plus particulièrement sur le bassin de l'Aygue Nègre. Sur ce dernier point, cela se traduit par des montées dans des pentes de l'ordre de 50% ou plus, glissantes car recouvertes de bois humide, de feuilles ou d'humus en contact parfois direct avec la roche. La texture grasse des niveaux argileux à franchir constitue une difficulté supplémentaire.

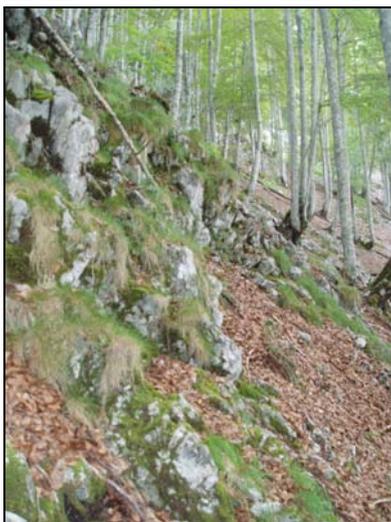


Figure 27 : Illustration d'une zone à forte pente et au sol glissant. Flan Nord du Pic de Monbula. Aygue Nègre.

Le repérage dans les zones où le signal GPS n'était plus capté (zone fortement escarpée, en contrebas d'une falaise/d'une barre rocheuse, en zone fortement boisée, ...) a aussi été parfois ardu.

Pour les sorties où le climat était couvert et brumeux, la visibilité très limitée pouvait empêcher une quelconque globalisation des critères in-situ, rendait le repérage sur le terrain bien difficile et pouvait se révéler dangereuse à proximité d'une falaise, sur une crête, ...



Figure 28 : La crête de Monbula par temps brumeux, reliant le plateau de Monbula et le Pic de l'Estibète, cernée de part et d'autre par des pentes supérieures à 50%. Aygue Nègre.

2) *Tracé des cartes de vulnérabilité intrinsèque*

1) Méthodes utilisées

Nous avons 234 points de mesures pour le bassin de l'Aygue Nègre (superficie : 15.3 km²), soit une densité de 15.3 points par km² et de 209 points pour le bassin de l'Aygue Blanche (14.5 km²) soit une densité de 14.4 points/ km². Nous avons organisé, sous Excel, deux types de bases de données. La première est purement descriptive (n° du point relevé, coordonnées géographiques en degrés décimaux, critères RISKE 2, ...). A chaque relevé correspond un certain nombre de photos. Ces photos sont directement visualisables par simple clic sur les liens hypertextes adéquats.

Point	Waypoint	Latitude (degrés décimaux)	Longitude (degrés décimaux)	Altitude (m)	Repère géographique	Photo	Critère	in-situ	corrigé	SIG	Commentaires RISKE
AYGUE NEGRE											
05/06/2008 temps couvert à pluvieux, humide											
AN_1	wpt 21	43.042813	-0.23496	1450	Plateau du Monbula Partie Est	Photo Photo Photo	R I S E K	2 2 2 2 4		3	calcaires marneux quelques dolines visibles malgré les marnes sol argileux homogène
AN_2	wpt 22	43.044179	-0.24217	1355.8	sous-bois de Monbula Nord-Est du Garroc-Rouy	Photo Photo	R I S E K	4 1 2 4			urgonien pas de morphologie karstique sol présent+humus, entre 20-100 cm d'épaisseur
AN_3	wpt 24	43.045247	-0.246712	1228.7	sous-bois de Monbula Nord du Garroc-Rouy	Photo Photo	R I S E K	4 2 3 4			
AN_4	wpt 26	43.045579	-0.2501	1084.7	sous-bois entre le col d'Arangou et le Garroc-Rouy	Photo Photo	R I S E K	4 2 4 4		3	Profil similaire au niveau de la source Aygue Nègre

Figure 29 : Allure de la base de données descriptive

La seconde sert de support pour le tracé des cartes de vulnérabilité intrinsèque sous SIG (n° du point selon le bassin, coordonnées en Lambert II étendu, ...). A noter que les coordonnées sont exprimées en Lambert II étendu.

Name	E_m	N_m	Altitude	R	I	S	K	E	P
AN 01	390081.95	1785659.38	1450	2	3	2	3	2	2
AN 02	389498.589	1785830.64	1355.8	4	1	2	2	3	4
AN 03	389131.871	1785961.64	1228.7	4	2	3	3	4	3
AN 04	388856.634	1786007.67	1084.7	4	2	3	3	4	3
AN 05	391012.338	1784396.86	1811.7	4	3	3	3	4	3
AN 06	390839.541	1784865.59	1691.8	4	4	3	3	4	3
AN 07	390666.042	1785211.83	1549.3	4	3	3	3	4	3
AN 08	389719.493	1786364.33	1625.7	4	4	3	3	4	4
AN 09	389647.837	1786540.42	1583.6	4	2	3	3	4	4
AN 10	389692.327	1785939.44	1429.4	4	2	2	3	4	2
AN 11	392071.923	1784264.53	1696.8	1	2	3	3	4	3
AN 12	392026.882	1784276.46	1669.2	1	2	3	3	4	3
AN 13	392144.572	1784496.83	1663.4	4	4	4	3	4	4
AN 14	392106.128	1784697.1	1569.9	4	2	4	3	4	4
AN 15	392001.142	1784775.13	1499.8	4	2	4	3	4	4
AN 16	391886.463	1784801.12	1420.7	4	2	4	3	4	4
AN 17	391897.751	1784947.55	1373.4	3	2	3	3	4	4
AN 18	391882.004	1784968.33	1360.1	3	2	4	3	4	4
AN 19	391981.972	1785251.98	1243.3	2	2	3	3	4	3
AN 20	392004.699	1785559.75	1231.8	2	2	3	3	4	3
AN 21	391920.463	1785720.41	1151.1	4	4	3	3	4	4
AN 22	391816.643	1785707.96	1141.9	2	2	3	3	4	3
AN 23	391632.752	1785695	1051.3	4	3	4	3	4	4
AN 24	391517.754	1785580.01	1167.6	4	3	3	3	4	4
AN 25	391434.261	1785446.74	1248.6	2	1	3	3	2	3
AN 26	391362.749	1785162.06	1426.7	4	2	3	3	4	4
AN 27	391150.933	1784909.34	1659.1	4	4	4	3	4	4
AN 28	396199.884	1784540.43	1437.8	3	2	4	3	4	4

Figure 30 : Allure de la base de données fonctionnelle

Pour le tracé des cartes de vulnérabilité intrinsèque, nous avons utilisé la méthode décrite plus haut, préconisée par le guide du BRGM.

Pour obtenir les cartes de chaque critères, nous avons procédé comme suit :

- critère R : nous nous sommes basés sur les limites des formations géologiques données par la carte vectorisée du BRGM pour tracer les limites, vectorisées elles aussi, des grands types de lithologie (marnes de Sainte Suzanne R1, calcaire marneux à spicules R2 et calcaires massifs et fracturés en grand de l'Urgonien R4). Pour tracer les limites des niveaux plus marneux (R3) inclus dans de l'urgonien, nous nous sommes appuyés, depuis

les points de relevés terrain, sur une extrapolation apparentée aux polygones de Thiessen. La méthode RISKE 2 est par nature une méthode probabiliste, l'application de cette méthode d'interpolation ne se révélera donc pas dépréciative ;

- critère I : nous nous sommes appuyés sur les données orthophotos et sur la carte IGN pour le repérage des morphologies karstiques non relevées sur le terrain. Nous nous sommes aussi basés sur le tracé du réseau d'écoulement issu du SIG utilisé (SAGA), sur nos propres relevés de terrain, mais aussi sur notre connaissance du terrain. Les limites entre zones d'égales indexation, vectorisées, ont été tracées en prenant en compte les limites des bassins versants de chaque type de morphologie karstique, sauf pour les lapiaz. Par ce tracé des bassins versants et l'indexation rattachée, nombre de relevés terrain du critère I ont vu la valeur de leur indice augmenter de 1 à 3 unités. Enfin, nous avons indexé en vulnérabilité maximale les bassins versants alimentant de façon directe (écoulements de surface) chacune des sources ;
- critère S : Aucune carte répertoriée des sols n'existe pour la zone étudiée. Il a fallu construire nous-mêmes les cartes de sol appliquées à la méthode RISKE 2. Ce critère S est dépendant de la lithologie (sols quasiment absents au niveau des calcaires ; relativement épais sur les marnes à Spicules). Cette lithologie définit le type de couvert végétal, quand il est présent. Nous nous sommes donc basés sur l'extension de la végétation (forêt, arbustes, graminées sur orthophotos) pour définir les limites des zones d'égale indexation (S4 au niveau des barres calcaire, S3 en forêt, S2 pour les pâturages par exemple) ;
- critère K : régionalisé, pour un bassin donné. Ce sont donc les seules limites des bassins qui vont définir les limites des cartes K. Pour l'Aygue Nègre, nous avons indexé localement avec des valeurs plus élevées les sous-bassins constitués de formations du Jurassique (calcaires Kimméridgien - Portlandien) et du Crétacé inférieur (calcaires barrémien ; marnes de Sainte Suzanne). ;
- critère E : critère dépendant des paramètres géologiques (lithologie, épaisseur) et structuraux (fracturation), en ce qui nous concerne. Il n'est pas directement lié à la présence de sol ;
- critère P : critère de protection du sol, traduisant un effet de retard, plus ou moins prononcé, à l'infiltration. La construction de la carte de ce critère résulte de la combinaison des cartes S et E, où en une maille donnée, l'indice le plus protecteur (le moins élevé) sera conservé.

Au final, après un nombre d'heures de travail assez conséquent (Annexe 1 : Tableau de bord), nous obtenons une série de cartes au format raster, (pixels : 25 m de côté, en accord avec le MNT fournit).

2) Tests effectués

Rappelons que la valeur de la vulnérabilité intrinsèque I_g en un point donné est définie par la combinaison linéaire des critères R, I, P et K en ce point, selon la relation suivante :

$$I_g = rR_{0.4} + iI_{0.4} + pP_{0.4} + kK_{0.4}$$

Avec r, i, p et k indices respectifs des critères R, I, P et K.

Ce calcul est soumis à deux conditions :

$$i > r \geq p \geq k \geq 0.1$$
$$\Sigma (\text{indices de pondération}) = 1$$

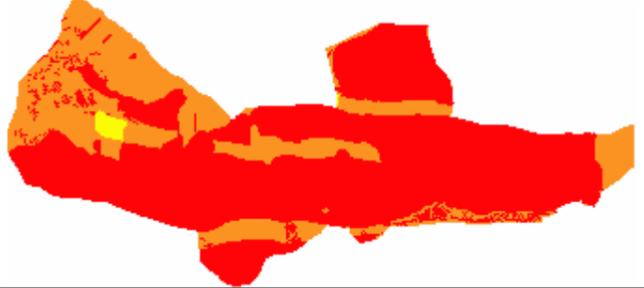
Nous avons donc testé l'ensemble des combinaisons possibles définies par ces deux conditions, pour des indices à deux décimales où la seconde décimale est soit 0, soit 5. Ce qui correspond à 27 tests différents pour chacun des deux bassins.

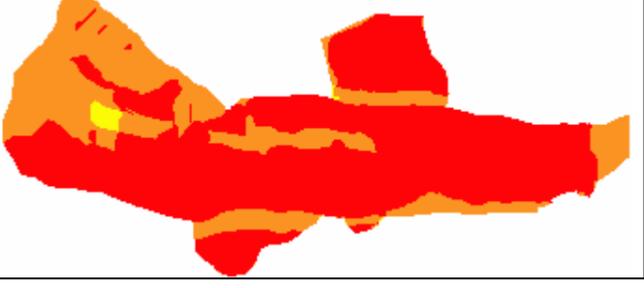
3) Présentation des cartes obtenues

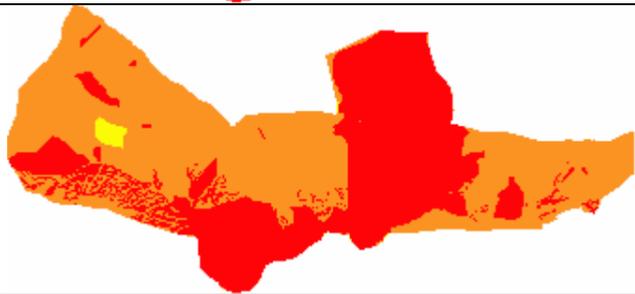
Dans cette partie, nous présentons l'ensemble des cartes d'Ig que nous avons obtenues, et débattons de leur cohérence vis-à-vis de chacune des cartes de critères R, I, P et K.

1) Aygue Nègre

Présentation des grands groupes de cartes de vulnérabilité intrinsèque obtenus :

Combinaison des pondérateurs	Carte Ig résultante
i0.3-r0.25-p0.25-k0.2	
i0.35-r0.25-p0.2-k0.2, i0.35-r0.25-p0.25-k0.15, i0.4-r0.25-p0.2-k0.15 et i0.4-r0.25-p0.25-k0.1	
i0.35-r0.3-p0.2-k0.15, i0.4-r0.3-p0.15-k0.15 et i0.4-r0.3-p0.2-k0.1	
i0.35-r0.3-p0.25-k0.1	
i0.4-r0.2-p0.2-k0.2	

Combinaison des pondérateurs	Carte Ig résultante
i0.4-r0.35-p0.15-k0.1	
i0.45-r0.2-p0.2-k0.15	
i0.45-r0.25-p0.15-k0.15, i0.45-r0.25-p0.2-k0.1 et i0.5-r0.25-p0.15-k0.1	
i0.45-r0.3-p0.15-k0.1	
i0.45-r0.35-p0.1-k0.1 et i0.5-r0.3-p0.1-k0.1	

Combinaison des pondérateurs	Carte Ig résultante
i0.5-r0.2-p0.15-k0.15 et i0.5-r0.2-p0.2-k0.1	
i0.55-r0.15-p0.15-k0.15, i0.6-r0.15-p0.15-k0.1 et i0.65-r0.15-p0.1-k0.1	
i0.55-r0.2-p0.15-k0.1	
i0.55-r0.25-p0.1-k0.1	
i0.6-r0.2-p0.1-k0.1	

Combinaison des pondérateurs	Carte Ig résultante
i0.7-r0.1-p0.1-k0.1	

Les cartes des critères RISKEP se rapportant à ce bassin sont regroupées en Annexe 3 : Cartes des critères RISKEP pour le bassin de l'Aygue Nègre (longueur totale : 8.35 km ; superficie : 15.3 km²).

i0.3-r0.25-p0.25-k0.2

Comme on pourrait l'attendre, en première approche, de la combinaison la plus équilibrée des indexations, l'ensemble des cartes RIPK ressort bien dans la carte d'Ig résultante. "Équilibrée" se rapporte à la combinaison qui permet l'expression maximale de chacun des critères, selon les conditions énoncées en 2)2). Les grands ensembles géologiques sont bien identifiables dans l'ensemble (dans l'ensemble, Ig = 4 pour R = 4, et Ig = 3 pour R = 2 et R = 1). Les contours des formations marneuses sont identiques à ceux de la carte R elle-même. L'extrémité Ouest des calcaires marneux à Spicules de l'Aptien ressort en Ig = 2, grâce à l'expression des cartes R (=2), I (=2) et P (=2).



Figure 31 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.3-r0.25-p0.25-k0.2, Aygue Nègre

La carte I s'exprime aussi de façon bien reconnaissable, plus particulièrement dans les zones où Ig = 3 pour I = 2 (extrémité Nord-Ouest, à l'extrémité Est et aussi au niveau de la zone SE du bassin). Ceci, grâce à son indexation plus forte, mais aussi grâce à la combinaison des vulnérabilités moindres des cartes P et K (P = K = 3) dans ces mêmes zones. La complexité des motifs très vulnérables (Ig = 4) traduit l'influence marquée de la carte P, toujours dans lesdites zones.

A noter que certains bassins versants définis comme extrêmement vulnérables sous la carte I (I = 4) se trouvent morcelés au niveau des formations plus marneuses de l'ensemble de la zone d'étude (Ig = 3 quand il devrait être égal à 4). Ce morcellement s'exprime à lui seul au Sud du bassin (Soum de Granquet) pour un R = 1, malgré des valeurs de I = K = 4 et un S = 3. Au Sud du cirque de la Toue, ce morcellement est exprimé d'autant plus intensément, par des valeurs de R = 1 et de P = 2 au niveau de la bande des marnes de sainte Suzanne.

Mais par la forme de la zone E des marnes à Spicules, on peut déduire que ce morcellement s'initie de façon suffisante pour un R = 2. En effet, la petite queue (P = 2) qui part vers le Nord, et qui ne s'exprime qu'au niveau de la carte P ne s'exprime aucunement au niveau de la carte Ig.

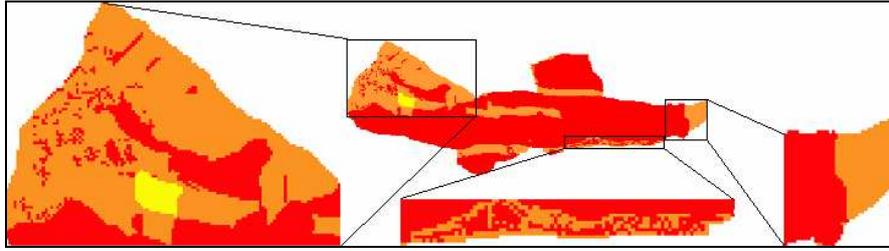


Figure 32 : zoom sur les zones explicitant l'influence prépondérante du critère I

Ainsi, selon les conditions données en première approche par J. Pranville (2007), le morcellement des bassins versants classés en $I = 4$ suffirait pour désavouer la cohérence de cette carte d'Ig ($I_g = 3$ au lieu de $I_g = 4$).

Mais il a été aussi conseillé, toujours dans le rapport de J. Pranville (2007), de pouvoir s'adapter en fonction du contexte d'étude. C'est d'ailleurs ce qui a poussé D. Kavouri, autre testeuse de la méthode RISKE 2, à effectuer une inversion des valeurs d'indexation pour la carte R dans le cas où une concentration des écoulements est avérée.

Nous considérons que la carte de vulnérabilité intrinsèque issue de cette combinaison de pondérateurs pourrait être potentiellement la carte la plus cohérente de vulnérabilité du bassin de l'Aygue Nègre. Voici une autre description qui pourrait valider notre pensée.

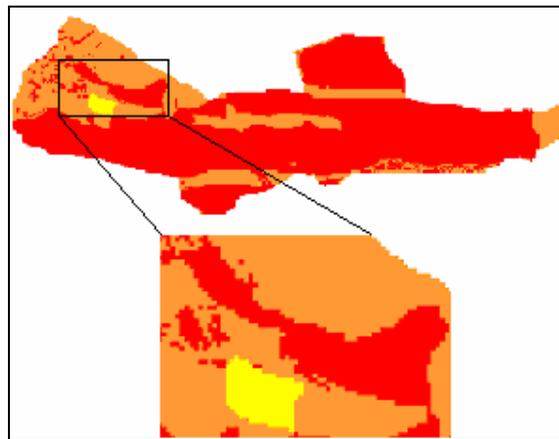


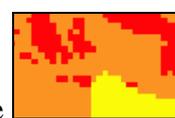
Figure 33 : Commentaire sur le plateau du Monbula, carte d'Ig

La zone la plus vulnérable de cette image (vers le haut) est liée à l'expression de la carte I (pour la forme de ladite zone, délimitée par un $I = 2$ au Nord et la valeur d'indexation de l'Ig, avec $I_g = 4$ pour $I = 4$ ou $I = 3$) et de la carte R ($I_g = 4$ pour $R = 4$).

Nous pouvons aussi remarquer l'expression de la seule carte P : l'allure de cette pointe



(carte P) ressort distinctement sur la carte Ig, en orange



(carte Ig).

C'est ainsi que nous avons confirmation de l'expression équilibrée, et relativement cohérente, de l'ensemble des cartes des critères RIPK au niveau de cette carte de vulnérabilité intrinsèque i0.3-r0.25-p0.25-k0.2.

i0.35-r0.25-p0.2-k0.2, i0.35-r0.25-p0.25-k0.15, i0.4-r0.25-p0.2-k0.15 et i0.4-r0.25-p0.25-k0.1
 Ces cartes, équivalentes à quelques pixels près, sont similaires à la précédente (Figure 31).

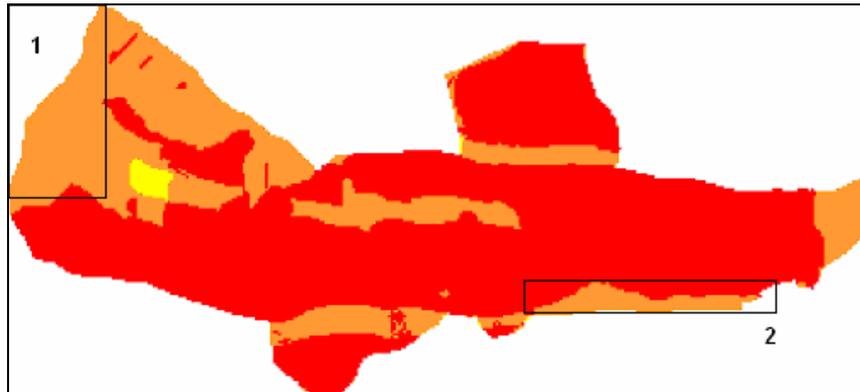
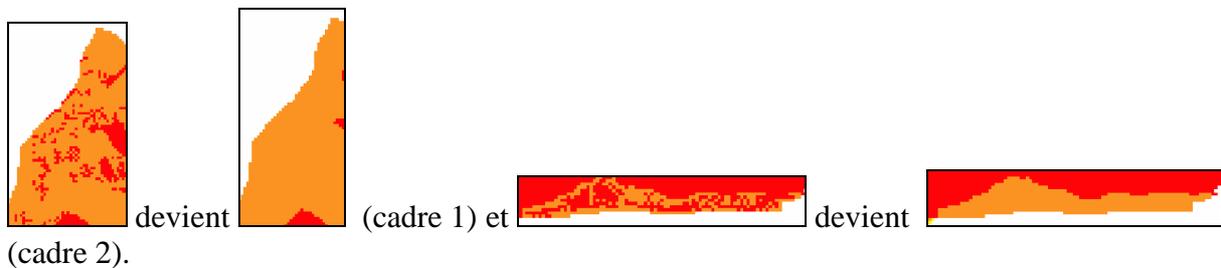


Figure 34 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.35-r0.25-p0.2-k0.2, Aygue Nègre

On peut observer une expression moins forte de la carte P en certains endroits, par la disparition de petites zones disparates classées $I_g = 4$ incluses dans du $I_g = 3$ dans la carte précédente et indexées en $P = 4$ (pas de sol ni d'épikarst). Nous avons donc une homogénéisation en $I_g = 3$ des dites zones.



Comme $R = 4$ en ces endroits, cette atténuation de P vient essentiellement de la carte I ($I = 2$) et, de façon bien moins marquée mais présente, de la carte K ($K = 3$).

i0.35-r0.3-p0.2-k0.15, i0.4-r0.3-p0.15-k0.15, i0.4-r0.3-p0.2-k0.1 :

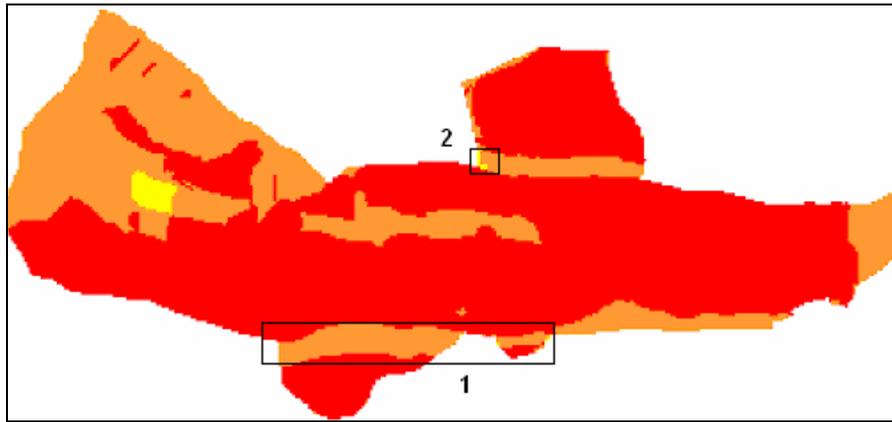


Figure 35 : carte de vulnérabilité intrinsèque, $i0.35-r0.3-p0.2-k0.15$, Aygue Nègre

Ce groupe de carte semble découler directement du groupe décrit juste au-dessus (Figure 34), par une atténuation plus prononcée de la carte P, mais pour des raisons différentes. En

observant la transition suivante, où  devient



(cadre 1), nous pouvons conclure que cette fois-ci, c'est la carte R qui va diminuer l'influence de la carte P. En effet, En ces endroits où une homogénéisation en $Ig = 3$ se fait, tous les critères autres que R et P sont égaux à 4, tandis que $R = 1$.

A noter ce qui semble être un artefact (Sud-Ouest du cirque de la Toue, cadre 2).



devient , toujours par rapport au précédent groupe de cartes.

$i0.35-r0.3-p0.25-k0.1$

Cette carte est très similaire à la première présentée (Figure 31), avec quelques variations liées à une expression moins poussée de la carte P au niveau de la bande de marnes de Sainte Suzanne au Sud du bassin. Ce qui est principalement dû à une expression plus marquée de la carte R par rapport à la carte P (on passe de $r0.25-p0.25$ à $r0.3-p0.25$).

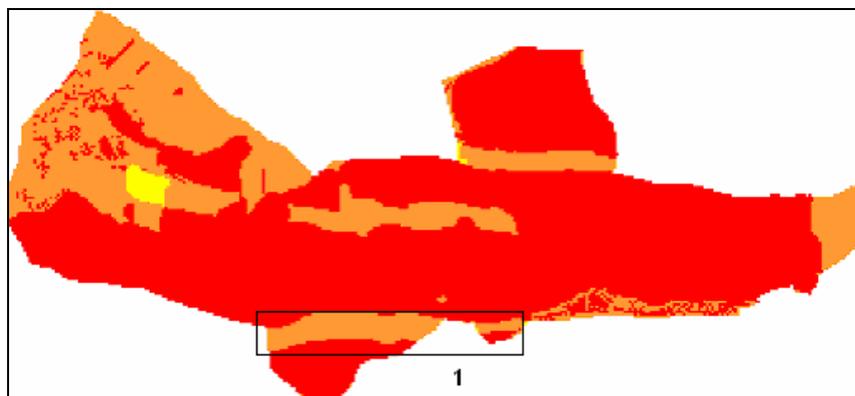


Figure 36 : carte de vulnérabilité intrinsèque, $i0.35-r0.3-p0.25-k0.15$, Aygue Nègre



devient



(par rapport à la première carte).

Le petit artefact  s'exprime aussi.

i0.4-r0.2-p0.2-k0.2

Nous observons des changements bien plus marqués que précédemment.

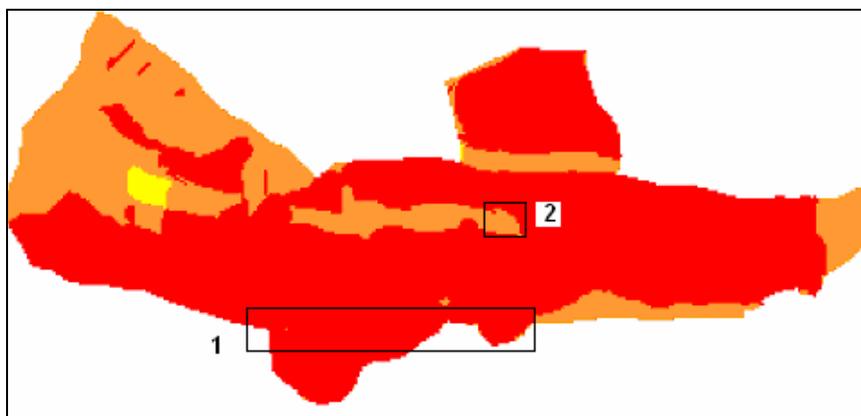


Figure 37 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.4-r0.2-p0.2-k0.2, Aygue Nègre

Cette carte se rapprocherait de la carte i0.35-r0.3-p0.2-k0.15 (Figure 35), mais avec cette fois une mise en évidence de la continuité des bassins d'alimentation des pertes, au niveau du Soum de Granquet et de la petite parcelle de Jurassique au pied du Soum de las Escures (cadre 1). C'est-à-dire une influence suffisante de la carte I (=4) à ce niveau ($I_g = 4$) pour palier l'influence de la carte R (=1, ici).



devient



, par

rapport à la carte i0.35-r0.3-p0.2-k0.15.

Que ce changement en $I_g = 4$ ne se fasse pas au niveau de la bande des marnes de Sainte Suzanne est donc lié à une indexation de la carte P (=2) sur ces marnes. Ce qui donne $I_g = 3$. En effet, nous avons sur cette bande les mêmes indexations en R (=1), I (=4) et K (=4) qu'au niveau de la bande Sud des marnes, sur ce bassin.

Quelques changements minimes sont observés en complément, toujours par rapport à la carte

i0.35-r0.3-p0.2-k0.15, où  devient . Visuellement parlant, cela traduit une influence relative de la carte P plus importante que pour la carte i0.35-r0.3-p0.2-k0.15.

i0.4-r0.35-p0.15-k0.1

Cette carte ressemble fortement au groupe i0.4-r0.3-p0.2-k0.1 (Figure 35), mais certains points méritent tout de même d'être soulignés.

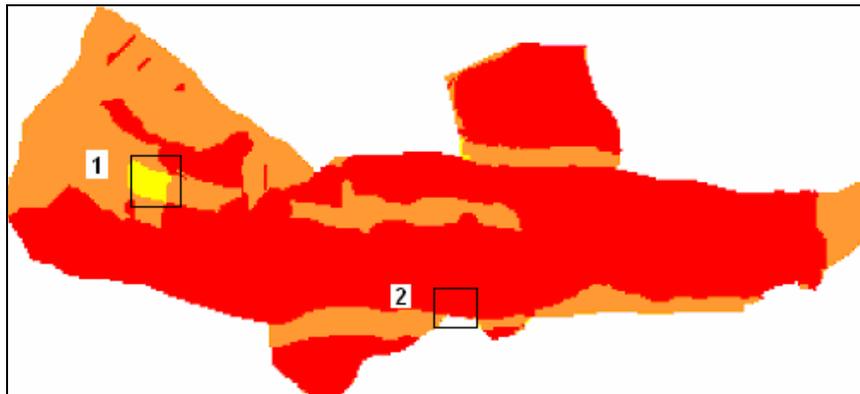
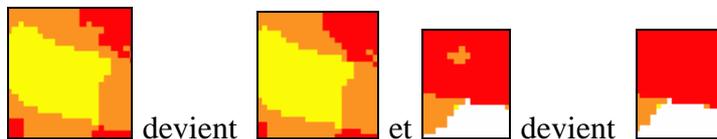


Figure 38 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.4-r0.35-p0.15-k0.1, Aygue Nègre

En effet, nous pouvons que les différences entre ces deux cartes sont minimes mais assez importantes pour être remarquée au premier coup d'œil.



devient et devient . Ce qui traduit une influence relative moins prononcée de la carte P (=2) par rapport à celles de I (=4) et R (=4) pour la détermination de l'Ig à ce niveau (Ig = 3 devient Ig = 4).

i0.45-r0.2-p0.2-k0.15

Cette carte est très similaire à la carte i0.4-r0.2-p0.2-k0.2 (Figure 37) présentée plus haut.

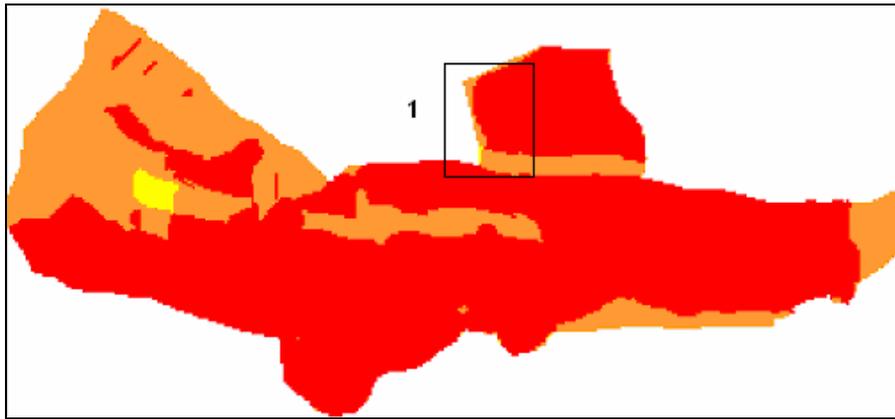
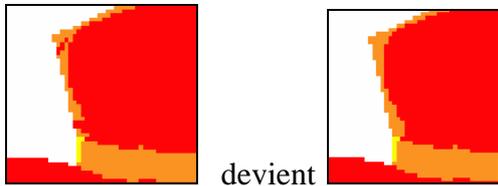


Figure 39 : carte de vulnérabilité intrinsèque, $i0.45-r0.2-p0.2-k0.15$, Aygue Nègre

Les différences visibles apparaissent au niveau de la partie Ouest du cirque de la Toue (cadre 1).



devient , ce qui traduit une diminution relative assez faible de l'influence de la carte P sur celle des autres cartes RIK.

$i0.45-r0.25-p0.15-k0.15$, $i0.45-r0.25-p0.2-k0.1$ et $i0.5-r0.25-p0.15-k0.1$:

Ce groupe de cartes est très similaire au groupe auquel $i0.35-r0.25-p0.2-k0.2$ (Figure 34) appartient.

Les seules différences entre ces deux cartes sont observées au même endroit que dans le cas précédent (Figure 39).

$i0.45-r0.3-p0.15-k0.1$

Cette carte se rapproche plus de la carte $i0.35-r0.3-p0.2-k0.15$ (Figure 35) et de ses sœurs.

La seule différence bien visible est celle telle que décrite entre les cartes $i0.45-r0.2-p0.2-k0.15$ et $i0.4-r0.2-p0.2-k0.2$ (Figure 39).

$i0.45-r0.35-p0.1-k0.1$ et $i0.5-r0.3-p0.1-k0.1$

Le groupe de cartes le plus ressemblant est celui de l' $i0.35-r0.3-p0.2-k0.15$ (Figure 35).

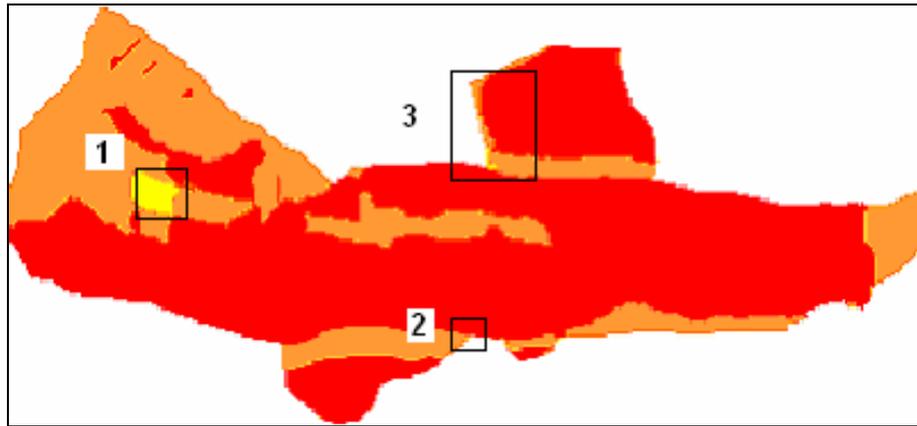
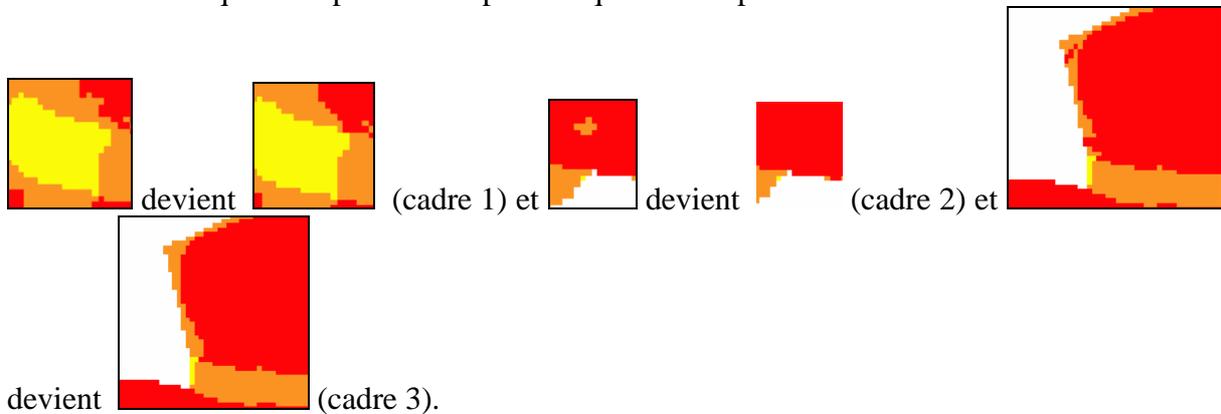


Figure 40 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.45-r0.35-p0.1-k0.1 , Aygue Nègre

Les différences qui les séparent sont peu marquées mais présentes.



L'origine des différences de ce type a été décrite précédemment.

i0.5-r0.2-p0.15-k0.15 et i0.5-r0.2-p0.2-k0.1 : très similaires à la i0.4-r0.2-p0.2-k0.2 (Figure 37). Les différences entre ces deux groupes de cartes sont (pour celles observables) identiques à la différence entre les cartes i0.45-r0.2-p0.2-k0.15 et i0.4-r0.2-p0.2-k0.2

i0.55-r0.15-p0.15-k0.15, i0.6-r0.15-p0.15-k0.1 et i0.65-r0.15-p0.1-k0.1
Ce groupe de cartes se démarque clairement de la série de cartes d'Ig précédente.

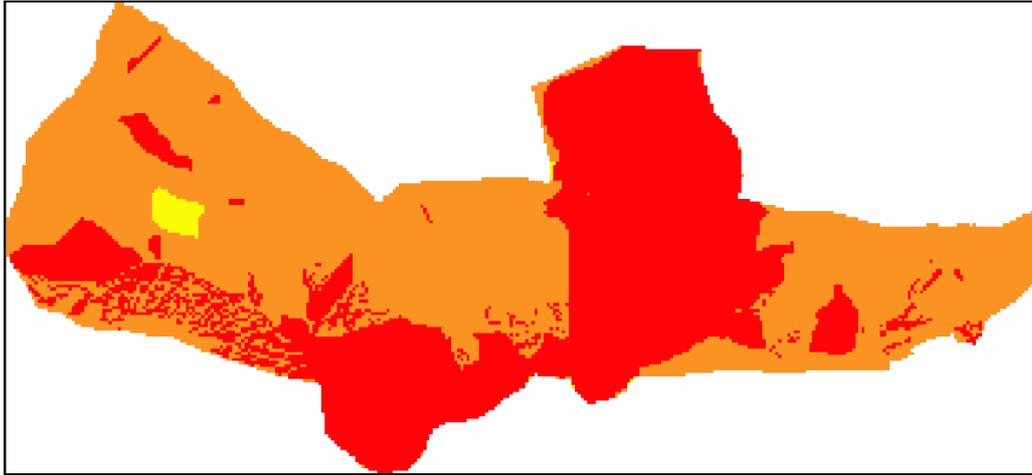


Figure 41 : carte de vulnérabilité intrinsèque, $i0.55-r0.15-p0.15-k0.15$, Aygue Nègre

On y voit clairement exprimée l'influence majoritaire de la carte I et celle de la carte P. L'ensemble des bassins versants des pertes/gouffres apparaît de façon claire et complète (contrairement à la carte $i0.3-r0.25-p0.25-k0.2$, Figure 31), avec $I_g = 4$.

Les cartes R et K se contrebalancent mutuellement (même pondérateur). L'influence de la carte I finit de diluer l'influence de R, plus particulièrement en dehors des zones où $I = 4$ (soit $I_g = 4$ pour cette carte). C'est ainsi que même au niveau de ces mini-bassins, l'influence des marnes de Sainte Suzanne ($R = 1$) ne transparaît aucunement. Aucune limite d'ordre lithologique ne ressort clairement, si ce n'est l'extrémité Ouest des calcaires marneux à Spicules. Cela résulte de l'influence combinée à cet endroit des cartes I ($=2$), R ($=2$) et P ($=2$) : $I_g = 2$ s'exprime alors.

Les valeurs $P = 4$ de la carte des sols ressort bien ($I_g = 4$) en dehors des zones où $I = 2$ (avec $I_g = 3$).

Cette carte ressort du lot, malgré une influence majoritaire du critère I dans la pondération. Les cartes K et P ressortent directement sur le display. Seule la carte R apparaît de façon moins directe, mais son influence est bien présente.

En première approche, ces cartes d' I_g pourraient être celles qui conviendraient le mieux jusqu'à présent en regard des conditions données par J. Pranville (2007). Mais rien ne permet de démarquer concrètement l'une des séries de pondération. Il faut attendre la fin de l'analyse de l'ensemble des cartes de ce bassin, voire de celles de l'Aygue Blanche pour trancher.

$i0.55-r0.2-p0.15-k0.1$: cette carte semble presque l'opposée de la série précédente.

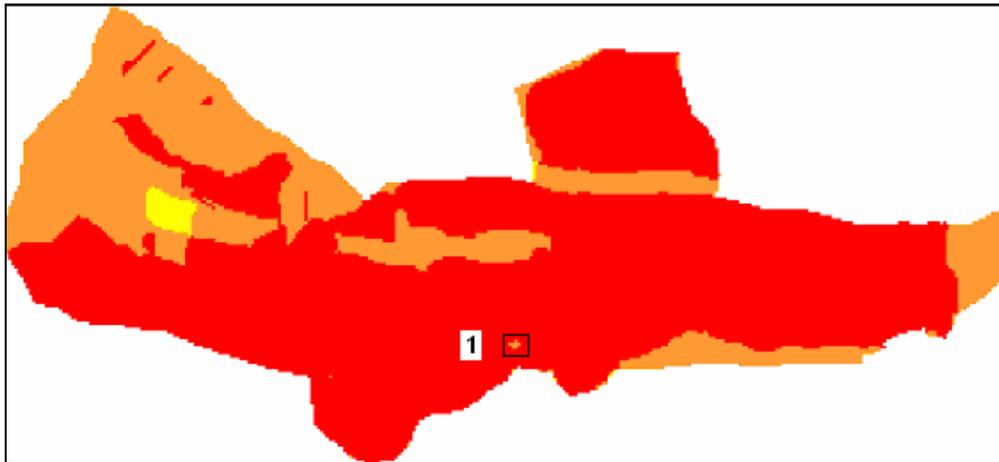


Figure 42 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.55-r0.2-p0.15-k0.1 , Aygue Nègre

En effet, la carte R s'exprime sans ambiguïté (limites des marnes à Spicules et de la partie Nord des marnes de Sainte Suzanne en $I_g = 3$, majorité des zones en $R = 4$ retranscrites en $I_g = 4$) tandis que l'on pourrait croire que les autres cartes semblent s'effacer. Même si la carte I reste prioritaire dans l'ensemble (zones où $I = 2$ exprimées en $I_g = 3$, par exemple).

La carte P semble ne pas s'exprimer, ou très peu, de façon directe. Nous pouvons reconnaître son influence, diffuse, au niveau de la petite zone orange isolée, au NO du Soum de las Escures (cadre 1). La bande Nord des marnes de Sainte Suzanne ressort sur la carte du vulnérabilité grâce à la combinaison des cartes $R (=1)$ et $P (=2)$ à ce niveau ($I_g = 3$). Ce qui crée une coupure au niveau du bassin versant d'une morphologie karstique classée $I = 4$ (bassin qui s'exprime en $I_g = 4$).

i0.55-r0.25-p0.1-k0.1

Cette carte est la même que précédemment (i0.55-r0.2-p0.15-k0.1, Figure 42), à quelques changements près.

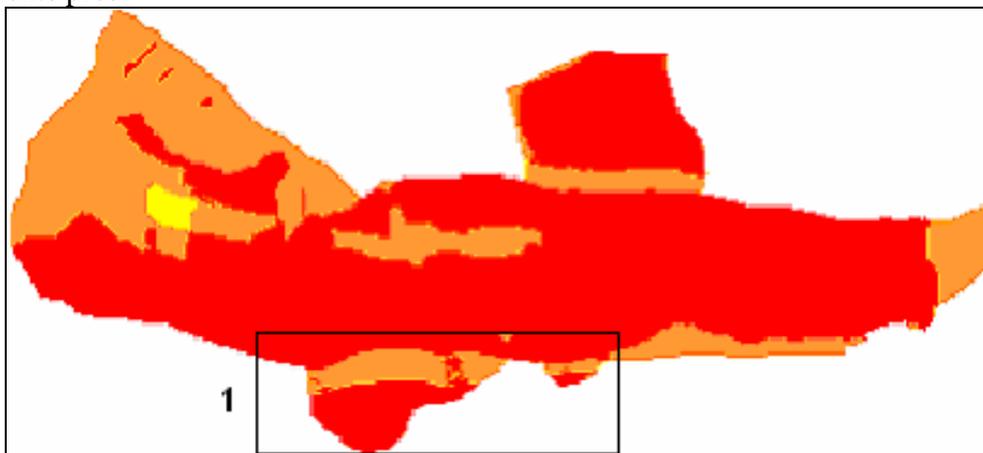
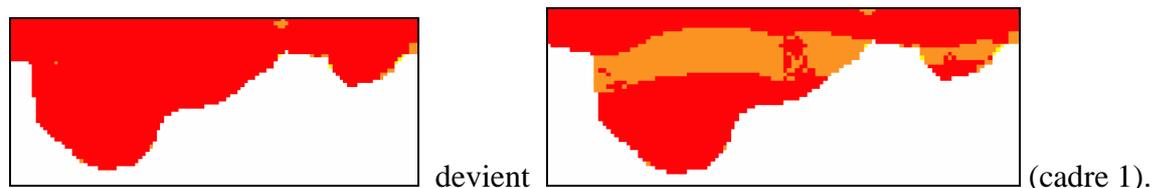


Figure 43 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.55-r0.25-p0.1-k0.1 , Aygue Nègre

L'influence de la carte R est plus poussée encore, ce qui permet de faire apparaître la bande Sud des marnes de Sainte Suzanne en $I_g = 3$ ($R = 1$). La couche P continue de s'exprimer, par le remplissage de ladite bande de marnes par quelques zones en $I_g = 4$, éparées ($P = 4$).

Comme toujours, la carte I s'exprime de façon prépondérante, par le tracé franc des limites des zones indexées $I = 2$ et qui ressortent ici en $I_g = 3$. Mais malgré tout, les coupures des bassins versants des morphologies karstiques classées en $I = 4$ s'expriment malgré tout ($I_g = 3$ au lieu de $I_g = 4$: bandes définies par les marnes de Sainte Suzanne).

Transition de i0.55-r0.2-p0.15-k0.1 à i0.55-r0.25-p0.1-k0.1 :



i0.6-r0.2-p0.1-k0.1

Cette carte ressemble fortement à la carte i0.55-r0.2-p0.15-k0.1 (Figure 42) sauf que la bande Nord des marnes de Sainte Suzanne est à présent classée en $I_g = 4$. Ce qui se traduit par une influence de I suffisamment forte pour compenser les influences combinées des cartes R (=1) E (=2), voir K (=3) à ce niveau.

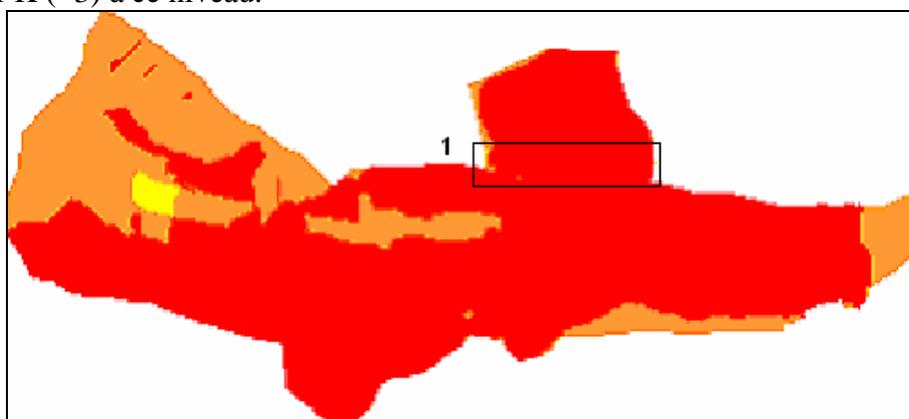


Figure 44 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.6-r0.2-p0.1-k0.1, Aygue Nègre

Dans l'ensemble, seules les cartes R et I semblent s'exprimer ici. Les bassins versants classés en $I = 4$ apparaissent tous en $I_g = 4$ dans ce cas précis. Le tracé sinueux des zones où $P = 4$ ne ressort aucunement dans les zones où $I_g = 3$, contrairement à la Figure 31, par exemple).

Transition de i0.55-r0.2-p0.15-k0.1 à i0.6-r0.2-p0.1-k0.1 :



i0.7-r0.1-p0.1-k0.1

Le phénomène de contrebalancement des cartes R et K décrit pour la série 0.55-r0.15-p0.15-k0.15 (Figure 41) s'accroît, ce qui laisse plus de champ libre à la carte P pour s'exprimer.

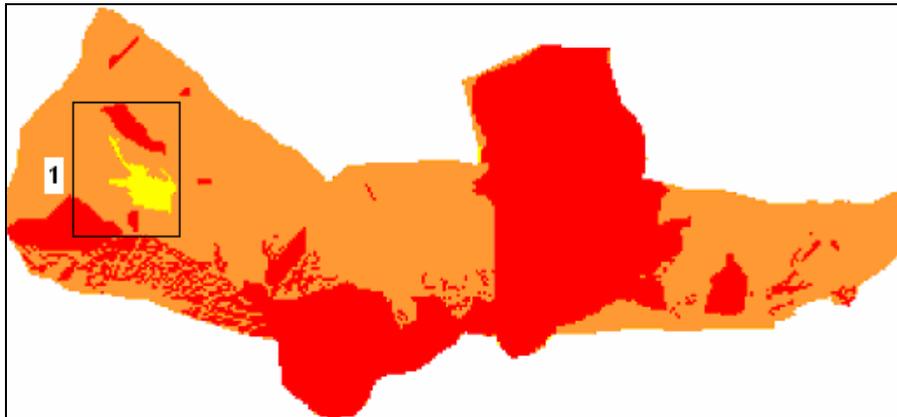
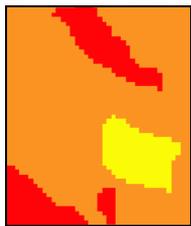


Figure 45 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.7-r0.1-p0.1-k0.1, Aygue Nègre

Cela se traduit par le tracé de zones sinueuses et ponctuelles en $I_g = 4$, incluse dans de larges zones où $I_g = 3$. Ce tracé ne s'observe par contre aucunement dans les zones où $I = 2$.

Par contre, les bandes de marnes de Sainte Suzanne ($P = 2$) ne ressortent aucunement cette fois-ci : il y a donc une complète expression de l'ensemble des bassins versants indexés en $I = 4$. Ce dernier point se traduit par une indexation en $I_g = 4$ sur la carte ci-dessus.

La seule différence visible entre 0.55-r0.15-p0.15-k0.15 et i0.7-r0.1-p0.1-k0.1 :



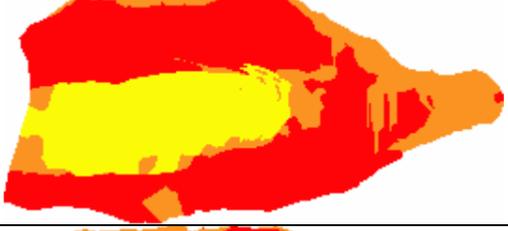
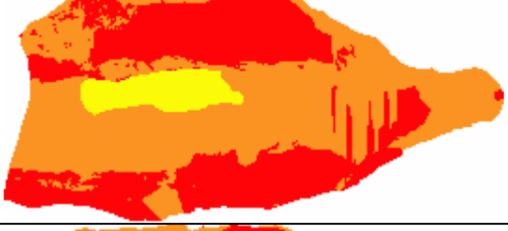
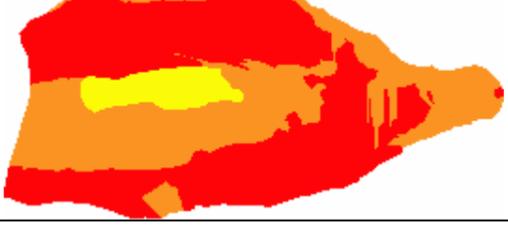
devient



(cas présent), où l'on reconnaît l'allure de la carte P

($I_g = 2$, cadre 1).

2) Aygue Blanche

Combinaison des pondérateurs	Carte Ig résultante
i0.3-r0.25-p0.25-k0.2	
i0.35-r0.25-p0.2-k0.2	
i0.35-r0.25-p0.25-k0.15 et i0.35-r0.3-p0.2-k0.15	
i0.35-r0.3-p0.25-k0.1	
i0.4-r0.2-p0.2-k0.2, i0.4-r0.25-p0.2-k0.15, i0.4-r0.25-p0.25-k0.1, i0.4-r0.3-p0.15-k0.15, i0.45-r0.2-p0.2-k0.15, i0.45-r0.25-p0.15-k0.15, i0.45-r0.25-p0.2-k0.1, i0.5-r0.2-p0.15-k0.15 et i0.5-r0.25-p0.15-k0.1	
i0.4-r0.3-p0.2-k0.1 et i0.4-r0.35-p0.15-k0.1 et i0.45-r0.3-p0.15-k0.1 et i0.45-r0.35-p0.1-k0.1	

Combinaison des pondérateurs	Carte Ig résultante
i0.5-r0.2-p0.2-k0.1	
i0.5-r0.3-p0.1-k0.1	
i0.55-r0.2-p0.15-k0.1 et i0.55-r0.25-p0.1-k0.1	
i0.55-r0.15-p0.15-k0.15, i0.65-r0.15-p0.1-k0.1	
i0.6-r0.15-p0.15-k0.1, i0.6-r0.2-p0.1-k0.1	
i0.7-r0.1-p0.1-k0.1	

Les cartes des critères RISKEP se rapportant au bassin de l'Aygue Blanche sont regroupées en Annexe 4 : Cartes des critères RISKEP pour le bassin de l'Aygue Blanche (longueur totale : 6.65 km ; superficie : 14.5 km²).

i0.3-r0.25-p0.25-k0.2

Tout comme pour l'Aygue Nègre, l'ensemble des critères RIPK qui composent cette carte d'Ig ressortent bien dans l'allure générale. L'organisation des grands ensembles constitutifs de la carte d'Ig se fait selon une direction longitudinale.

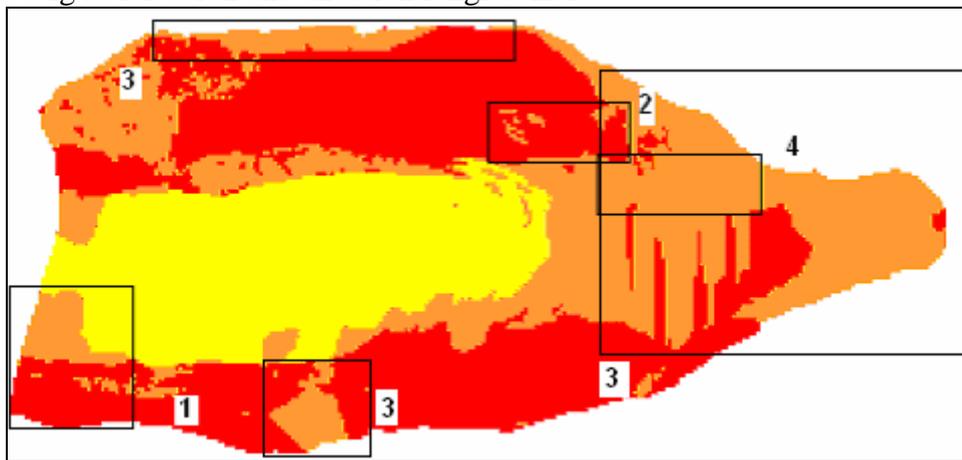
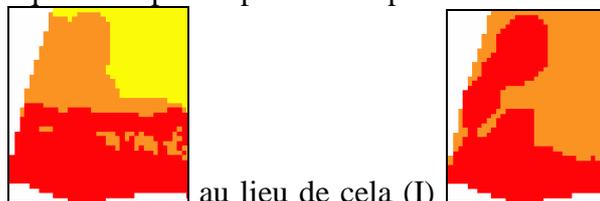


Figure 46 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.3-r0.25-p0.25-k0.2, Aygue Blanche

La carte I s'exprime par l'ensemble des bassins versants cartographiés en I = 4 qui transparaissent en Ig = 4, à quelques exceptions près. Exemple dans le coin Sud-Ouest de la



carte Ig : nous avons ceci (Ig) au lieu de cela (I) (cadre 1). De plus, au sein de zones où Ig = 4, il est tout de même possible de trouver des petits espaces à Ig moindre, bien que I = 4 toujours à ce niveau.



Pour ce dernier cas, nous avons par exemple ceci (cadre 2) alors que l'I donne cela

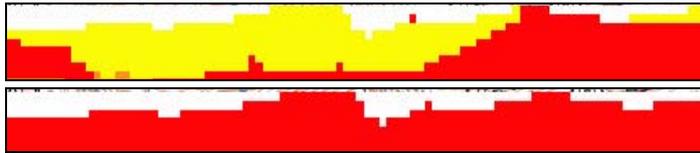


Dans le premier cas, ceci est lié à l'intensité d'expression des autres cartes, surtout R et K, pour ne parler que de l'indexation des critères (R = K = 2). Remarquer tout de même que le contour supérieur droit de la bulle d'I = 4 se retrouve sur la carte de vulnérabilité en Ig = 3. Dans le second cas, ce serait plus l'influence combinée des cartes R et P qui interviendrait.

Toutes les zones où I = 2 ressortent bien sur la carte d'Ig (Ig = 3, environné d'Ig = 4 par exemple, cadres 3), même quand R = 4 dans lesdites zones.

Nous avons par exemple

ceci pour l'Ig :
quand I ressemble à cela



et R à cela

, pour la même zone.

L'influence de K doit aussi intervenir dans cette dernière séparation, par son indexation traduisant une vulnérabilité moyenne sur l'ensemble du bassin ($K = 2$).

Nous pouvons remarquer en complément qu'en dehors des zones d' $I_g = 4$ correspondant à un $I = 4$ et/ou à un $R = 4$, la carte P s'exprime sans ambiguïté, par l'intermédiaire de ces petites zones éparées d' $I_g = 4$, incluses dans des ensembles où $I_g = 3$. De plus, la forme de l'ensemble $I_g = 2$ provient clairement de la carte P, pour la moitié Ouest de ladite carte. La moitié Est étant définie (visuellement parlant) par la carte R.

Dans l'ensemble, cette carte laisse assez bien s'exprimer l'ensemble des critères RIPK qui la constituent. Mais l'indexation de certaines zones va se révéler peu cohérente, notamment au niveau du Vallon de la Glacère (cadre 4). Sauf avis contraire, cette carte ne saurait être retenue pour traduire la vulnérabilité du bassin.

i0.35-r0.25-p0.2-k0.2

Quelques très légères différences par rapport à la carte précédente (Figure 46), liées à une intensité d'expression légèrement plus élevée de la carte R.

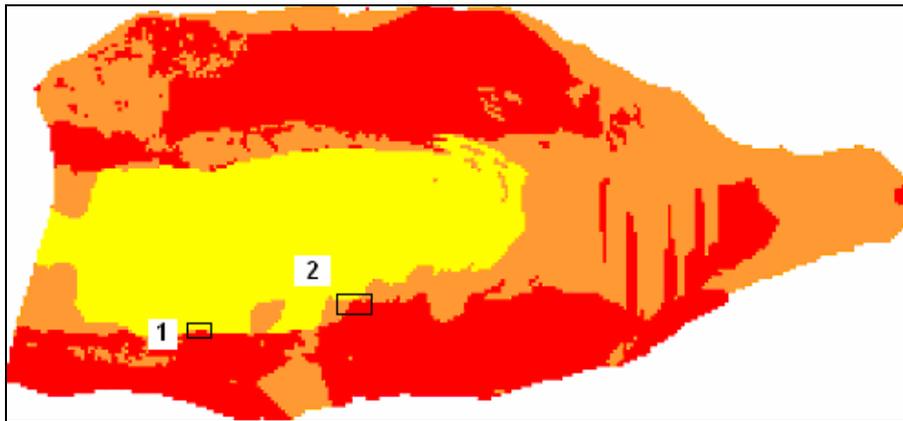
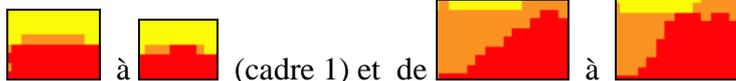


Figure 47 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.35-r0.25-p0.2-k0.2, Aygue Blanche

Exemples de transition (i0.3-r0.25-p0.25-k0.2 → i0.35-r0.25-p0.2-k0.2) :



Changements de [red to yellow] à [red to yellow] (cadre 1) et de [red to yellow] à [red to yellow] (cadre 2).

Nous pouvons donc considérer qu'en première approche (visuellement parlant), ces deux premières cartes se révèlent être identiques.

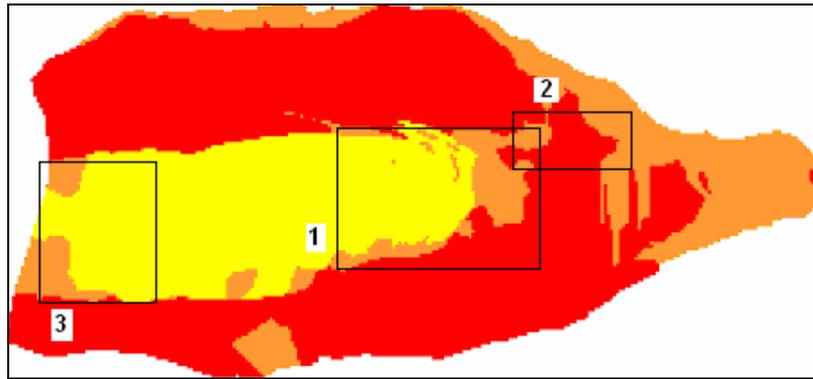


Figure 49 : carte de vulnérabilité intrinsèque, $i0.35-r0.3-p0.25-k0.1$, Aygue Blanche

Cette carte concilie avec un certain équilibre l'ensemble des critères RIPK qui la constituent. De plus, le Vallon de la Glacère ressort bien (partie Est du bassin, cadre 2) et apparaît avec une vulnérabilité maximale, ce que les autres cartes de vulnérabilité n'ont pas fait ressortir jusqu'à présent. Par contre, l'Ig = 2 au niveau des marnes à Spicules la partie Ouest du bassin semble bien faible, en regard des champs de dolines impressionnants qui y ont été observés (cadre 3). Avec des dolines très bien creusées, de type effondrement, en beaucoup d'endroits.

$i0.4-r0.2-p0.2-k0.2$, $i0.4-r0.25-p0.2-k0.15$, $i0.4-r0.25-p0.25-k0.1$, $i0.4-r0.3-p0.15-k0.15$,
 $i0.45-r0.2-p0.2-k0.15$, $i0.45-r0.25-p0.15-k0.15$, $i0.45-r0.25-p0.2-k0.1$, $i0.5-r0.2-p0.15-k0.15$
 et $i0.5-r0.25-p0.15-k0.1$

Pour autant de combinaisons de pondérateurs possibles, nous obtenons une même carte

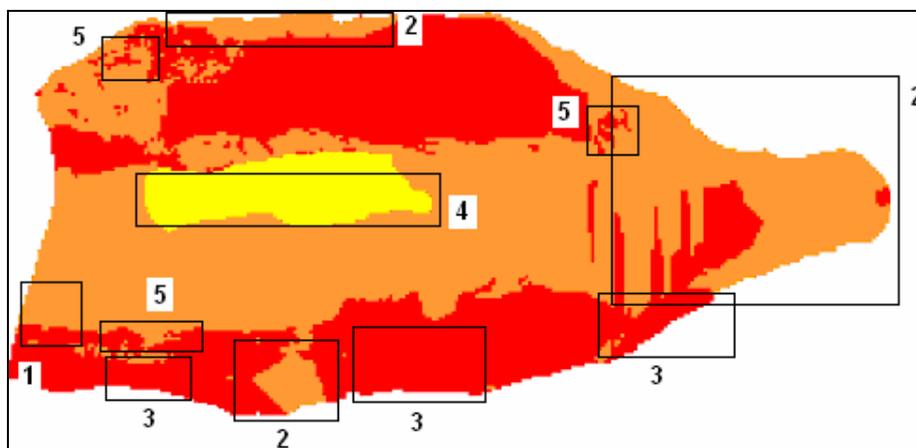


Figure 50 : carte de vulnérabilité intrinsèque, $i0.4-r0.2-p0.2-k0.2$, Aygue Blanche

Tous les bassins versants en I = 4 ressortent bien en Ig = 4 excepté celui situé dans le coin inférieur gauche de la carte d'Ig (Ig = 3, cadre 1). Les zones où I = 2 s'individualisent toujours en Ig = 3 (cadres 2). La carte R vient étendre les zones d'Ig = 4 issues d'un I = 4, ce qui est assez visible dans la partie Sud du bassin (cadres 3). P s'exprime clairement au niveau de la zone d'Ig = 2 (P = 1, cadre 4), là où la zone épikarstique du bassin a été jugée la plus importante. P aide aussi à étendre les zones d'Ig = 4 définies par un I = 4 et / ou un R = 4 (P = 4). Cela se reconnaît à la forme des fins motifs ponctuels d'Ig = 4 (cadre 5).

Au final, cette carte ne traduit pas entièrement la vulnérabilité globale du bassin (vallon de la Glacère par exemple), même s'il y a eu amélioration pour la partie Ouest du bassin (augmentation de l'Ig au niveau de l'étendu champ de dolines).

i0.4-r0.3-p0.2-k0.1 et i0.4-r0.35-p0.15-k0.1 et i0.45-r0.3-p0.15-k0.1 et i0.45-r0.35-p0.1-k0.1

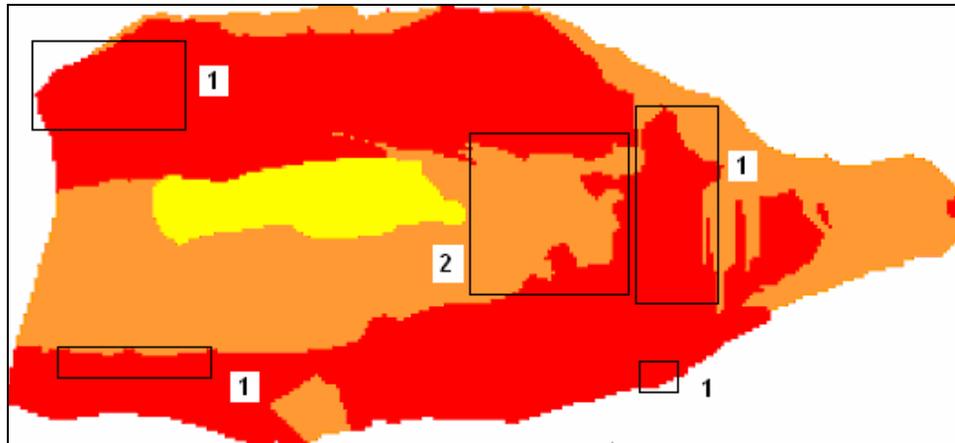


Figure 51 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.4-r0.3-p0.2-k0.1, Aygue Blanche

Ce sont les cartes qui traduisent jusqu'à présent au mieux une répartition de l'Ig globalement cohérente, tant en accord avec chacun des critères qu'avec les observations de terrain. Cela se voit à l'allure des zones très vulnérables (Ig = 4 pour I et/ou R et/ou P = 4) vulnérables (Ig = 3 pour I et/ou P = 2 et/ou pour R = 2 ou 3) et moyennement vulnérables (Ig = 2 pour P = 1 et/ou R = 2).

Le critère I s'exprime toujours de façon visible, quelque soit son indexation. La jonction décrite pour la Figure 50 (Ig = 4 des zones issues d'un I = 4 étendues par les zones où R = 4 et P = 4) est encore plus forte (cadres 1).

Les contours Est des calcaires marneux à spicules (R = 2), des sols (P = 2) et des formations calcaires avec passes marneuses (R = 3) ressortent de façon nette, ce qui se traduit par une zone d'indice Ig = 3 prenant en compte l'influence de ces trois facteurs (cadre 2).

Comme nous n'avons pas la possibilité de faire un choix précis pour la combinaison de critères à conserver, il serait judicieux :

- de tous les conserver ;
- de faire la comparaison avec le bassin de l'Aygue Nègre pour tenter de faire ressortir une possible combinaison applicable aux deux bassins.

i0.5-r0.2-p0.2-k0.1

Cette carte diffère de peu de la série de cartes introduite par la i0.4-r0.2-p0.2-k0.2.

La seule différence notable est l'indexation Ig = 4 à l'ensemble des bassins versants définis en I = 4, y compris celui dans le coin inférieur Ouest du bassin global (cadres de la figure ci-dessous).

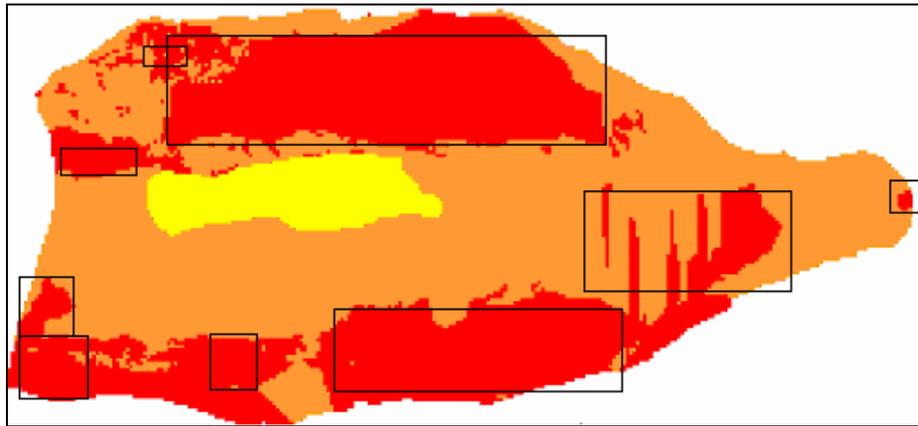


Figure 52 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.5-r0.2-p0.2-k0.1, Aygue Blanche

i0.5-r0.3-p0.1-k0.1

Cette carte s'apparente beaucoup à celles de la série initiée par i0.4-r0.3-p0.2-k0.1 (Figure 51). La seule différence vient de la disparition de la zone centrale d'Ig = 2. Disparition provoquée par une plus grande influence des critères I et R par rapport au cas de la Figure 51 (cadre).

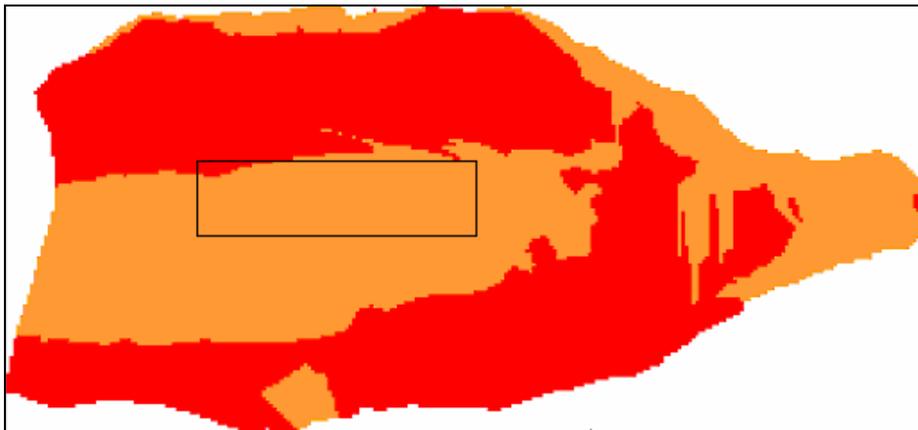


Figure 53 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.5-r0.3-p0.1-k0.1, Aygue Blanche

Cette carte aussi pourrait donc être plausible pour définir la vulnérabilité intrinsèque de l'ensemble du bassin. Qui plus est, il n'y a pas d'autres combinaison de pondérateurs qui permet de l'obtenir. Mais l'absence de zone moyennement vulnérable ne joue pas en sa faveur.

i0.55-r0.2-p0.15-k0.1 et i0.55-r0.25-p0.1-k0.1

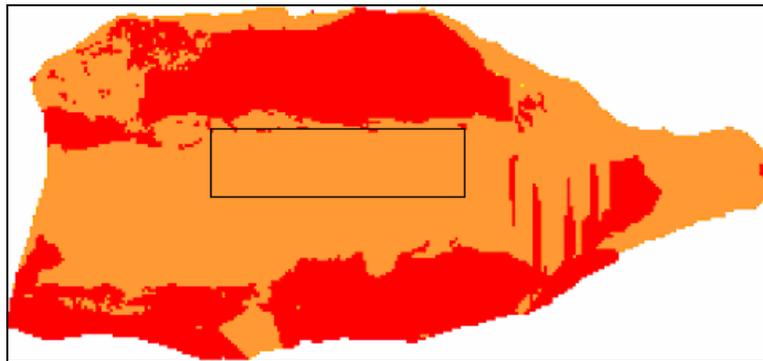


Figure 54 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.55-r0.2-p0.15-k0.1, Aygue Blanque

Cette carte ressemble à celle de la Figure 50 (série i0.4-r0.2-p0.2-k0.2), avec la disparition de la zone classée en vulnérabilité moyenne (Ig = 2, cadre).

i0.55-r0.15-p0.15-k0.15, i0.65-r0.15-p0.1-k0.1 et i0.6-r0.15-p0.15-k0.1, i0.6-r0.2-p0.1-k0.1

Ces deux groupes de cartes, très similaires dépendent très fortement de I, le second plus que le premier (cadres dans leurs figures respectives). L'influence des autres critères semble ici quasiment inexistante.

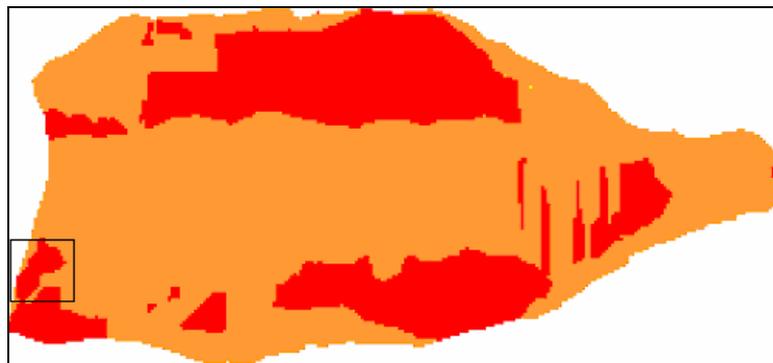


Figure 55 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.55-r0.15-p0.15-k0.15, Aygue Blanque

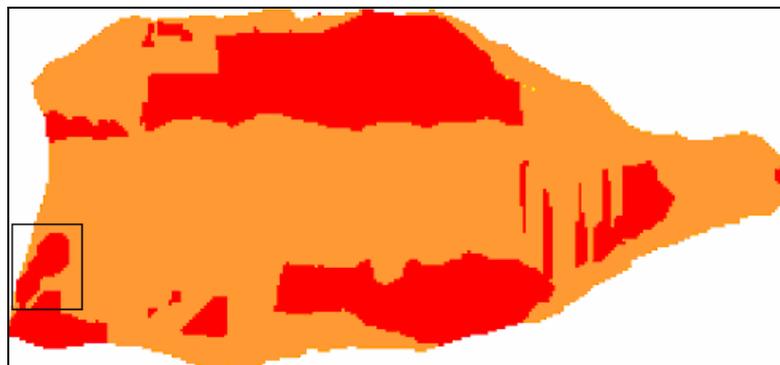


Figure 56 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.6-r0.15-p0.15-k0.1, Aygue Blanque

i0.7-r0.1-p0.1-k0.1

Cette carte ne semble dépendre que du seul critère I, à quelques exceptions près (cadre). Là où le critère P s'exprime par des petites zones en $I_g = 3$ (équivalent à $P = 4$) incluse dans du $I_g = 2$.

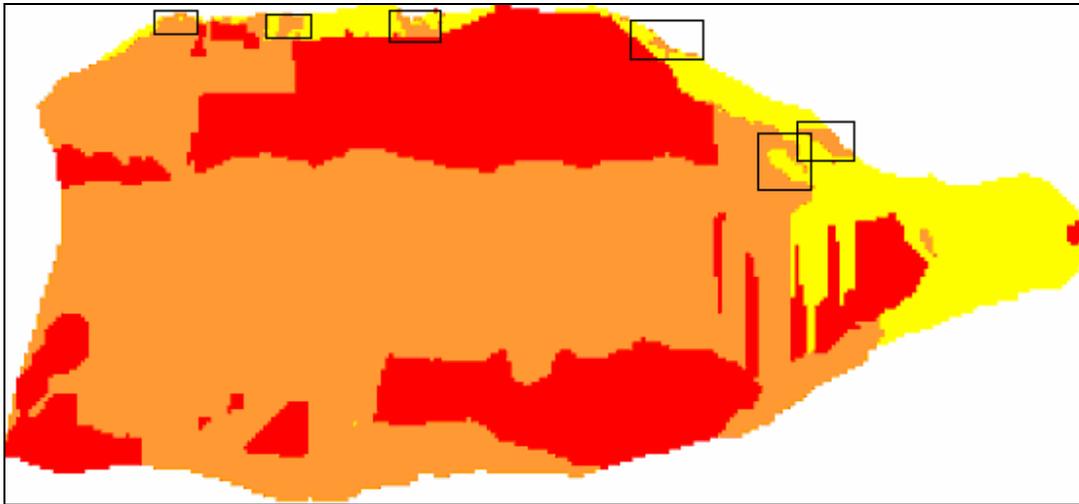


Figure 57 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.7-r0.1-p0.1-k0.1, Aygue Blanche

Elle ne sera donc pas retenue pour le choix des cartes de vulnérabilité du bassin.

3) Cartes finales de vulnérabilité

Du fait de contrastes d'indexations peu marqués des différents critères RIPK, différentes combinaisons de ces critères peuvent donner des cartes de vulnérabilité similaires, voire identiques. La détermination de la combinaison conduisant à la carte de vulnérabilité la plus cohérente sera donc contrariée. D'autant plus que nous sommes confrontés à une telle situation, où une carte de vulnérabilité qui apparaît comme la plus cohérente peut résulter d'un certain nombre de combinaisons possibles de pondérateurs.

C'est ainsi qu'après de nombreuses comparaisons et interrogations, nous avons finalement conclu que la combinaison de pondérateurs i0.3-r0.25-p0.25-k0.2 pour l'Aygue Nègre et le groupe i0.4-r0.3-p0.2-k0.1 pour l'Aygue Blanche traduiraient au mieux la vulnérabilité intrinsèque globale respective de chacun des deux bassins de notre étude. Position renforcée par la connaissance du terrain acquise au cours de ce stage. C'est ainsi que nous aurions les cartes suivantes, pour l'Aygue Nègre :

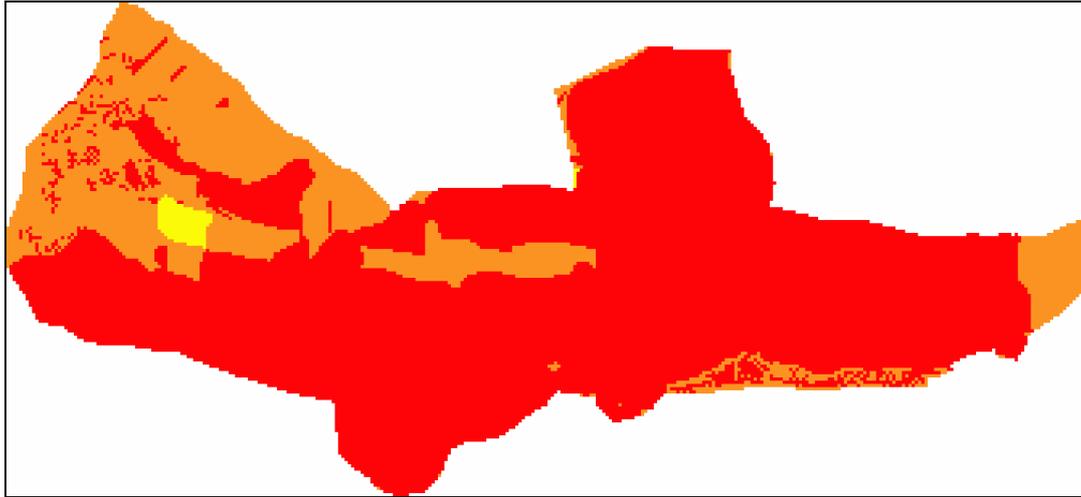


Figure 58 : carte de vulnérabilité intrinsèque, i0.3-r0.25-p0.25-k0.2 modifiée, Aygue Nègre

Et pour l'Aygue Blanche :

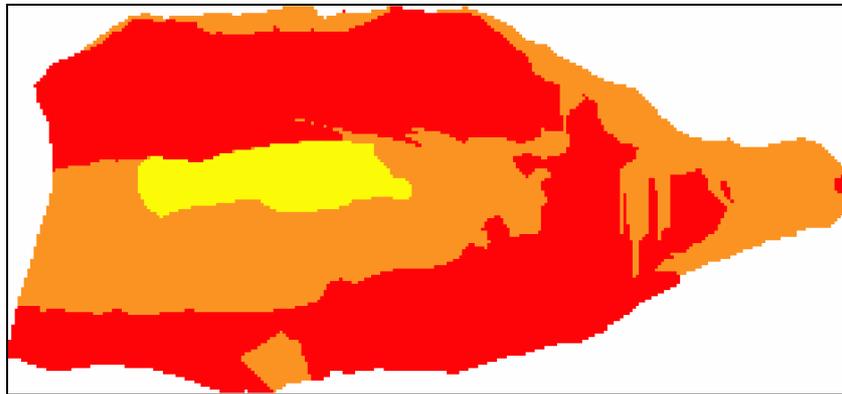


Figure 59 : carte de vulnérabilité intrinsèque, groupe i0.4-r0.3-p0.2-k0.1, Aygue Blanche

La carte de l'Aygue Nègre a été corrigée de telle sorte que l'ensemble des bassins versants drainant les morphologies karstiques en $I = 4$ ressort avec une vulnérabilité maximale ($I_g = 4$) sur la carte de vulnérabilité intrinsèque.

Dans les deux cas, les cartes traduisent un état de vulnérabilité très important des deux bassins, selon une organisation à dominante E-O.

AYGUE NEGRE

Le bassin de l'Aygue Nègre apparaît comme étant plus vulnérable que celui de l'Aygue Blanche. En effet, de par sa nature binaire et de son organisation structurale, un certain nombre d'écoulements de surface va se produire. Cela se caractérise par un certain nombre de système de pertes/résurgences, pouvant alterner sur plusieurs dizaines de mètres au sein d'un même thalweg.



Figure 60 : Système alternant de perte/résurgence au sein d'un même thalweg. Ruisseau de Yerse, Aygue Nègre.

Du fait d'un relief marqué, une morphologie karstique classée en I4 et située dans un point bas aura un impact majeur sur la détermination de la carte I. Ce, par l'indexation en I4 de l'ensemble du bassin versant drainant les eaux de surface en un tel point.

En complément, le bassin de l'Aygue Nègre, tout comme celui de l'Aygue Blanche, s'identifient par un nombre restreint de lithologies variées. Ce qui va influencer d'autant plus l'indexation du critère R et, par extension, de la vulnérabilité intrinsèque. Dans notre cas, les calcaires massifs et fracturés de l'Urgonien vont contribuer à augmenter l'indexation de la vulnérabilité globale. La zone des calcaires marneux qui ressort en $I_g = 2$ correspond à une zone où le facteur de protection est moyen ($P = 2$), du fait d'un sol relativement épais (entre 20 et 100 cm) et d'un épikarst moyennement développé. De plus, les possibles morphologies karstiques observées sont des lapiaz, cette zone ne drainant aucune doline ou perte observées. De même, la zone des calcaires marneux de l'Aptien qui ressort en $I_g = 3$, d'un facteur de protection équivalent, va alimenter des dolines ou autres dépressions repérées en contrebas.

Dans la partie Nord-Ouest du bassin de l'Aygue Nègre, la forte vulnérabilité générale ($I_g = 3$) résulte de la présence de morphologie karstiques de type lapiaz au niveau des barres calcaires très massives et très fracturées de l'Urgonien, mais où le facteur de protection est faible mais présent (entre 0 et 20 cm de sol mais pas d'épikarst). Les petites zones disparates de forme irrégulière classées en très forte vulnérabilité ($I_g = 4$) traduisent l'absence totale de protection dans le même contexte. Les zones de forme rectiligne et allongée correspondent aux bassins versants drainant des avaloirs ou dolines observés localement.

De même, dans la partie Est de cette zone Nord-Ouest, la zone continue et relativement étendue correspond, toujours pour le même contexte général décrit plus haut, à des zones où les écoulements de surface drainent des dolines observées à ce niveau.

L'extrémité Est du bassin de l'Aygue Nègre classée en forte vulnérabilité ($I_g = 3$) est une zone sans réel intérêt particulier, à cause de sa nature homogène. Elle correspond à un calcaire urgonien massif et fracturé, lapiazé, avec un indice de protection faible (pas d'épikarst mais présence d'un peu de sol, entre 0 et 20 cm). La mince bande à forte vulnérabilité au SE du bassin correspond au même type de contexte que celui de l'extrémité Est mais avec cette fois des zones disparates et irrégulières classées en vulnérabilité maximale ($I_g = 4$). Cela traduit un indice de protection P d'intensité minimal (pas d'épikarst ni de sol).

Le reste du bassin, classé en vulnérabilité maximale, est constitué de calcaires urgoniens massifs et fracturés en grand, qui vont drainer les écoulements de surface vers des morphologies karstiques en $I = 3$ (dolines) ou $I = 4$ (pertes, gouffres). En première approche, on pourrait penser que les cartes d'indice de protection P et de karstification K n'interviennent pas. Ceci est lié au fait que pour lesdites zones, l'indexation de ces deux derniers critères est très similaire à celle de R et I.

AYGUE BLANQUE

A présent, commentons la carte de vulnérabilité intrinsèque qui a été retenue pour le bassin de l'Aygue Blanche (Figure 59).

Cette carte, contrairement à celle choisie pour l'Aygue Nègre, peut résulter de plusieurs combinaisons possibles de pondérateurs. Malgré tout, nous avons choisi de conserver cette carte car elle reflète, à notre sens, la meilleure cohérence vis-à-vis des observations de terrain, tout en laissant s'exprimer l'allure des cartes de chacun des critères RIPK.

L'ensemble des zones classées en vulnérabilité maximale traduit les influences combinées (pour la partie visible) des cartes I et R. En effet, les parties du terrain qui vont drainer les pertes ou gouffres recensés ($I = 4$) doivent apparaître en $I_g = 4$. L'influence de la carte R (calcaire massif et fracturé, $R = 4$) va permettre de faire le lien entre ces différentes zones de concentration des écoulements par l'attribution d'une vulnérabilité maximale.

La forme générale de la structure vulnérable centrale ($I_g = 3$) vient de la combinaison des cartes R et P, principalement. Cette surface s'identifie dans l'ensemble à la zone des calcaires marneux à spicule de l'Aptien, qui constitue le cœur du synclinal du Jaut. La zone centrale, de vulnérabilité moyenne ($I_g = 2$) représente la partie du bassin où l'épikarst a été jugé le plus épais, en regard des observations effectuées (géologie, captage).



Figure 61 : Observations effectuées au niveau de la zone centrale du bassin de l'Aygue Blanche. Epikarst et sol à gauche, puits à droite.

Les zones en périphérie du bassin, classées en vulnérabilité forte ($I_g = 3$) traduisent un milieu constitué de calcaires massifs et fracturés urgonien, creusé de lapiaz, où il est possible d'y trouver un sol épais entre 0 et 20 cm.

A noter tout de même que nous n'avons considéré aucun facteur qui traduirait l'éloignement d'une zone donnée par rapport à la source que cette zone draine. Ce qui pourrait contribuer à jouer sur la cohérence finale des cartes présentées. En effet, les zones les plus proches de la source devraient ressortir, globalement, comme étant plus vulnérables que celle qui s'en trouveraient éloignées.

Conclusion générale et perspectives

La méthode RISKE 2 - PaPRIKa est une méthode probabiliste, multicritères, qui permet de tracer les cartes de vulnérabilité intrinsèque du bassin d'alimentation d'un aquifère karstique donné. La construction des cartes de l'ensemble des critères permettant l'obtention de cartes de vulnérabilité intrinsèque se base sur des relevés de terrains d'ordre visuels (directs ou non : orthophotos, cartes IGN). Seule la carte K est déterminée de façon entièrement indirecte, pour cerner le fonctionnement hydrogéologique du système étudié, via des chroniques de pluie-débits-concentrations chimiques, des relevés spéléo, ...

Cette méthode se révèle être relativement aisée à mettre en application sur le terrain, même si la connaissance d'un terrain donné va forcément évoluer au cours d'une étude. Cela se traduit par une indexation des critères qui peut ne pas être homogène dans le temps. Il est donc conseillé de prendre au moins 3 ou 4 photos par point de mesure (vue générale + détails de l'affleurement) et surtout de revoir l'indexation de l'ensemble des relevés une fois la partie terrain achevée. Ce qui est rendu possible par une banque d'image exhaustive. Ce point est à développer plus particulièrement pour un bassin comme le nôtre (variations rapides de critères dans un espace restreint), mais aussi selon le degré de précision recherché (globalisation ou non d'indexations). La méthode permet l'obtention de résultats cohérents, mais il est pour cela nécessaire de tester un certain nombre de combinaisons de pondérateurs. De plus, nous avons pu mettre en évidence ceci :

- plusieurs combinaisons possibles permettent d'obtenir des cartes très similaires, voire équivalentes. Cela peut être dû à des indexations très voisines entre les différents critères. La taille de chaque bassin (et donc, du nombre et de la répartition des relevés) peut aussi jouer. A plus grande échelle (cause du Gramat, par exemple), des similitudes locales, dont l'étendue peut être similaire à celle de nos bassins d'étude, peuvent ainsi se fondre dans un environnement global qui sera différent selon les combinaisons de pondérateurs ;
- malgré des contextes géographique, géologique, hydrogéologique et structural très similaires, ce sont deux types de combinaisons de pondérateurs différents qui nous ont permis d'obtenir les cartes jugées les plus cohérentes sur chacun des bassins respectifs. Comme hypothèses possibles, nous pouvons penser à des différences minimales mais suffisantes pour s'exprimer à cette échelle de travail (bassins de l'ordre de 15 km²). La difficulté de régionaliser les observations sur le bassin de l'Aygue Nègre peut aussi intervenir, pas forcément de façon indépendante. Cela peut induire un biais sur l'ensemble des cartes. Par exemple, contrairement au bassin de l'Aygue Blanche, les niveaux calcaro-marneux de l'Aptien, déjà peu présents, sont enfouis sous un abondant couvert végétal. De plus, en regardant le schéma structural de la zone (), nous pouvons remarquer que le bassin de l'Aygue Blanche semble mieux renseigné. Ce qui peut être dû à la qualité de la visibilité du terrain lui-même (moins de végétation sur l'Aygue Blanche). En complément, nous pouvons voir que sur l'Aygue Nègre, la densité de fracturation répertoriée au niveau du Clots du Granquet est comparable à celle caractérisant le champ de doline présent à proximité du col du Jaut sur l'Aygue Blanche. La position des relevés de terrain a aussi pu jouer. En effet, si les observations avaient été plus denses, certains ensembles qui peuvent ne pas apparaître actuellement auraient pu être mis en évidence. La répartition des points de mesures joue donc par extension sur l'allure des cartes de vulnérabilité intrinsèque. Tout ceci peut s'apparenter aux conditions d'accès du bassin.

L'application de la méthode que nous en avons faite s'est révélée difficile par plusieurs aspects, indépendants les uns des autres :

- l'application en zone de moyenne montagne, ce qui implique des conditions météo et d'accessibilité particulières, qui induisent un travail bien moins rapide et détaillé que si nous étions en zone de plaine ou de plateau ;
- l'indexation in-situ des critères (valeurs entières). Remarque d'autant plus applicable au critère E ;
- la prise en main autodidacte du SIG qui nous a permis l'obtention des cartes de vulnérabilités présentées plus haut. L'adaptation laborieuse du SIG pour ce type d'étude (couches vectorielles créées sans possibilité d'y rattacher quelque attribut que ce soit) ;
- le manque de données disponibles (chroniques de pluie-débit-concentrations chimiques, ...).

De plus, les traçages effectués ont révélé des résultats peu probants. Il serait bon de palier cette lacune dans le but de mieux cerner les limites des deux bassins d'alimentation.

A cause d'un apprentissage autodidacte de Saga et du mauvais fonctionnement de gvSIG, nous n'avons pu commencer à tracer l'ensemble des cartes des critères RISKEP de chacun des bassins moins d'un mois avant l'échéance de ce stage. C'est pourquoi nous n'avons pu réaliser tous les tests auxquels nous avons pensé, mais dont nous allons présenter les grandes lignes ci-dessous :

- Carte R : tester les effets d'une indexation rapportée à la formation aquifère elle-même, et non aux seules formations affleurantes. Dans notre cas, cela aurait été de globaliser le critère R qui aurait été égal à 4. La formation aquifère reconnue étant en effet définie par les calcaires massifs et fracturés de l'Urgonien ;
- Carte I : tester les effets d'une déclassification d'une unité ($I = 4 \rightarrow I = 3$ par exemple) pour les zones dont la pente topographique est supérieure à 50% (indice I_g équivalent de telles valeurs de pentes : 0) ;
- Nous avons découpé chaque bassin en zone "homogène" où l'on considère que la lithologie, la structure et le couvert végétal varient peu. Cette procédure initiale visait à optimiser la répartition des points de mesure, de telle sorte qu'elle soit la plus homogène possible. Ce qui a permis aussi de repérer dans un premier temps les structures assez remarquables pour être signalées sur des documents papiers ou numériques. Cela permettrait de comparer les résultats (cartes I_g) issus d'un tel découpage avec ceux issus de la procédure conventionnelle de tracé des cartes d' I_g . Cela revient en quelque sorte à comparer les résultats issus du tracé direct des cartes d' I_g (calcul de l' I_g en chaque point) avec ceux issus de la combinaison linéaire des cartes RIPK. Car le découpage en zones homogènes s'est révélé bien plus rapide que celui de chacune des cartes RISKE. Précisons qu'au sein d'une même zone homogène, l'extrapolation des limites d'égale indexation entre points avec des valeurs d' I_g différentes se baserait sur les aires de Voronoï, contribuant à souligner d'autant plus le caractère probabiliste de la méthode;
- enfin, tester les effets d'une variation de la densité de points, dans le cadre de la procédure conventionnelle, mais aussi par rapport à celle décrite plus haut (zones homogènes).

D'un point de vue plus méthodologique, nous proposons :

- la réalisation d'une présentation de l'indexation de chacun des critères, à partir d'une banque d'images, dans des contextes différents ;
- une répartition des relevés qui soit la plus homogène possible, la méthode étant par nature probabiliste. Sans négliger de relever la position de chacune des morphologies karstiques particulières (dolines, gouffres, ...), si le temps le permet ;

- la mise en place de traçages, dès l'instant où certains doutes subsistent quant à la définition des limites des bassins d'alimentation ;
- la prise en compte d'un facteur qui tendrait à modifier les indexations en fonction du temps de trajet jusque la (les) résurgence(s) du bassin.

Suite à l'expérience que nous en avons faite, il est possible d'appliquer la méthode RISKE 2 sur les SIG à licence libre (réalisé efficacement sur Saga). Cela peut se révéler plus laborieux par certains aspects que sur des logiciels du commerce, mais cela reste réalisable. De plus, il reste possible d'exporter l'ensemble des fichiers, raster ou vecteur, utilisés à cette occasion. Ce point se révèle intéressant par les économies que cela permet de réaliser, qui plus est pour des étudiants qui n'utiliseraient les SIG que pour une durée de 6 mois. Mais sur le long terme, il est vrai qu'il est toujours plus intéressant d'investir dans un logiciel du commerce, ne serait-ce que pour des raisons de maintenance, garantie, suivi, ...

De plus, l'inconvénient des SIG libres vient du fait qu'étant moins connus, donc moins utilisés, un certain temps est nécessaire à leur apprentissage.

Ce dernier point a été traité par la rédaction d'un guide d'utilisation du SIG libre Saga (combiné avec le SIG libre gvSIG), il pourrait donc se révéler intéressant à l'avenir d'utiliser ce type de logiciel pour mener une telle étude.

Références bibliographiques

Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse (2005) : Bilan et analyse de la mise en oeuvre des procédures de protection des captages AEP en milieu karstique. Rapport final synthèse des phases 1,2 et 3, 76 p.

Auly T. (2000) : La région d'Arudy : les relations glacio-karstiques, élément fondamental de l'organisation morphologique. Travaux du laboratoire de Géographie Physique Appliquée, Institut de Géographie, Université Bordeaux III, n°18, 126 p.

Bakalowicz M. (1999) : Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques. Guide technique n°3, SDAGE Rhône - Méditerranée - Corse. Agence de l'eau Rhône - Méditerranée - Corse, Lyon, 40 p.

Bichot F. (2007) : Avis sur la protection des captages des sources Aygue Nègre, Aygue Blanche et de la prise d'eau de la rivière Ouzom (Pyrénées-Atlantiques) - version provisoire. Rapport d'hydrogéologue agréé à l'intention du Syndicat Mixte AEP du Nord-Est de Pau. 75 p.

Comité départemental de Spéléologie des Pyrénées Atlantiques : base de données contenant les coordonnées des morphologies karstiques de surface relevées par le Comité.

Dassau O., Holl S., Neteler M., Redslob M. (2005) : Introduction à l'utilisation du Système d'Information Géographique Libre GRASS 6.0 - version 1.2. GDF Hannover bR. Traduction française : Rousseau E., 178 p.

Desegaulx P., Roure F., Villein A. (1990) : Structural evolution of the Pyrenes : tectonic inheritance and flexural behaviour in the continental crust. *Tectonophysics*, No 182, P. 211-225

Dörfliger N., Jauffret D., Loubier S. (2004) : Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche Comté, avec la collaboration de V. Petit, rapport BRGM RP-53576-FR, 121 pages, 24 illustrations, 4 annexes.

Equipo SEXTANTE (2007) : Conceptos generales de SEXTANTE. Edition v0.52 | Revision 4 de mai 2008. 48 p.

Godechot Y. (1962) : Contribution à l'étude géologique des chaînons nord-pyrénéens aux confins du Béarn et de la Bigorre. Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université de Toulouse, 192 p.

IVER - Tecnologías de la información, PRODEVELOP - Integración de tecnologías S.L., INSTITUTO DE DESARROLLO REGIONAL (Sección de Teledetección y SIG) (2007) : gvSIG 1.1 - User guide (English- Version 1), 409p.

James V. & Canérot J. (1999) : Diapirisme et structuration post-triasique des Pyrénées occidentales et de l'Aquitaine méridionale (France). *Eclogae geol. Helv.* 92, p. 63-72.

Klarica S. (1997) : Etude pluridisciplinaire de deux aquifères du piémont pyrénéen (Béarn). Thèse de Doctorat ès Géophysique, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 263 p.

Lenoble J.-L. (1992) : Les plates-formes carbonatées ouest-pyrénéennes du Dogger à l'Albien. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 413 p.

Marsaud B. (1996) : Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir de résultats expérimentaux. Thèse de Doctorat, Université Orsay Paris Sud, Document BRGM n° 268, 305 p.

N'Da Loukou V. (1984) : Urgonien des Pyrénées occidentales, synthèse paléo-écologique, micropaléontologique et paléogéographique. Thèse de Doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 318 p.

Neteler M. (2005) : GRASS 6 in a nutshell - précis et concis. Conférence Open Source Geospatial '05, 16-18 juin 2005, Université du Minnesota, Minneapolis, MN USA. Traduction française : Rousseau E. 37 p.

Olaya V. (2004) : A gentle introduction to SAGA GIS. Edition 1.1, révisée le 9 décembre 2004. 216 p.

Pranville J. (2007) : Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines de la partie Sud du Causse de Gramat. Rapport de fin d'études, Master 2 Hydrologie - Hydrogéologie. Université Pierre et Marie Curie, 143 p.

Rey F. (2007) : Ressources en eau souterraine dans les chaînons béarnais (Pyrénées-Atlantiques, France) - Géométrie et fonctionnement hydrogéologique de quatre aquifères carbonatés. Thèse de Doctorat ès Géologie Appliquée, Université de Bordeaux I, 456 p.

Sherman G. E. et al (2007) : Quantum GIS User and Installation Guide -Version 0.9.0 '*Ganymede*'. 169 p.

Unit Geo Software Development Sector Remote Sensing & GIS IT Department International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC) (2001) : ILWIS 3.0 Academic User's Guide. 542 p.

Vernoux J.F., Wuillemier A., Seguin J.J., Doerfliger N. (2007) : Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Rapport intermédiaire : synthèse bibliographique et analyse des études réalisées par le bassin Seine-Normandie, rapport BRGM/RP-55332-FR, 128 pages, 125 illustrations, 8 annexes.

Annexes

Table des matières des annexes

Annexe 1 : Tableau de bord	71
Annexe 2 : Présentation de SAGA_GUI (SIG).....	72
Annexe 3 : Cartes des critères RISKEP pour le bassin de l'Aygüe Nègre (longueur totale : 8.35 km ; superficie : 15.3 km ²).....	73
Annexe 4 : Cartes des critères RISKEP pour le bassin de l'Aygüe Blanche (longueur totale : 6.65 km ; superficie : 14.5 km ²).....	74
Annexe 5 : tutorial des logiciels à licence libre utilisés avec succès au cours de ce stage	Erreur ! Signet non défini.

Annexe 1 : Tableau de bord

Etapas	Contraintes	Commentaires
Acquisition des données	Temps / Unité de surface (km ²) Matériel / Logiciel	
Données Nécessaires (ex: MNT, carte géologique, hydrogrammes ou valeurs de débits des sources, ...)	2,6 heures.km ² MNT au 1/25 000 de IGIL, carte géologique au 1/50 000	Pas d'hydrogramme disponible
Données utiles (ex: carte géomorphologique, pédologique, photos aériennes, synthèses hydrogéologiques, données d'essais de traçage, données hydrologiques-hydrochimiques, ...)	2,6 heures.km ² orthophotos IGIL, données spéléo, traçages	Pas de données hydrochimiques continues, pas de données carto spéléo
Tri et traitement des données existantes	4,2 heures.km ²	
Terrain		
Critères de définitions de densités des points d'observation (en fonction de l'hétérogénéité des terrains, complexité / surface)	2,9 heures.km ² cartes IGIL 1/25 000 et carte géologique 1/50 000 puis sous SIG (GPSIG)	Très dépendant des conditions météo (montagne)
Observation / Géoréférencement	6,1 heures.km ² GPS Garmin 60, cartes IGIL au 1/25 000	Très dépendant des conditions météo (montagne)
Cartographie RISKE 2		
Carto de R	0,9 heures.km ² SIG : SAGA, ILWIS : Excel; GPSBabelGUI; Circé (IGIL)	Prise en main laborieuse des SIG utilisés, plus particulièrement Saga (1 seul tutoriel existant, pas d'aide disponible)
Carto de I	2,4 heures.km ² SIG : SAGA, ILWIS : Excel; GPSBabelGUI; Circé (IGIL)	Découverte des débuts de la procédure officielle le 23/10/11
Carto de S	3,1 heures.km ² SIG : SAGA, ILWIS : Excel; GPSBabelGUI; Circé (IGIL)	Modifier : peu de communication de ma part vers le milieu du stage
Carto de E	1,1 heures.km ² SIG : SAGA, ILWIS : Excel; GPSBabelGUI; Circé (IGIL)	(d'après sur le forum SIG)
Carto de P	2,1 heures.km ² SIG : SAGA, ILWIS : Excel; GPSBabelGUI; Circé (IGIL)	Le temps inclut la rédaction du tutoriel de l'utilisation des logiciels libres
Carto de K	0,3 heures.km ² SIG : SAGA, ILWIS : Excel; GPSBabelGUI; Circé (IGIL)	utilisés dans le cadre de ce stage, appliqués à la méthode RISKE 2
Carto finale (indexation / pondération)	4,7 heures.km ²	
Rapport		
Cartographie Aléas	Microsoft Word, Powerpoint	
Recensement des Industries / STEP/assainissement individuel	Non prévue non prévu	Non prévue
Recensement des élevages / Cultures	non prévu	
Cartographie Risques	Non prévue	Non prévue
Croisement carte RISKE et Carte Aléas	non prévu	

Annexe 2 : Présentation de SAGA_GUI (SIG)



SAGA est un SIG à licence libre qui a été développé à l'université de Göttingen (Allemagne). Ce logiciel peut traiter des fichiers de type raster ("grid") et vecteur ("shape") sous de multiples formats (via l'utilisation du module GDAL).

Il est particulièrement puissant et polyvalent pour ce qui est du traitement des fichiers raster (analyses diverses, géostatistiques,...), ce qui inclut notamment le traitement sur MNT (pentes, réseau hydrographique, ...). Tout ceci ne l'empêche pas de pouvoir être pris en main relativement facilement, que ce soit par des débutants en SIG ou par des personnes plus confirmées, de façon quasi-intuitive, notamment grâce à son interface claire et bien organisée (mais moins conviviale que gvSIG).

Au cas où certaines opérations voulues par l'utilisateur n'existeraient pas, il est toujours possible de créer ses propres modules à l'aide de quelques lignes (plusieurs dizaines à plusieurs centaines) de programmation en C++.

Ce qui expliquerait qu'un logiciel aussi puissant, maniable et, qui plus est, libre d'accès soit aussi peu connu ou répandu (au moins par rapport à Grass), vient peut-être du fait qu'il n'existe quasiment aucune documentation. Il n'y a même aucun menu d'aide disponible. Seul un "conseil du jour" ("tip of the day") se lance à l'ouverture. Il est accessible via la barre de menus ("?→Tip of the Day..."). Mais ce conseil ne se rapporte qu'à des situations très basiques.

Quelques inconvénients majeurs sont à signaler, liée à la nature instable de ce SIG, au moins sous Windows. Mais malgré tout, SAGA reste à ce jour, par rapport aux autres SIG testés, le logiciel le plus fiable testé jusqu'alors.

Quelques liens :

Présentation générale du logiciel

<http://saga-gis.wiki.sourceforge.net/>

Page de téléchargement :

http://sourceforge.net/project/showfiles.php?group_id=102728

Forum de l'ancienne version :

<http://www.saga-gis.uni-goettingen.de/html/index.php?module=pnForum&func=viewforum&forum=1>

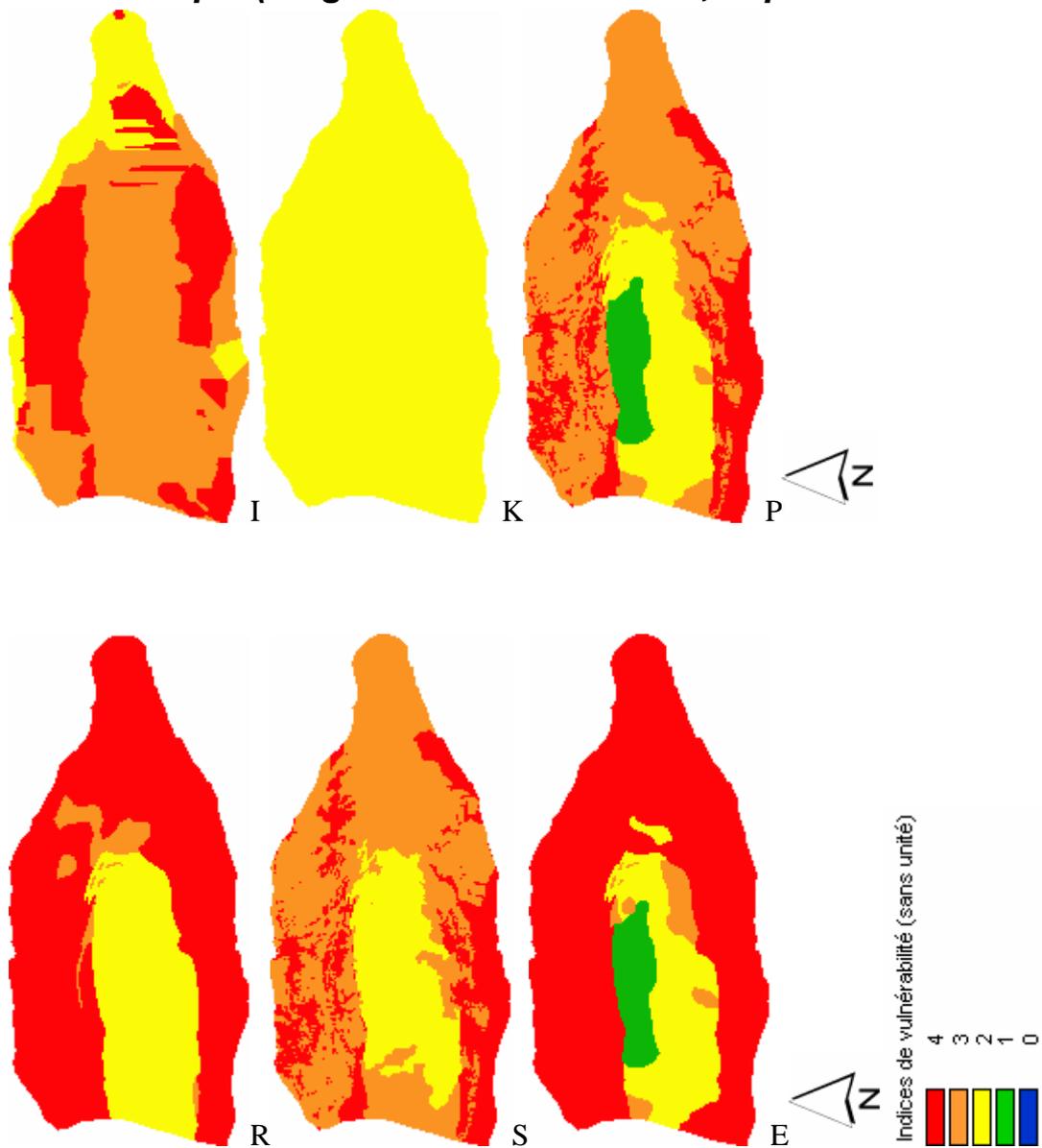
Forum de la nouvelle version :

http://sourceforge.net/forum/forum.php?forum_id=790705

Annexe 3 : Cartes des critères RISKEP pour le bassin de l'Aygue Nègre (longueur totale : 8.35 km ; superficie : 15.3 km²)



**Annexe 4 : Cartes des critères RISKEP pour le bassin de l'Aygue
Blanche (longueur totale : 6.65 km ; superficie : 14.5 km²)**



Annexe 5 : Présentation de quelques exemples d'indexation type



Deux endroits distincts.

Calcaire massif et fracturé : $R = 4$;

Concentration des écoulements dans un/des avaloir(s) de type doline d'effondrement : $I = 4$;

A gauche, pas de sol (globalement) : $S = 4$; à droite, entre 0 et 20 cm de sol : $S = 3$;

Pas d'épikarst observé : $E = 4$.



Deux endroits distincts.

Calcaire massif et fracturé : $R = 4$; Calcaire lapiazé.

Pas d'avaloirs observés : $I = 2$ (à corriger si l'on se trouve dans un bassin versant concentrant les écoulements vers des dolines, avaloirs, ...) ;

Entre 0 et 20 cm de sol : $S = 3$;

Pas d'épikarst observé : $E = 4$. Schéma assez couramment retrouvé dans un couvert végétal fixé sur de l'Urgonien, en contexte de pente forte à très forte.



Même endroit.

Calcaire marneux à spicule de l'Aptien : R = 2 ;

Au niveau d'une large cuvette. Concentration des écoulements d'une bonne partie du bassin : I = 3 (à corriger si l'on se trouve dans un bassin versant concentrant les écoulements vers des gouffres, avaloirs, ...) ;

Entre 20 et 100 cm de sol argileux avec une pierrosité comprise entre 15 et 50% : S = 2 ;

Epikarst plus ou moins continu latéralement et pouvant stocker de l'eau : E = 1.



Même endroit.

Calcaire massif et fracturé, mais avec des passes plus marneuses : R = 3 ;

Calcaire très lapiazé. Infiltration favorisée par la disposition des lapiaz dans la pente : I = 3 (à corriger si l'on se trouve dans un bassin versant concentrant les écoulements vers des gouffres, avaloirs, ...) ;

Globalement pas de sol, mais cela change assez rapidement dans cette zone : S = 4 ;

Pas d'épikarst observé : E = 4.



Même endroit.

Calcaire massif et fracturé : R = 4 ;

Calcaire très lapiazé et très creusé. Infiltration favorisée par l'orientation des lapiaz et des joints interstrates eux-mêmes très creusés : I = 4 ;

Globalement pas de sol : S = 4 ;

Pas d'épikarst observé : E = 4.