

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Hydrogéologie**

Arrêté ministériel : 07/08/2006

Présentée par

TISSIER Grégory

Thèse dirigée par **GASQUET Dominique**
et codirigée par **DZIKOWSKI Marc** et **HOBLEA Fabien**

préparée au sein du laboratoire **EDYTEM (Université de Savoie)**
et de l'Ecole Doctorale **SISEO**

Ressource en eaux karstiques de montagne : analyse des impacts de l'anthropisation dans un contexte de changement climatique

Thèse soutenue publiquement le **23/11/2012**,
devant le jury composé de :

Mr. Zwahlen François

Université de Neuchâtel, Rapporteur

Mr. Huneau Frédéric

Université de Corse Pascal-Paoli, Rapporteur

Mr. Jourde Hervé

Université de Montpellier 2, Examineur

Mr. Razack Moumtaz

Université de Poitiers, Examineur

Mr. Cadilhac Laurent

Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, Examineur

Mr. Gasquet Dominique

Université de Savoie, Directeur de thèse

Mr. Dzikowski Marc

Université de Savoie, Co-Directeur de thèse

Mr. Hobléa Fabien

Université de Savoie, Co-Directeur de thèse



Résumé

Les domaines subalpin et jurassien sont constitués de nombreux systèmes karstiques de dimension et de surface réduites qui peuvent représenter localement l'unique ressource des communes. Les bassins d'alimentation de ces systèmes sont essentiellement composés de forêts et de pâturages et ne présentent qu'une urbanisation limitée. Les systèmes karstiques sont des milieux de transferts rapides assez mal connus dans la région.

L'objectif principal de cette thèse s'attache à étudier les relations entre le fonctionnement et la vulnérabilité des systèmes karstiques de moyenne montagne. La vulnérabilité est abordée selon trois approches : intrinsèque, anthropique et climatique. Pour cela huit sites de nature différente et complémentaire (sources karstiques, galerie karstique et rivières) ont été étudiés.

La vulnérabilité intrinsèque est étudiée par l'application de la méthode PaPRIKa. Cette analyse se fonde sur la superposition par pondération de cartes des bassins d'alimentation réalisées en fonction des critères Roche, Infiltration, Protection et Karstification. Elle permet de spatialiser les degrés de vulnérabilité sur le bassin d'alimentation d'un système karstique. Bien que les systèmes étudiés présentent des fonctionnements hydrodynamiques et une occupation des sols relativement similaires, les degrés de vulnérabilité diffèrent en fonction des sites.

La vulnérabilité anthropique est étudiée, dans le cadre du programme Interreg Alpeau, sous l'angle de la remobilisation des sols suite à des travaux de sylviculture programmés sur les bassins d'alimentation. La recherche s'est concentrée sur la matière organique dissoute et en suspension et plus particulièrement sur la matière organique fluorescente. Ce travail a d'abord nécessité la réalisation d'un état des lieux sur les transferts associés au fonctionnement hydrodynamique des sites d'étude sur un cycle hydrologique. Pendant ou à la suite des travaux, les eaux des systèmes karstiques présentent des pics de turbidité ainsi que des venues en matières organiques fluorescentes du type humique et protéique, en azote total et en carbone organique total beaucoup plus importants (entre 5 et 10 fois plus). Cependant, tous les sites ne présentent pas d'augmentation significative des apports en matières en suspension et dissoutes, malgré l'ampleur des travaux réalisés.

Enfin la vulnérabilité climatique est approchée par l'étude de chroniques historiques sur plus de 60 ans. Les précipitations et les températures de trois stations météorologiques ainsi que les débits de deux sources et une rivière ont été analysés afin d'extraire les grandes tendances. En plus de l'augmentation de la tempéra-

ture ambiante de $+1.5^{\circ}\text{C}$ en 50 ans, les précipitations présentent une tendance à la baisse des cumuls annuels depuis 1980. La baisse des cumuls est plus particulièrement marquée à partir de 2003. Cette baisse de précipitation et l'augmentation des températures ont une répercussion quantitative sur les eaux de surface et souterraines. Les tendances observées sur les débits moyens annuels des systèmes étudiés sont en corrélation avec les précipitations. Malgré une tendance à la fonte des neiges de plus en plus précoce, les étiages basés sur les VCN10 ne montrent pas de réelles tendances à l'augmentation sur la période 1960-2011. Basées sur les données du GIEC 2007, les débits des sources subalpines ont été estimés pour les années 2030, 2050 et 2080. Les résultats montrent une diminution importante de la ressource en eau qui pourrait atteindre des baisses de l'ordre de 46% à l'horizon 2080.

Abstract

The subalpine and jura middle mountains are composed of a many karstic systems characterized by small size and area. For local towns, these systems can represent the only water resource. The catchment areas are mainly composed of forests and pastures and have a limited urbanisation. Local karst systems have quick flow transfer and are not really known in the region.

The main goal of this thesis is the study of the relationship between functioning and vulnerability of middle mountains karst systems. The vulnerabilities are analysed with three approaches : intrinsic, anthropogenic and climatic, applied on eight sites with variable natures (karst spring, karst conduit and rivers) which are additional.

The intrinsic vulnerability is studied by the use of PaPRIKa method. This method is based on the overlaying by weighting catchment area maps. Each map is represented by one criterion. Criteria used to carry out a final map are : Rock, Infiltration, Protection and karstification. The method allows the characterization of the vulnerability degrees on the catchment area. Although the study systems have hydrodynamic functioning and similar soil occupation, the vulnerability degrees change for each site.

Within the ALPEAU program, the soil remobilization due to sylvicultural activities is used as an anthropogenic vulnerability factor on the catchment area. The study is focused on dissolved and suspended organic matter, especially the fluorescent organic matter. This work has begun with the study of the organic matter transfers during hydrological cycle in natural conditions (without anthropogenic activities). During or after sylvicultural activities, karst waters can show turbidity peaks associated with concentration increasing of humic like, protein like, total nitrogenous and total organic carbon. However, all sites don't show a significant increase in spite of the intensity of sylvicultural activities.

The climatic vulnerability is approached with the study of historical data since 60 years. The temporal evolution of precipitation, discharge and temperature have been analysed in order to extract global trends. Besides temperature increase (+15°C) since 50 years, the quantity of precipitations shows a decrease from 1980. This decrease is particularly accentuated since 2003. The decrease of precipitation and the increase of temperature lead an impact on the ground and fresh water quantity. Trends observed on mean annual discharge are correlated with the variation of precipitations. Despite an early snowmelt, low flow periods, defined by the VCN10,

ABSTRACT

don't show significant increase on the period 1960-2011.

Remerciements

C'est peut être, pour moi, la partie la plus importante et la plus facile à rédiger. Elle symbolise la fin d'un parcours de trois ans, mais surtout elle me permet de mettre en lumière toutes les personnes cachées qui ont rendu ce travail possible.

Je commencerai donc par remercier mes directeurs de thèse Dominique Gasquet, Marc Dzikowski et Fabien Hobléa pour m'avoir encadré et soutenu dans ce travail. Je les remercie surtout pour avoir pris du temps à m'écouter et à m'aiguiller dans mes recherches à mes moments perdus.

Je remercie aussi Jean Jacques Delannoy pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire EDYTEM.

Je remercie l'Assemblée des Pays de Savoie et l'Agence de l'Eau, mes financeurs, pour avoir cru et permis la réalisation de cette recherche. Mes remerciements vont également à Etienne Cholin et Matthieu Perrotton de Chambéry Métropole pour l'appui technique et financier qu'ils m'ont apporté.

Je tiens à adresser toute ma gratitude à mes collègues de travail Jerome Poulard, Yves Perrette, Fanget Bernard, Emilie Chalmin et Emmanuel Malet, pour l'aide qu'ils m'ont apporté pour la réalisation de mes analyses de spectrofluorescence, d'infrarouge et de chimie, et surtout à la compréhension de celles ci.

Je remercie également toutes les personnes qui se sont déplacées pour m'écouter et me conseiller sur les axes à suivre au cours de mes comités de thèse. Merci à Neville Josna, à Hervé Jourde, à Laurent Cadhillac et en particulier à Valérie Plagnes qui a pris une semaine de son temps pour me former à l'utilisation de la méthode PaPRIKa au sein de son université.

Mes remerciements vont également à mon jury de thèse : au Professeur Moun-taz Razack qui a accepté de présider ce jury, au Professeur François Zwahlen qui m'aura également suivi et apporté de bons conseils lors des réunions du programme Intereg Alpeau, au Professeur Frédéric Huneau pour ses remarques pertinentes pour la correction de ma thèse. Et enfin à Laurent Cadhilac et Hervé Jourde qui m'auront accompagné pendant trois ans par le biais de mes comités de pilotage de thèse.

Je tiens à adresser mes remerciement à Christelle Batiot-Guilhe pour m'avoir accueilli en urgence à l'Université de Montpellier 2 pour des analyses de fluorescence.

Je tiens à remercier Maxime, Yvon et Guillaume qui m'ont accompagné sur le terrain et travaillé sur mon sujet de thèse. Leur aide a été précieuse, j'espère qu'ils auront apprécié la vie laborantine. Je tiens à remercier particulièrement Thibault Blondel qui, à l'époque Post-Doctorant au laboratoire EDYTEM, a eu une très grande patience à m'écouter et m'expliquer les rudiments et les joies de la fluorescence de la matière organique.

Bien sur, je n'oublie pas mes collègues doctorants qui ont réussi à me supporter sur les trois ans de thèse. Je remercie sincèrement Jean-Phillipe, (E)laine, Melaine, Marie, Amandine, Timothée, Charlotte, Marine, Leila, eve, florence, Camille (la nouvelle despote), Grégoire, Pierre P., Pierre A., Thierry, Benjamin, Anouke, Carole, Bruno et Justine.

Enfin, je tiens à remercier particulièrement mes parents, mon frère et mes amis Pierre, Clémence, Emma, Damien, Marie, Aurélien et Arnaud qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu lors de mes moments de doute.

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Résumé | i |
| Abstract | iii |
| Remerciements | v |
| Table des matières | vii |
| Table des figures | xi |
| Liste des tableaux | xix |
| Introduction | 1 |
| I Etat des connaissances, méthodologie, présentation et caractérisation des sites d'étude | 5 |
| 1 La vulnérabilité des aquifères karstiques | 7 |
| 1 Le karst | 7 |
| 1.1 Définition | 7 |
| 1.2 Processus de karstification | 9 |
| 1.3 Structure des systèmes karstiques | 10 |
| 1.4 Fonctionnement des systèmes karstiques | 14 |
| 1.5 Formation et caractérisation des constituants de la couverture pédologique | 15 |
| 2 Le karst, un milieu vulnérable | 22 |
| 2.1 Notion de vulnérabilité appliquée au karst | 22 |
| 2.2 Etudes de la vulnérabilité intrinsèque des systèmes karstiques | 23 |
| 2.3 la vulnérabilité spécifique des systèmes karstiques | 27 |
| 3 Etat des connaissances sur le changement climatique et son impact sur le milieu karstique de moyenne montagne | 28 |
| 3.1 Caractérisation de l'évolution climatique dans les Alpes de Savoie | 28 |
| 3.2 Impacts sur la qualité et la quantité des ressources karstiques en eau | 31 |
| 3.3 Conclusion | 32 |
| 2 Contexte général et présentation des sites | 33 |
| 1 Contexte général de la zone d'étude | 34 |
| 1.1 Géographie | 34 |
| 1.2 Contexte structural | 34 |
| 1.3 Unités stratigraphiques | 38 |
| 1.4 Conditions climatiques | 40 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2 | Présentation des sites d'études | 44 |
| 2.1 | La Roche Saint Alban | 44 |
| 2.2 | La Combe à Saint Cassin | 46 |
| 2.3 | Fontaine Noire à Saint Jean d'Arvey | 48 |
| 2.4 | Fontaines Froides aux Echelles | 50 |
| 2.5 | Le Creux des Elaphes | 53 |
| 2.6 | Bange – l'Eau Morte | 53 |
| 2.7 | Le Chéran | 55 |
| 2.8 | La source du Groin | 58 |
| 3 | Conclusion | 59 |
| 3 | Méthodologie d'acquisition et de traitement des données | 61 |
| 1 | Mesures de terrain | 61 |
| 1.1 | Suivi aux émergences | 61 |
| 1.2 | Suivi des sols | 63 |
| 1.3 | Suivi de l'épikarst | 63 |
| 2 | Mesures de laboratoire | 63 |
| 2.1 | Spectroscopie de fluorescence | 63 |
| 2.2 | Spectroscopie UV-visible | 66 |
| 2.3 | Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier | 67 |
| 2.4 | COT et NT-mètre | 67 |
| 2.5 | Fluorescence | 68 |
| 2.6 | Infrarouges | 74 |
| 3 | Conclusion | 75 |
| 4 | Etudes des systèmes karstiques | 77 |
| 1 | Caractérisation et comparaison des fonctionnements des systèmes étudiés | 77 |
| 1.1 | Fonctionnement hydrodynamique | 77 |
| 1.2 | Apport de la physico-chimie | 87 |
| 2 | Caractérisation des sols des bassins versants | 90 |
| 2.1 | Description et analyses physico-chimiques des sols | 90 |
| 2.2 | Extrapolation aux autres sites d'études | 98 |
| 3 | Conclusion | 100 |

II Vulnérabilités des petits systèmes karstiques montagnards 103

| | | |
|----------|---|------------|
| 5 | Test de la méthode PaPRIKa pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des petits karsts de montagne | 105 |
| 1 | Principe de la méthode PaPRIKa | 105 |
| 1.1 | Définition des critères | 106 |
| 1.2 | Poids des paramètres et classes de vulnérabilité | 111 |
| 1.3 | Classification de la vulnérabilité générale | 111 |
| 2 | Calcul des critères pour les sites d'études | 112 |
| 2.1 | La Roche Saint Alban | 112 |
| 2.2 | La Combe à Saint Cassin | 120 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.3 | Fontaine Noire à Saint Jean d'Arvey | 126 |
| 2.4 | Fontaine Froide des Echelles | 132 |
| 2.5 | Bange - l'Eau Morte | 138 |
| 3 | Conclusion : bilan de la méthode pour les petits bassins d'alimentation karstiques | 144 |
| 6 | Vulnérabilité spécifique liée à la remobilisation anthropique ou naturelle des sols | 147 |
| 1 | Suivi des indicateurs pédologiques dans les eaux des systèmes karstiques étudiés | 147 |
| 1.1 | Validation du suivi en continu de la matière organique fluorescente | 147 |
| 1.2 | Etat des lieux des matières en suspension et dissoutes dans les eaux karstiques | 149 |
| 2 | Vulnérabilité spécifique anthropique : exemple de l'impact des activités forestières | 167 |
| 2.1 | Description et localisation des travaux sylvicoles sur les bassins d'alimentation d'étude | 167 |
| 2.2 | Recherche d'impact des activités sylvicoles | 170 |
| 2.3 | Conclusion | 183 |
| 3 | Conclusion (Conceptualisation / Caractérisation des écoulements au sein du système karstique | 184 |
| 7 | Vulnérabilité spécifique des systèmes karstiques montagnards face au "changement climatique" | 187 |
| 1 | Traitement des données | 188 |
| 1.1 | Traitement spécifique des données | 188 |
| 2 | Etude de l'évolution du climat local | 191 |
| 2.1 | Analyse de l'évolution des températures | 191 |
| 2.2 | Analyse de l'évolution des Précipitations | 195 |
| 2.3 | Analyse de l'évapotranspiration | 196 |
| 3 | Analyse de l'évolution du débit | 198 |
| 3.1 | Le Chéran à la Charniaz | 198 |
| 3.2 | Station hydrométrique du Groin à Artemare | 206 |
| 3.3 | Bange - l'Eau Morte | 215 |
| 4 | Evolution la ressource en eau | 222 |
| 4.1 | Rappels sur les prévisions climatiques | 222 |
| 4.2 | Estimation de valeurs d'évapotranspiration réelle dans les pré-Alpes | 223 |
| 5 | Conclusions | 225 |
| | Conclusion Générale | 229 |
| | Bibliographie | 235 |
| | Annexe 1 | 249 |
| | Annexe 2 | 253 |

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|-----------------|------------|
| Annexe 3 | 255 |
| Annexe 4 | 259 |
| Annexe 5 | 261 |

Table des figures

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Réprésentation du système karstique [Agence RMC 1999] | 8 |
| 1.2 | L'aquifère karstique [Agence RMC 1999 (d'après Mangin 1975)] | 10 |
| 1.3 | Représentation d'un système karstique unaire (a) et binaire (b) [Bas- sin Rhône-Méditerranée-Corse 1999] | 11 |
| 1.4 | Les transferts de l'eau dans le sol [Guide Alpeau 2012] | 12 |
| 1.5 | Représentation d'un système de type jurassien (a) et vauclusien (b) [Marsaud 1997] | 14 |
| 1.6 | Schéma du fonctionnement général des karsts [Mangin, 1975] | 15 |
| 1.7 | Principe d'humification [d'après Gallien] | 17 |
| 1.8 | Schéma d'extraction et de fractionnement de substances humiques. Composition et structures [Ndira 2006] | 19 |
| 1.9 | Modèle de structure des substances (a) humiques (b) fulvique [An- dreux et Munier-Lamy 1994] | 20 |
| 1.10 | Structure des acides aminés (a) Tyrosine (b) Tryptophane | 21 |
| 1.11 | Structure de la cellulose | 21 |
| 1.12 | Structure de la lignine | 22 |
| 1.13 | Comparaison entre les principales méthodes de cartographie de la vul- nérabilité (EPIK, COP, PI, RISKE) des bassins versants de systèmes karstiques appliquées sur le causse de Quercy [Pranville 2007] | 26 |
| 1.14 | Les différents périmètres de protection au sein d'un bassin versant [Vernoux et Buchet 2010] | 28 |
| 1.15 | Ecart moyen annuel de la température de la montagne savoyarde de 1950 à 2009 par rapport à la normale 1971/2000 [Livre blanc du climat en Savoie 2010] | 29 |
| 1.16 | Evolution des totaux de précipitations annuelles à Bourg-Saint-Maurice de 1947 à 2009. <i>Météo-France</i> | 30 |
| 1.17 | Evolution des cumuls de neige fraîche à Peisey-Nancroix de 1959/1960 à 2009/2010. <i>Météo-France</i> | 31 |
| 2.1 | Répartition des domaines karstiques en France [Marsaud 1997] | 33 |
| 2.2 | Schéma structural de la zone d'étude et localisations des sites d'étude | 36 |
| 2.3 | Style tectonique des Chaînes subalpines septentrionales : le massif des Bauges et le N de la Chartreuse [Debelmas 1974] | 37 |
| 2.4 | Log stratigraphique synthétique du secteur d'Aix les Bains [Carfantan 1994] | 39 |
| 2.5 | Carte des précipitations moyennes annuelles (1992/2009) en milli- mètres sur l'Ouest de la Savoie [Météo France] | 40 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.6 | Courbes ombro-thermiques de Gausсен de trois stations météorologiques : La Féclaz, La Dent du Chat et Voglans [2006-2010] | 42 |
| 2.7 | Ecart à la moyenne pluviométrique annuelle à la station de Voglans de 1974 - 2011 (a) et de 2000 - 2011 (b) | 43 |
| 2.8 | Précipitations mensuelles de la période d'étude comparées aux moyennes de la station de Voglans (1974-2011) | 43 |
| 2.9 | Evacuation du trop plein des sources hautes de La Roche Saint Alban | 45 |
| 2.10 | Coupe géologique interprétative passant par la source de La Roche Saint Alban | 45 |
| 2.11 | Représentation des fractures et de la rosace en longueur cumulée des directions de fracturations du bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban | 46 |
| 2.12 | Captage de la source de La Combe | 47 |
| 2.13 | Coupe géologique interprétative NNE-SSW passant par La Combe . . | 47 |
| 2.14 | Coupe géologique interprétative WNW-ESE au niveau de La Combe . | 48 |
| 2.15 | Captage de la source de Fontaine Noire | 48 |
| 2.16 | Coupe géologique interprétative SSW-NNE au niveau de Fontaine Noire | 49 |
| 2.17 | Topographie de la grotte de Fontaine Noire [cds73 1975] | 49 |
| 2.18 | Captage de la source karstique de Fontaine Froide [Hobléa 2008] . . . | 50 |
| 2.19 | Dispositif structural de la Chartreuse et de la terminaison méridionale du Jura [Gidon 1990] | 51 |
| 2.20 | Topographie du réseau des Echelles (www.Plongéessout.fr) | 52 |
| 2.21 | Cartographie spéléo-morphologique du Creux des Elaphes [Hobléa 1997] | 53 |
| 2.22 | Coupe perpendiculaire à l'axe de l'anticlinal du Semnoz [Mathevet 2002] | 54 |
| 2.23 | Topographie du réseau Bange – l'Eau Morte (Plongéessout) | 55 |
| 2.24 | Le Chéran [photographie de Pegeot 2011] | 55 |
| 2.25 | Présentation du bassin versant du Chéran [Lecuret <i>et al.</i> 2010] | 57 |
| 2.26 | Le trop plein de la source du Groin [photographie de Grinand 2010] . | 59 |
| 3.1 | Diagramme du protocole expérimental (d'après Dzikowski | 62 |
| 3.2 | Diagramme de Perrin-Jablonski | 64 |
| 3.3 | Allure du spectre de MEE sous forme de pics (a), sous forme de courbes de niveau (b) [Blondel 2008] | 66 |
| 3.4 | Localisation des pics de matières organiques dans une matrice d'émission et d'excitation | 68 |
| 3.5 | Exemple de résultat obtenu par l'analyse PARAFAC | 69 |
| 3.6 | Matrice d'émission et d'excitation, exemple du 16/06/2010 à La Roche Saint Alban | 70 |
| 3.7 | Décomposition du signal d'émission pour une longueur d'excitation à 330 nm obtenue par fluorescence représentant l'intensité en fonction des longueurs d'ondes d'émission | 71 |
| 3.8 | Décomposition du signal d'émission pour une longueur d'excitation à 280 nm obtenue par fluorescence représentant l'intensité en fonction des longueurs d'ondes d'émission | 72 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3.9 | Comparaison des résultats entre l'analyse PARAFAC et la méthode de modélisation du signal de fluorescence des matières organiques du type (A) humique, (B) protéique et (C) issue de la production bactérienne | 73 |
| 3.10 | Exemple d'une analyse d'un spectre infrarouge | 74 |
| 4.1 | Corrélogramme simple Débit-Débit (journalier) | 78 |
| 4.2 | Corrélogramme croisé Pluie-Débit | 79 |
| 4.3 | Décomposition de la récession | 80 |
| 4.4 | Classification des systèmes karstiques dans le diagramme de Mangin . | 82 |
| 4.5 | Allure des différentes hystérésis et leurs significations [in Lefrançois <i>et al.</i> 2007] | 83 |
| 4.6 | Courbes d'hystérésis de la turbidité en fonction du débit sur 3 périodes hydrologiques de La Roche Saint Alban | 84 |
| 4.7 | Courbes d'hystérésis de la turbidité en fonction du débit sur 3 périodes hydrologiques de La Combe | 85 |
| 4.8 | Hystérésis de Fontaine Noire observées sur 3 périodes hydrologiques . | 86 |
| 4.9 | Détermination du régime de la source du Groin et de la rivière du Chéran par les coefficient de Pardé | 87 |
| 4.10 | Représentation des faciès chimiques des eaux dans un diagramme de Piper | 88 |
| 4.11 | Distribution des données journalières des conductivités triées par classe sur la période 2009 - 2010 | 89 |
| 4.12 | Pourcentage cumulé de la turbidité des eaux de 3 sources karstiques au cours de l'année 2010 | 89 |
| 4.13 | Illustration des différents sols rencontrés sur le bassin d'alimentation de la Roche Saint Alban | 90 |
| 4.14 | Analyses infrarouges des sols du bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban | 93 |
| 4.15 | Illustration des différents sols rencontrés sur le bassin d'alimentation de La Combe | 95 |
| 4.16 | Analyses infrarouges des sols du bassin d'alimentation de La Combe . | 98 |
| 4.17 | Deux types de faciès du bassin d'alimentation de Fontaine Noire : (A) le calcaire Urgonien et (B) les argiles rouges | 99 |
| 5.1 | Cartes de vulnérabilité selon le critères Protection (d), synthèse des paramètres les plus protecteurs des cartes de vulnérabilité des critères sol (a), épikarst (b), zone non saturée (c) du bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban | 114 |
| 5.2 | Carte de vulnérabilité selon l'indice R du bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban | 115 |
| 5.3 | Carte de vulnérabilité selon l'indice I du bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban | 116 |
| 5.4 | Carte de vulnérabilité selon le critère Ka du bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban | 117 |
| 5.5 | Cartes finales de vulnérabilité du bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban | 119 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.6 | Cartes de vulnérabilité selon le critères Protection (d), synthèse des paramètres les plus protecteurs des cartes de vulnérabilité des critères sol (a), épikarst (b), zone non saturée (c) du bassin d'alimentation du système karstique de La Combe | 121 |
| 5.7 | Carte de vulnérabilité selon le critère R du bassin d'alimentation du système karstique de La Combe | 122 |
| 5.8 | Carte de vulnérabilité selon le critère I du bassin d'alimentation du système karstique de La Combe | 123 |
| 5.9 | Carte de vulnérabilité selon le critère Ka du bassin d'alimentation du système karstique de La Combe | 124 |
| 5.10 | Cartes finales de vulnérabilité du bassin d'alimentation du système karstique de La Combe | 125 |
| 5.11 | Cartes de vulnérabilité selon le critères Protection (d), synthèse des paramètres les plus protecteurs des cartes de vulnérabilité des critères sol (a), épikarst (b), zone non saturée (c) du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Noire | 127 |
| 5.12 | Carte de vulnérabilité selon le critère R du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Noire | 128 |
| 5.13 | Carte de vulnérabilité selon le critère I du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Noire | 129 |
| 5.14 | Carte de vulnérabilité selon le critère Ka du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Noire | 130 |
| 5.15 | Cartes finales de vulnérabilité du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Noire | 131 |
| 5.16 | Cartes de vulnérabilité selon le critères Protection (d), synthèse des paramètres les plus protecteurs des cartes de vulnérabilité des critères sol (a), épikarst (b), zone non saturée (c) du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Froide | 133 |
| 5.17 | Carte de vulnérabilité selon le critère R du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Froide | 134 |
| 5.18 | Carte de vulnérabilité selon le critère I du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Froide | 135 |
| 5.19 | Carte de vulnérabilité selon le critère Ka du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Froide | 136 |
| 5.20 | Cartes finales de vulnérabilité du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Froide | 137 |
| 5.21 | Cartes de vulnérabilité selon le critères Protection (d), synthèse des paramètres les plus protecteurs des cartes de vulnérabilité des critères sol (a), épikarst (b), zone non saturée (c) du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte | 139 |
| 5.22 | Carte de vulnérabilité selon le critère R du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte | 140 |
| 5.23 | Carte de vulnérabilité selon le critère I du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte | 141 |
| 5.24 | Carte de vulnérabilité selon le critère Ka du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte | 142 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.25 | Cartes finales de vulnérabilité du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte | 143 |
| 6.1 | Représentation de l'intensité du type humique suivi à 310 nm par le fluorimètre de terrain en fonction de la concentration du type humique mesurée en spectrofluorimétrie 3D (mol/L. QSU) | 148 |
| 6.2 | Superposition du seuil de détection du fluorimètre de terrain avec les mesures du spectrofluorimètre (a.) à 280 nm et (b.) à 310 nm d'excitation | 148 |
| 6.3 | Correlogrammes croisés annuel pluie/débit et pluie/matières organiques fluorescentes (MOF) réalisés pour le système karstique de La Roche Saint Alban | 150 |
| 6.4 | Correlogrammes croisés pluie/débit et pluie/matières organiques fluorescentes (MOF) réalisés en (a) basses eaux, (b) moyennes eaux et (c) hautes eaux pour le système karstique de La Roche Saint Alban . . . | 150 |
| 6.5 | Relation entre l'intensité de fluorescence des matières organiques fluorescentes du type humique en fonction du débit pour le système karstique de La Roche Saint Alban | 151 |
| 6.6 | Correlogrammes croisés annuel pluie/débit et pluie/matières organiques fluorescentes (MOF) réalisés pour le système karstique de La Combe | 152 |
| 6.7 | Correlogrammes croisés pluie/débit et pluie/matières organiques fluorescentes (MOF) réalisés en (a) Mai 2011 et (b) février 2010 pour le système karstique de La Combe | 153 |
| 6.8 | Relation entre l'intensité de fluorescence des matières organiques fluorescentes du type humique en fonction du débit pour le système karstique de La Combe | 153 |
| 6.9 | Courbes d'hystérésis de la turbidité en fonction de l'intensité de fluorescence de la matière organique du type humique sur 2 périodes hydrologiques : en basses eaux (noir) et en moyennes eaux (rouge) sur le système karstique de La Roche Saint Alban | 155 |
| 6.10 | Analyses infrarouges des sédiments de la source de La Roche Saint Alban | 156 |
| 6.11 | Etude des arrivées des matières organiques du type humique et des matières en suspension (a) évolution du rapport turbidité sur fluorescence (T/F) (b) lors d'une crue d'été sur le système karstique de La Roche Saint Alban | 157 |
| 6.12 | Courbe d'hystérésis de la turbidité en fonction de l'intensité de fluorescence de la matière organique du type humique en automne 2011 sur le système karstique de La Combe | 158 |
| 6.13 | Analyses infrarouges des sédiments de la source de La Combe | 160 |
| 6.14 | Etude des arrivées de matières organiques du type humique et de MES (a) évolution du rapport turbidité sur fluorescence (b) lors d'une crue d'automne sur le système karstique de La Combe | 161 |
| 6.15 | Etude des relations entre le carbone organique total (COT) et la concentration de matières organiques fluorescentes du type humique pour le système karstique de La Roche Saint Alban | 162 |

| | | |
|------|--|-----|
| 6.16 | Etude des relations entre le carbone organique total (COT) et la concentration de matière organique fluorescente du type humique pour le système karstique de La Combe | 163 |
| 6.17 | Reconstitution de la chronique du flux de carbone organique total en fonction du cycle hydrologique sur le système karstique de La Roche Saint Alban | 164 |
| 6.18 | Suivi de la turbidité, du nombre de bactéries, du COT, de Nt, et des matières organiques fluorescentes au cours d'une crue d'Octobre 2011 sur les sites de (a) La Roche Saint Alban et de (b) La Combe | 166 |
| 6.19 | Photographies présentant l'impact visuel des activités sylvicoles sur les bassins d'alimentation des systèmes karstiques (A) de La Roche Saint Alban, (B) de La Combe, (C) du Creux des Elaphes et (D) de Fontaine Noire | 168 |
| 6.20 | Cartes de Vulnérabilité de La Roche Saint Alban, de La Combe et de Fontaine Noire réalisées à partir de la méthode PaPRIKa | 169 |
| 6.21 | Chronique de l'impact des travaux de sylviculture du site de La Combe (La bande rouge représente la durée des travaux) | 171 |
| 6.22 | Suivi physico-chimique d'un écoulement épikarstique sous un organosol | 173 |
| 6.23 | Suivi physico-chimique d'un écoulement épikarstique sous un sol brun | 174 |
| 6.24 | Suivi de la matière organique fluorescente dans deux écoulements épikarstiques (organosol en haut, sol brun en bas) | 175 |
| 6.25 | Suivi physico-chimique à l'émergence du système karstique de La Roche Saint Alban | 177 |
| 6.26 | Suivi de la matière organique fluorescente à l'émergence du système karstique de La Roche Saint Alban | 178 |
| 6.27 | Suivi physico-chimique à l'émergence du système karstique de Fontaine Noire | 180 |
| 6.28 | Suivi de la matière organique fluorescente à l'émergence du système karstique de Fontaine Noire | 181 |
| 6.29 | Suivi physico-chimique à l'émergence du système karstique de Fontaine Froide | 182 |
| 6.30 | Suivi de la matière organique fluorescente à l'émergence du système karstique de Fontaine Froide | 183 |
| 6.31 | Schématisation des transferts au sein d'un système karstique | 185 |
| 7.1 | Pic de crue marquant le début de la fusion printanière, exemple sur la chronique de 1982 de Bange - l'Eau Morte | 190 |
| 7.2 | Courbes ombro-thermiques de Gaussen de trois stations météorologiques : Lescheraines, Aillon-le-Jeune et Voglans (2000-2004) | 191 |
| 7.3 | Ecart à la moyenne des températures moyennes annuelles mesurées à la station de Voglans (1974-2011) | 192 |
| 7.4 | Ecart à la moyenne des températures moyennes mensuelles mesurées à la station de Voglans (1974-2011) | 193 |
| 7.5 | Comparaison des écarts à la moyenne des températures moyennes annuelles mesurées aux stations de Aillon-le-Jeune, de Lescheraines et de Voglans (1981-2010) | 194 |

| | | |
|------|---|-----|
| 7.6 | Comparaison des écarts à la moyenne des précipitations moyennes annuelles mesurées aux stations de Aillon-le-Jeune et de Lescheraines (1950-2010) | 195 |
| 7.7 | Ecarts à la moyenne des déficits annuels calculés par l'équation de Turc pour les données de la station de Lescheraines (1950-2011) . . . | 196 |
| 7.8 | Ecarts à la moyenne des précipitations moyennes mensuelles mesurées à la station de Lescheraines (1950-2011) | 197 |
| 7.9 | Débits moyens mensuels mesurés à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011) | 198 |
| 7.10 | Ecarts à la moyenne du débit moyen annuel mesuré à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011) | 199 |
| 7.11 | Ecarts à la moyenne du Q_{mna_5} mesuré à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011) | 199 |
| 7.12 | Ecarts à la moyenne du débit instantané maximal annuel mesuré à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011) | 200 |
| 7.13 | Ecarts à la moyenne du débit instantané minimal annuel mesuré à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011) | 201 |
| 7.14 | Ecart à la moyenne des débits moyens mensuels mesurés à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011) | 202 |
| 7.15 | Fréquence annuelle des crues mesurées à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011) | 203 |
| 7.16 | Nombre de jours consécutifs ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011) | 204 |
| 7.17 | Nombre de jours ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011) | 204 |
| 7.18 | Coefficient de corrélation annuel calculé à la station du Chéran (1960-2011) | 205 |
| 7.19 | Date du premier pic de crue marquant de la fusion printanière à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011) | 206 |
| 7.20 | Débits moyens mensuels mesurés à la station du Groin (1961-2011) . | 206 |
| 7.21 | Ecarts à la moyenne du débit moyen annuel mesuré à la station du Groin (1961-2011) | 207 |
| 7.22 | Ecarts à la moyenne du Q_{mna_5} mesuré à la station du Groin (1961-2011) | 208 |
| 7.23 | Ecarts à la moyenne du débit instantané maximal mesuré à la station du Groin (1961-2011) | 209 |
| 7.24 | Ecarts à la moyenne du débit instantané minimal mesuré à la station de la source du Groin (1961-2011) | 210 |
| 7.25 | Ecart à la moyenne des débit moyen mensuel mesuré à la station du Groin (1961-2011) | 211 |
| 7.26 | Fréquence des crues mesurées à la station du Groin (1961-2011) . . . | 212 |
| 7.27 | Nombre de jours consécutifs ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ mesuré à la station du Groin (1961-2011) | 213 |
| 7.28 | Nombre de jours total ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ mesuré à la station du Groin (1961-2011) | 213 |
| 7.29 | Coefficient de corrélation annuel calculé à la station de la source du Groin (1961-2011) | 214 |

| | | |
|------|--|-----|
| 7.30 | Date du premier pic de crue marquant le début de la fusion printanière à la station du Groin (1961-2011) | 214 |
| 7.31 | Débits moyens mensuels mesurés à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002) | 215 |
| 7.32 | Écarts à la moyenne du débit moyen annuel mesuré à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002) | 216 |
| 7.33 | Écarts à la moyenne du débit instantané maximal mesuré à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002) | 216 |
| 7.34 | Écarts à la moyenne du débit instantané minimal mesuré à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002) | 217 |
| 7.35 | Écart à la moyenne des débit moyen mensuel mesuré à la station de Bange-l'Eau Morte (1981-2002) | 218 |
| 7.36 | Fréquence des crues à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002) | 219 |
| 7.37 | Nombre de jours consécutifs ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002) | 220 |
| 7.38 | Nombre de jours total ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002) | 220 |
| 7.39 | Coefficient de corrélation annuel calculé à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002) | 221 |
| 7.40 | Date du premier pic de crue marquant le début de la fusion printanière mesuré à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002) | 222 |
| 7.41 | Comparaison entre les données de débits du Chéran observées et simulées à partir du calcul de l'évapotranspiration | 223 |

Liste des tableaux

| | | |
|------|--|-----|
| 2.1 | Paramètres issus de l'analyse des courbes de récession | 52 |
| 2.2 | Débits moyens du Chéran [données Agence de l'Eau] | 56 |
| 2.3 | Synthèse des données des systèmes étudiés, le "-" correspond à des cas particuliers | 60 |
| 3.1 | Caractéristiques des fluorophores retrouvés dans les eaux karstiques . | 72 |
| 4.1 | Paramètres issus de l'analyse des courbes de récession | 81 |
| 4.2 | Volume dynamique spécifique | 81 |
| 4.3 | Données physico-chimiques des différents sols du bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban | 92 |
| 4.4 | Identification des matières organiques fluorescentes en fonction des différents sols du bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban . . . | 94 |
| 4.5 | Données physico-chimiques des différents sols du bassin d'alimentation de La Combe | 97 |
| 5.1 | Description de l'état de surface dans les bassins versants des pertes [Döerfliger et Plagnes 2009] | 106 |
| 5.2 | Tableau de détermination de la nature d'un sol en fonction de sa texture et sa proportion de cailloux [Döerfliger et Plagnes 2009] . . . | 107 |
| 5.3 | Tableau de détermination des classes du critère S par croisement de la nature du sol et de son épaisseur [Döerfliger et Plagnes 2009] . . . | 107 |
| 5.4 | Tableau de détermination des classes du critère S à partir uniquement des classes d'épaisseur et de la pierrosité [Döerfliger et Plagnes 2009] . | 107 |
| 5.5 | Description du critère E – "aquifère épikarstique" | 108 |
| 5.6 | Tableau décrivant la lithologie de la zone non saturée | 108 |
| 5.7 | Tableau de l'attribution de la valeur de l'indice ZNS en croisant les trois paramètres : épaisseur, lithologie et fracturation | 109 |
| 5.8 | Tableau des classes de vulnérabilité globale | 112 |
| 5.9 | Vulnérabilité en fonction des faciès identifiés sur le bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban | 115 |
| 5.10 | Les trois jeux de pondérations utilisés pour combiner les quatre cartes de vulnérabilité | 118 |
| 5.11 | Vulnérabilité en fonction des faciès identifiés sur le bassin d'alimentation de La Combe | 122 |
| 5.12 | Vulnérabilité en fonction des faciès identifiés sur le bassin d'alimentation de Fontaine Froide | 134 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.13 | Vulnérabilité en fonction des faciès identifiés sur le bassin d'alimentation de Bange - l'Eau Morte | 140 |
| 6.1 | Présentation des espèces fluorescentes identifiées dans les eaux des sources karstiques de La Roche Saint Alban, La Combe, Fontaine Noire et Fontaine Froide. | 149 |
| 6.2 | Types et caractéristiques des travaux réalisés sur les bassins d'alimentation des systèmes karstiques de La Roche Saint Alban (RSA), La Combe (LC) et Fontaine Noire (FN) | 167 |
| 6.3 | Valeur des paramètres suivis avant et après les travaux de sylviculture sur le bassin d'alimentation de La Combe | 172 |
| 6.4 | Valeur des paramètres physico-chimiques avant et après les travaux de sylviculture sur le site du Creux des Elaphes | 174 |
| 6.5 | Valeur des matières organiques fluorescentes avant et après les travaux de sylviculture sur le site du Creux des Elaphes | 176 |
| 7.1 | Evolution de l'évapotranspiration en fonction des modifications des températures et de précipitations basées sur la période 1960 - 2010 . . | 224 |
| 7.2 | Evolution de l'évapotranspiration en fonction des modifications des températures et de précipitations basées sur la période 2000 - 2010 . . | 224 |
| 7.3 | Estimations des débits en 2030, 2050 et 2080 pour le Chéran, le Groin et Bange - l'Eau Morte | 225 |

Introduction

Dans les pré-alpes du Nord, la gestion de la ressource en eau est un enjeu important. Pour certaines communes, la seule ressource en eau exploitable provient des systèmes karstiques. Ceux-ci sont généralement de petite taille et de petite surface. Leurs bassins d'alimentation sont généralement constitués de forêts et de pâturages avec une urbanisation et des activités humaines peu développées. La forêt est reconnue comme étant un filtre naturel des eaux de pluie, elle permet donc de protéger les eaux souterraines. Cette eau souterraine issue de bassins d'alimentation boisés est en général de très bonne qualité et n'a donc pas toujours besoin d'être traitée pour servir d'eau potable. Toutefois, des analyses d'eau indiquent régulièrement la présence de bactéries et de pics de turbidité. Ces deux paramètres sont des critères majeurs pour la potabilité des eaux. En plus d'une pollution avérée, les systèmes karstiques sont marqués par des sécheresses de plus en plus récurrentes, mises en valeur entre autres avec la canicule de 2003.

Cette thèse s'attache à l'étude de la réponse des petits systèmes karstiques aux modifications des conditions environnementales liées au changement climatique et aux activités humaines. Plus particulièrement, cette recherche porte donc sur la vulnérabilité vis à vis de trois approches : intrinsèque, anthropique et naturelle. Sur la région, très peu de systèmes karstiques sont suivis de manière intensive, il a donc été décidé de démarrer l'étude sur des sites pilotes. Ceux-ci devaient être représentatifs des différents systèmes potentiels des régions de moyennes montagnes. Le but est de caractériser à court terme le fonctionnement hydrodynamique et les transferts de matières dissoutes et en suspension au sein des systèmes karstiques. Il sera ainsi permis de définir des indicateurs potentiels du changement climatique et des activités anthropiques. Pour cela, des données historiques ont été étudiées afin de mieux cerner les modifications liées au changement climatique et aux activités anthropiques à long terme.

Les problématiques de la thèse reposent sur plusieurs axes complémentaires :

- **étudier en détail et comprendre le fonctionnement hydrologique des systèmes karstiques ;**
- **définir les différents degrés de vulnérabilité au sein des bassins d'alimentation des systèmes étudiés et entre les systèmes karstiques ;**
- **analyser les transferts naturels des matières en suspension et dissoutes au sein des systèmes karstiques ;**
- **déterminer des indicateurs liés à la remobilisation du sol suite à des travaux anthropiques pouvant entraîner un impact sur la qualité des eaux karstiques ;**
- **appréhender les conséquences et l'évolution de la qualité et de la quan-**

tité des ressources en eau dans un contexte de changement climatique.

Pour répondre à une partie de ces questions, la thèse a fait l'objet d'un partenariat dans le cadre d'un projet Intereg franco-suisse appelé ALPEAU (2009-2011). L'étude portait du principe que les activités sylvicoles réalisées sur ce type de bassin versant sont supposées avoir une influence sur la qualité des eaux des systèmes karstiques. Les forestiers n'ont pas toujours connaissance des impacts qu'ils pourraient provoquer sur la ressource en eau. Ainsi, une étude visant à déterminer les relations entre les activités forestières et la protection des milieux karstiques forestiers a été lancée. Le projet ALPEAU était supervisé pour la Suisse par l'Université de Neuchâtel et par l'ONF pour la France. Ce partenariat visait à consolider et pérenniser le rôle protecteur de la forêt, pour les ressources en eau potable, dans un contexte d'inquiétude des usagers sur l'évolution générale de la qualité de la ressource en eau. Son objectif était notamment de préciser les modalités de protection efficaces et adaptées des captages d'eau en forêt et d'établir des liens contractuels directs entre les collectivités en charge de l'approvisionnement en eau et les acteurs forestiers. Le côté scientifique cherchait à déterminer le rôle du sol, de la végétation et du sous sol dans la filtration des eaux.

L'un des objectifs français du programme était consacré à l'impact des activités sylvicoles sur la qualité des ressources en eaux karstiques. Bien qu'une partie traite de pollutions accidentelles (hydrocarbures, huile de moteur, ...), la thématique principale s'intéresse à la remobilisation du sol et de son transfert au sein des systèmes karstiques. Il a donc été demandé de trouver des indicateurs pertinents susceptibles d'identifier cette remobilisation et de définir les zones de vulnérabilité au sein du bassin d'alimentation (Méthode PaPRIKa). Dans le cadre de cette étude, Chambéry-Métropole en collaboration avec le laboratoire EDYTEM ont sélectionné et équipé quatre captages de sources karstiques. Les systèmes karstiques possèdent des bassins versants essentiellement composés de forêts et présentent des activités sylvicoles.

L'Agence de l'Eau co-financeur de la thèse (le second financeur est l'Assemblée des Pays de Savoie) et la DREAL de bassin ont constitué une cellule de travail commune pour aborder la question des vulnérabilités du bassin RMC aux incidences du changement climatique. L'Agence de l'Eau a prévu d'établir une synthèse des connaissances scientifiques sur les incidences du changement climatique pour l'eau et les milieux aquatiques pour dégager les phénomènes qui peuvent déjà initier des stratégies précises d'adaptation et les questions scientifiques dont il serait important de prendre la mesure avec les chercheurs. C'est pour cette raison qu'il a été demandé de travailler sur l'impact du changement climatique au niveau de la qualité et la quantité de la ressource en eau karstique. Ainsi, trois sites ont été retenus, ils possèdent une chronique suffisamment longue (plus de 50 ans) pour identifier des tendances liées à l'évolution du climat.

Cette thèse se décompose en deux grandes parties divisées en sept chapitres. La première partie, découpée en 4 chapitres, débute avec la présentation de l'état de l'art basé sur la définition du karst et les études de la vulnérabilité des systèmes karstiques

d'un point de vu intrinsèque, anthropique et climatique. Le second chapitre traite du contexte général (géographique et géologique) et présente les huit sites d'études. Le troisième chapitre explique le protocole expérimental de l'étude, la méthodologie d'analyse et le traitement des données. Enfin le quatrième chapitre consiste en l'étude du fonctionnement et de la caractérisation des systèmes karstiques.

Les trois chapitres de la deuxième partie sont consacrés à la vulnérabilité des systèmes karstiques étudiés. Le premier s'attache à l'étude de la vulnérabilité au sein des bassins d'alimentation des systèmes karstiques par l'application de la méthode PaPRIKa. A partir de l'étude du fonctionnement des systèmes karstiques et de l'évolution des matières en suspension et dissoutes aux émergences, le deuxième chapitre est consacré à l'identification d'indicateur des activités anthropiques sur les bassins d'alimentation. La finalité est de définir les paramètres importants à l'identification d'un impact suite à une remobilisation des sols. Enfin, le dernier chapitre présente l'analyse réalisée sur des longues chroniques de températures, précipitations et débits dans le but de mettre en évidence des tendances en relation avec le changement climatique.

tel-00808614, version 1 - 5 Apr 2013

Première partie

Etat des connaissances, méthodologie, présentation et caractérisation des sites d'étude

Chapitre 1

La vulnérabilité des aquifères karstiques

1 Le karst

1.1 Définition

Le mot karst vient de la traduction du mot slovène "Kras" qui désigne une région du Nord-Est de l'Adriatique comprise entre le golf de Trieste, la vallée de la Vipava, la vallée de la Rasa et le secteur de Rečka. Cette région à dominante calcaire présente une morphologie particulière de vallées sèches, de dépressions fermées et de manifestations spectaculaires telles que des grottes, gouffres et rivières souterraines (Figure 1.1). Le karst est un paysage façonné dans une roche soluble. Ces roches peuvent être regroupées en trois grandes familles, la plus représentative est celle des roches carbonatées, constituées essentiellement par des calcaires et des dolomies. Les 2 autres sont la famille des roches sulfatées et la famille des roches salines et apparentées [Salomon 2006].

La définition du karst s'est longtemps séparée en deux approches, bien qu'elles soient complémentaires, à savoir une approche géomorphologique et une approche hydrogéologique. En 1973, Gèze propose une approche géomorphologique du karst en définissant le karst comme *"région constituée par des roches carbonatées, compactes et solubles, dans lesquelles apparaissent des formes superficielles et souterraines caractéristiques"*. Bakalowicz [1999] complète cette définition géomorphologique du karst de la manière suivante *"Le karst est l'ensemble des formes superficielles et souterraines résultant de la dissolution des roches carbonatées (calcaire, dolomie) par l'eau rendue acide par le carbone ; par extension l'ensemble des formes comparables se développant dans les roches salines (gypse, anhydrite, halite)"*. Cependant, d'un point de vue hydrogéologique, le karst est un aquifère, où les circulations souterraines et superficielles sont en étroite interaction. Il comporte en amont un massif formé de roches perméables et solubles qui sert d'impluvium (espace recueillant les eaux de pluie) et dans lequel la circulation de l'eau s'organise souterrainement. Le massif peut être associé ou non à une zone imperméable permettant le ruissellement. Le karst constitue bien souvent une ressource en eau non négligeable, celle-ci peut alimenter un ou plusieurs points d'émergence. Dès 1967, Castany dé-

finir le karst comme possédant une continuité hydraulique et des conditions aux limites communes à l'ensemble de l'aquifère. Il propose, ainsi, de dénommer "ensemble (aquifère) karstique" un ensemble hydrogéologique carbonaté constitué d'un ou plusieurs systèmes karstiques. Mangin [1974] définit le système karstique comme "l'ensemble au niveau duquel les écoulements souterrains de type karstique s'organisent pour constituer une unité de drainage. Le système karstique correspond donc au bassin hydrogéologique d'alimentation d'une source karstique ou d'un groupe de sources karstiques liées les unes aux autres". Enfin Hobléa [1999] essaie de donner une définition de type encyclopédique en regroupant les deux approches, il définit le karst comme "un agencement de formes superficielles et souterraines, et de vides développés dans les trois dimensions, créés dans un volume de roche carbonatée ou d'évaporite par l'action de divers processus morphogénique (karstification) dont le principal est la dissolution sous l'effet de circulations d'eau anisotropes et hétérogènes utilisant dans un premier temps la perméabilité fissurale du volume rocheux pour former, à l'échelle géologique des temps (quelques dizaines de millénaires au minimum), une unité de drainage souterrain hiérarchisé en direction d'une source, cette unité étant appelée «système karstique»".

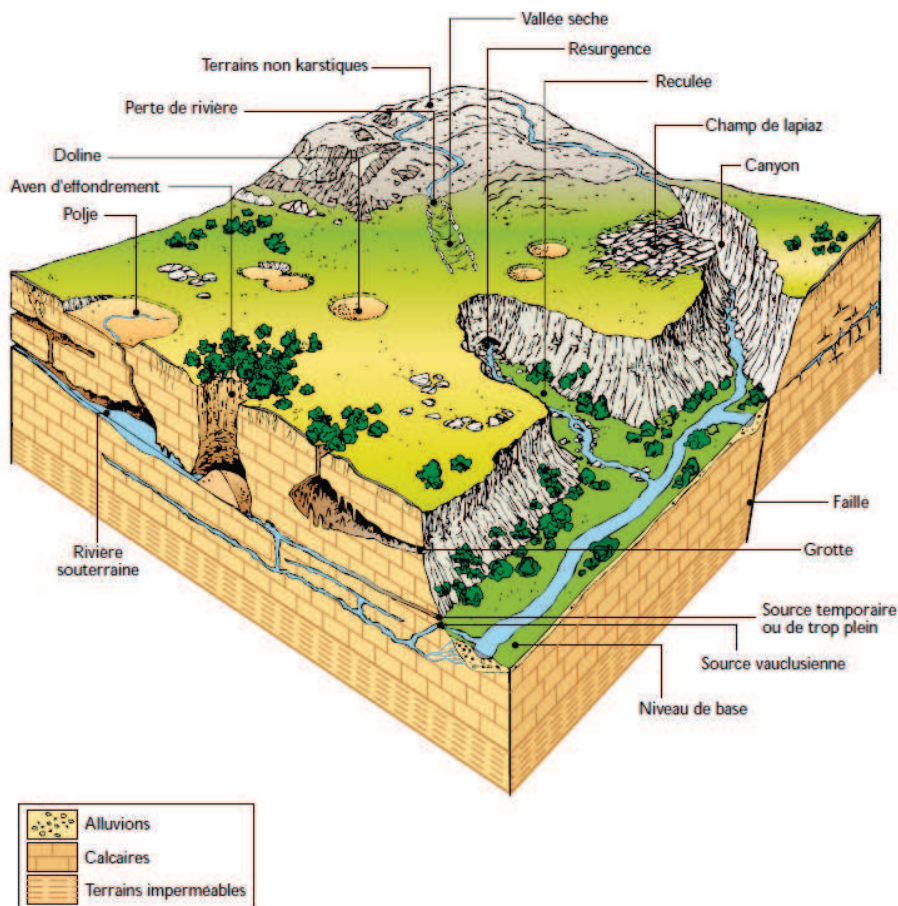


FIGURE 1.1 – Représentation du système karstique [Agence RMC 1999]

1.2 Processus de karstification

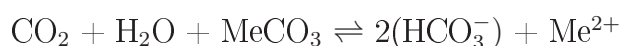
Le processus de karstification est un phénomène lié à la dissolution de la roche calcaire par des eaux naturelles chargées en CO_2 . Le processus de dissolution est lui-même assez court et sa durée peut varier de quelques jours à quelques semaines selon que la pression partielle en CO_2 est faible (10^{-3} atm.) ou forte ($2 \cdot 10^{-2}$ atm.). Une eau pure peut dissoudre au maximum $13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ à 16°C [Salomon 2006]. La teneur en pCO_2 a principalement pour origine la respiration racinaire et la dégradation de la matière organique par les organismes du sol. Dans certains cas le CO_2 peut provenir d'une circulation d'air dans le sous-sol ou d'un dégazage profond et/ou volcanique [Blondel 2008].

La température est aussi un des facteurs principaux qui influent sur la vitesse de dissolution des carbonates [Salomon 2006]. En théorie, la mise en solution du CO_2 est d'autant plus importante que l'eau est froide.

La cinétique de la dissolution dépend aussi de facteurs physiques, tels que la fracturation originelle de la roche (qui permet un transport plus rapide en profondeur d'une eau chargée en CO_2). La lithologie issue des différents environnements de dépôts des sédiments carbonatés joue sur la solubilité : ainsi, une roche provenant de sédiments de récifs ou de talus sera plus aisément karstifiable qu'une roche originaire de sédiments pélagiques [Palmer 1991].

D'autres facteurs peuvent intervenir tels que la disposition lithologique des différentes couches, la présence de niveaux imperméables non calcaires, l'épaisseur de la série karstifiable, etc [Cucchi *et al.* 1998]. La formation des karsts est liée à une baisse du niveau de base (d'origine climatique ou tectonique), à l'augmentation de l'accommodation karstique et au potentiel karstique [Aunay and Le Strat 2002]. En période de régression, l'accommodation karstique est considérée comme le volume disponible entre le niveau de base d'un karst d'âge donné et la paléosurface qui lui est connectée dans une même séquence tectono-eustatique. Lors d'une transgression, l'accommodation définit l'espace disponible pour déposer les sédiments en période d'ennoyage dans un karst à un âge donné. En résumé, la somme des accommodations karstiques correspondent à l'épaisseur potentiellement karstifiée. Le potentiel karstique est défini par l'importance du gradient hydraulique (différence de la charge hydraulique, entre la zone d'alimentation de l'aquifère et l'exutoire), ainsi que par l'acidité du solvant (eau et CO_2) qui permet une dissolution de la roche encaissante.

Les écoulements de la phase liquide engendrent et conditionnent les écoulements de la phase gazeuse (écoulement biphasique) : cette dernière phase ne pouvant s'échapper, il peut se produire une mise en pression dans le drain entraînant une corrosion (karstification). Cette action est représentée selon l'équation générale :



Me représente un cation divalent associé au carbonate, il correspond au calcium (Ca^{2+}) ou au magnésium (Mg^{2+}).

Cette équation synthétise toutes les équations des équilibres du système calco-carbonique. Les espèces carbonatées sont représentées généralement sous la forme HCO_3^- alors qu'il coexiste trois autres formes dans l'eau :

- ◇ CO_3^{2-} , l'ion carbonate ;
- ◇ H_2CO_3 , l'acide carbonique ;
- ◇ CO_2 aqueux, le CO_2 dissout.

La circulation de l'eau au sein de l'aquifère, par l'intermédiaire d'un gradient hydraulique, est définie comme une condition nécessaire et suffisante, déterminant l'existence ou non d'une karstification. Cette compétition entre la vitesse de dissolution et la dynamique des écoulements souligne une autre particularité de la karstification : le phénomène d'auto-organisation des vides, permettant une hiérarchisation de ces derniers et l'élaboration de tout un réseau de drainage souterrain [Bakalowicz 1976].

1.3 Structure des systèmes karstiques

Les systèmes karstiques montrent une grande variabilité en fonction de leurs structures et de leurs fonctionnements. La configuration des aquifères karstiques dépend principalement de la nature de l'impluvium et de l'état de karstification du massif [Marsaud 1997]. L'organisation de ce type de système se définit en trois grandes parties représentées par la **zone d'alimentation**, la **zone d'infiltration** et la **zone saturée**. La Figure 1.2 schématise la structure générale d'un système karstique.

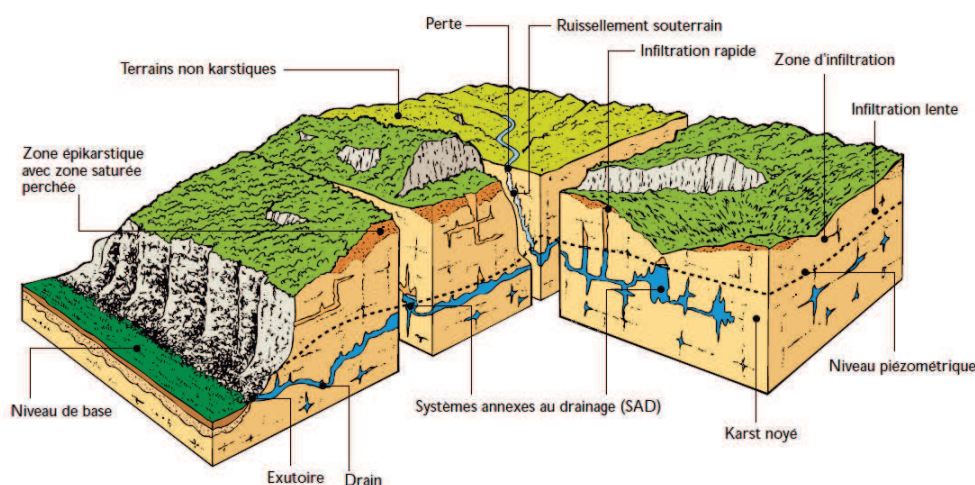


FIGURE 1.2 – L'aquifère karstique [Agence RMC 1999 (d'après Mangin 1975)]

La zone d'alimentation (impluvium) :

L'impluvium d'un système karstique se caractérise selon le type de terrain qui le compose. Si l'impluvium n'est défini que par des terrains karstiques alors le système est dit unaire (Figure 1.3 a). L'infiltration de l'eau est diffuse à l'échelle du massif mais les vitesses peuvent être lentes ou rapides [Bakalowicz 1995]. Si l'impluvium est un mélange constitué de terrains karstiques et non karstiques alors le système est dit binaire (Figure 1.3 b). Le système est équivalent à l'aquifère karstique mais aussi à un bassin de surface drainé par des pertes. La partie non karstique de l'impluvium entraîne la concentration des eaux d'infiltration, accélérant et augmentant le développement de la structure drainante. Elle peut aussi avoir une influence sur

le transfert des écoulement et avoir un effet retard qui peut perturber le retour au débit de base après une crue [Soulios 1991]. Les eaux de surface en ruisselant peuvent apporter des particules fines favorisant le colmatage des fissures des carbonates [Peyraude 2011].

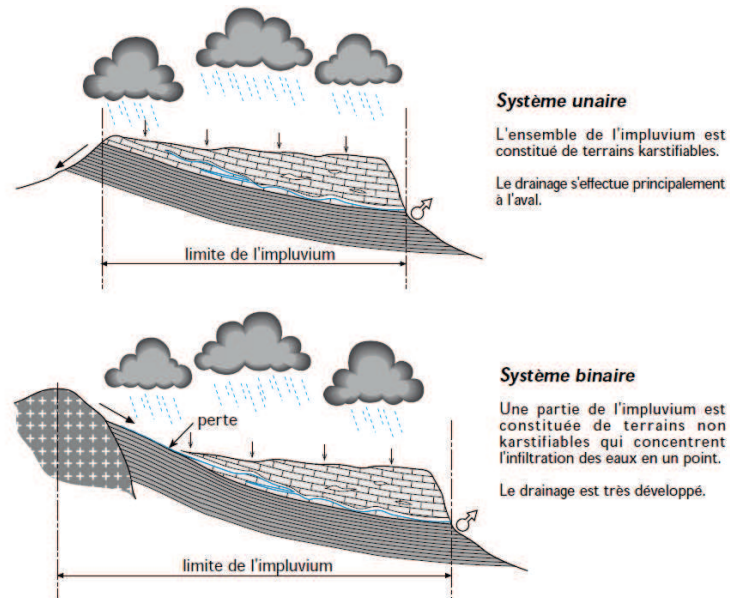


FIGURE 1.3 – Représentation d'un système karstique unaire (a) et binaire (b) [Bassin Rhône-Méditerranée-Corse 1999]

La zone d'infiltration :

La zone d'infiltration s'organise en trois compartiments distincts : le sol, l'épikarst et la zone non saturée. En fonction du climat, de l'environnement et de la lithologie, un ou deux compartiments peuvent être absents. Chaque compartiment possède une identité qui lui est propre, il possède cependant les deux mêmes fonctions, à savoir un rôle transmissif et un rôle capacitif. De nombreux modèles ont été développés pour appréhender les interactions entre ces trois compartiments [Gunn 1983, Williams 1983, Kiraly *et al.* 1995, Trček 2007].

Le sol

Le sol est un milieu triphasique qui se caractérise par une phase solide (minérale et organique), une phase liquide et une phase gazeuse (l'atmosphère du sol). Il représente un milieu organisé et structuré. Plusieurs niveaux d'organisation doivent être considérés, depuis l'agrégat de constituants élémentaires, jusqu'au système pédologique défini par la nature des horizons qui le constituent et la distribution des horizons dans le paysage. Pour comprendre le fonctionnement d'un tel système, il faut tenir compte à la fois des propriétés intrinsèques des divers horizons et de leur arrangement au sein de la couverture pédologique.

Dans les milieux karstiques, le sol possède ou peut posséder un rôle de filtre. La présence de vie (bactéries, champignons, invertébrés) dans le sol permet un recyclage de la matière organique et minérale. Les eaux de pluies qui arrivent sur le sol peuvent être chargées en polluants ; ceux-ci peuvent être retenus par la végétation (principe de la remédiation), se complexer avec la matière organique, être dégradés

par des organismes vivants ou simplement traverser le sol. L'infiltration des eaux est dépendante de la perméabilité, de la porosité et de la capacité de stockage. Le sol est donc un milieu complexe, par sa composition qui évolue en fonction de la profondeur, mais aussi par ses discontinuités latérales variables en fonction de la végétation. Dans les milieux de moyenne montagne, la végétation évolue par étage selon l'altitude passant de l'étage collinéen (inférieur à 900 m) à l'étage montagnard (900 à 1600 m), pour atteindre l'étage subalpin (1600 à 2300 m).

Les eaux qui arrivent sur le sol auront des devenir différents, la Figure 1.4 résume les possibilités de transfert des eaux (dans cette figure les calcaires sont considérés comme peu perméables et la quantité d'eau transférée est proportionnelle à la taille des flèches). Globalement, une partie de cette eau est interceptée par le couvert végétal et subit l'évapotranspiration, et une autre partie s'infiltrate et/ou ruisselle.

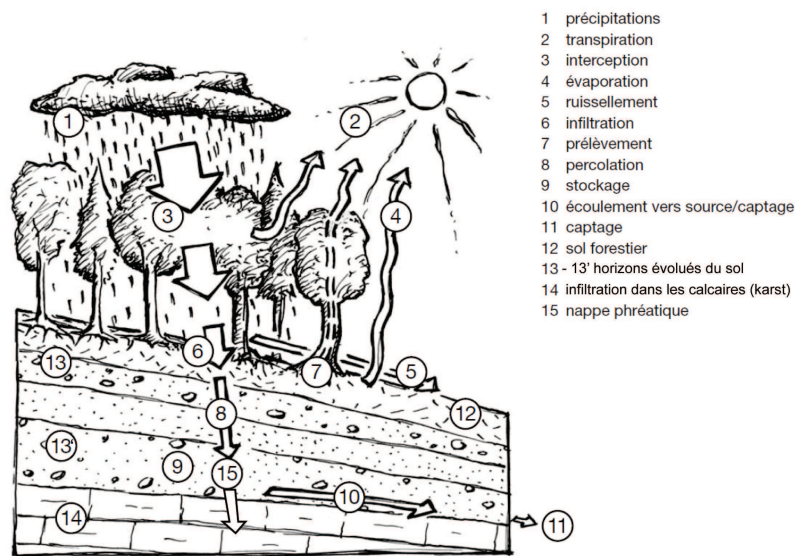


FIGURE 1.4 – Les transferts de l'eau dans le sol [Guide Alpeau 2012]

Le bilan hydrique peut être défini par l'équation suivante :

$$P + S = R + E + (S \pm \Delta S) \quad (1.1)$$

Avec P : précipitation liquide ou solide (mm), S : ressources (souterraines, humidité du sol, neige, glace) disponibles à la fin de la période précédente (mm), R : ruissellement de surface et écoulements souterrains (mm), E : évaporation et évapotranspiration, $S \pm \Delta S$: ressources accumulées à la fin de la période étudiée (mm).

L'épikarst

L'épikarst correspond à la zone superficielle du système karstique. D'une épaisseur comprise entre 5 et 30 m [Williams 2008], l'épikarst représente une zone de décompression très fracturée liée à un relâchement des contraintes tectoniques lors de la mise en place des terrains. Cette zone décompressée permet une dissolution préférentielle le long des fractures des carbonates [Mangin 1975]. L'épikarst est une zone qui permet de stocker et de répartir les infiltrations [Jeannin 2007] entre les écoulements rapides (drain) et lents (volume de roches fissurées et peu perméables).

Cette zone a un rôle de tampon par stockage temporaire ou en permettant un retard dans l'infiltration.

La proximité de l'épikarst avec le sol peut entraîner une influence sur le chimisme de l'eau [Blavoux et Mudry 1986, Bakalowicz 1995, Blondel 2008]. L'activité biologique est importante ce qui permet le développement racinaire. Le dégagement de CO₂ est élevé, l'eau d'infiltration est donc très agressive et une partie importante de l'acquisition du chimisme de l'eau se fait à ce niveau [Guyot 1985]. De plus, il peut se produire des phénomènes de reconcentration des éléments dissous suite à l'évapotranspiration, ou la solubilisation de la matière organique du sol en fonction de leurs états de saturation.

La zone non saturée

Située sous l'épikarst, la zone non saturée est appelée aussi, zone d'infiltration. Pouvant atteindre des centaines de mètres d'épaisseur, cette zone a un rôle majeur, intermédiaire entre la zone d'infiltration épikarstique et la zone noyée. La zone non saturée possède donc une double fonction, à la fois transmissive et capacitive.

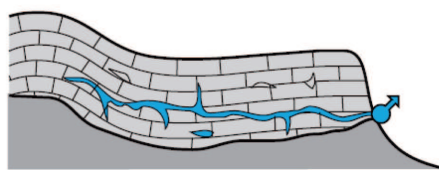
La **fonction transmissive** se distingue par deux modes d'écoulements :

- ◊ les écoulements lents ou diffus par le biais des réseaux de fissures permettant un retard d'infiltration ;
- ◊ les écoulements directs et rapides à travers des fractures drainantes ou directement par des drains karstiques.

La **fonction capacitive** peut être relativement importante en fonction des systèmes karstiques. Les temps de séjours peuvent être longs et permettre un soutien important lors de l'étiage de karsts spécifiques [Emblanch *et al.* 1998]. Certains compartiments de la zone non saturée peuvent fonctionner en trop plein et ne sont activés que par des fortes pluies efficaces [Peyraude 2011].

La Zone Noyée :

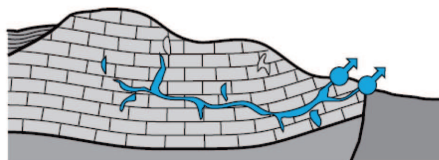
Le zone noyée ou encore appelée zone saturée représente le réservoir principal en eau de l'aquifère karstique. Sa fonction première est d'assurer le stockage de l'eau. La fonction transmissive de l'aquifère est assurée par des drains principalement horizontaux dans lesquels les écoulements sont turbulents. Autour de ces drains existent des réseaux de fissures qui permettent un écoulement lent. C'est dans cette zone que se concentre tous les résidus du pouvoir de dissolution des eaux qui n'ont pas été consommés dans l'épikarst et dans la zone de transmission [Peyraude 2011]. En fonction de leurs formations originelles les drains, qui ont pour finalité l'exutoire du système, peuvent se développer dans la partie supérieure du karst noyé (karst jurassien (Figure 1.5a)) ou encore dans la partie inférieure, sous le niveau de l'exutoire (karst vauclusien (Figure 1.5b)).



a. Système jurassien

Degré de fracturation, lithologie, et stratification déterminent une faible résistance à l'écoulement des eaux.

Le drainage s'organise au voisinage du niveau de l'exutoire.



b. Système vauclusien

Degré de fracturation, lithologie, et stratification déterminent une forte résistance à l'écoulement des eaux.

Le drainage s'organise sous le niveau de l'exutoire.

FIGURE 1.5 – Représentation d'un système de type jurassien (a) et vauclusien (b) [Marsaud 1997]

NB : Il existe un cas différent de ces deux types de karsts. Il s'agit d'un système karstique où le processus de karstification n'a pas été suffisant pour organiser un réseau de drainage. Les écoulements au sein du système sont alors comparables à ceux d'un système fissuré. L'absence d'organisation des écoulements peut se traduire par un exutoire principal individualisé mais aussi par un nombre important de petites sources [Peyraude 2011].

1.4 Fonctionnement des systèmes karstiques

Mangin [1975] propose un schéma général pour illustrer le fonctionnement des systèmes karstiques (Figure 1.6). Il représente deux types de compartiment : une zone non saturée ou encore appelée système d'infiltration et une zone où le karst est noyé.

Le système d'infiltration se caractérise par la présence ou non d'un aquifère épikarstique. Il se compose de roches altérées et fissurées qui déterminent l'infiltration retardée. La zone non saturée présente surtout deux types d'écoulement : l'infiltration rapide où les écoulements dans des fractures de grandes tailles sont dits monophasiques et l'infiltration lente où les écoulements dans des fissures étroites sont diphasiques. Ces deux types d'écoulement peuvent converger vers des zones de ruissellements souterrains ou se propager directement dans la zone noyée.

Dans la zone noyée de l'ensemble du système karstique tend à s'établir deux structures : un axe de drainage (ou drain) et des systèmes annexes de drainage. L'axe de drainage est un ensemble de conduits souterrains où les écoulements sont définis comme turbulents et rapides (plusieurs mètres par seconde). Dans l'ensemble du système hétérogène, cet axe peut correspondre à une porosité de 0.5% [Marsaud 1997] et a un rôle transmissif au sein du karst. Le système annexe au drainage est représenté par un ensemble de vides anastomosés situé de part et d'autre du drain. Les vides sont tous individualisés et indépendants, la porosité que constitue ces vides dans le système karstique pourrait être estimée à 20% [Marsaud 1997]. Les systèmes annexes au drainage ont un rôle capacitif, ils servent de soutien aux drains en pé-

riode d'étiage.

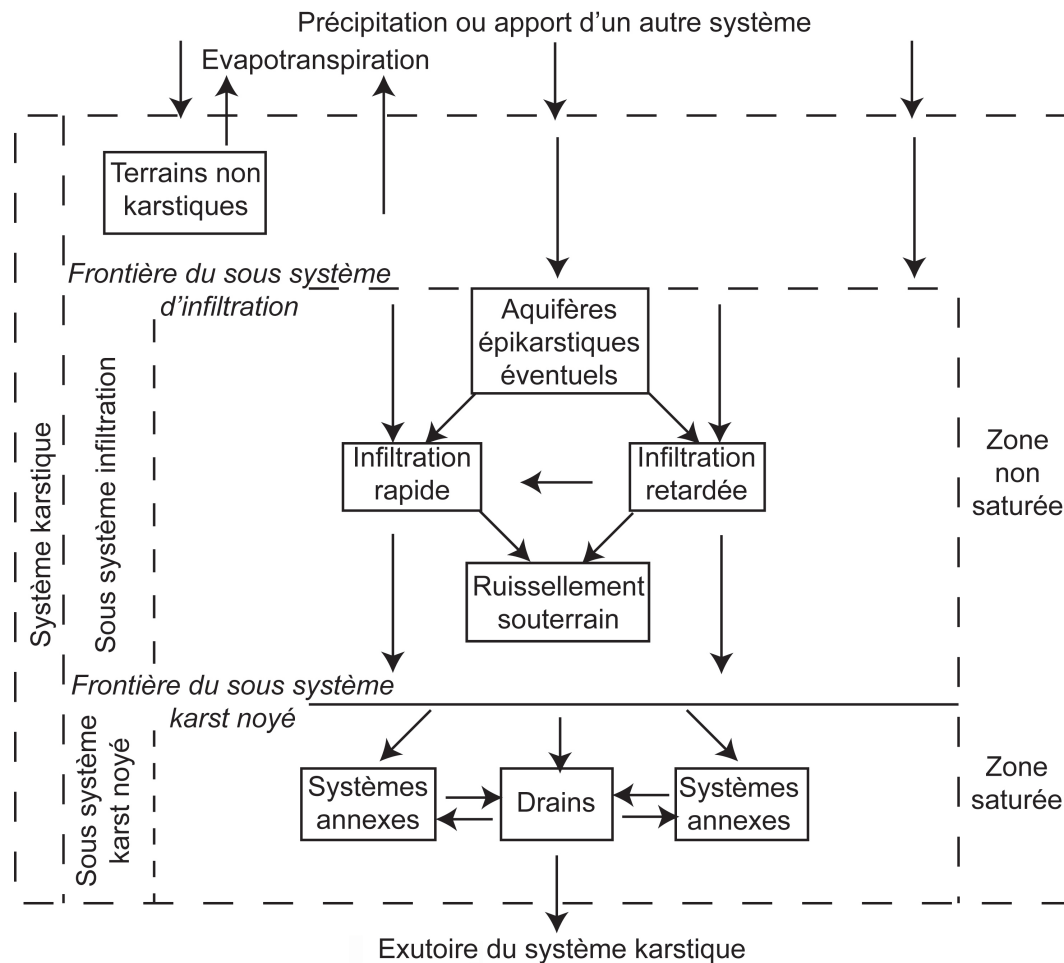


FIGURE 1.6 – Schéma du fonctionnement général des karsts [Mangin, 1975]

NB : de nombreux schémas fonctionnels ont été proposés au cours des années [Bèzes 1976, Lastennet *et al.* 1995, Emblanch *et al.* 2006], toutefois la représentation de Mangin de 1975 (Figure 1.6) est une des plus simples et des plus complètes.

1.5 Formation et caractérisation des constituants de la couverture pédologique

Le sol peut jouer un rôle de filtre naturel, il possède un pouvoir épurateur sur l'eau. Cependant, il est important de connaître ses constituants pédologiques afin de déterminer ceux qui possèdent une solubilité suffisante pour être retrouvés à l'exutoire des sources karstiques. Comprendre la structure permet d'identifier les phénomènes d'adsorption/désorption, de complexation et chélation avec d'éventuels polluants. Pour cela, il est nécessaire d'examiner les processus de formation des sols.

1.5.1 La genèse des sols

La genèse d'un sol appelée pédogenèse est un processus long et complexe, elle peut toutefois se résumer en trois étapes :

1er stade : la décomposition de la roche mère

La roche mère subit une désagrégation physique (fragmentation de la roche) et chimique (transformation des minéraux de la roche). La désagrégation physique se produit sous l'action des écarts de température, de l'effet abrasif par le vent et aussi de l'écartement par le gel et par la poussée des racines. Ces mécanismes permettent la formation d'un "squelette" composé de cailloux, graviers, sables grossiers et fins ainsi que des limons. La taille des produits finaux sera fonction du temps. L'altération chimique consiste en une dissolution de la roche ainsi qu'en une hydrolyse sous l'action de l'eau associée à des acides ou des bases. Ce type de processus permet la formation d'un complexe d'altération comprenant des argiles, de la silice, des oxydes de fer, etc...

2e stade : l'enrichissement en matière organique

Les végétaux pionniers (végétaux supérieurs, champignons, lichens, algues, etc..) suivis des premiers animaux (vers, insectes, etc...) colonisent le sol encore peu épais. A la mort de cette faune et flore, des microorganismes les décomposent pour former de l'humus et permettre un dégazage de CO₂. Ces deux éléments étant acides, l'altération des minéraux se poursuit. Ces derniers sont donc rendus assimilables pour la nutrition des plantes. Le sol est formé et son profil est homogène, il est dit "jeune" ou "non évolué".

Principe d'humification

L'humification est le processus de transformation de la matière organique fraîche en humus suite à une fragmentation et une digestion réalisées par des décomposeurs (Figure 1.7). Les microorganismes hétérotrophes décomposeurs des matières organiques exogènes se développent par succession de populations en fonction de la nature du substrat [McMahon *et al.* 2005]. La genèse de l'humus s'accompagne d'une fixation d'azote. Toutefois une partie de la matière fraîche est minéralisée par l'action de champignons et de bactéries.

3e stade : les migrations et accumulations différencient les couches ou les horizons

L'eau d'infiltration peut lessiver et entraîner en profondeur des éléments solubles ou fluides. Le lessivage est dépendant de la pluviométrie, de la perméabilité du sol et de nature de l'humus formé. Ces lessivages font évoluer les couches du sol. Les couches sont appelées horizon, elles sont homogènes et parallèles à la surface. L'horizon se décrit en fonction de son épaisseur, de sa composition granulométrique (argiles, limons, sables, cailloux), de son degré d'altération de la roche mère, de son acidité, ...

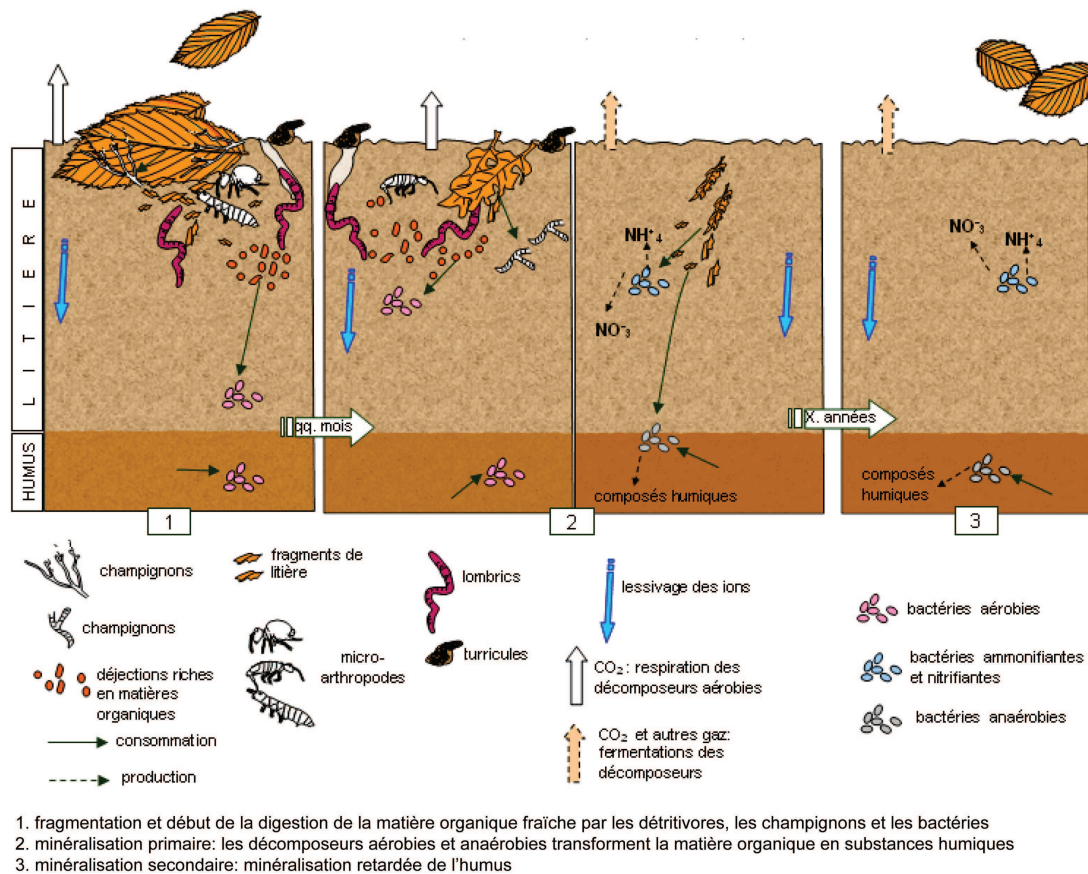


FIGURE 1.7 – Principe d'humification [d'après Gallien]

Classiquement, les horizons sont définis de O à C, ils ne sont pas toujours tous présents. Néanmoins, les principaux horizons retrouvés sont :

- O** - comprenant la litière et les matières organiques en cours de transformation.
- OL** - la litière qui comprend l'ensemble des débris bruts (restes de bois, de feuilles et de fleurs fanées).
- OF** - l'horizon de fragmentation.
- OH** - l'horizon humifié, composé presque exclusivement de matière organique morte transformée par les organismes du sol.
- A** - l'horizon mixte composé d'éléments minéraux et d'humus. Sa structure dépend de l'incorporation plus ou moins rapide de l'humus.
- E** - l'horizon lessivé drainé par l'eau qui s'infiltré, le rendant pauvre en ions, en argiles, en composés humiques et en hydroxydes de fer et d'aluminium.
- B** - l'horizon d'accumulation apparaissant dans les sols lessivés. Il est riche en éléments fins ou amorphes (argiles, hydroxydes de fer et d'aluminium, humus).
- S** - l'horizon d'altération. Il est le siège de processus physico-chimiques et biochimiques aboutissant à la destruction des minéraux du sol (altération minérale)
- C** - la roche-mère peu altérée.
- R** - la roche-mère non altérée qui correspond à la couche géologique dans laquelle se sont formés les sols.

Pour résumer, les constituants organiques retrouvés dans l'horizon humifère ont deux principales origines :

◊ **les constituants vivants** représentés par les végétaux, les animaux du sol et la biomasse microbienne ;

◊ **les constituants non vivants** caractérisés par les matières organiques particulaires composées de débris plus ou moins grossiers et les matières organiques moléculaires. Dans cette dernière sous catégorie sont distinguées les substances humiques et les substances non humiques. Nous insisterons plus précisément sur ces deux substances dans la suite du travail de thèse.

1.5.2 Les constituants de la couverture pédologique

1.5.2.1 Les matières humiques

Les substances humiques sont probablement les constituants du sol les moins bien connus malgré le très grand nombre de travaux qui leur sont consacrés [Khan et Schnitzer 1972, Stevenson 1982, Schnitzer 1999, Hayes et Clapp 2001]. La définition des substances humiques reste très vague, selon Stevenson en 1982, elles sont définies comme des substances de masse moléculaire relativement élevée de couleur brune noire et formées au cours de réactions de synthèse dans le sol. Cependant Aiken [1985], les considère comme des substances naturelles d'origine biologique, hétérogènes de couleur jaune à noire et résistante à la dégradation. Griffith & Schnitzer [1975] estiment que les substances humiques représentent 60 à 70 % du carbone organique du sol. Malgré ces différentes définitions, il est possible par extraction (Figure 1.8) de différencier trois types de composé. La substance humique est composée d'acide fulvique soluble en milieux alcalins et acides, d'acide humique soluble dans les milieux alcalins et insoluble dans les milieux acides et enfin de l'humine insoluble dans les milieux alcalins et acides. La séparation à l'éthanol des acides humiques permet d'obtenir une phase soluble : les acides humatomélaniques.

La différence entre les acides fulviques et humiques reste très difficile à déterminer : les premiers étant considérés comme plus mobiles, possédant un plus faible poids moléculaire et donc moins « polymérisés » que les seconds. Les humines correspondent à la fraction des substances humiques insolubles. Bien que peu connues, puisqu'elles sont difficiles à isoler totalement du fait des relations très étroites qu'elles peuvent avoir avec les matériaux inorganiques, elles représentent plus de 50 % du carbone organique total du sol.

La composition des substances humiques est définie par les teneurs en éléments chimiques et en groupes fonctionnels. Les substances humiques possèdent une charge toujours négative ou nulle, d'intensité variable suivant le pH du milieu [Ndira 2006]. Cette charge provient de la dissociation des groupements fonctionnels représentés par des groupements fonctionnels hydrophiles : carboxyles (COOH), phénoliques et/ou alcooliques (OH), carbonyles (C=O) ainsi que des groupements amines (NH₂) [Ndira 2006]. Les propriétés physiques des substances humiques sont dues aux groupes COOH et OH. La proportion des groupements COOH est le plus souvent supérieure à 50% [Citeau 2004].

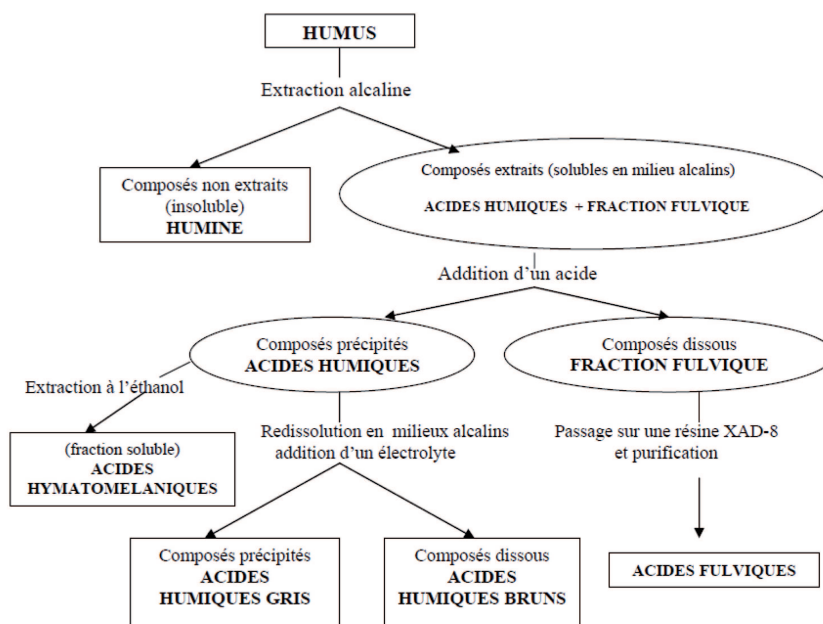


FIGURE 1.8 – Schéma d'extraction et de fractionnement de substances humiques. Composition et structures [Ndira 2006]

Trois caractéristiques fondamentales [Calvet 2003] définissent la conception des substances humiques :

- ◊ il est vraisemblablement impossible de trouver deux molécules de substance humique identiques, qu'elles que soient la taille [Dubach *et al.* 1964];
- ◊ il n'existe pas de régularité dans la structure moléculaire des substances humiques [Stevenson 1982];
- ◊ les substances humiques sont probablement formées de manière chaotique [Swaby et Ladd 1962].

Ces trois caractéristiques exposent la complexité de représenter de façon conceptuelle les substances humiques.

Actuellement, les substances humiques sont définies comme des "supramolécules" [piccolo *et al.* 1996]. Elles seraient caractérisées par des associations de petites molécules issues de la complexation des débris végétaux et liées entre elles par des liaisons hydrophobes, hydrophiles et de Vander waal, etc... [Piccolo 2001, Sutton et Sposito 2005]. Une représentation d'Andreux et Munier-Lamy [1994] compare la structure des substances humiques et des substances fulviques (Figure 1.9). Les deux substances sont représentées avec un noyau central aromatique sur lequel sont fixées des chaînes latérales aliphatiques ramifiées, mais plus longues pour les substances fulviques. Le noyau aromatique et les chaînes aliphatiques sont deux structures qui permettent la fluorescence.

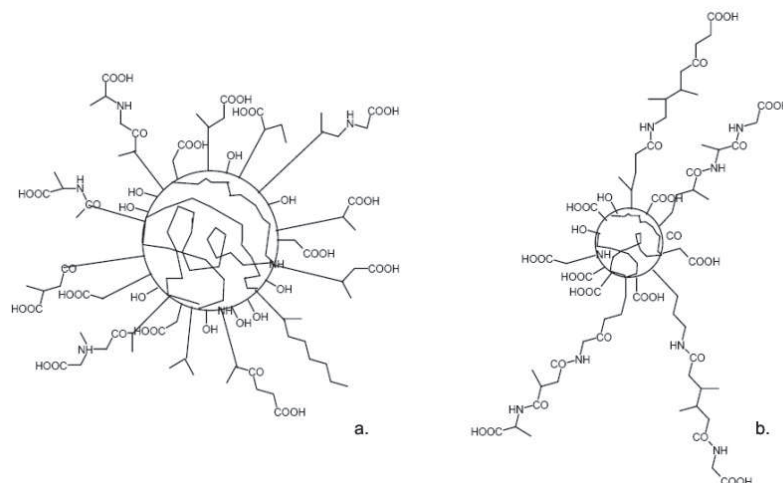


FIGURE 1.9 – Modèle de structure des substances (a) humiques (b) fulvique [Andreux et Munier-Lamy 1994]

1.5.2.2 Les matières non humiques

Les sols contiennent une grande variété de composés organiques qui existent à l'état libre pour une petite partie. Pour la majorité, les composés organiques sont soit associés aux colloïdes humiques et minéraux, soit des constituants des substances humiques [Calvet 2003]. Les substances non humiques sont des molécules appartenant à des familles chimiques identifiées en trois groupes : les composés azotés, les hydrates de carbone et les lipides [Calvet 2003].

Les composés azotés :

Ce sont les acides aminés, les sucres aminés, les acides nucléiques et un certain nombre de pigments et leur dégradation. Les deux premiers groupes sont quantitativement les plus importants.

Acides aminés :

Ce sont des molécules qui possèdent au moins une fonction carboxylique et une fonction aminée. Les acides aminés les plus abondants dans le sol sont ceux des parois cellulaires des micro-organismes, notamment la glycine, l'alanine, l'acide aspartique et l'acide glutamique. Les substances humiques contiennent les mêmes acides aminés [Calvet 2003]. Plusieurs facteurs ont une influence sur leur quantité et leur distribution dans les sols : les réactions de synthèse et de dégradation, les organismes vivants, l'adsorption et les réactions chimiques avec les quinones et les sucres. Les plus caractéristiques pour l'étude sont les composés aromatiques monoacides monoaminés, à savoir la phénylalanine, la tyrosine et le tryptophane (Figure 1.10).

Les sucres aminés :

Ce sont des mucopolysaccharides que l'on trouve dans le sol, combinés, entre autre, avec des mucopeptides et des mucoprotéines. Certains sont des polysaccharides insolubles en milieu alcalin et sont appelés "chitines". Les sucres aminés représentent 5 à 10% de l'azote des couches de surface du sol [Stevenson 1994]. Leur

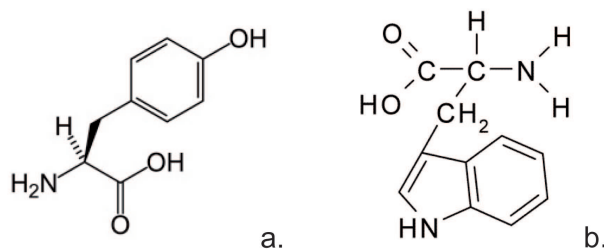


FIGURE 1.10 – Structure des acides aminés (a) Tyrosine (b) Tryptophane

structure est de type noyau pyrane où un radical hydroxyle est remplacé par une fonction amine.

Les hydrates de carbone :

Les hydrates de carbone ou carbohydrates sont des composés très répandus, ils représentent 5 à 25% de la matière organique du sol et proviennent des résidus des parois cellulaires des végétaux et des synthèses microbiennes qui sont leur principale source [Stevenson 1994]. Ils tirent leur nom de leur formule chimique générale $C_n(H_2O)_m$ (Figure 1.12) et peuvent se présenter sous la forme d'un simple monosaccharide (hexoses, pentoses) ou sous la forme de polysaccharides comme la cellulose (Figure 1.11) ou l'hémicellulose correspondant à des monosaccharides liés par des liaisons glucosidiques β -(1-4) (Figure 1.13).

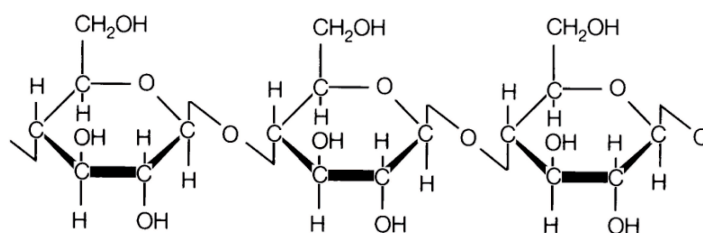


FIGURE 1.11 – Structure de la cellulose

La lignine :

C'est une macromolécule de haut poids moléculaire qui compose une partie de la paroi des plantes ligneuses et permet la rigidité, des ptéridophytes (fougères) et certaines bryophytes (mousses). La structure des lignines est polyaromatique comprenant trois unités de bases, (i) l'alcool coumarylique, (ii) l'alcool coniférylique et (iii) l'alcool sinapylique (Figure 1.12).

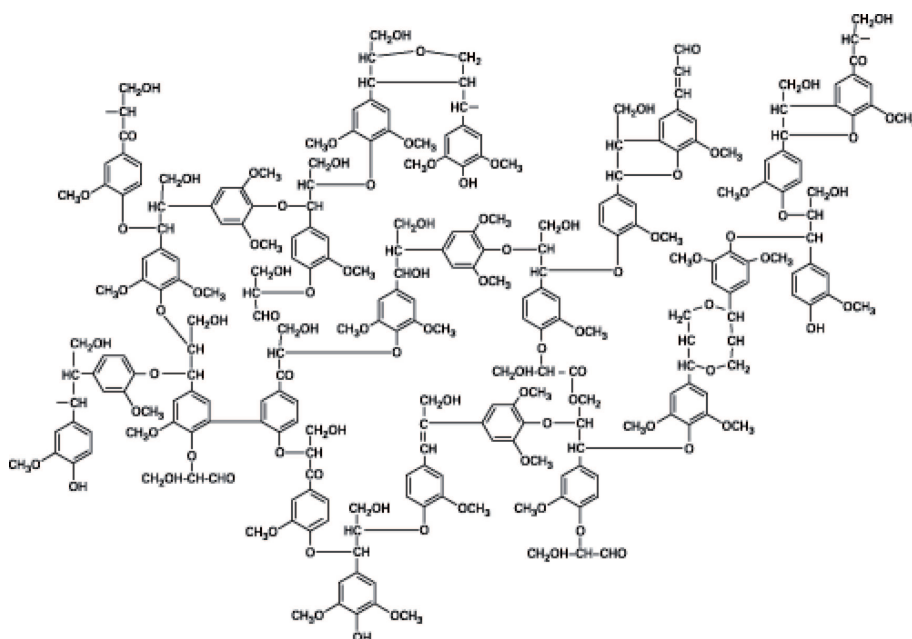


FIGURE 1.12 – Structure de la lignine

Les tanins :

Les tanins sont des substances d’origine végétale, non azotée. Ils se distinguent par une famille hydrolysable et une famille non-hydrolysable ou condensée (ou encore proanthocyanidine). Les tannins condensés, polymères de proanthocyanidine, sont des polyphénols tandis que les tannins hydrolysables ont deux unités de base, un sucre estérifié soit par l’acide gallique soit par l’acide ellagique.

Les lipides :

Ils correspondent à un ensemble de composés organiques solubles dans des solvants organiques [Dinel *et al.* 1990]. Ce terme regroupe des composés très variés, allant des simples composés comme les acides gras à des molécules complexes comme les stérols, les terpènes ou encore des substances tels que les corps gras, les cires et les résines. Ils proviennent des résidus de végétaux et des microorganismes et ne représentent que 2 à 6% de la matière organique du sol. Les lipides peuvent avoir des conséquences sur les propriétés physiques du sol, à savoir jouer un rôle sur l’agrégation du sol et sa stabilité ainsi que la rétention de l’eau. Les lipides sont considérés comme résistants à la biodégradation. Les principaux constituants des lipides sont : les cires, les hydrocarbures et en particulier les composés polycycliques aromatiques les acides gras, etc ...[Schnitzer and Neyroud 1975].

2 Le karst, un milieu vulnérable

2.1 Notion de vulnérabilité appliquée au karst

La notion de vulnérabilité a été définie dans les années 60-70, comme la possibilité de transit par un trajet vertical de corps polluant depuis le sol de surface jusqu’au réservoir aquifère [Margat 1968, Albinet and Margat 1970]. Cette propagation possède une vitesse variable selon les caractéristiques de la roche aquifère,

de l'épaisseur du sol et de la zone non saturée et saturée ainsi que de la "pente" hydraulique. Cette notion de vulnérabilité se subdivise en deux catégories : la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique.

La **vulnérabilité intrinsèque** est définie comme dépendante des propriétés du karst lui-même. Le degré de vulnérabilité repose sur la quantité de recharge en eau, les propriétés du sol de surface (dans le cas où il est présent) et sur les caractéristiques des zones saturées et non saturées. Quinlan *et al.* [1991] ajoutent les caractéristiques des infiltrations. Elles ont un faible impact dans le cas où elles sont diffuses et spatialisées sur le bassin d'alimentation, mais sont très impactantes lorsqu'elles sont ponctuelles et directes. Ils insistent également sur l'importance du degré d'évolution de l'épikarst. Les mesures directes des paramètres de la vulnérabilité intrinsèque sont donc difficiles [Gogu and Dassargue 1998].

La **vulnérabilité spécifique** est définie comme la vulnérabilité d'un aquifère à un contaminant particulier ou à un groupe de contaminants. Cette vulnérabilité prend en compte la structure de l'aquifère ainsi que la propriété du polluant. En effet, le potentiel agressif du contaminant peut être affecté par des processus de retard ou de désintégration comme la sorption, la biodégradation, la filtration, etc [Sinreich *et al.* 2004, Vernoux and Buchet 2010]. La notion de vulnérabilité spécifique à l'occupation des sols est souvent associée aux activités humaines et à la couverture pédologique [Vrba and Zaporozec 1991].

2.2 Etudes de la vulnérabilité intrinsèque des systèmes karstiques

L'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines des systèmes karstiques peut être réalisée à partir des méthodes dites à index. Elles sont basées sur la superposition spatiale de plusieurs critères influençant la vulnérabilité de la région d'étude. Une valeur numérique est imposée en fonction du degré de vulnérabilité du critère et chaque critère possède une pondération en fonction de son importance.

La réalisation de cartes multicritères a débuté aux Etats Unis [Aller *et al.* 1987] avec une méthode appelée **DRASTIC** (**D**epth to water, **R**echarge, **A**quifer media, **S**oil media, **T**opography, **I**mpact of the vadose zone and hydraulic **C**onductivity). Cette méthode avait pour but d'estimer la sensibilité à la pollution potentielle des eaux souterraines sur des grandes zones. Chaque paramètre est cartographié avec un index numéroté de 1 à 10 et un facteur de pondération est appliqué aux différents paramètres en fonction de leur importance. L'index de vulnérabilité (D_i) correspond à la somme des 7 paramètres (j) selon la formule suivante :

$$D_i = \sum_{j=1}^{j=7} (W_j R_j) \quad (1.2)$$

Avec : D_i , l'index de vulnérabilité global d'une unité cartographique ; W_j , le facteur de pondération du paramètre j et R_j , l'index du paramètre j .

Dérivée de DRASTIC, la méthode italienne **SINTACS** (Soggiacenza, Infiltrazione, Azione del Non Saturo, Tipologia della Copertura, Carratteri idrogeologici dell' Acquifero Conducticibilità, et Acclività della Superficie) a été conçue de plus petites zones. Les différences principales avec la méthode DRASTIC sont les valeurs des index, la sélection des classes de pondération et la stratégie de leur combinaison [Dörfliger *et al.* 2004]. La méthode SINTACS utilise les mêmes paramètres que DRASTIC mais est plus souple au niveau du système d'indexation et de pondération. L'index de vulnérabilité I_v est calculé selon la formule suivante :

$$I_v = \sum (P_{1,7}W_{1,n}) \quad (1.3)$$

Avec : $P_{1,7}$, l'index des paramètres 1 à 7 et $W_{1,n}$, le poids correspondant à chaque classe.

Dans le but de protéger les eaux souterraines karstiques, l'**OFEPF** (Office Fédérale de l'Environnement, de la Forêt et le Paysage Helvétique) avec la participation du projet suisse COST Action 65 (European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research) a permis l'élaboration de la méthode EPIK [Dörfliger 1996]. Le nom **EPIK** est issu de l'acronyme **Epikarst**, couverture **Protectrice**, condition d'**Infiltration** et développement du réseau **Karstique**. Cette méthode est basée sur l'organisation spécifique des écoulements dans le milieu karstique. Elle consiste en l'évaluation, le levé cartographique et la combinaison de quatre critères, à savoir le développement de l'épikarst, l'épaisseur de la couverture protectrice, les conditions d'infiltration et le développement du réseau karstique. Cette méthode permet d'évaluer la sensibilité des eaux souterraines en milieu karstique.

Chaque paramètre est divisé en classe traduisant des degrés d'impact vis à vis d'une pollution et chaque paramètre possède un coefficient de pondération qui est fonction de son importance. L'indice final de vulnérabilité est calculé selon la formule suivante :

$$F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \delta K_l \quad (1.4)$$

Avec : $\alpha, \beta, \gamma, \delta$, les coefficients de pondération de chacun des critères, et E_i, P_j, I_k, K_l , les valeurs de chacun des critères indexés.

De cette méthode a découlé la méthode multicritère **RISKE** [Peletier-Giraud *et al.* 2001]. Elle prend en compte 5 critères qui permettent de définir l'architecture de l'aquifère et l'organisation des écoulements dans le milieu karstique. Les critères sont : la **Roche** aquifère, l'**Infiltration**, le **Sol**, la **Karstification** et l'**Epikarst**. Elle a pour but d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. L'indice global de vulnérabilité I_g se détermine selon la formule suivante :

$$I_g = \alpha R_i + \beta I_j + \gamma S_k + \delta K_l + \epsilon E_m \quad (1.5)$$

Avec : $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$, les poids des critères, et i, j, k, l, m , les indices des critères.

Une méthode intermédiaire, en 2005, RISKE2 (s'inspirant de EPIK et de RISKE) fût créée avant d'aboutir à une dernière version appelée PaPRIKa [Döerfliger and Plagnes 2009]. L'acronyme **PaPRIKa** signifie "**P**rotection des **a**quifères karstiques basée sur la **P**rotection, le **R**éservoir, l'**I**nfiltration et le degré de **K**arstification". Elle correspond à une méthode multicritère à index avec système de pondération dont les critères sont sélectionnés en fonction des caractéristiques de structure et de fonctionnement des aquifères karstiques [Döerfliger and Plagnes 2009]. Cette méthode a été appliquée, dans le cadre de cette thèse, à des petits systèmes karstiques de moyenne montagne, sa description complète est détaillée Chapitre 5.

Actuellement, des méthodes dérivées de PaPRIKA sont développées pour être appliquées à des milieux plus spécifiques. C'est le cas de la méthode **PPLIK** (**P**récipitation, couverture **P**rotectrice, **I**nfiltration, **L**ithologie et **K**arstification) qui a été conçue pour définir la vulnérabilité intrinsèque des systèmes karstiques Nord africains [Tayebi 2011].

A la suite du projet Action COST 65, l'action COST 620 fût créée en 1997 dans le but d'établir une méthodologie pour la réalisation de carte de vulnérabilité spécifique et intrinsèque. Plusieurs méthodes ont été aussi développées à l'issue de ce projet.

- ◊ La méthode **PI** [Goldscheider *et al.* 2000] basée sur la caractérisation spatiale de deux critères : P pour la couverture **P**rotectrice (5 critères) et I pour les conditions d'**I**nfiltration (1 critère).

- ◊ La méthode **LEA** se présente comme la méthode PI mais sans recours à l'usage d'indices numériques.

- ◊ La méthode **COP** [Vías *et al.* 2002] qui permet la caractérisation de la ressource et non d'une source ou d'un captage. C représente la concentration du flux en distinguant la recharge par les pertes et avens de celle du reste du bassin d'alimentation. O caractérise les formations superficielles de couverture résultant du croisement entre l'épaisseur et la nature de la couverture. Enfin, P détermine les précipitations obtenues en croisant les quantités et intensités.

Cette méthode a évolué vers la méthode **VUKA** (**VU**lnerability mapping in **KAR**st terrains) appliquée aux terrains karstiques Sud africains [Leyland and Wirthüser 2010].

Pranville *et al.* [2007] a réalisé une comparaison entre les principales méthodes de réalisation de carte de vulnérabilité. Pour réaliser cette étude, le Causse de Gramat a été retenu. Il appartient au Causse de Quercy situé en marge sud-ouest du Massif Central. L'auteur met en évidence que les plages de vulnérabilité sur le bassin d'alimentation sont très variables d'une méthode à l'autre (Figure 1.13). En complément, il montre que :

- ◊ la définition des classes des pentes différent d'une méthode à l'autre ;
- ◊ des redondances existent dans les critères ;
- ◊ le reclassement des valeurs d'indice peut être en contradiction avec les observations de terrain ;
- ◊ le système de pondération ne laisse pas toujours assez de souplesse pour faire jouer les différents paramètres ;

◊ la fracturation verticale n'est pas toujours prise en compte.

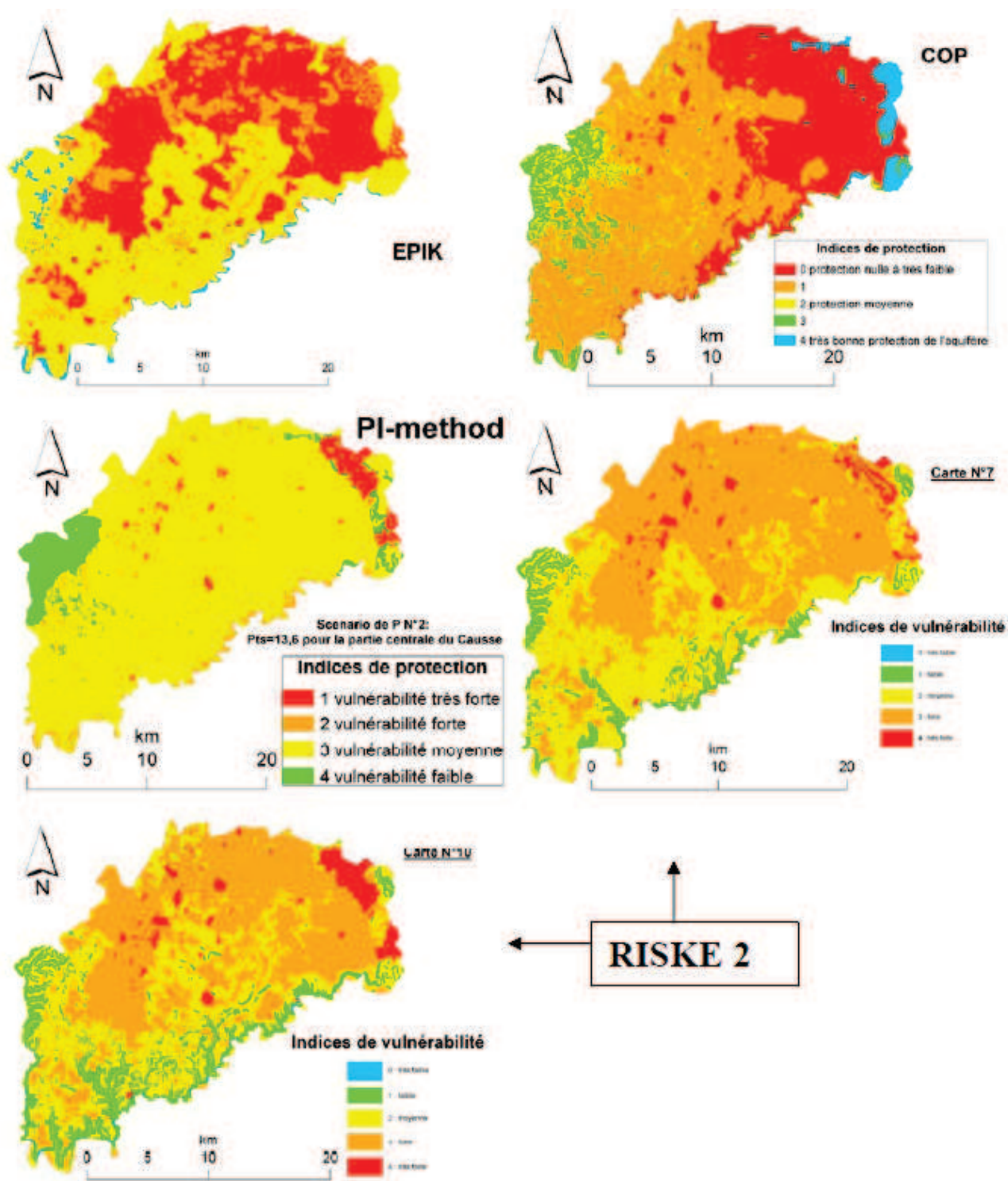


FIGURE 1.13 – Comparaison entre les principales méthodes de cartographie de la vulnérabilité (EPIK, COP, PI, RISKE) des bassins versants de systèmes karstiques appliquées sur le causse de Quercy [Pranville 2007]

2.3 la vulnérabilité spécifique des systèmes karstiques

Les études sur la vulnérabilité spécifique des systèmes karstiques sont plus compliquées à mettre en place. Elles sont généralement réalisées lors d'études d'impacts pendant l'aménagement d'un site ou encore après l'apparition d'une pollution. Les contaminations peuvent être multiples, d'origine animale ou anthropique. La vulnérabilité peut prendre en compte une pollution diffuse et/ou ponctuelle :

La pollution diffuse :

Elle résulte d'une contamination rendant impropre la qualité des eaux, causée par des rejets diffus affectant une partie ou toute la surface du bassin d'alimentation. Sous l'influence des précipitations, cette pollution est transmise à l'aquifère en traversant le sol. Au sein des systèmes karstiques, il s'agit généralement d'un type de pollution qui influence la qualité de l'eau de la source de manière rémanente ou permanente. En milieu forestier, cette "pollution" correspond majoritairement à une contamination naturelle par des matières dissoutes ou en suspension composées de matières organiques et minérales. Elle se traduit par une augmentation de la turbidité ainsi que des nitrates, et par la présence occasionnelle de bactéries fécales (*Escherichia Coli* et *Enterocoque*) [Dorioz *et al.* 2008].

La pollution ponctuelle :

Elle correspond à une contamination qui peut être localisée géographiquement. Cette pollution n'est pas permanente, et souvent d'origine accidentelle. En période d'étiage, certains flux entrant comme par exemple des rejets de station d'épuration, ne sont plus dilués et la qualité de l'eau peut être fortement impactée par la présence de bactéries fécales [Mahler *et al.* 2000]. Dans les milieux karstiques de moyennes montagnes, les pollutions ponctuelles sont régulièrement associées aux activités sylvicoles, pastorales et touristiques. On peut citer : des pollutions par les hydrocarbures provenant de cuves de restaurant (exemple de la pollution au fuel de la source karstique de Font d'Urle dans le Vercors en 2007), d'engins sylvicoles et d'huiles de chaîne des tronçonneuses, de l'utilisation de produits phytosanitaires pour le traitement des bois [Liu *et al.* 1999], ou encore une augmentation de matières en suspension suite à un remaniement du sol après le passage d'engin.

La vulnérabilité accidentelle bien que fortement impactante peut être relativisée compte tenu des divers limites de contexte de la ressource.

Pour éviter tout type de pollution, la législation française impose, depuis la loi sur l'eau de 1964, une mise en place de périmètres de protection des ressources en eau potable au sein des bassins d'alimentation. Au nombre de trois (Figure 1.14) leur définition doit tenir compte de la complexité de la structure des milieux karstiques. Trois périmètres sont définis :

- ◊ le Périmètre de Protection Immédiate (PPI) est le plus restreint et se présente autour du captage. Il a pour objet la protection des ouvrages, notamment des drains captants ;

- ◊ le Périmètre de Protection Rapprochée (PPR) est mis en place pour prévenir des risques de pollution dans une zone d'infiltration sensible. La taille de ce périmètre est fonction des dimensions du système aquifère et des critères de transfert ;

- ◊ le Périmètre de Protection Eloignée (PPE) n'est pas obligatoire. Sa superficie

devrait correspondre à la zone d'alimentation de la source.

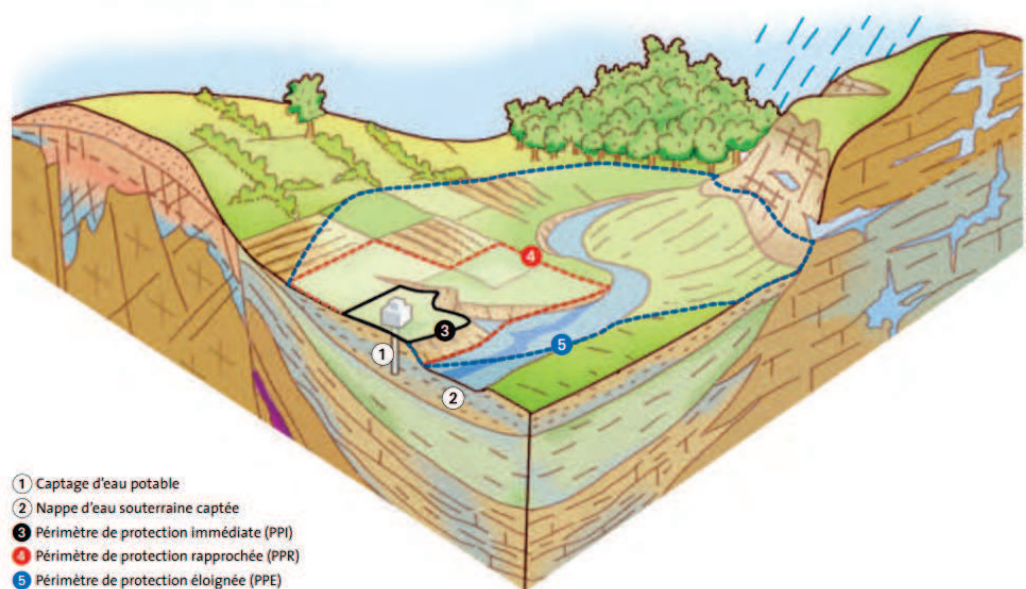


FIGURE 1.14 – Les différents périmètres de protection au sein d'un bassin versant [Vernoux et Buchet 2010]

Bien que ces trois périmètres existent, les ressources en eau des systèmes karstiques restent très vulnérables aux contaminations anthropiques ou naturelles comme une remobilisation du sol suite à un glissement de terrain.

3 Etat des connaissances sur le changement climatique et son impact sur le milieu karstique de moyenne montagne

3.1 Caractérisation de l'évolution climatique dans les Alpes de Savoie

Les Alpes sont soumises à quatre grandes influences climatiques dont l'emprise est plus ou moins importante selon la situation géographique et les saisons. Ces influences sont : les flux d'Ouest qui apportent douceur et humidité (influence atlantique) ; les flux méditerranéens qui amènent chaleur et pluies sur les versants méridionaux (effet de foehn sur les versants Nord) ; les flux de nord issus des hautes latitudes (froid et sec) ; la masse d'air continental à l'Est (froid et sec en hiver et chaud en été) [Livre blanc du climat en Savoie 2010].

3.1.1 La température de l'air

Bien que les causes soient sources de controverse, l'augmentation de la température de l'air est un phénomène mondial avéré. Depuis 1900, l'augmentation de la température est estimée à + 0.7°C à l'échelle mondiale. Les systèmes montagneux,

comme les Alpes, génèrent leurs propres climats, et la topographique joue un rôle essentiel dans la détermination des climats locaux. Combiné au déplacement des masses d'air, cela favorise l'apparition de microclimats ce qui ne rend pas évident l'estimation de l'impact du changement climatique. Toutefois de nombreux rapports traitant ce sujet ont été réalisés et montrent que de 1901 à 2000 l'augmentation de la température est estimée à $+ 0,9^{\circ}\text{C}$ [Livre blanc du climat en Savoie 2010]. Cette augmentation est beaucoup plus marquée depuis le milieu des années 80, les années les plus chaudes sont 1994, 2000, 2002 et 2003. Les modélisations réalisées sur l'évolution des températures dans les Alpes montrent que d'ici le 21e siècle, les températures devraient augmenter de 3 à 5°C . De 1980 à 2000, le nombre de jour de gel a diminué de 12 à 14% [ONERC 2008].

Plus localement, l'ensemble des postes de montagne ont enregistré depuis 1950 une augmentation des températures moyennes située entre $+ 1,69^{\circ}\text{C}$ et $+ 1,81^{\circ}\text{C}$ en moyenne (Figure 1.15). Au niveau saisonnier, les étés et les hivers se sont réchauffés de manière similaire en Savoie ($+ 2^{\circ}\text{C}$) avec des pics mensuels pour janvier ($+ 2,5^{\circ}\text{C}$) et août ($+ 2,46^{\circ}\text{C}$), suivis du printemps ($+ 1,78^{\circ}\text{C}$) et de l'automne ($+ 1,17^{\circ}\text{C}$) (Figure 1.15). Depuis 1985, début de l'important réchauffement actuel, c'est la saison printanière qui s'est la plus réchauffée avec $+ 2^{\circ}\text{C}$ [Livre blanc du climat en Savoie 2010] .

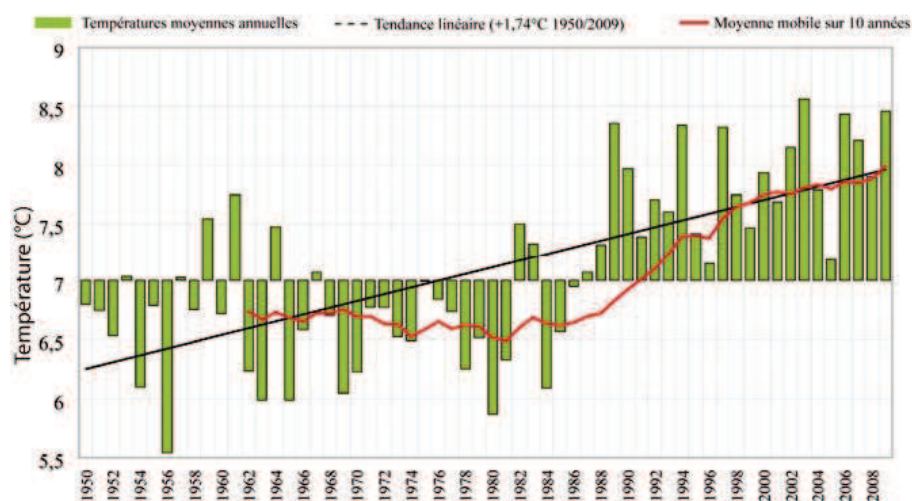


FIGURE 1.15 – Ecart moyen annuel de la température de la montagne savoyarde de 1950 à 2009 par rapport à la normale 1971/2000 [Livre blanc du climat en Savoie 2010]

L'augmentation des températures (liée au CO_2) a aussi un impact sur la végétation. Les forêts montrent des augmentations de croissance de 25 à 50% sur la période 1900-2000 [ONERC 2008], ce qui a pour effet une augmentation de l'évapotranspiration. Cette évapotranspiration est d'autant plus importante que la reprise de la végétation après l'hiver est de plus en plus précoce. L'infiltration efficace des pluies est donc réduite. Dans les zones de montagne, la progression des feuillus sur les conifères a un impact plutôt positif. Les feuillus apportant plus de matières organiques à l'automne lors de la chute des feuilles, les litières forestières sont plus importantes et ont donc un meilleur pouvoir épurateur de l'eau.

3.1.2 Les précipitations

L'évolution des précipitations est beaucoup plus difficile à appréhender. Les analyses ne montrent pas de changements aussi marqués que pour les températures. Toutefois les longues séries (Figure 1.16) mettent en avant une très faible et non significative augmentation des précipitations depuis 1947 [Livre blanc du climat en Savoie 2010].

Très localement en Savoie, des relevés météorologiques font apparaître des baisses dans les cumuls des précipitations de certaines stations isolées [Livre blanc du climat en Savoie 2010]. Les cumuls annuels ne changent pas mais les tendances saisonnières des précipitations se modifient au cours de l'année. Les précipitations sont en baisse sur la période estivale tandis qu'elles augmentent en hiver. Il existe un décalage dans les précipitations, les averses d'été se décalent en automne [ONERC 2008]. Toutefois certains rapports [CIPRA 2007] annoncent qu'au cours de ce siècle, les précipitations devraient diminuer de 1 à 11%, avec une incidence accrue de 36% des sécheresses estivales.

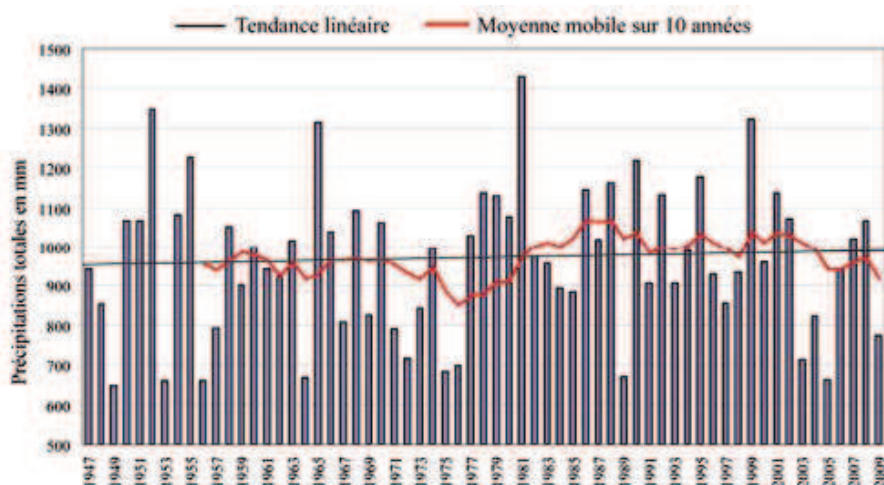


FIGURE 1.16 – Evolution des totaux de précipitations annuelles à Bourg-Saint-Maurice de 1947 à 2009. *Météo-France*

Un point de plus en plus abordé, concerne les intensités des précipitations, que ce soit au niveau de la durée qu'au niveau de la quantité. Des études récentes [Frei *et al.* 2006] tendent à prouver que les intensités des pluies ont augmenté de 10 à 12%. Les événements extrêmes sont donc plus fréquents, ils augmentent donc la probabilité de voir apparaître des inondations.

3.1.3 Le couvert neigeux

L'augmentation des températures associée au décalage des précipitations ont un impact non négligeable sur la couverture neigeuse. Depuis 1960, la durée d'enneigement n'a cessé de baisser, les estimations montrent une perte de 1 mois. Pour des altitudes de 1500m, l'enneigement passe de 5 à 4 mois en moyenne dans les Alpes du Nord. La quantité est aussi en baisse, toujours depuis 1960, il est noté une réduction de l'ordre de 30% (Figure 1.17), soit environ 1 m de neige cumulée [Livre blanc du climat en Savoie 2010]. La hauteur de 1m50 dans les préalpes (étude réalisée dans

le Massif de Bauges et le Massif de la Chatreuse) n'a été dépassée qu'une seule fois depuis 1990, alors que cette valeur était atteinte 3 ou 4 fois par décennie.

Enfin, pour chaque degré d'augmentation de la température, la ligne d'enneigement s'élèvera d'environ 150m et la durée de la couverture neigeuse diminuera de plusieurs semaines [IPCC 2007].

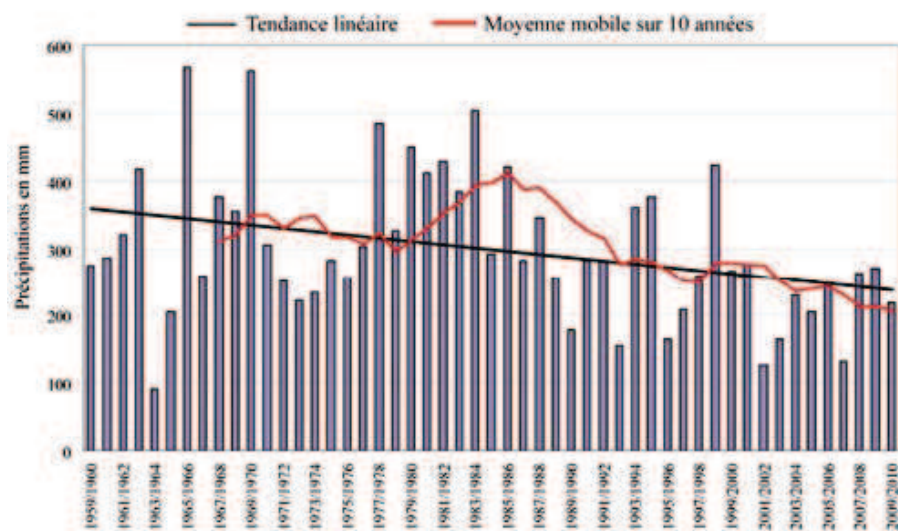


FIGURE 1.17 – Evolution des cumuls de neige fraîche à Peisey-Nancroix de 1959/1960 à 2009/2010. *Météo-France*

3.2 Impacts sur la qualité et la quantité des ressources karstiques en eau

3.2.1 La quantité des ressources en eau

Nous avons donc vu que le cumul annuel des précipitations ne présentait pas d'évolution significative. Les quantités reçues sur le sol restent globalement les mêmes. Toutefois, le décalage saisonnier des précipitations peut avoir un impact important. En effet, les pluies d'été se produisent en automne, or l'été est une période chaude, la demande d'eau est donc importante. Ce manque d'eau peut donc être problématique.

Pour les systèmes de montagne, la couverture neigeuse est un apport nécessaire pour les ressources karstiques. La fonte du stock de neige qui a lieu généralement courant Avril-Mai permet un soutient régulier et diffus jusqu'aux mois de Juin-Juillet. L'épaisseur et la durée de la couverture neigeuse se réduisant, il existe un impact négatif sur la répartition saisonnière des apports en eau.

Le risque le plus important pour la ressource en eau reste d'origine anthropique. La population en Savoie a augmenté de 12% entre 1990 et 1999 (chiffres INSEE). Les quantités d'eau restent inchangées alors que la demande croît. Le problème le plus important sera donc de pouvoir capter et stocker l'eau lors des saisons abondantes

en précipitation pour la redistribuer lors des périodes d'étiage.

Il est à noter aussi que la végétation peut avoir un impact sur la ressource. Avec l'augmentation des températures, l'évapotranspiration plus importante réduit les quantités d'eau s'infiltrant dans le sol. De plus, le changement de végétation sur les versants de montagne avec la propagation des feuillus sur les résineux a aussi un effet néfaste sur la ressource en eau, les feuillus ont une évapotranspiration plus importante que les résineux.

3.2.2 La qualité des ressources en eau

La modification du climat ne joue pas un rôle prépondérant sur la qualité de la ressource en eau. Ce sont principalement les activités anthropiques (agriculture, industries, etc...) qui sont vectrices des pollutions de l'eau.

Cependant, l'augmentation de l'intensité des précipitations peut avoir un effet négatif sur la qualité de l'eau. Des pluies violentes entraînent une remobilisation plus importante des éléments solides du sol. La turbidité qui est un paramètre limitant pour la potabilité des eaux risque de dépasser les normes de façon plus régulière. De plus, le lessivage des sols permet l'apport d'agents pathogènes (*Escherichia coli*, Entérocoques, etc ...) et de champignons.

3.3 Conclusion

L'essentiel des rapports existants traitent de l'impact d'un changement climatique sur les eaux de surface et les nappes aquifères. Le cas des systèmes karstiques n'est que très rarement abordé. D'une part, ces systèmes sont de structures complexes et d'autre part, ils diffèrent d'un faciès géologique à un autre de part leur caractère très transmissif. Les systèmes karstiques peuvent être comparés à des "*pluviomètres naturels*". Toutefois en fonction de leur taille, ils présentent également un caractère capacitif et peuvent réguler le transfert des eaux sur de très longues périodes.

La place du karst dans l'alimentation en eau potable est un enjeu très important dans les milieux de moyenne montagne. Dans un premier temps, pour identifier l'impact des activités anthropiques sur les bassins d'alimentation des bassins, nous avons sélectionnés 5 sites karstiques en milieu forestier. Puis dans un second temps, nous proposons d'évaluer les impacts du changement climatique sur les karsts préalpins et jurassiens. Pour cela, 2 sites possédant des chroniques de données suffisamment longues (plus de 50 ans) et un site avec des séries de données moins longues (30 ans) ont été retenues pour répondre à cette objectif.

Chapitre 2

Contexte général et présentation des sites

En France, le karst représente 35% du territoire [Mangin 1975], ce qui correspond à environ 180 000 km². Ce type d'aquifère fournit plus de 55% de l'eau destinée à l'alimentation en eau potable (AEP). Les systèmes karstiques de montagne sont très importants car ils peuvent représenter l'unique ressource en eau pour l'alimentation des communes. La Figure 2.1 montre la répartition des domaines carbonatés en France. La moyenne montagne (avec une tranche d'altitude de 1000 à 2000 m) en milieu carbonaté est représentée en France par le Jura, les Pyrénées, les préalpes, les Vosges et la Montagne Noire. Dans ces domaines, les aquifères sont généralement peu étendus et la karstification est souvent très développés [Marsaud 1997].

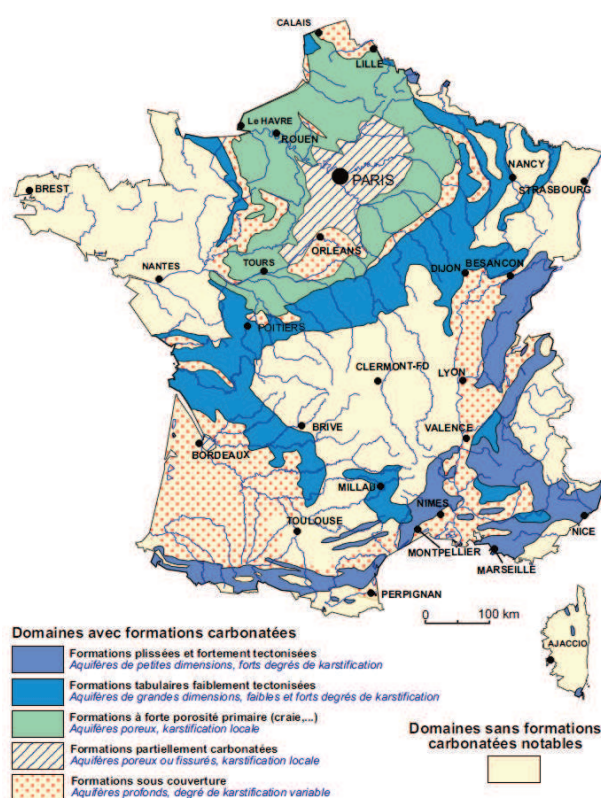


FIGURE 2.1 – Répartition des domaines karstiques en France [Marsaud 1997]

La faible étendue des systèmes karstiques est liée principalement à la géologie de ces domaines, les couches étant fortement tectonisées, plissées et fracturées. La proportion totale de ces karsts de moyennes montagnes représente globalement moins de 7% du territoire Français.

1 Contexte général de la zone d'étude

1.1 Géographie

La zone d'étude est localisée à l'Ouest des pays de Savoie. Elle s'étend sur environ 1600 km² et comprend deux domaines structuraux (Figure 2.2) : les chaînes subalpines septentrionales incluant les massifs de la Chartreuse et des Bauges, et le chaînon jurassien de l'Épine - Chat appartenant à l'extrémité méridionale des chaînons du Jura. Ces deux domaines sont séparés par le sillon molassique périalpin.

Les massifs subalpins d'orientation Sud-Ouest – Nord-Est sont formés par une succession d'anticlinaux et synclinaux perchés [Boissier 2005]. Le chaînon jurassien de direction Nord-Sud correspond à un grand anticlinal coffré. Ces deux domaines sont affectés par des chevauchements à la base des versants Ouest. La structure géologique de ces massifs jouent un rôle capital dans l'hydrogéologie des systèmes karstiques.

Dans cette zone, l'altitude varie de 200 à 1500 m pour les plus hauts sommets (Dent du Chat sur le chaînon jurassien et le Nivolet sur le massif des Bauges). En Chartreuse certains sommets peuvent atteindre les 2000 m (le Gran Som). Les altitudes ne dépassant que rarement les 1500 m, la zone d'étude se situe donc dans des conditions de moyennes montagnes.

1.2 Contexte structural

La formation du relief des chaînes subalpines septentrionales et jurassiennes peut se résumer en deux étapes : les déformations anté Molassiques et les déformations syn et post molassiques. Les molasses sont des formations de roches sédimentaires détritiques syn-orogéniques, qui s'accumulent dans des bassins périphériques d'une chaîne de montagnes. Les molasses sont souvent des grès à ciment de calcaire argileux, parfois de couleur verte à cause de la glauconie. Les molasses plus proximales présentent des galets, formant ainsi des conglomérats. Elles sont fréquemment accumulées dans des bassins flexuraux (créés par la flexure de la lithosphère sous le poids de la chaîne de montagne en cours de formation) et sont souvent reprises par les chevauchements les plus externes de l'orogénèse. À la différence des flyschs, qui s'accumulent en domaine marin profond, les molasses sont des sédiments marins peu profonds (littoraux) ou continentaux. Dans les préalpes, elles se sont déposées à partir de l'Oligocène inférieur.

Les déformations anté molasse

La première déformation de grande envergure se produit au milieu du Crétacé (Barremo-Albien), c'est une phase compressive qui résulte de la remontée de la plaque Adriatique vers la plaque Européenne à une vitesse de 13 mm.an⁻¹

[Ford *et al.* 2006]. Ce mouvement se poursuit avec la phase pyrénéo-provençale (Eocène Moyen - Oligocène) et entraîne une compression Nord-Sud permettant la formation de failles normales. Au Paléocène, la compression correspond aux prémices de l'orogénèse et des premiers plissements alpins [Gidon 1997]. Il existe une phase précoce d'érosion anté Miocène où les massifs subalpins et jurassiens ont été pénéplanés.

Les déformations syn et post molasse

La seconde déformation (Oligo-Miocène) permet les premiers cisaillements tangentiels affectant les barres du Tithonique par des chevauchements de failles inverses. Cette phase permet les premiers plissements de la Chartreuse et des Bauges [Gidon 1999]. La plaque Adriatique converge toujours vers la plaque Européenne mais effectue une rotation antihoraire de 20° . La vitesse de la surrection se réduit et passe à 5 mm.an^{-1} [Gidon 1999]. Durant cette période (anté Miocène), le relief orogénique est à son maximum; il en est de même pour les taux d'érosion. Cette phase est en continuité plus ou moins indirecte avec les premières déformations anté molassiques.

Avant la dernière déformation compressive, a eu lieu une phase d'extension qui a permis, entre autre, de créer la faille de l'Arcalod [Gidon 1996]. La dernière déformation appelée ponto-rhodanienne est datée du post Miocène (5 Ma), elle est dite phase ultime, et a permis de mettre en place les reliefs actuels. C'est une déformation tectonique paroxysmale qui entraîne un raccourcissement horizontal des terrains provoquant l'orogénèse et le plissement des Alpes. Ce raccourcissement s'accompagne d'un décollement au niveau des marnes oxfordiennes des massifs des Bauges et de la Chartreuse [Gidon 1995]. Il provoque par endroit un doublement des séries stratigraphiques. Le Jura est défini comme un obstacle et subit une rotation de ses structures les plus méridionales. Ce pivotement vers l'Ouest de la portion méridionale se traduit par la naissance d'une faille chevauchante au front de la structure anticlinale coiffée du Mont du Chat - l'Épine [Lamiroux 1977]. Le pendage relevé dans le flanc oriental est de 40 à 45° , et sub-vertical pour le flanc Ouest. Au cours de cette période se produit un charriage de la Chartreuse et des Bauges [Santos Narvaez 1980, Gidon 2001], ainsi que la création de failles conjuguées décrochantes (N70 et N165).

A la suite de cette compression, débute un nouveau régime d'extension Plio-Pleistocène, considéré comme phase d'effondrement orogénique [Champagnac *et al.* 2006]. Enfin au quaternaire, le régime extensif et l'approfondissement des vallées sont amplifiés par les glaciations [Talour 1976]. Les structures tectoniques des différents massifs sont illustrés par les coupes géologiques de la Figure 2.3.

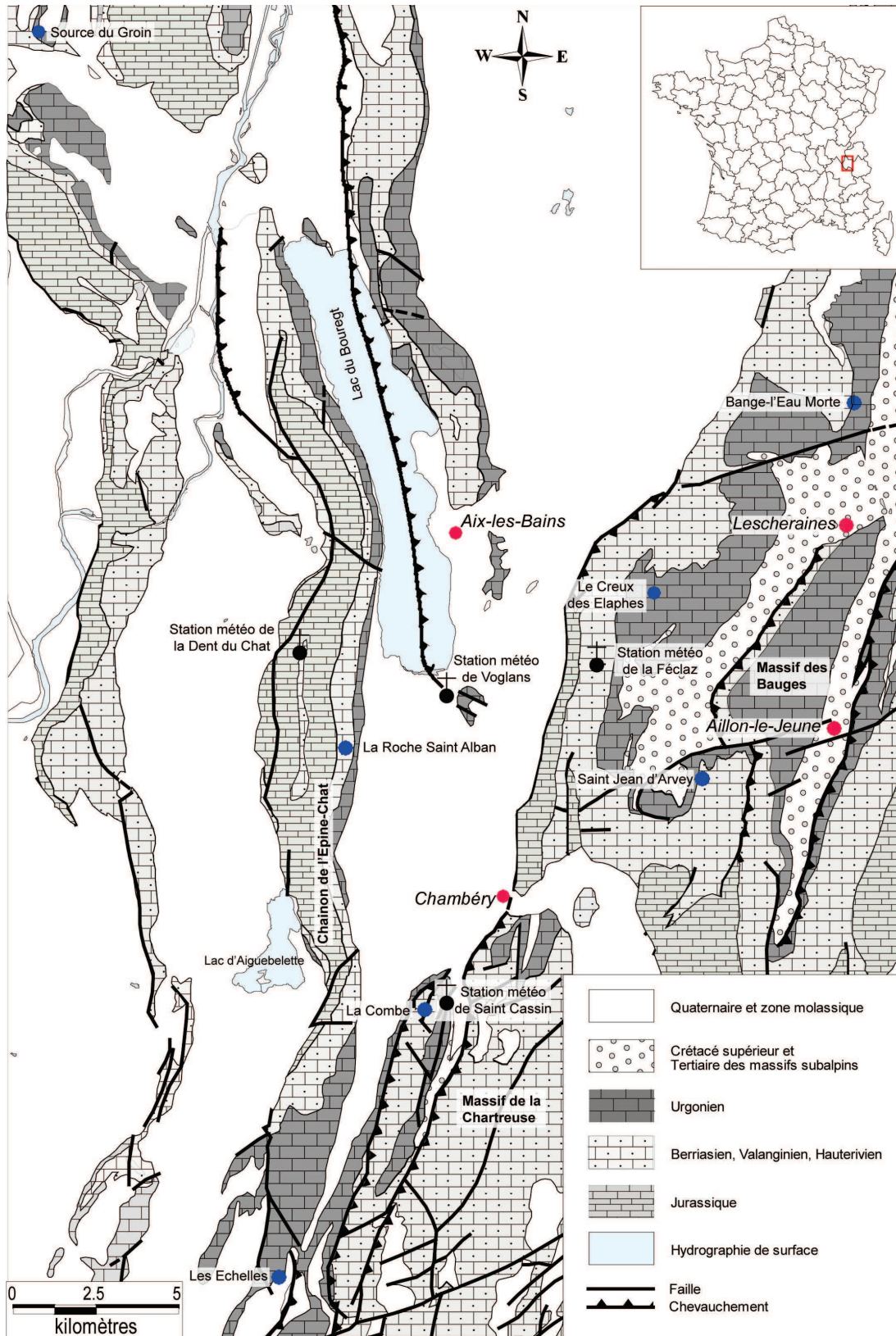


FIGURE 2.2 – Schéma structural de la zone d'étude et localisations des sites d'étude