SIVU Massif du Pibeste-Aoulhet
2bis avenue du Lavedan
Maison de la réserve
65400 Agos-Vidalos

ETUDE HYDROGEOMORPHOLOGIQUE DES RESEAUX HYDROGRAPHIQUES SUPERFICIELS ET SOUTERRAINS DE LA RESERVE NATURELLE REGIONALE DU MASSIF DU PIBESTE-AOULHET (65)

RAPPORT DE SYNTHESE

CETRA
12, rue de l'artisanat
64 110 LAROIN
05 59 11 00 60
Courriel : scp.cetra@wanadoo.fr

REFERENCES CETRA : 1121_HGEO_65_Pibeste_SIVU		
Date de Révision	Nature de la Modification	Indice de Révision
28/10/2021	Version initiale	0
26/11/2021	1ère Version	1
14/02/2022	Prise en compte des échanges avec la RNR	2

	Rédacteur	Vérificateur
Date	*15/06/2021*	
Nom et Prénom	*Magnet Jean Luc*	

TABLE DES MATIERES

1 Objet ... 6
2 Localisation ... 7
3 Contexte topographique ... 10
4 Hydrographie ... 19
5 Contexte géologique ... 28
5.1 Données et bibliographie ... 28
5.2 Description des terrains affleurant – Stratigraphie ... 29
5.3 Le cadre structural ... 43
5.4 L'histoire géologique ... 49
6 Quaternaire / Glaciations ... 53
6.1 Données et bibliographie ... 53
6.2 Histoire géologique du Quaternaire et des glaciations ... 54
7 Karstologie ... 65
7.1 Quelques notions générales sur le karst ... 67
7.2 Le karst, une évolution liée à l'histoire géologique, tectonique et climatologique ... 68
7.3 La morphologie du karst ... 70
8 Hydrogéologie ... 77
8.1 Données et bibliographie ... 77
8.2 Quelques définitions ... 78
8.3 Cartographie des masses d'eau et des formations aquifères ... 79
8.4 Recensement des sources ... 88
8.5 Vulnérabilité ... 90
8.6 Apport des traçages ... 93
8.7 Qualité des eaux ... 96
8.8 Synthèse hydrogéologique ... 103
8.9 Réflexions sur les impacts liés au changement climatique ... 105
9 Propositions d'actions à mener ... 115

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 – Localisation de la zone d'étude sur fond de SCAN1000, échelle : 1/1 000 000 ... 8
Figure 2 – Localisation des sites sur fond de SCAN100, échelle : 1/125 000 ... 8
Figure 3 – Localisation sur fond de SCAN25 avec les limites de communes, échelle : 1/125 000 ... 9
Figure 4 – Profil altimétrique d'une coupe Sud – Nord sur les Pyrénées françaises ... 10
Figure 5 – Topographie, échelle : 1/80 000 ... 11
Figure 6 – Précision du MNT 5m, échelle : 1/200 000 ... 12
Figure 7 – Relief : Vue 3D depuis le nord-nord-est ... 12
Figure 8 – Valeur des pentes (%), échelle : 1/125 000 ... 13
Figure 9 – Valeur des pentes (%), échelle : 1/125 000 ... 14
Figure 10 – Valeur des pentes (%), échelle : 1/10 000 ... 14
Figure 11 – Exposition des versants, échelle : 1/125 000 ... 15
Figure 12 – Caractéristiques du relief, échelle : 1/80 000 ... 16

Figure 13 – Morphologie : Vue 3D depuis le nord 17
Figure 14 – Morphologie : Vue 3D depuis le sud 17
Figure 15 – Différence de résultats suivant la valeur des paramètres de traitement, échelle : 1/50 000 18
Figure 16 – Cours d'eau (au sens général) de la BDTopo, échelle : 1/50 000 20
Figure 17 – Cartographie des cours d'eau en Hautes-Pyrénées (au sens réglementaire), sans échelle 21
Figure 18 – Cartographie des cours d'eau en Pyrénées-Atlantiques (au sens réglementaire), sans échelle 22
Figure 19 – Cartographie des QMNA5 moyens (IRSTEA 2011), échelle : 1/80 000 23
Figure 20 – Cartographie des MODULES moyens (IRSTEA 2011), échelle : 1/80 000 24
Figure 21 – Cartographie des QMNA5 moyens corrigés (AEAG, IRSTEA 2015), échelle : 1/125 000 25
Figure 22 – Cartographie des MODULES moyens corrigés (AEAG, IRSTEA 2015), échelle : 1/125 000 25
Figure 23 – Bassins versants topographiques principaux, échelle : 1 :80 000 27
Figure 24 - Emprise des cartes géologiques imprimées du BRGM, échelle graphique 28
Figure 25 – Exemple d'environnements de formation (milieux de dépôt) de quelques roches présentes sur la zone d'étude (Tournepiche 1999, *in* Salomon 2000 cf. partie Karst) 30
Figure 26 – Coupe stratigraphique des terrains paléozoïques du Pic de Navaillo (GéolVal, 09/2011) 33
Figure 27 – Coupe stratigraphique du Bathonien du Soum de Granquet (V. James, 1998) 35
Figure 28 – Stratigraphie de la zone d'étude (BRGM 1986) 37
Figure 29 – Stratigraphie de la zone d'étude selon Cloix (2017) et Labaume et al. (2020) 38
Figure 30 – Stratigraphie de la zone d'étude avec systèmes pétrolier selon Salardon (2016) 39
Figure 31 – Echelle chronostratigraphique (BRGM) 40
Figure 32 - Cartographie géologique harmonisée des Hautes-Pyrénées et Pyrénées-Atlantiques, échelle 1/50 000 41
Figure 33 – Légende de la carte géologique harmonisée 42
Figure 34 – Grandes unités structurales de la chaîne pyrénéenne (Canérot 2008), échelle graphique 43
Figure 35 – Coupe structurale de la chaîne pyrénéenne (Canérot 2008), échelle graphique 43
Figure 36 – Grandes unités structurales sur fond de cartes géologiques, échelle 1/200 000 44
Figure 37 – Schéma structural de la zone d'étude, (Synthèse géologique des Pyrénées1996-2018), échelle graphique 44
Figure 38 – Schéma structural de la zone d'étude, (Labaume et al., 2020), échelle 1/150 000 45
Figure 39 – Pli synclinal, pli anticlinal (J. Bauer 2008, cf. paragraphe Karstologie) 46
Figure 40 – Localisation des coupes géologiques, échelle 1/80 000 47
Figure 41 – Coupe GéolVal selon Y. Godechot, 2004, partie occidentale de la zone d'étude 48
Figure 42 – Coupe S4, partie centrale de la zone d'étude, selon Labaume et al. (2020) 48
Figure 43 – Coupe B1, partie orientale de la zone d'étude selon BRGM, 1986. 49
Figure 44 – 3 exemples de modèles de cinématique de la plaque Ibérique (Salardon 2016). 51
Figure 45 – Evolution structurale selon Labaume et al. 2020 52
Figure 46 – Cycles de Milankovitch (ENS Lyon, Univ Lyon) 54
Figure 47 – Relations entre volume des glaces et les cCycles de Milankovitch (ENS Lyon, Univ Lyon) 55
Figure 48 – Périodes glaciaires à travers les temps géologiques (CNRS, Université de Savoie) 55
Figure 49 – Esquisse du Quaternaire (BRGM, IGME) 56
Figure 50 – Datation des évènements glaciaires du Würm et psot-Würm (M. Mardones, 1982) 57
Figure 51 – Evolution du glacier de Lourdes selon M. Mardones 1982 58
Figure 52 – Extension des glaciers pyrénéens au Quaternaire (d'après M. Calvet 2004 modifié, BRGM – IGME) 58
Figure 53 – Légende de la Figure 52 59
Figure 54 – Evolution des apports issus du glacier de Lourdes, échelle graphique 60
Figure 55 – Cartographie au 400 000ème vectorisée du Quaternaire, échelle : 1/125 000 61
Figure 56 – Géologie, géomorphologie du Quaternaire selon M. Mardones 1982 62
Figure 57 – Légende de la Figure 56 62
Figure 58 – Localisation des différents types de reliefs karstiques résiduels, échelle 1/200 000 63
Figure 59 – Le paléo-poljé de la Batsurguère (T. Auly, 2008) 64
Figure 60 – Le système karstique (in E. Husson 2013, modifié d'après Ford & Williams, 1989) 67
Figure 61 – Les variations du niveau de base 70
Figure 62 – Morphologie et terminologie du karst (modifié d'après Mangin, *in* Valois 2011) 71
Figure 63 – Bloc diagramme du secteur Soum de Conques et col d'Espades (CDSC65) 74
Figure 64 – Eléments morphologiques du karst, échelle : 1/80 000 76
Figure 65 – Cartographie des masses d'eau de niveau 1 du secteur d'étude, sans échelle. 80
Figure 66 – Cartographie des masses d'eau de niveau 2 du secteur d'étude, sans échelle. 80
Figure 67 – BDLISAv2, Unités aquifères, échelle : 1/100 000 81
Figure 68 – BDLISAv2, Entités hydrogéologiques de niveau national, échelle : 1/100 000. 82

Figure 69 – BDLISAv2, Entités hydrogéologiques de niveau régional, échelle : 1/100 000. 83
Figure 70 – BDLISAv2, Extension de l'entité hydrogéologique "Chaînons calcaires du Secondaire de Durban-Bétharram", échelle : 1/200 000. 83
Figure 71 – BDLISAv2, Types de porosité des entités hydrogéologiques, échelle : 1/100 000. 84
Figure 72 – BDLISAv2, Entités hydrogéologiques de niveau local, échelle : 1/100 000. 85
Figure 73 – Potentialités aquifères, échelle 1/80 000 86
Figure 74 – Potentiels aquifères des formations géologiques, selon BRGM 1986 87
Figure 75 – Relations hydrogéologiques inter-aquifères, selon BRGM 1986 87
Figure 76 – Recensement des sources principales, échelle : 1/100 000 88
Figure 77 – Recensement des pertes principales, échelle : 1/100 000 89
Figure 78 – Répartition de l'altitude des sources inventoriées 89
Figure 79 – IDPR (infoterre), échelle : 1/80 000. 91
Figure 80 – Vulnérabilité intrinsèque, échelle : 1/50 000 92
Figure 81 – Patrimoine naturel, préservation de l'eau, échelle : 1/100 000 92
Figure 82 – Traçages connus, échelle : 1/80 000 94
Figure 83 – Traçages connus sur fond de géologie harmonisée, échelle : 1/80 000 95
Figure 84 – Température moyenne de l'eau d'une source en fonction de son altitude. 100
Figure 85 – Inventaire des sources avec mesures de terrain, échelle : 1/50 000 101
Figure 86 – Diagramme Schöeller-Berkaloff de quelques sources du secteur d'étude 102
Figure 87 – Bassins versants hydrogéologiques supposés, échelle : 1/100 000 104
Figure 88 – Méthodologie d'estimation de la pluie efficace 106
Figure 89 - Simulations à valeurs extrêmes sur mailles SAFRAN pour l'horizon 2030 107
Figure 90 - Simulations à valeurs extrêmes sur masses d'eau souterraine pour l'horizon 2030 108
Figure 91 - Variabilité des valeurs moyennées en fonction des modèles climatiques pour l'horizon 2030 108
Figure 92 - Variabilité des valeurs moyennées en fonction des méthodes de régionalisation pour l'horizon 2030 109
Figure 93 - Variabilité des valeurs moyennées en fonction des méthodes de bilan hydrologique pour l'horizon 2030 109
Figure 94 - Variabilité des valeurs moyennées en fonction des scénarios d'émissions pour l'horizon 2030 110
Figure 95 - Variabilité des valeurs moyennées en fonction des scénarios d'émissions pour l'horizon 2050 110
Figure 96 - Variabilité des valeurs moyennées en fonction des scénarios d'émissions pour l'horizon 2080 111
Figure 97 - Résultats des simulations pour les masses d'eau présentes sur la zone d'étude pour les 3 horizons. 111
Figure 98 - Evolution des débits sur le Gave de Pau à Saint-Pé à l'horizon 2055 selon le projet Adour 2050... 113

Liste des Tableaux :

Tableau 1 – Communes concernées 7
Tableau 2 – Pentes issues du MNT 13
Tableau 3 – Orientations des versants issues du MNT 15
Tableau 4 – Synthèse des processus de karstification et formes engendrées (E. Husson, 2016) 68
Tableau 5 – Phases de karstification sur le massif des Arbailles depuis la fin du Jurassique (R. Maire et N. Vanara, 2008) 69
Tableau 6 – Types de porosité d'un aquifère 79
Tableau 7 – Mesures de terrain sur les sources du secteur du Pibeste 98
Tableau 8 – Mesures de terrain sur les sources du secteur de Saint-Pé 98
Tableau 9 – Données bibliographiques sur les sources principales de la zone d'étude 99

Annexes

Annexe 1 : Coupes géologiques et colonnes stratigraphiques 120
Annexe 2 : Rapport de l'opération de traçage au gouffre de Pladi 140

1 OBJET

Le SIVU Massif du Pibeste-Aoulhet créé en 1990 gère la réserve naturelle régionale du massif du Pibeste-Aoulhet et le site Natura 2000 "Granquet, Pibeste et Soum d'Ech". Dans son plan de gestion pour 2016-2020, l'objectif à long terme OLTE est défini comme : "Préserver les objets géologiques de surface et souterrains et maintenir les conditions écologiques souterraines propres à l'accueil des taxons cavernicoles et spécifiques". Dans ce cadre l'opération SE18 doit permettre de réaliser l'objectif du plan de gestion OPG E1 : Se mettre en capacité d'évaluer la valeur du patrimoine souterrain, sa fonctionnalité et la responsabilité de la RNR. Cette opération de priorité 2 "Importante" correspond à la réalisation d'une étude hydro-géomorphologique des cours d'eau de surface et souterrains.

Le bureau d'études CETRA a proposé une méthodologie pour présenter le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique d'une zone d'étude qui englobe l'emprise de la Réserve Naturelle Régionale et du site Natura 2000. Cette méthodologie est basée sur une analyse de documents existants et sur des investigations de terrain qui comprennent notamment un traçage des écoulements souterrains.

Ce rapport de phase 4 concerne la synthèse des données recueillies et analysées et des investigations réalisées sur le terrain. Il présente notamment les contextes topographiques, hydrographiques, géologiques et hydrogéologiques. La dernière partie concerne des propositions de mise en place d'actions dont l'objet est l'approfondissement des connaissances du fonctionnement hydrologique du secteur d'étude. De nombreuses données ont été intégrées à un SIG (Système d'Information Géographique) réalisé à l'aide du logiciel QGIS (version 3.16).

Les écoulements superficiels et souterrains sont étroitement liés à l'histoire géologique ancienne et récente de la zone d'étude. C'est pourquoi le paragraphe traitant de la géologie fait l'objet d'une synthèse assez développée des données que nous avons pu collecter.

Nous remercions le personnel du SIVU Massif du Pibeste-Aoulhet et les spéléologues du CDSC65 qui nous ont apportés leur aide pour les missions de terrain.

Les fonds cartographiques des figures présentées dans la suite de ce rapport sont issus des données libres de l'IGN, sauf mention contraire.

2 LOCALISATION

La réserve naturelle régionale du Pibeste-Aoulhet et le site Natura 2000 du Granquet-Pibeste et Soum d'Ech se situent entre Lourdes et Argelès-Gazost dans le département des Hautes-Pyrénées (65) et en limite du département des Pyrénées-Atlantiques (64) (Figure 1 et Figure 1Figure 2).

L'emprise de la réserve est d'environ 51 km² et celle du site Natura 2000 de l'ordre de 72 km².

Pour des raisons d'homogénéité du contexte physique avec des limites cohérentes, la zone étude possède une emprise d'environ 161 km² à cheval sur les deux départements, dont les limites correspondent (Figure 3) : à la rivière le Gave de Pau au Nord et à l'Est, à la rivière l'Ouzom à l'Ouest et à la rivière Le Bergons au Sud.

Les communes dont tout ou partie de leur territoire est dans l'emprise de la zone d'étude sont :

Tableau 1 – Communes concernées

Nom commune	Département	SIVU	Emprise zone d'étude	Emprise RNR	Emprise Natura 2000
Arthez d'Asson	Pyrénées-Atlantiques		X		
Asson	Pyrénées-Atlantiques		X		
Ferrières	Hautes-Pyrénées		X		X
Aucun	Hautes-Pyrénées		X		
Salles	Hautes-Pyrénées	X	X	X	X
Ouzous	Hautes-Pyrénées	X	X	X	X
Ayzac-Ost	Hautes-Pyrénées		X		
Agos-Vidalos	Hautes-Pyrénées	X	X	X	X
Viger	Hautes-Pyrénées	X	X	X	X
Aspin en Lavedan	Hautes-Pyrénées		X		
Lourdes	Hautes-Pyrénées		X		X
Ossen	Hautes-Pyrénées	X	X	X	X
Ségus	Hautes-Pyrénées	X	X	X	X
Omex	Hautes-Pyrénées	X	X		X
Saint Pé de Bigorre	Hautes-Pyrénées	X	X	X	X
Sère en Lavedan	Hautes-Pyrénées	X			

Les données utilisées pour la cartographie sont :

Données acquises	**Utilisation**	**Remarques**
IGN : SCAN25, SCAN 100, SCAN1000, Orthophotographies	Données de base du fond cartographique du SIG	Données libres
Données du cadastre : cadastre.data.gouv.fr	Données de base du fond parcellaire du SIG	Données libres

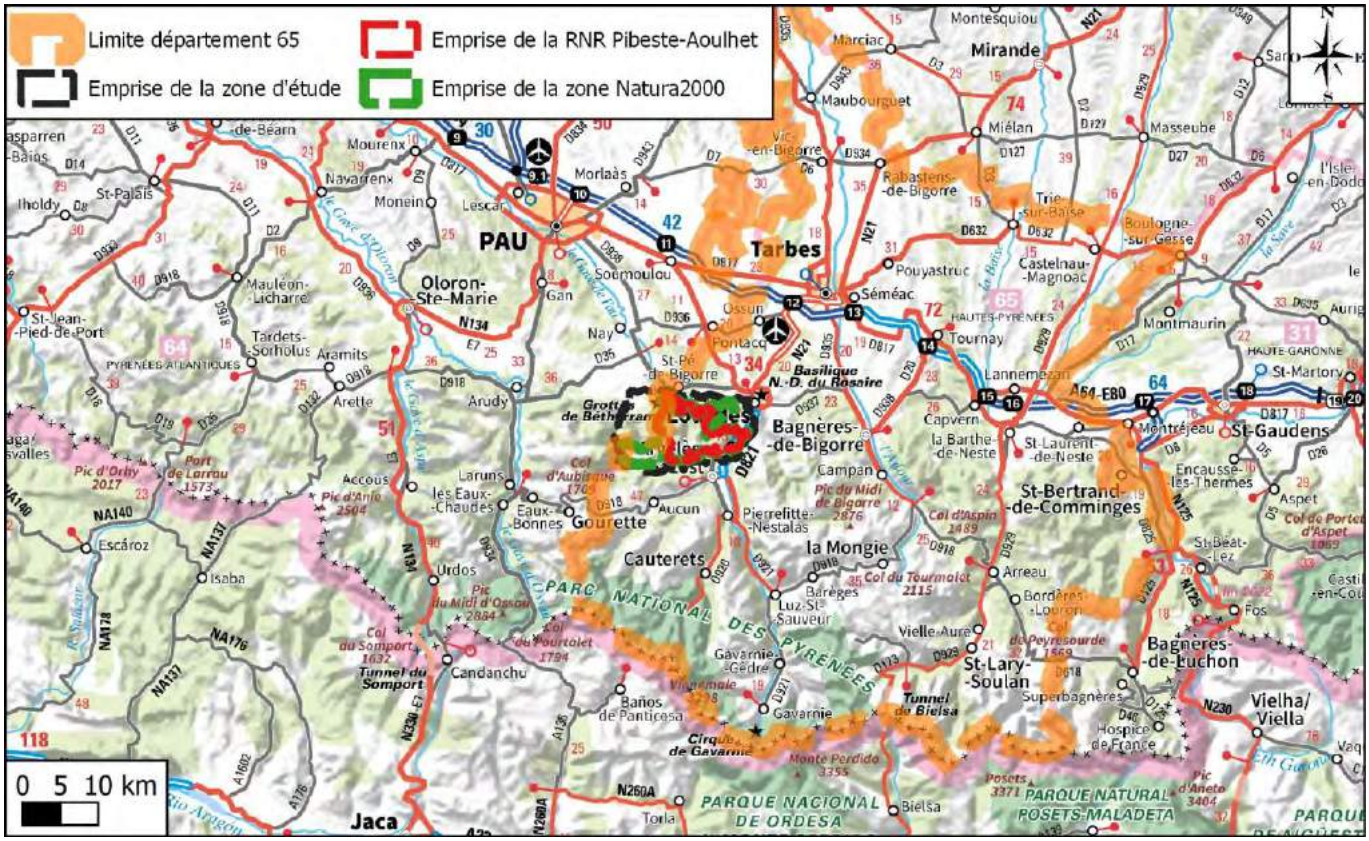


Figure 1 – Localisation de la zone d'étude sur fond de SCAN1000, échelle : 1/1 000 000

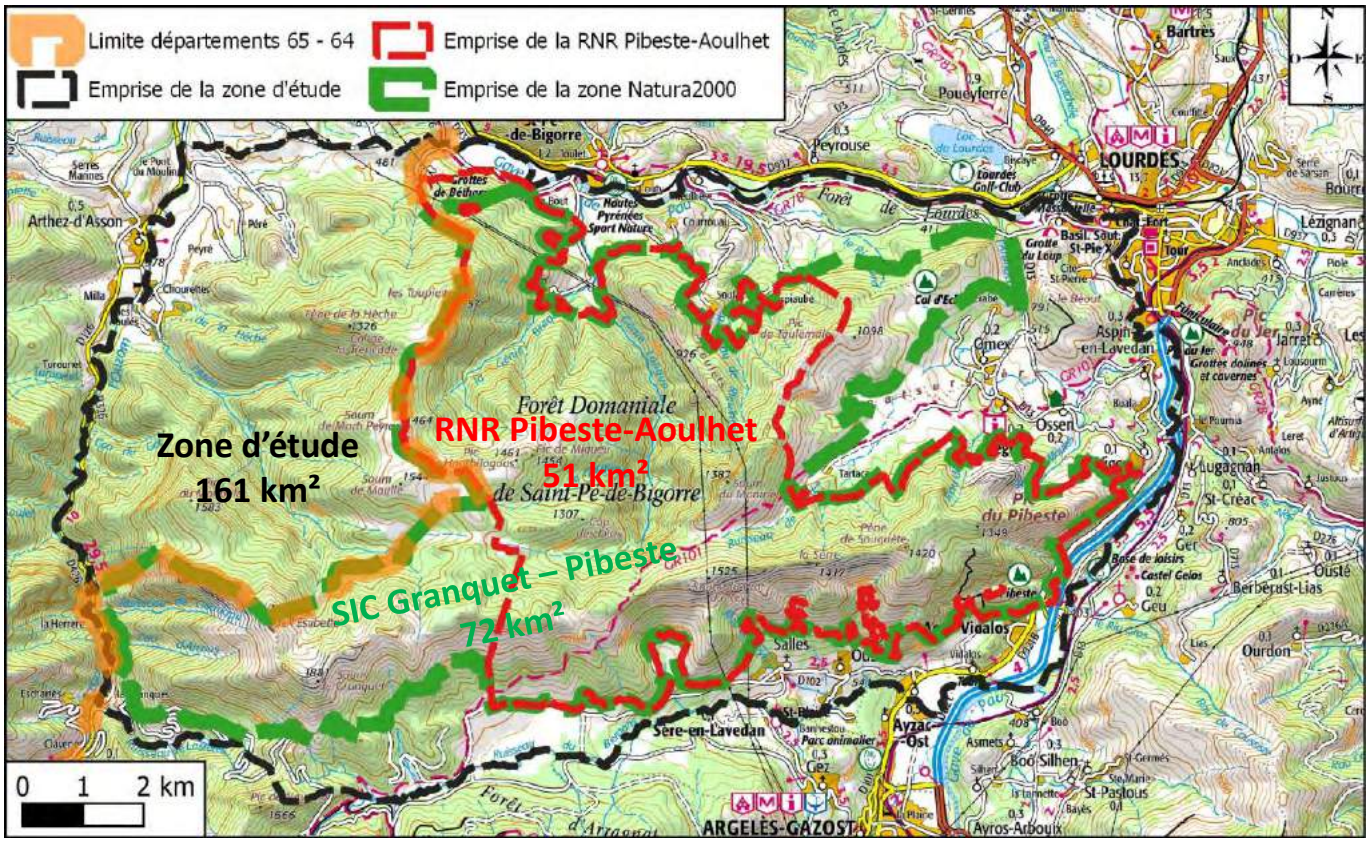


Figure 2 – Localisation des sites sur fond de SCAN100, échelle : 1/125 000

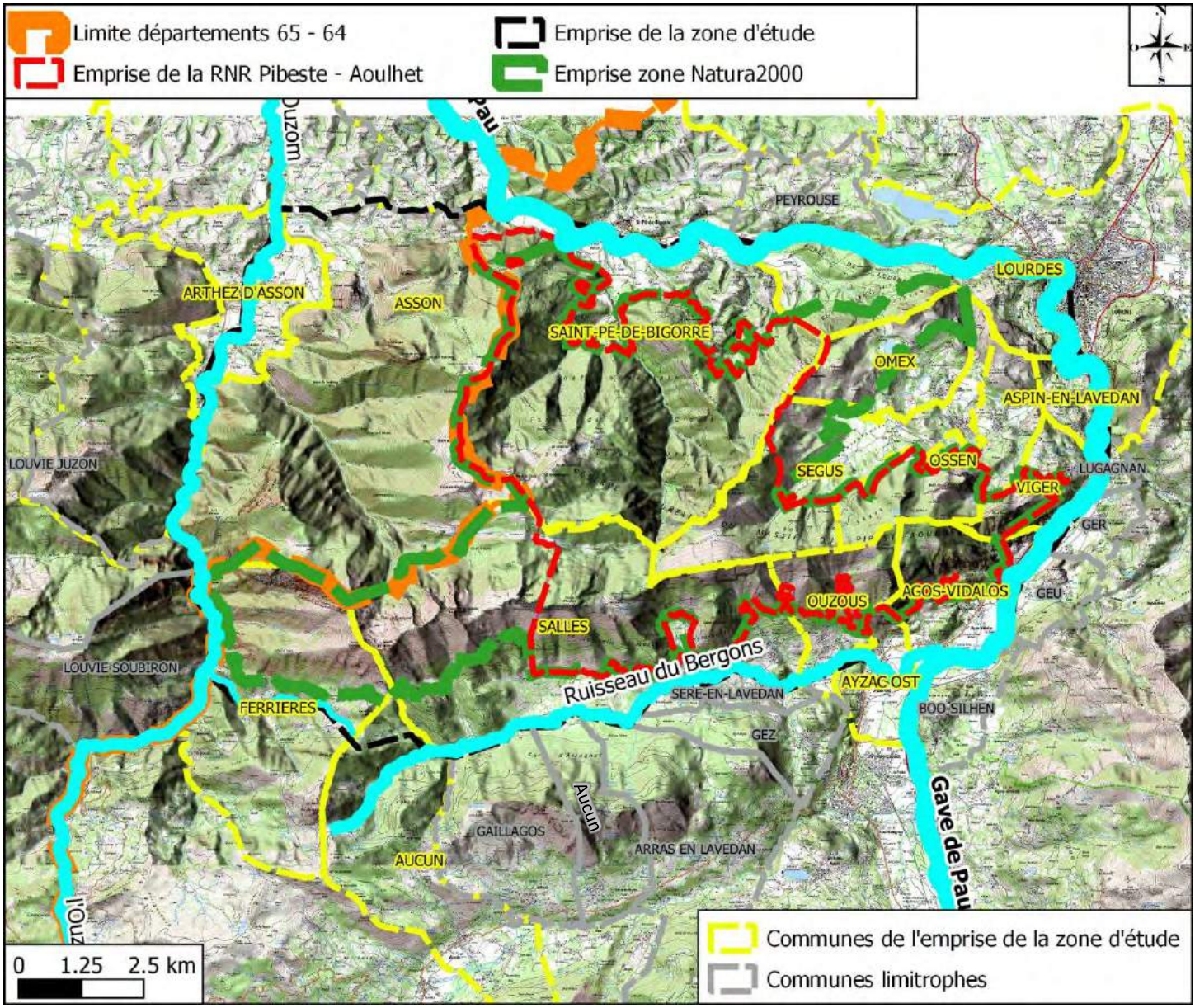


Figure 3 – Localisation sur fond de SCAN25 avec les limites de communes, échelle : 1/125 000

3 CONTEXTE TOPOGRAPHIQUE

La zone d'étude se situe à hauteur des premiers reliefs montagneux (Chainons calcaires du Béarn oriental et de la Bigorre occidentale, Figure 4). L'altitude varie entre 320 en bordure nord du Gave de Pau et 1881 m au Soum de Granquet (Figure 5).

Données acquises	Utilisation	Remarques
IGN : RGE ALTI MNT 5 m et RGE ALTI MNT 1 m	Données de base du fond topographique du SIG Données de base du traitement topographique et hydrologique	Données libres

Figure 4 – Profil altimétrique d'une coupe Sud – Nord sur les Pyrénées françaises

Les données au pas de 5 m ou de 1 m sur les dalles utilisées n'ont pas toutes la même précision altimétrique. Cette dernière est présentée en Figure 6 et nous constatons la forte disparité entre la bordure du Gave de Pau où le relevé Laser Topo apporte une très bonne précision (< 30 cm) alors que sur la zone centrale et sud du secteur d'étude le relevé RADAR apporte une précision bien moins bonne (entre 1 et 7 m). Il faudra donc suivre l'évolution du travail réalisé sur les dalles MNT concernées afin de mettre à jour ces données si la précision devait être améliorée ultérieurement

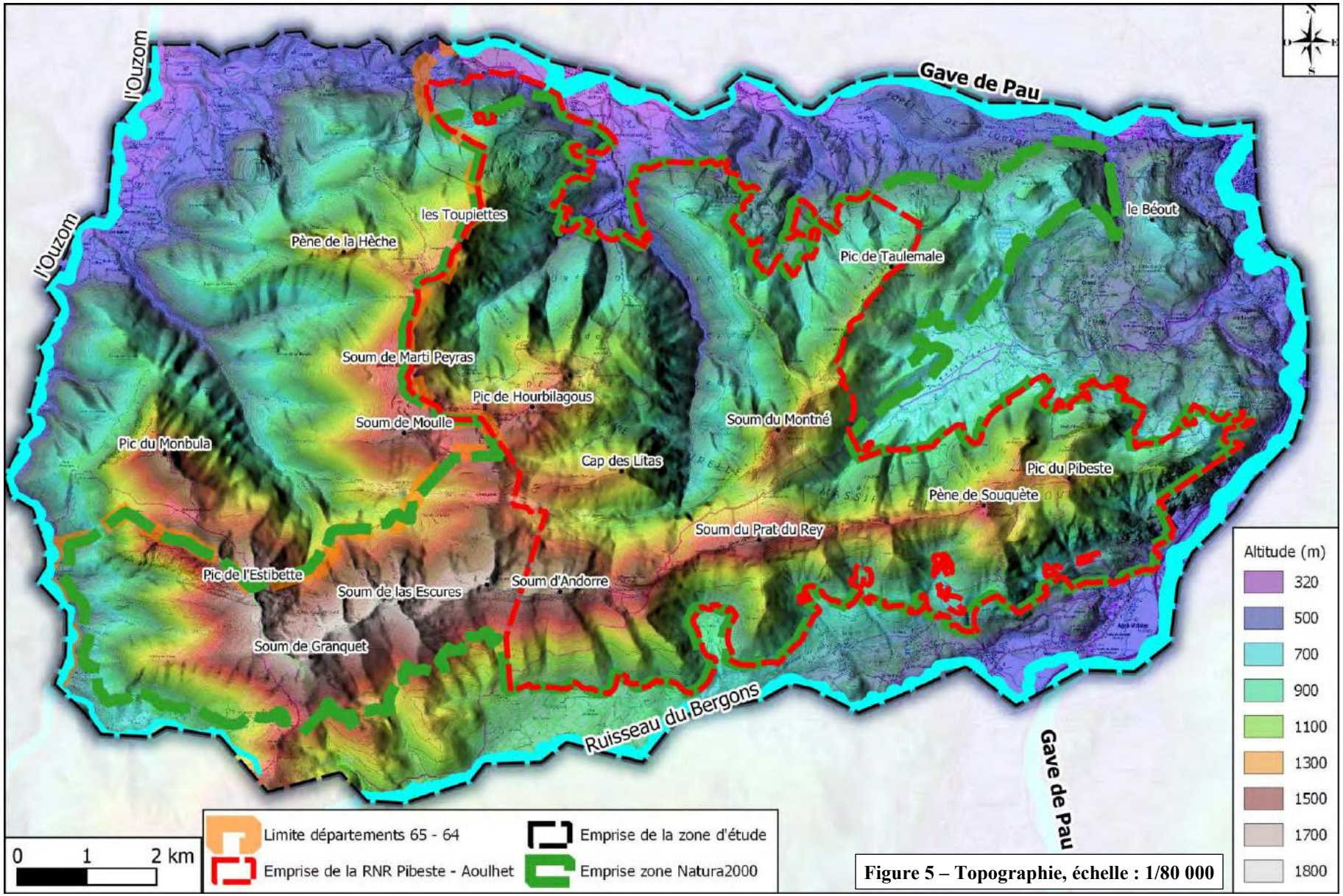


Figure 5 – Topographie, échelle : 1/80 000

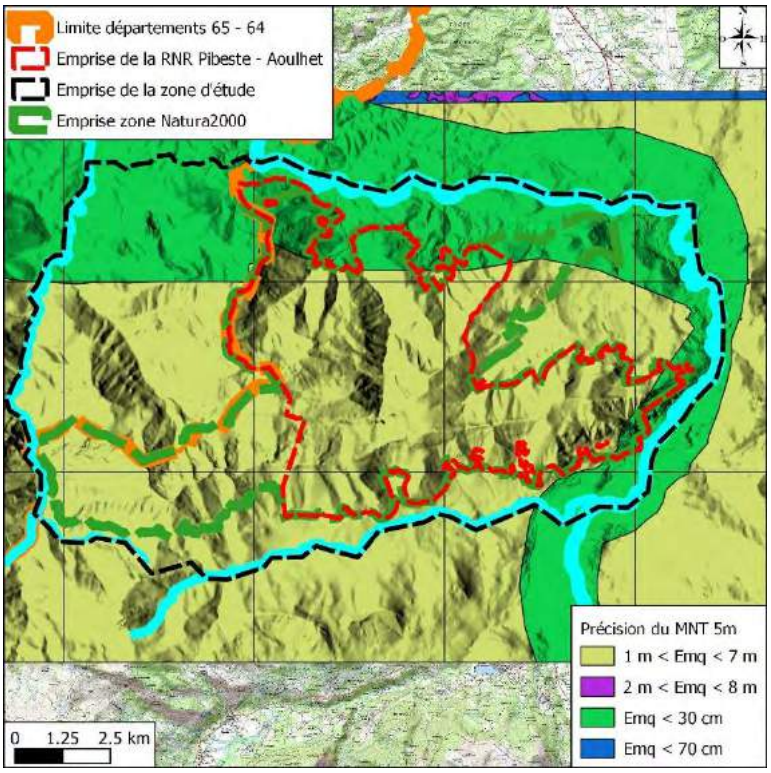


Figure 6 – Précision du MNT 5m, échelle : 1/200 000

Les vues 3D ont été réalisées à l'aide de l'extension Qgis2threejs dans QGIS v3.16.

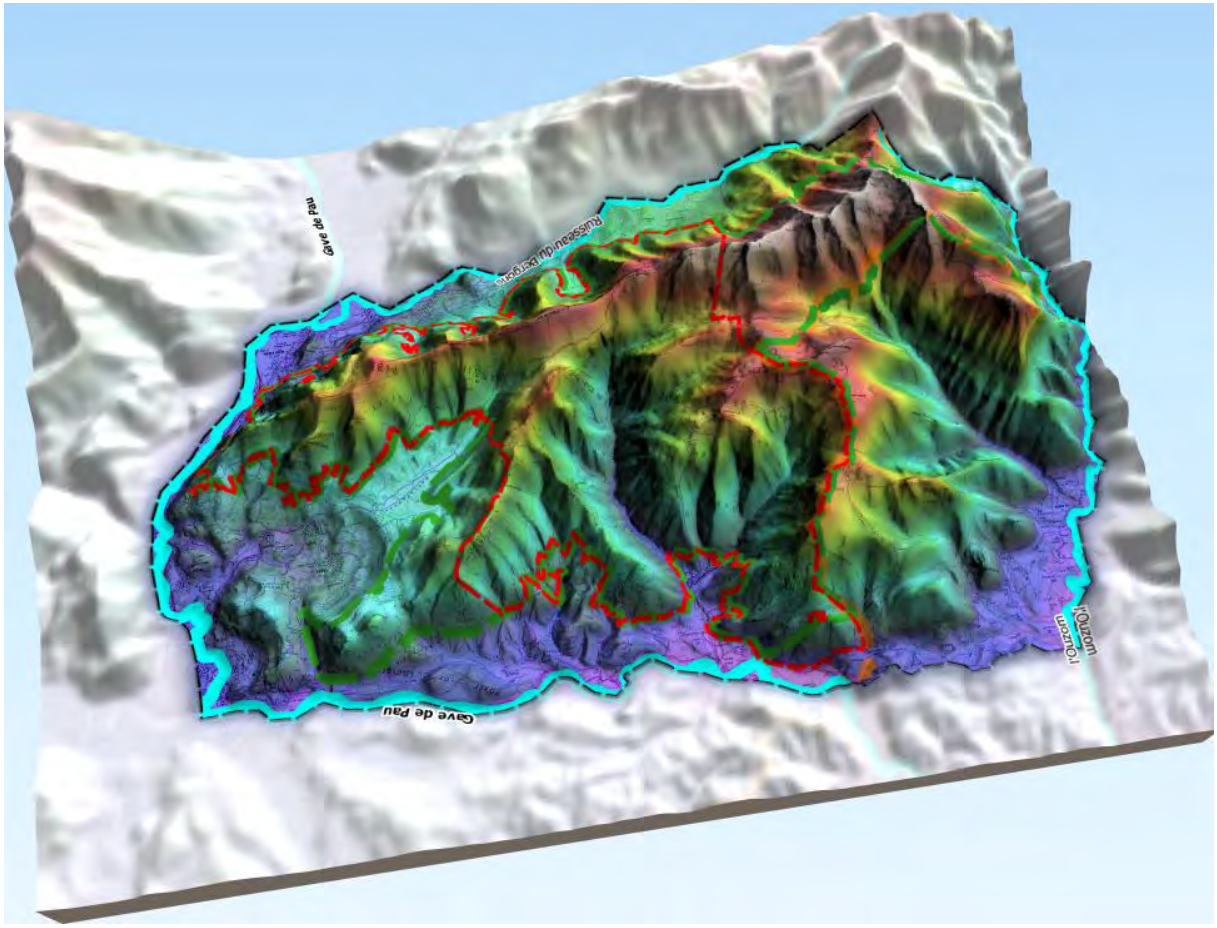


Figure 7 – Relief : Vue 3D depuis le nord-nord-est

Le traitement du MNT au pas de 5 m ou de 1 m par les outils mis à disposition dans QGIS a permis de cartographier les valeurs de pentes (en % sur les Figure 8 et Figure 9), les orientations des versants (Figure 11) et les principaux traits de la morphologie du relief (Figure 12).

La pente va jouer un rôle primordial dans le ruissellement. Dans cette zone de moyenne montagne, les pentes sont importantes, la pente moyenne est de 62 % sur la zone de la réserve naturelle. Les secteurs de pente faible sont très généralement situés hors emprise de la réserve ou de la zone Natura 2000, sur la périphérie de la zone d'étude, dans les vallées du Gave de Pau, du Bergons et de l'Ouzom mais également dans la vallée de la Batsurguère.

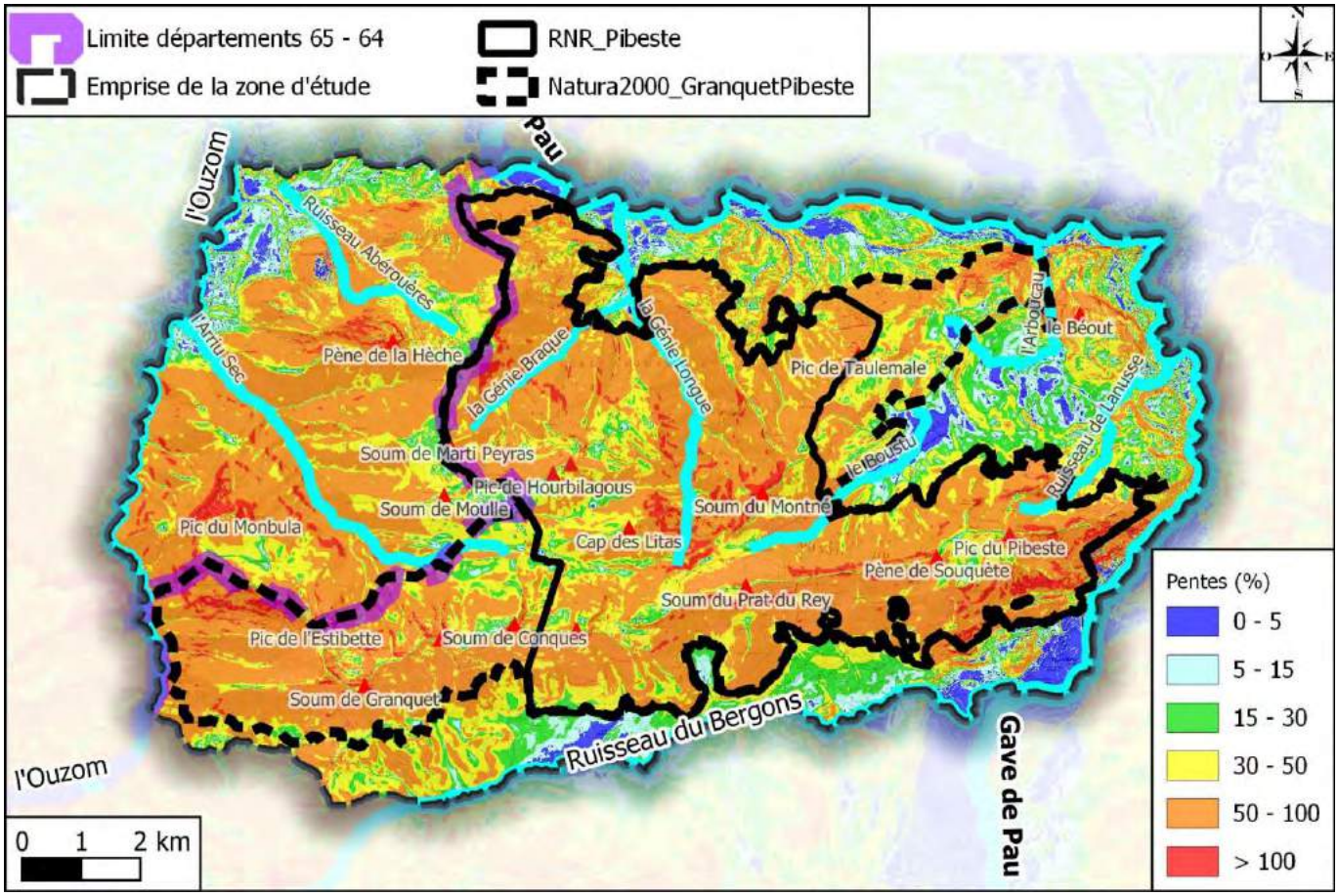


Figure 8 – Valeur des pentes (%), échelle : 1/125 000

Tableau 2 – Pentes issues du MNT

Pente (%)	0 – 5	5 - 15	15 - 30	30 - 50	50 – 100	> 100
Zone étude	4.5%	7.0%	12.0%	23.5%	49.4%	3.6%
RNR	0.1%	1.0%	5.2%	21.5%	66.5%	5.7%
Natura 2000	0.3%	1.4%	6.0%	22.8%	64.3%	5.3%

Localement, des pentes faibles peuvent être mises en évidence sur de petites emprises (Figure 10), par exemple les surfaces où les pentes sont inférieures à 5 % peuvent indiquer des secteurs propices au développement de zones humides (attention, le seul facteur pente ne suffit pas à individualiser des zones humides).

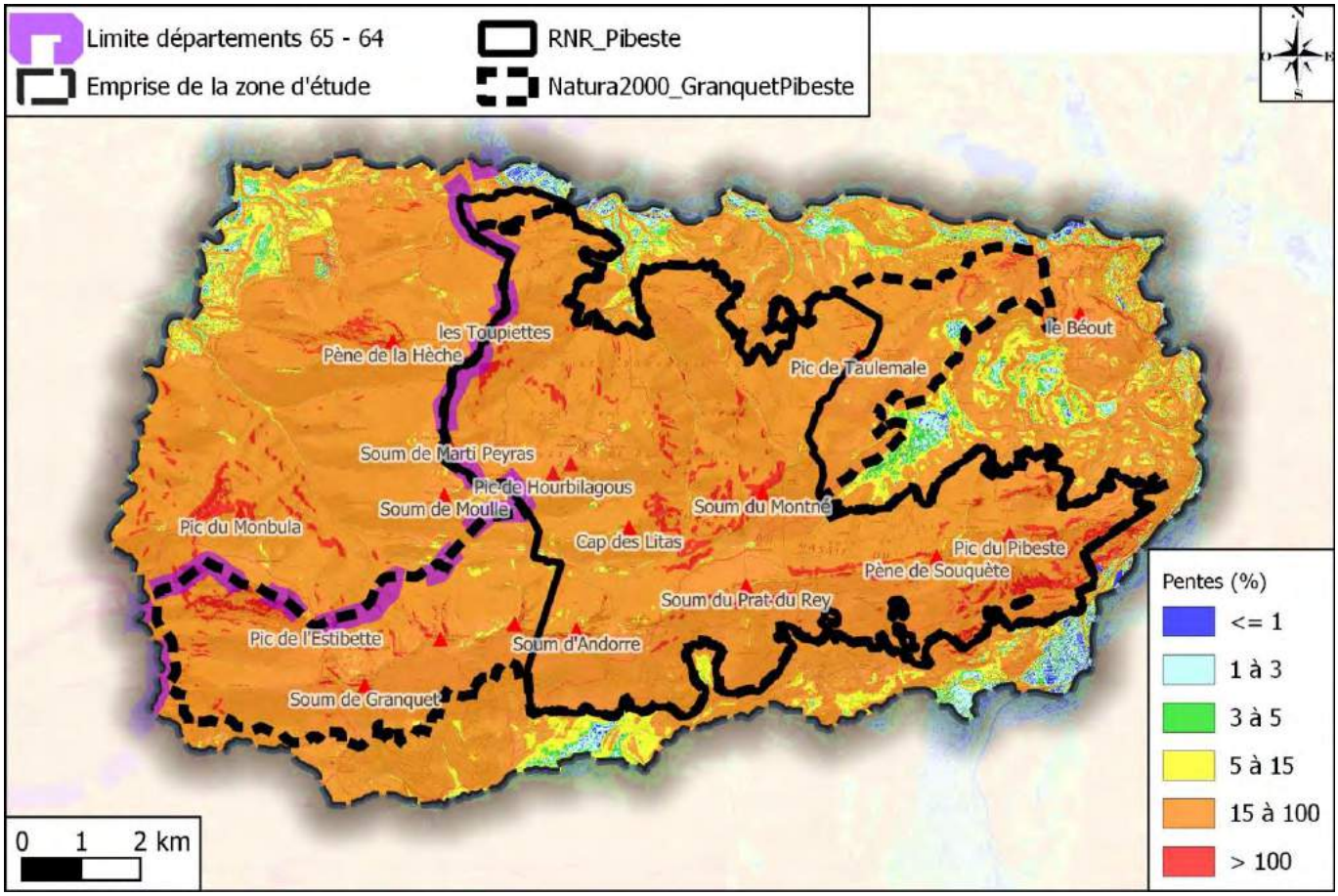


Figure 9 – Valeur des pentes (%), échelle : 1/125 000

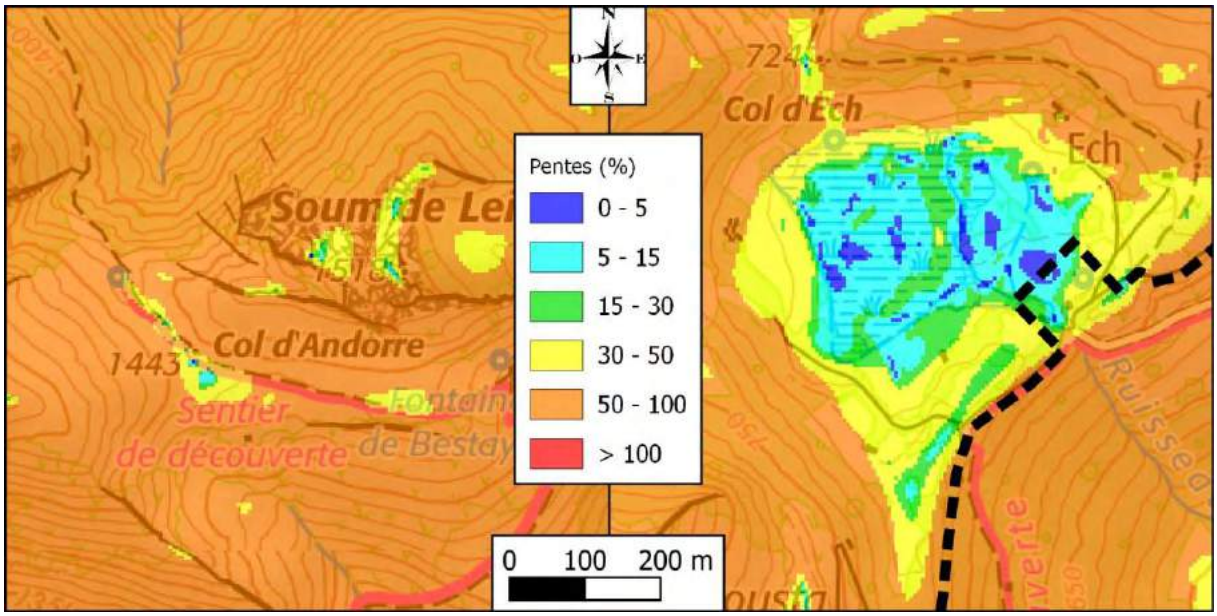


Figure 10 – Valeur des pentes (%), échelle : 1/10 000

Les orientations des versants peuvent avoir un rôle sur l'eau du sol, en favorisant l'évapotranspiration sur les versants soumis à un fort ensoleillement par exemple, sur la conservation plus longue d'accumulation de la neige et son relargage plus tardif sur les versants ombragés, …

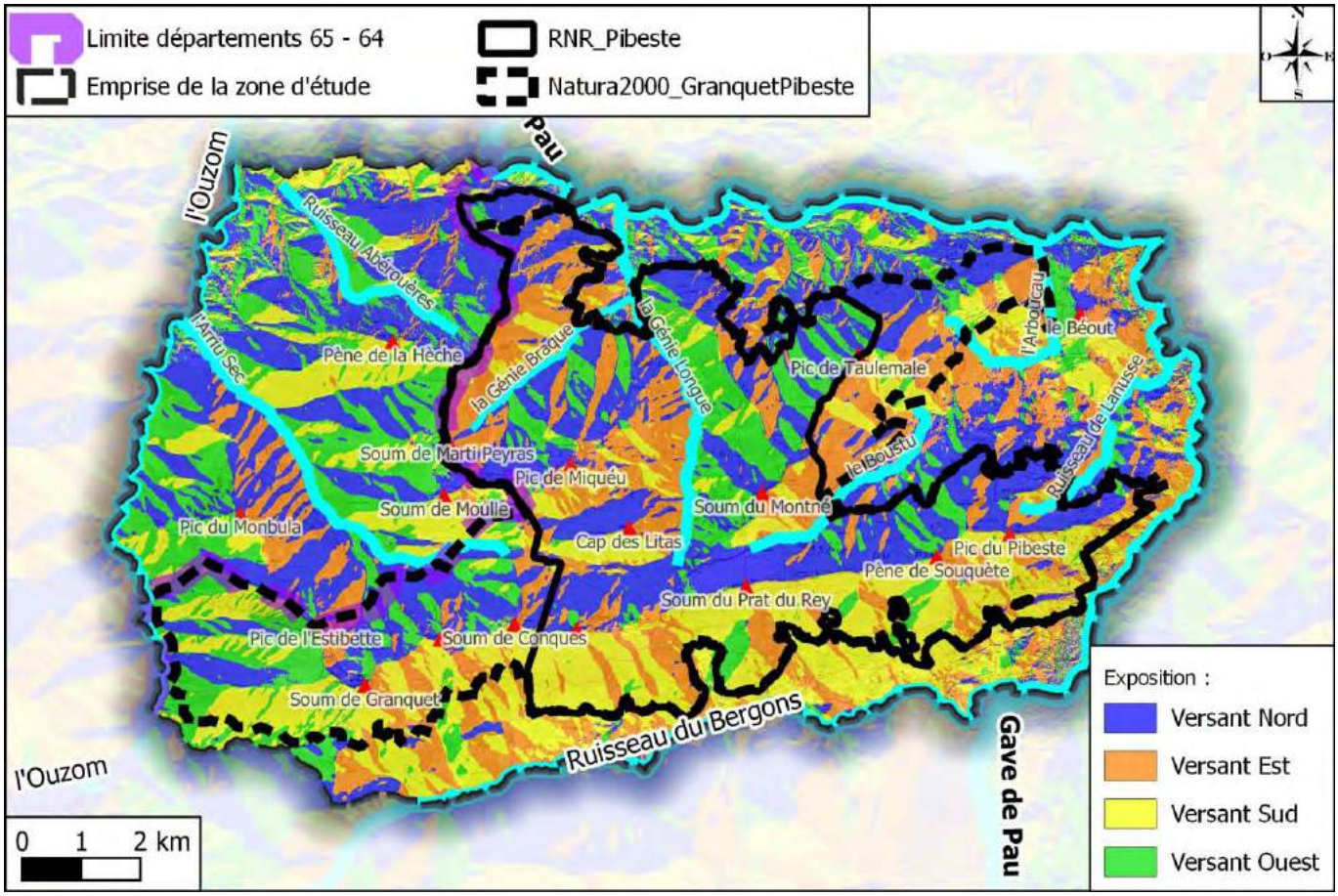


Figure 11 – Exposition des versants, échelle : 1/125 000

Tableau 3 – Orientations des versants issues du MNT

Orientation Versant	Nord	Est	Sud	Ouest
Zone étude	30.7%	23.6%	24.3%	21.4%
RNR	31.0%	28.0%	25.7%	15.3%
Natura 2000	29.8%	26.3%	26.2%	17.7%

Des outils de traitement du MNT permettent la description de la morphologie du relief : nous montrons une application avec l'outil « geomorphon » dans GRASS qui fait ressortir les principales caractéristiques du relief : crêtes, sommets, versants, talwegs, …

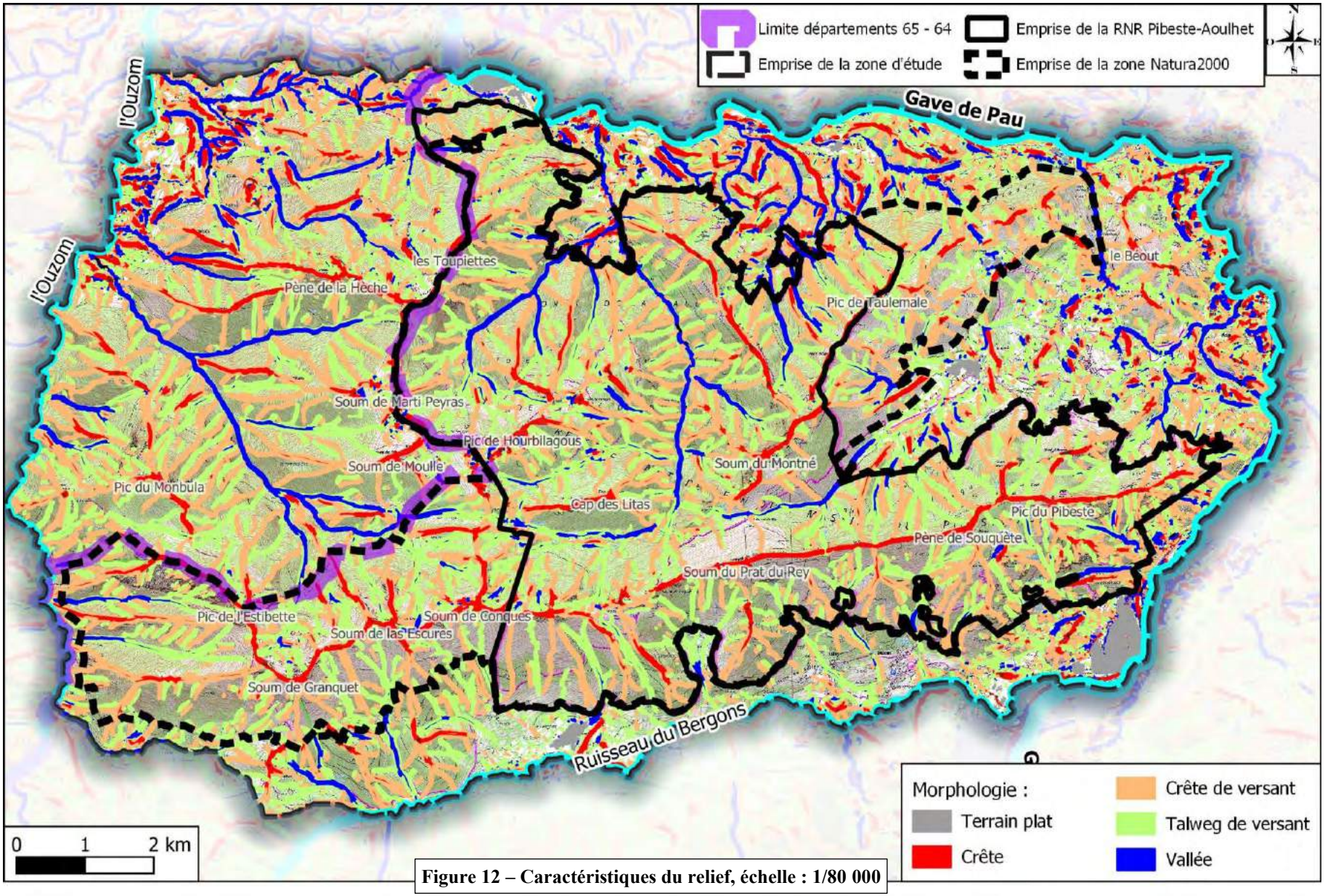


Figure 12 – Caractéristiques du relief, échelle : 1/80 000

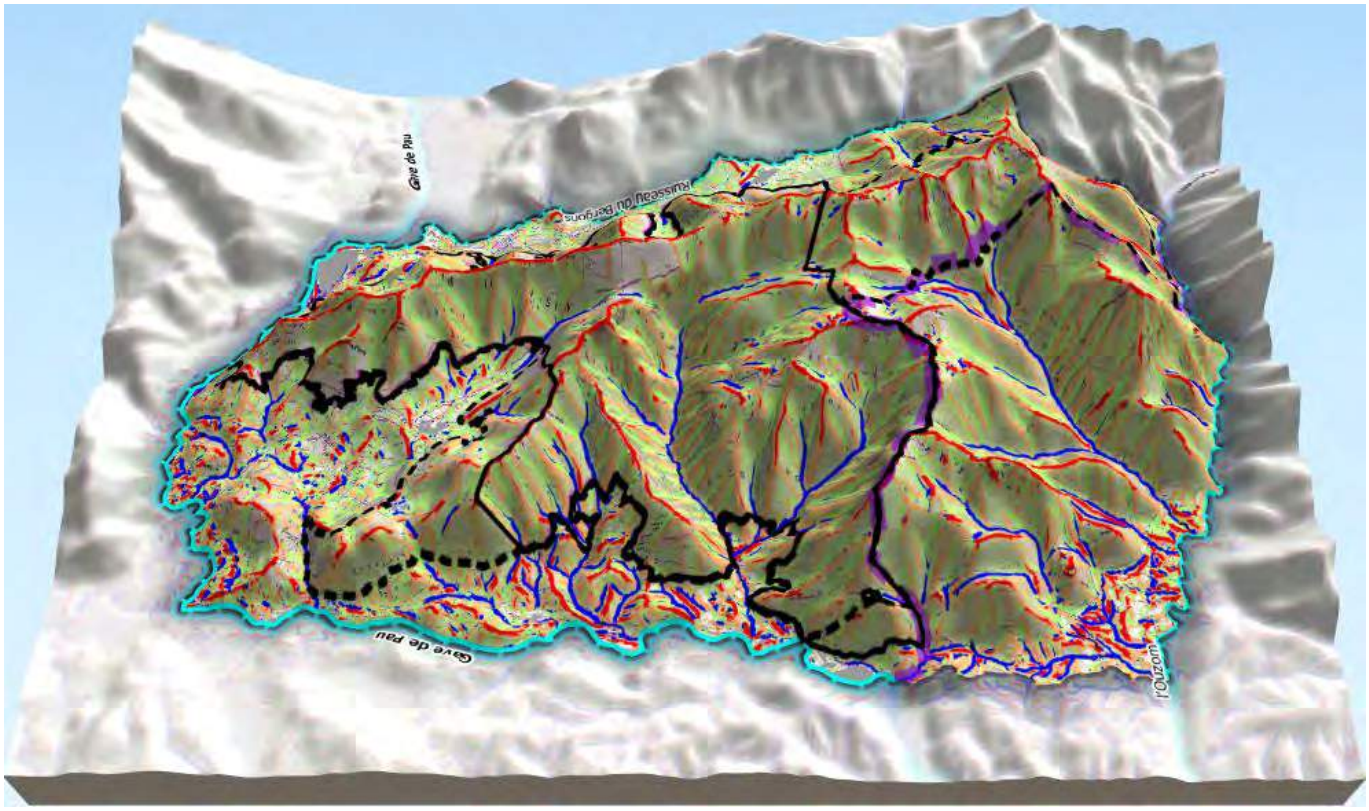


Figure 13 – Morphologie : Vue 3D depuis le nord

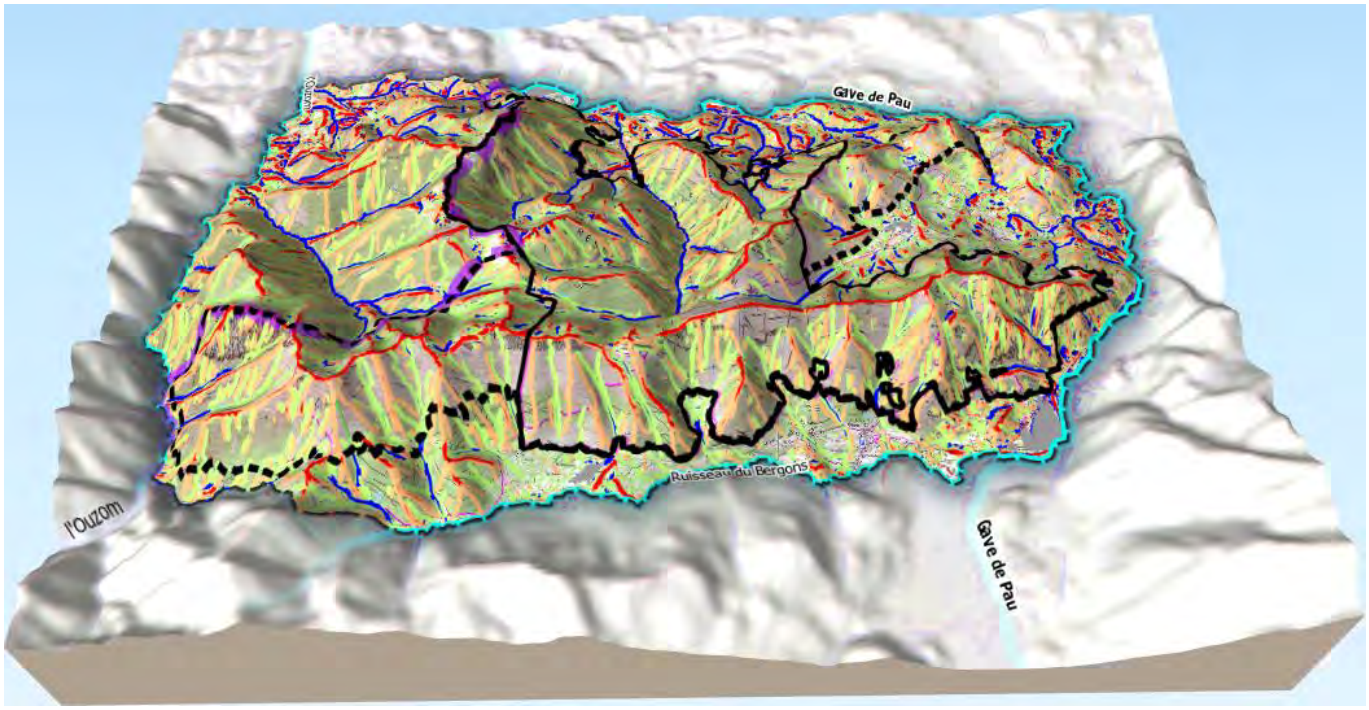


Figure 14 – Morphologie : Vue 3D depuis le sud

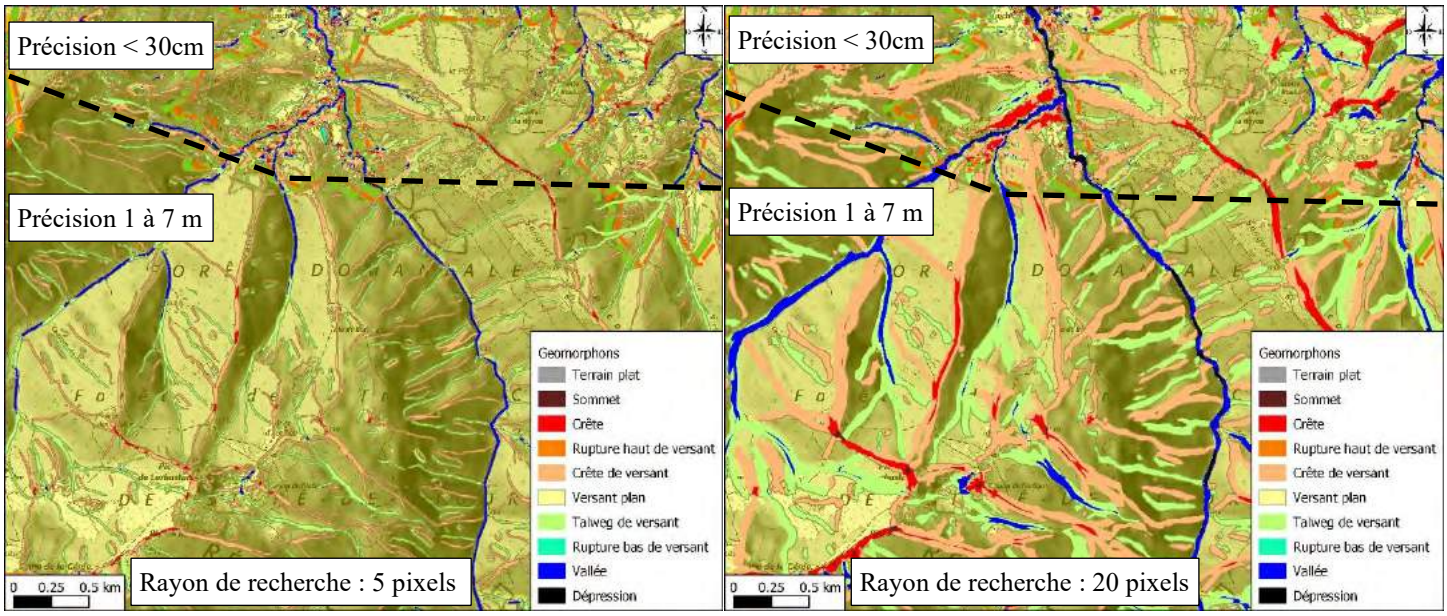


Figure 15 – Différence de résultats suivant la valeur des paramètres de traitement, échelle : 1/50 000

A partir d'une même donnée de base (RGE ALTI MNT 5m) la modification d'un paramètre de l'outil de traitement topographique (ici GRASS r.geomorphon) aboutit à des résultats sensiblement différents (par exemple, le rayon de recherche pour la Figure 15). De même la variation de la précision des données de la dalle du MNT va influencer le résultat (beaucoup plus de détails avec une bonne précision du MNT).

4 HYDROGRAPHIE

L'hydrographie est abordée à partir des bases de données accessibles et également par traitement du MNT 5m pour les caractérisations des lignes d'écoulements et la délimitation des bassins versants.

Données acquises	Utilisation	Remarques
BDTOPO de l'IGN	Cours d'eau, plan d'eau, tronçon hydrographiques, bassins versants principaux	Base de données qui évolue régulièrement
SIE de l'Agence de l'Eau Adour - Garonne	idem	
Site internet cartelie.application.developpement-durable.gouv.fr	Classification des cours d'eau pour les Hautes-Pyrénées	Base de données qui évolue régulièrement
Site internet carto.geo-ide.application.developpement-durable.gouv.fr	Classification des cours d'eau pour les Pyrénées-Atlantiques	Base de données qui évolue régulièrement
RGE ALTI MNT 5 m	Traitement outils hydrologiques	Précision

La Figure 16 présente les cours d'eau selon la BDTopo de l'IGN. Les principaux cours d'eau qui font la limite de la zone d'étude sont : le Gave de Pau à l'Est et au Nord, le ruisseau du Bergons au Sud et le ruisseau L'Ouzom à l'Est. A l'intérieur de la zone d'étude, les principaux cours d'eau sont d'Ouest en Est : l'Arriu Sec, la Génie Braque, la Génie Longue, le ruisseau de Rieulhès, le ruisseau du Boustu puis l'Arboucau et enfin l'Arrieu Long et le ruisseau de Lannusse.

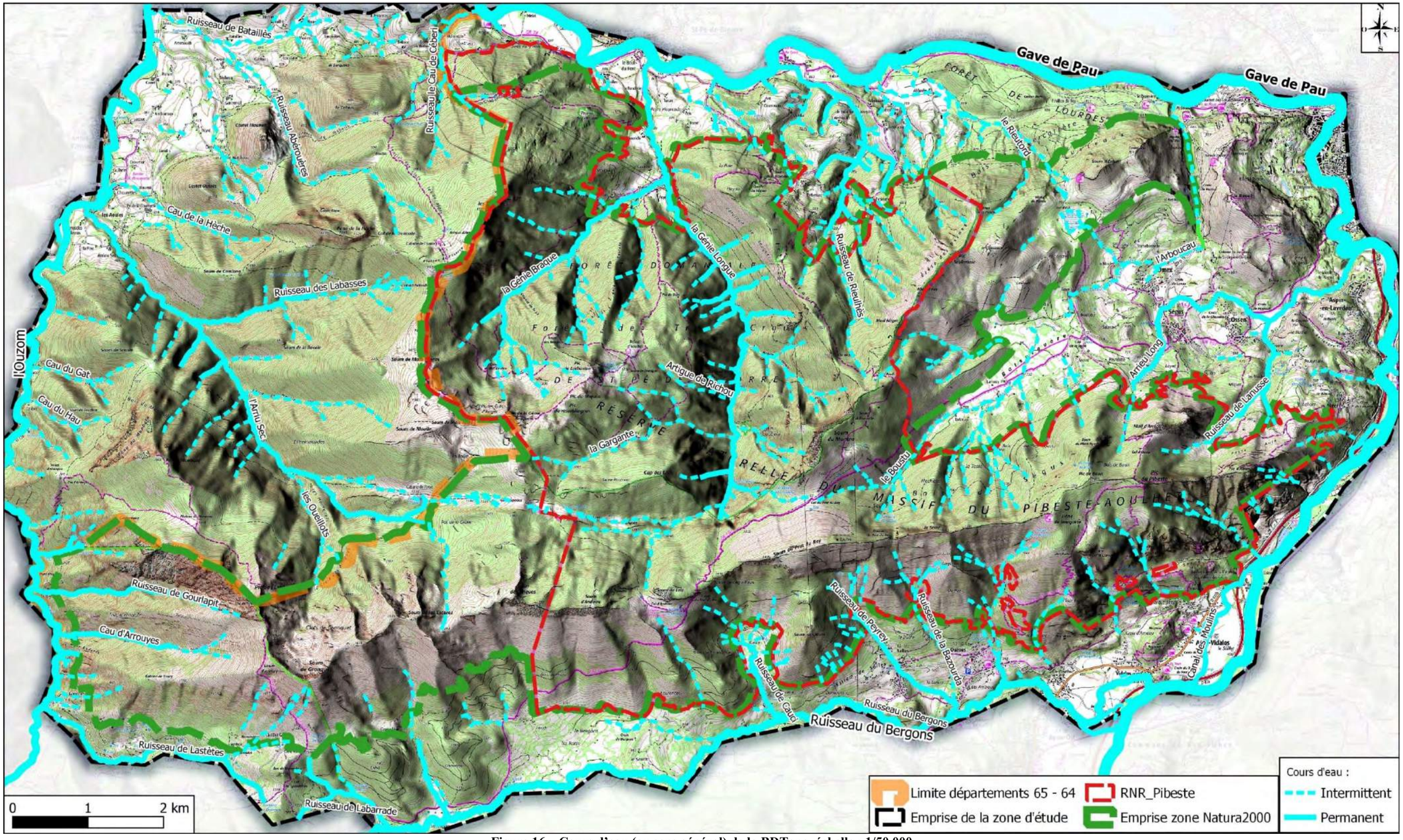


Figure 16 – Cours d'eau (au sens général) de la BDTopo, échelle : 1/50 000

La Figure 17 est une capture d'écran du site CARTELIE de la région Occitanie qui permet la visualisation de la cartographie de la classification des cours d'eau par la DDT65.
Elle permet d'obtenir l'identification du tronçon, le nom du cours d'eau, sa classification règlementaire (cours d'eau ou non), son régime (permanent ou intermittent) et la nature de l'identification et les divers avis pour la classification.

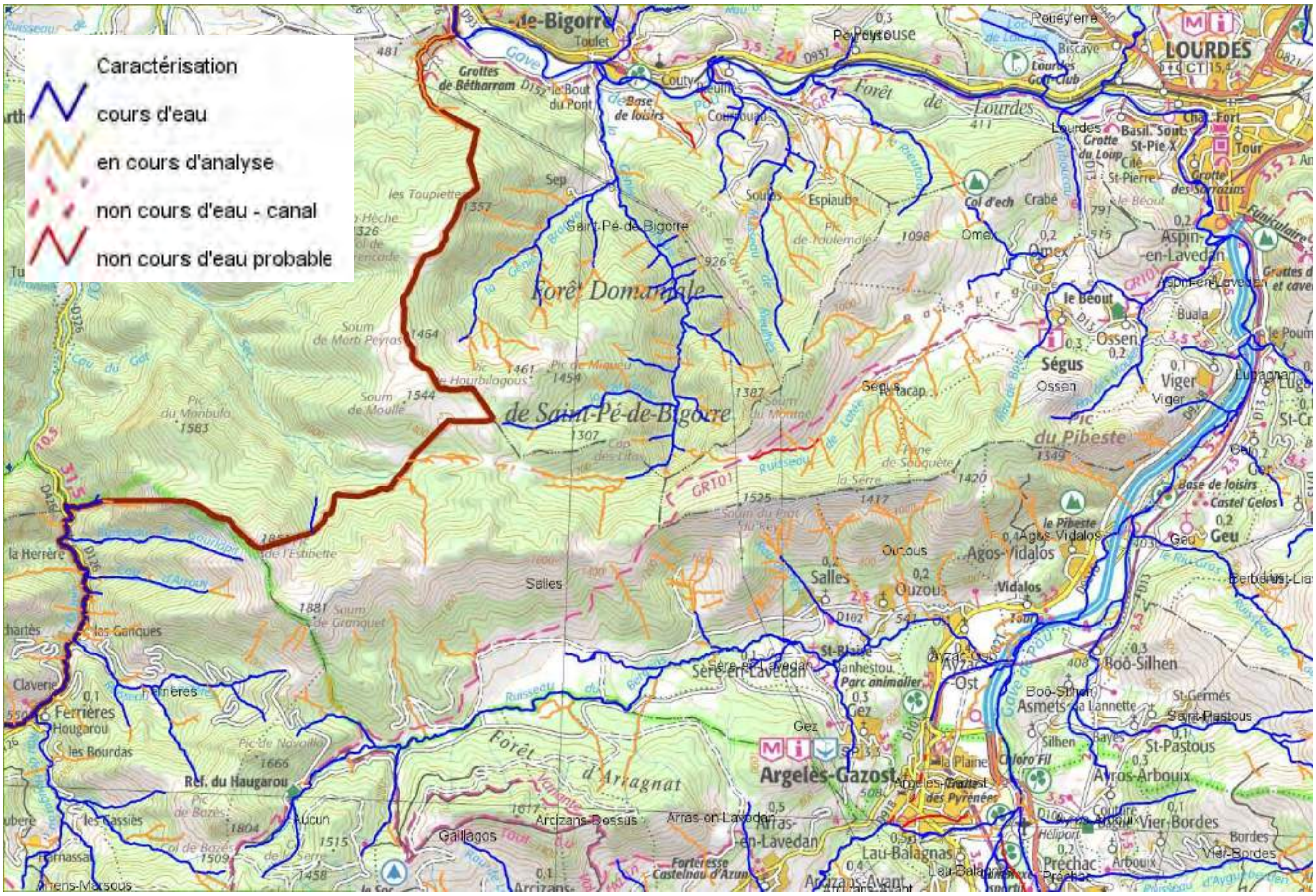


Figure 17 – Cartographie des cours d'eau en Hautes-Pyrénées (au sens réglementaire), sans échelle

La Figure 18 est une capture d'écran du site de la DDTM 64 qui permet la visualisation de la cartographie de la classification des cours d'eau sur le département des Pyrénées-Atlantiques.
Elle permet d'obtenir l'identification du tronçon, le nom du cours d'eau, sa classification règlementaire (cours d'eau ou non, à expertiser), son régime (permanent ou intermittent) et le numéro d'expertise.

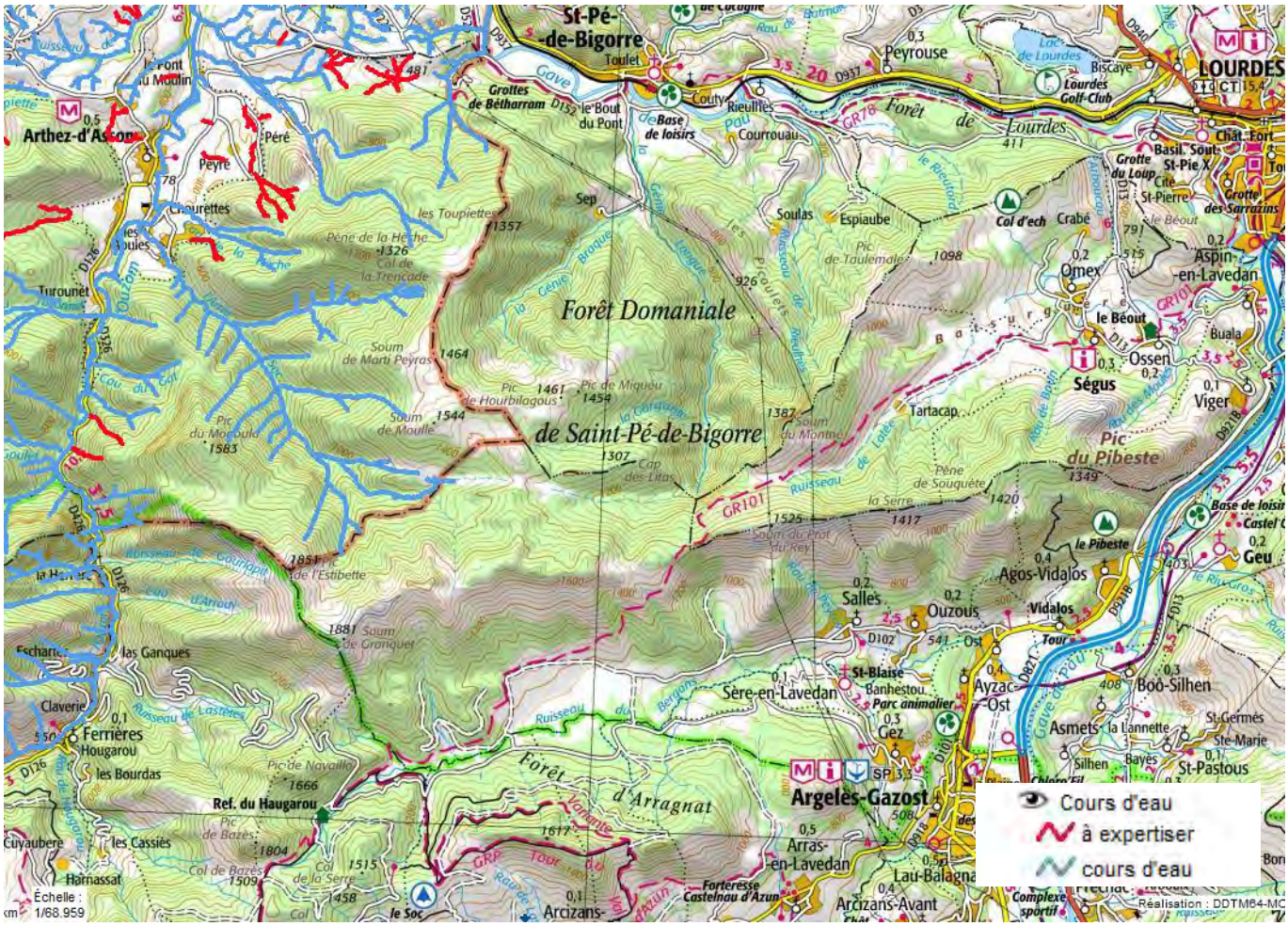


Figure 18 – Cartographie des cours d'eau en Pyrénées-Atlantiques (au sens réglementaire), sans échelle

Les données de la DDT65 et de la DDTM64 sont intégrées à la cartographie des cours d'eau du SIG.

Nous avons également intégré les valeurs estimées de QMNA5 (débit mensuel minimum ayant la probabilité 1/5 de ne pas être dépassée chaque année, c'est une référence du débit d'étiage) et de Module (débit moyen inter-annuel) selon la cartographie de l'IRSTEA issues de leur étude de 2011 et les données validées par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne (AEAG) datant de 2015. Les valeurs de débit en m^3/s des QMNA5 moyens et des Modules moyens sont présentés sur les Figure 19 et Figure 20 et ces mêmes données validées par l'AEAG sur les Figure 21 et Figure 22. Ces données permettent d'apprécier les débits potentiels calculés des cours d'eau et les écarts avec les débits consolidés après validation par l'agence de l'eau Adour-Garonne.

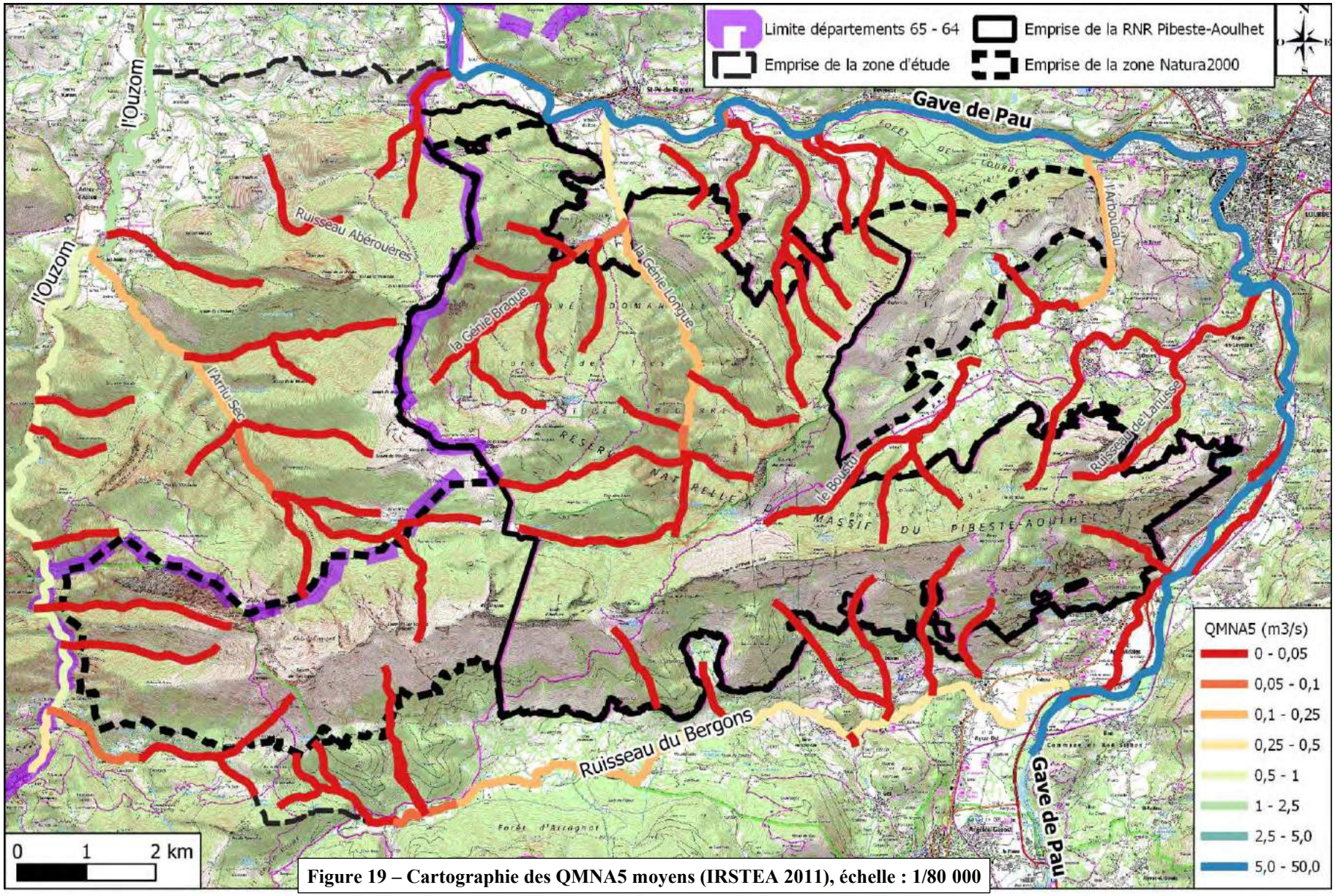


Figure 19 – Cartographie des QMNA5 moyens (IRSTEA 2011), échelle : 1/80 000

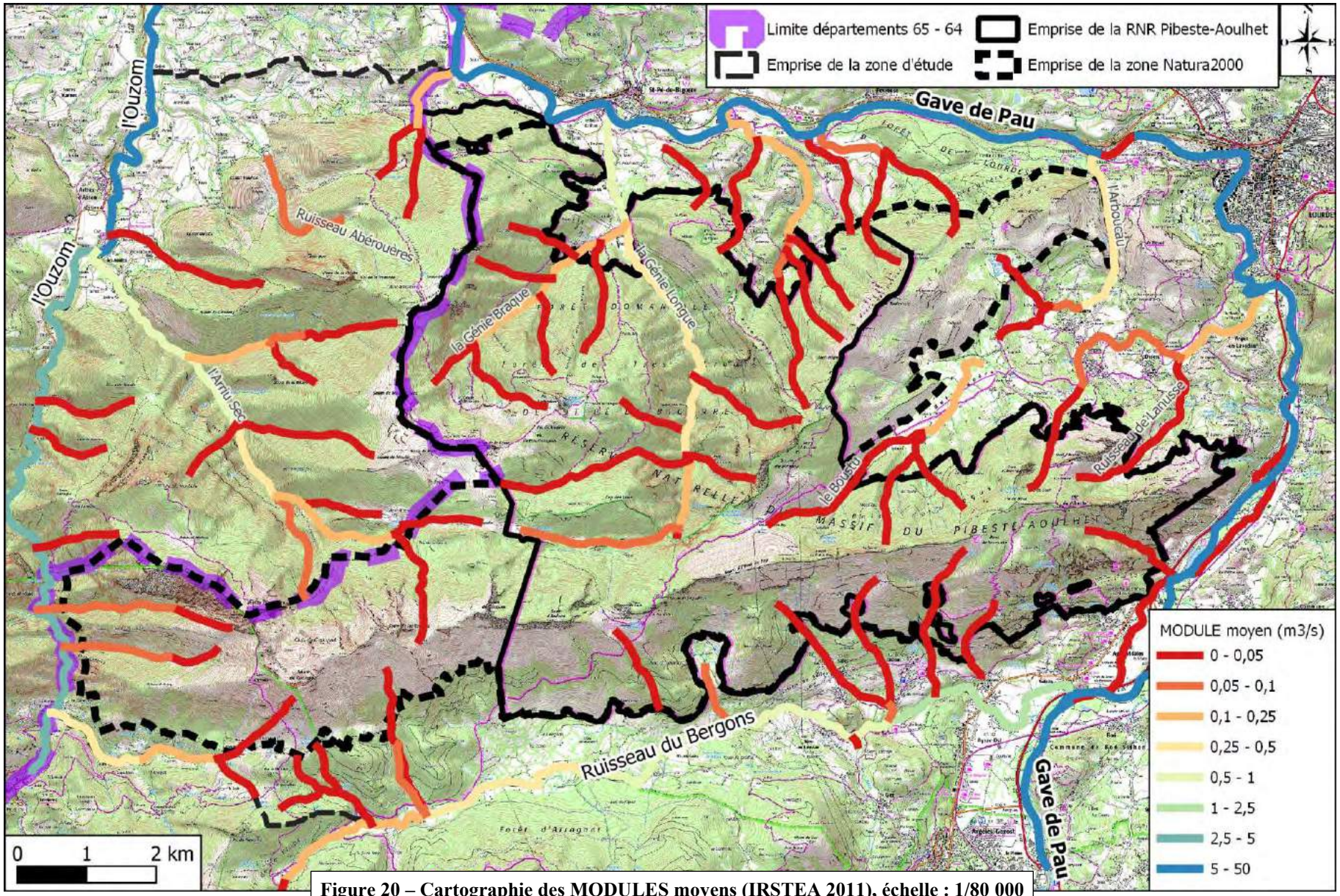


Figure 20 – Cartographie des MODULES moyens (IRSTEA 2011), échelle : 1/80 000

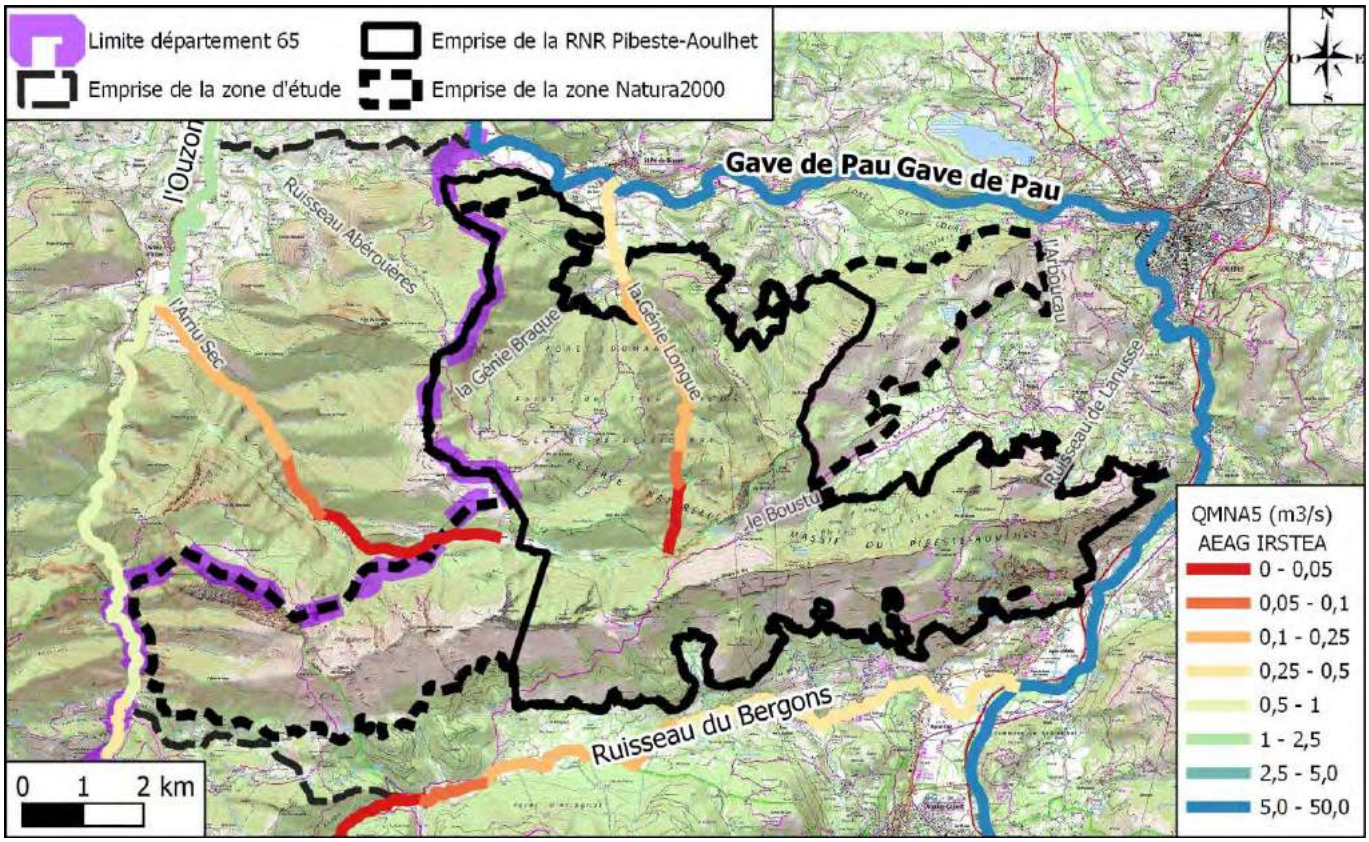


Figure 21 – Cartographie des QMNA5 moyens corrigés (AEAG, IRSTEA 2015), échelle : 1/125 000

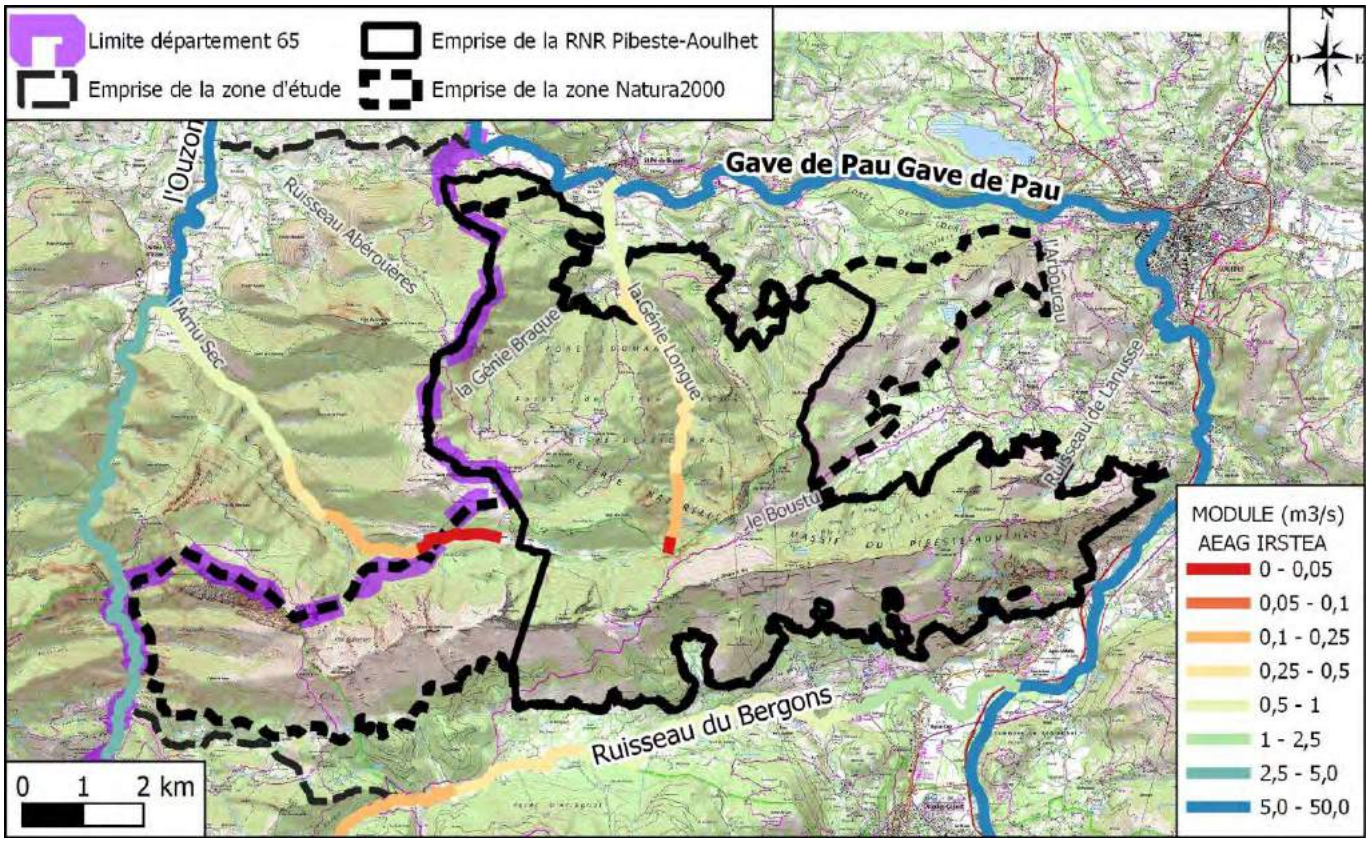


Figure 22 – Cartographie des MODULES moyens corrigés (AEAG, IRSTEA 2015), échelle : 1/125 000

Les bassins versants de la BDTopo ont été confrontés aux résultats du traitement du MNT 5m (r.geomorphon et r.watershed) de GRASS. Le résultat est la création de bassins versants topographiques « consolidés » sur la base de la topographie issue du MNT 5m pour les principaux cours d'eau de la zone d'étude. Les bassins versants topographiques unitaires (par branches de réseau d'écoulement) sont également accessibles. Sur la Figure 23, les nombres correspondent à la superficie des bassins versants en km².

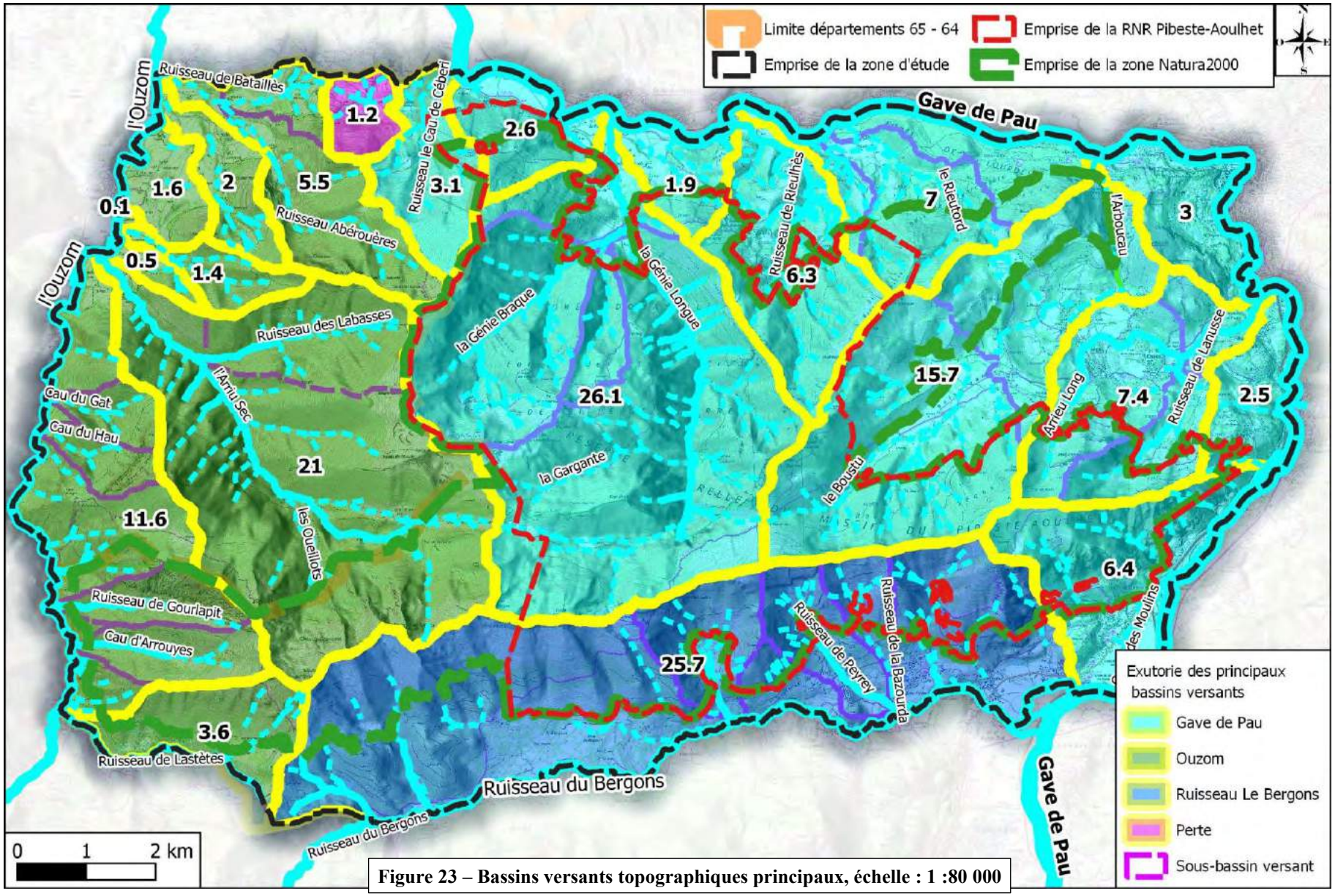


Figure 23 – Bassins versants topographiques principaux, échelle : 1 :80 000

5 CONTEXTE GEOLOGIQUE

5.1 Données et bibliographie

La cartographie géologique est abordée à partir des documents de base que sont les cartes géologiques du BRGM à l'échelle 1/50 000. Ici sont concernées la feuille de Lourdes pour la majeure partie de la zone d'étude et celle d'Argelès-Gazost pour son extrémité sud (Figure 24). L'intégration de cette cartographie géologique dans le SIG correspond aux couches des cartes géologiques harmonisées des départements des Hautes-Pyrénées et des Pyrénées-Atlantiques. Pour cette dernière, quelques corrections ont été apportées sur les terrains jurassiques principalement. Les notations des couches géologiques sont reprises de la carte géologique harmonisée des Hautes-Pyrénées.

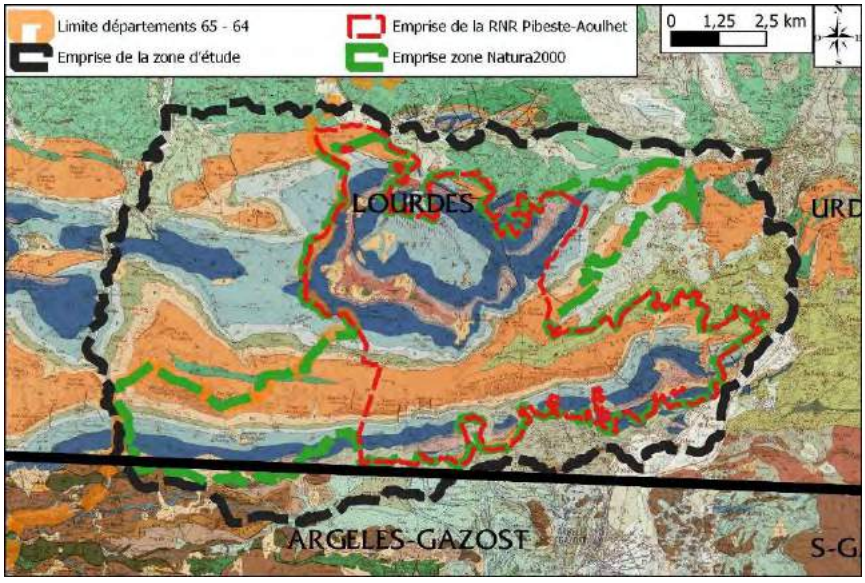


Figure 24 - Emprise des cartes géologiques imprimées du BRGM, échelle graphique

Données acquises	Utilisation	Remarques
Site internet Infoterre.brgm.fr	Intégration couche WMS des cartes géologiques imprimées au 1/50 000 ; Intégration des couches vecteurs des cartes géologiques harmonisées au 1/50 000 ; Consultations des rapports BRGM.	Cartographie initiale : carte n°1052 feuille de Lourdes et carte n°1070 feuille d'Argelès-Gazost Corrections à faire sur la cartographie harmonisée (côté Pyrénées-Atlantiques)

Les interprétations géologiques sont issues des notices géologiques et des informations plus récentes dont les principales références sont listées ci-dessous.

Bibliographie :

Y. Godechot, Université des Sciences de Toulouse, Thèse présentée en 1962. Contribution à l'étude géologique des chaînes nord-pyrénéennes aux confins du Béarn et de la Bigorre ;

M. Villanova, Université des Sciences de Toulouse, Thèse présentée en juillet 1962. Contribution à l'étude géologique de la région de Lourdes et du chainon Pibeste – Estibète (Hautes-Pyrénées) ;

M. Castéras, 1971. Notice explicative de la carte géologique n°1052 au 1/50 000 feuille de Lourdes ;

P. Barrère, J-P. Bois, J-C. Soulé, Y. Ternet, 1980. Notice explicative de la carte géologique n°1070 au 1/50 000 feuille d'Argelès-Gazost ;

G. Astruc, J.P. Paris, J. Roche, R. Vernet, BRGM, 86-SGN-355-MPY, juillet 1986. Etude hydrogéologique de la région de Lourdes ;

V. James, Université Paul Sabatier de Toulouse, Thèse présentée en 1998. La plateforme carbonatée ouest-pyrénéenne au Jurassique moyen et supérieur ;

AGSO, BRGM, 1996 – 2018. Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées, vol. 1, vol.2 et vol. 3 ;

J. Canérot, Altantica – BRGMéditions, 2008 : Les Pyrénées – Histoire géologique ;

R. Salardon, Université de Lorraine, Thèse présentée en décembre 2016. Fracturation, interactions fluides - roches et circulations fluides dans un bassin en hyper-extension puis lors de son inversion : Exemple des séries mésozoïques de la Zone Nord Pyrénéenne (Chaînons Béarnais, France) ;

J. Villard, Université de Montpellier, Mémoire de M2 juin 2016. Déformation et thermicité de la couverture mésozoïque dans une structure salifère des Chaînons Béarnais (Zone Nord---Pyrénéenne) ;

A. Cloix, Université de Montpellier, Mémoire de M2 juin 2017. Bréchification de la série prérift Nord-Pyrénéenne : Mécanismes tectoniques ou/et sédimentaires et place dans l'histoire tectono-métamorphique de la marge extensive crétacée et de son inversion Pyrénéenne (Chaînons Béarnais, Zone Nord-Pyrénéenne) ;

P. Labaume et A. Teixell, Tectonophysics, 2020.Evolution of salt structures of the Pyrenean rift (Chaînons Béarnais, France) : From hyper-extension to tectonic inversion.

GéolVal : association loi de 1901 dont l'objectif principal est de faire découvrir et comprendre "aux jeunes et aux moins jeunes" l'histoire de la Terre en s'appuyant sur le très riche patrimoine géologique des Pyrénées – https://www.geolval.fr/ ;

AGSO : Association des Géologues du Sud-Ouest, fondée en 1964 sous statut loi de 1901, a pour objectif de regrouper les professionnels et les praticiens des sciences de la Terre exerçant dans le Sud-Ouest – https://www.agso.net/

5.2 Description des terrains affleurant – Stratigraphie

Des terrains divers et variés sont présents sur la zone d'étude, de par leur nature (lithostratigraphie), leur contenu en fossiles (biostratigraphie) ou leur datation (chronostratigraphie, divisions géochronologiques).

La nature des terrains sur la zone d'étude est à forte dominante de roches sédimentaires, c'est à dire issues de l'accumulation d'éléments minéraux issus de la dégradation de roches existantes ou de débris d'organismes (coquilles, …) et/ou de précipitations à partir de solutions. Elles se forment dans des environnements divers, en milieu continental (versant, cours d'eau, …) ou marin (littoral, talus continental, bassin profond, …). Quelques roches magmatiques, essentiellement d'origine volcanique (ou hypovolcanique) sont présentes en petits filons de faible ou très faible extension ainsi que quelques roches métamorphiques qui correspondent à des roches existantes modifiées par des contraintes tectoniques (déformations post-formation des roches initiales) comme les schistes ou des contraintes thermiques comme les marbres ou les deux.

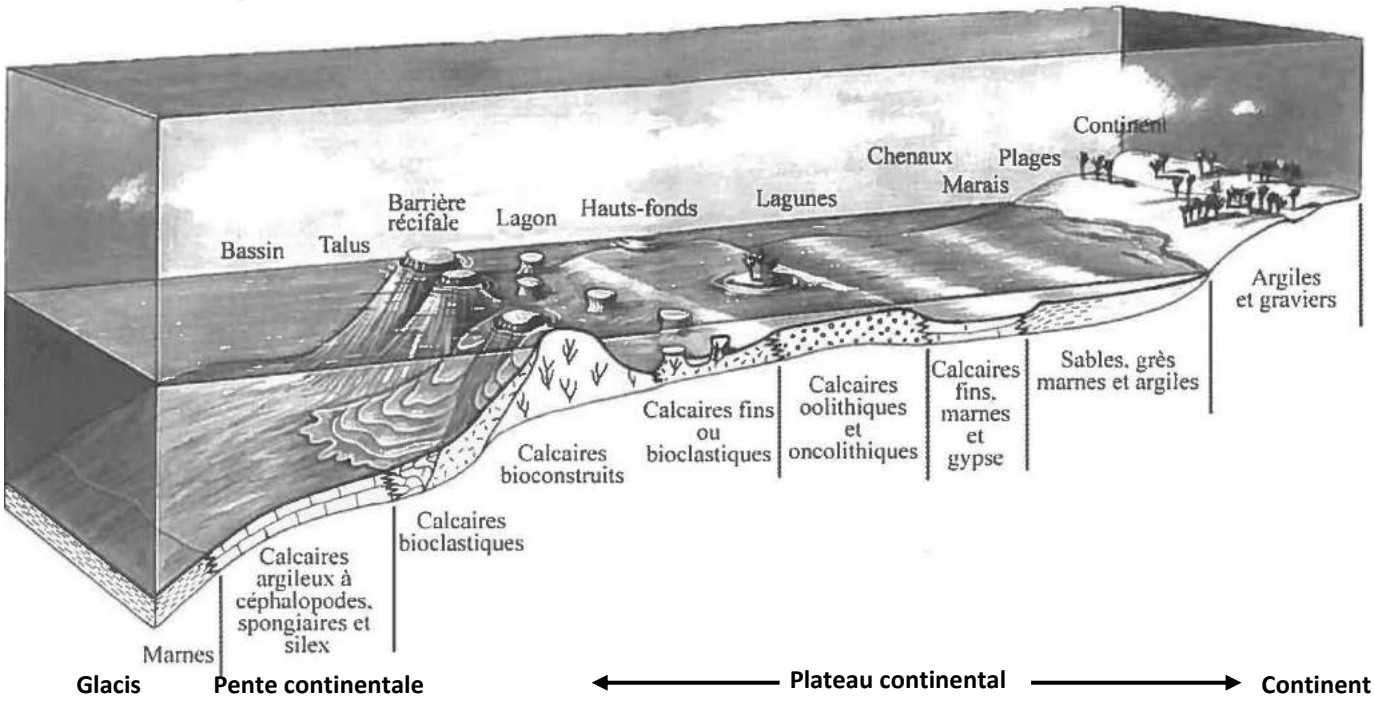


Figure 25 – Exemple d'environnements de formation (milieux de dépôt) de quelques roches présentes sur la zone d'étude (Tournepiche 1999, *in* Salomon 2000 cf. partie Karst)

Quelques définitions pour les principales natures de roches rencontrées à l'affleurement et pouvant être citées sur la zone d'étude :

- **Les calcaires** : roches sédimentaires carbonatées comportant au moins 50 % de calcite ($CaCO_3$), le reste pouvant être de la dolomie, des argiles, des grès, … Ils se forment par accumulation de débris de coquilles, squelettes ou tests calcaires et de précipitations bio/chimiques. Ils se forment en milieu marin ou lacustre ou fluviatile. Ils peuvent montrer de nombreux fossiles, microfossiles ou être sans organismes visibles. Ce sont des roches plutôt tendres.

- **Les dolomies** : ce sont également des roches sédimentaires carbonatées mais où au moins la moitié des carbonates sont sous forme de dolomite ((Ca, Mg) CO3). Tous les intermédiaires entre Dolomie pure (90-100 % de Dolomite) et les calcaires ou les autres roches détritiques sont également possibles. Elles se forment généralement en milieu de lagune avec des eaux chaudes et minéralisées (dolomies primaires) mais peuvent également se former par circulation d'eaux magnésiennes au sein de calcaires fissurés et fracturés. Les dolomies font partie des roches dures.
- **Les marnes** : roches sédimentaires constituées d'un mélange de calcaire et d'argile (35 à 65 %). Elles se déposent généralement en milieu marin ouvert mais aussi en lagune. Ce sont des roches tendres. Elles peuvent être schisteuses et se débiter en plaquettes.
- **Les argiles** : roches sédimentaires ou résiduelles contenant plus de 50 % de minéraux argileux (phyllosilicates hydratés), le reste pouvant être varié : calcaires, grès, … Elle se forment en milieu continental ou marin. Ce sont des roches tendres. Les **pélites** (roches à grains très fins) sont en partie constituée d'argiles mais peuvent présentées moins de 50 % de minéraux argileux.
- **Les grès** : roche sédimentaire détritique qui comporte au moins 85 % de grains de quartz (de dimension comprise entre 1/16 de mm et 2 mm). Le ciment qui lie ces grains (à la différence des sables qui sont meubles) peut être siliceux ou calcaire. Ils sont peu représentés sur la zone d'étude (rares affleurements de terrains du Permo-Trias au sud-ouest de la zone).
- **Les brèches** : roches formées par plus de 50 % d'éléments anguleux (contrairement aux Poudingues), de même nature ou de natures diverses et de taille supérieure à 2 mm. Ici, elles sont essentiellement sédimentaires (accumulation d'éléments ayant subis un faible transport) ou tectoniques (fragmentation de la roche sur place par les mouvements de terrain et cimentation chimique par circulation des fluides au sein des fractures).
- **Le gypse** : roche évaporitique issue de lagunes chaudes très minéralisées. Il s'agit d'un sulfate de calcium hydraté (CaSO4, 2H2O). Elles sont très tendres et peuvent être associées à des argiles, des calcaires ou des dolomies pour former ensuite des cargneules. Elles sont associées au Trias (Keuper) et jouent un rôle important dans la structure des formations géologiques locales. Peu visibles à l'affleurement, ils ont été reconnus sur une épaisseur de plus de 2500 m au forage de Bélair 1 au nord d'Arudy.
- **Les schistes (schisteux)** : roche métamorphique (pouvant être considérées comme sédimentaire quand le métamorphisme est faible, comme pour les schistes ardoisiers)

qui présentent un feuilletage plus ou moins serré (schistosité de fracture) sous l'effet de contraintes tectoniques.

- **Les flyschs** : il s'agit d'une formation sédimentaire (et non d'une roche) constituée de turbidites. Cette formation généralement litée (empilement de couches) peut comporter des calcaires, des marnes, des argiles, des grès, … Elle se forme dans des zones de Deltas sous-marins.
- **Les ophites** : ce sont des roches magmatiques volcaniques (ou hypovolcaniques) : basaltes doléritiques tholéïtiques, très abondantes dans les chaînons béarnais ; Leur origine, leur âge et leur mode de mise en place sont toujours un sujet de discussion et de controverses pour les spécialistes : l'âge communément admis de leur mise en place à la limite Trias-Lias est remis en question par certains auteurs qui suggèrent un âge Jurassique ou Crétacé et même Danien. Ces roches magmatiques en association avec des formations argileuses supposées du Keuper, vont jouer un rôle majeur dans le fonctionnement hydrogéologique des aquifères locaux des chaînons béarnais.
- **Les granites** : ou plus généralement les granitoïdes qui englobent les granites, sont des roches magmatiques plutoniques (provenant de la profondeur et à refroidissement lent, ils forment près de 45 % de la croûte terrestre). Sur la zone d'étude, ils proviennent des massifs de Cauterets et ont été "apportés" par les glaciers qui ont laissé sur place des blocs erratiques de granitoïdes.

Si nous nous intéressons aux âges de ces roches (des roches de même nature pouvant avoir des âges totalement différents), en chronostratigraphie on individualise les terrains en "étage" division de base qui correspond à un affleurement type (pouvant avoir des natures de roches différentes ou non) et qui possède un âge et une durée en géochronologie (l'étage peut être subdivisé en sous-étages), puis on regroupe les étages en série (ou époque en géochronologie), puis les séries en système (ou période), les systèmes en érathème (ou ère) et enfin les érathèmes en éonothème (ou éon). Une échelle chronostratigraphique est présentée sur la Figure 31.

A l'affleurement, les couches géologiques (ensemble de roches regroupées sous un même figuré) suivantes ont été cartographiées (des plus anciennes au plus récentes, avec notation en noir de la carte géologique harmonisée des Hautes-Pyrénées présentée en Figure 32 et en bleu celle de la carte géologique de la feuille de Lourdes ou de la feuille d'Argelès-Gazost pour les terrains paléozoïques) :

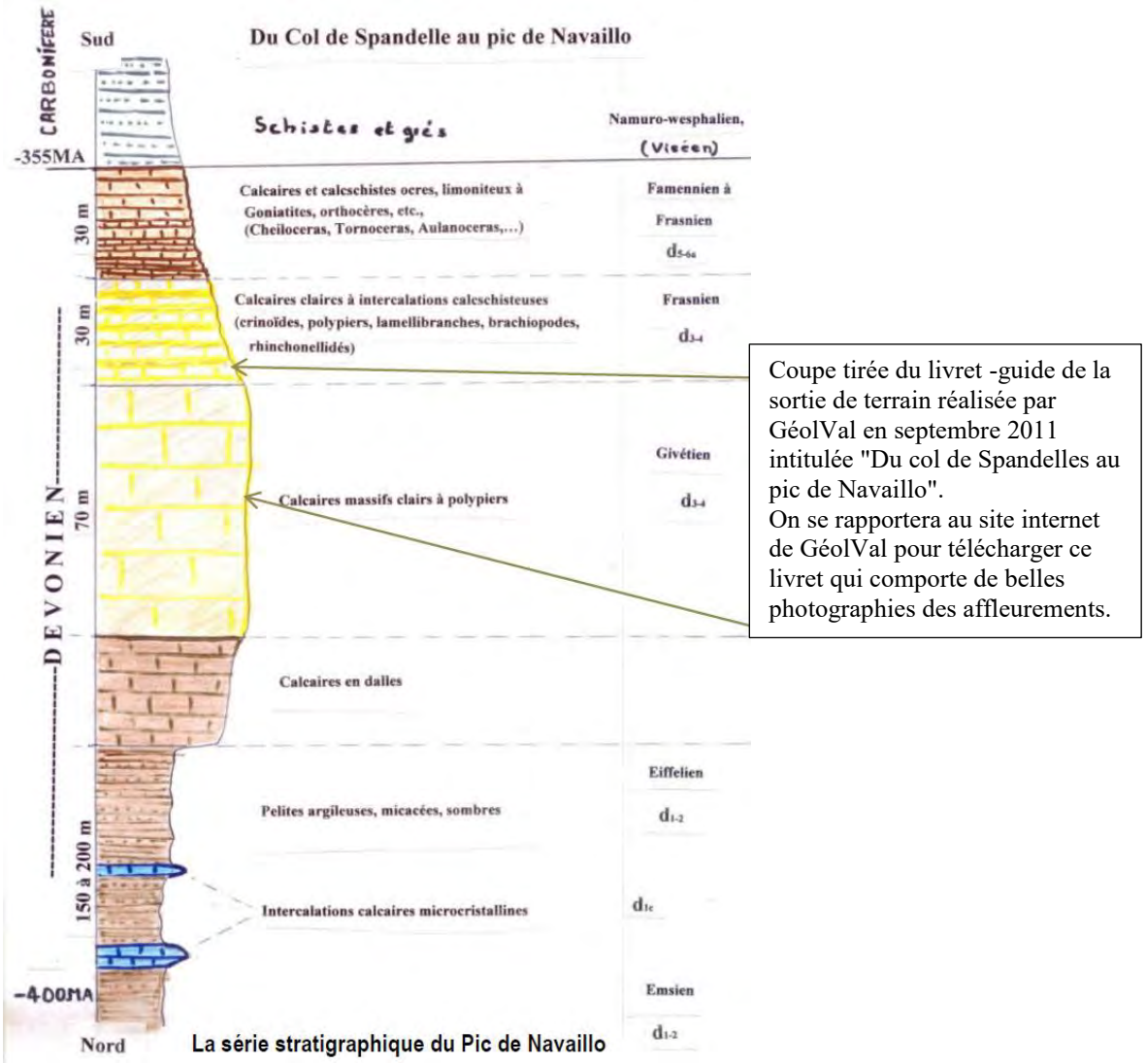
- **Terrains paléozoïques :**
  - **Ordovicien (o3-6 / s3-2)** : petit affleurement en-dessous du sommet des Toupiettes dans la structure de la forêt de Très Crouts) correspondant à des schistes ardoisiers et des grès-quartzites ;
  - **Dévonien inférieur et la base du Dévonien moyen** (**d1a-b / d1-2**) : il est représenté par des pelites ardoisières et des grès, avec des intercalations de calcaires microcristallins datés de l'Emsien (**d2-3D / d1-2C**) ;
  - **Dévonien moyen et supérieur** (**d4-6 ou dC ou dPG / d3-4 , d5-6a, ou d3-6**) : ce sont des calcaires en dalles, des calcaires massifs à polypiers, des calcaires clairs calcschisteux et des calcaires limoniteux. Ces calcaires comportent de nombreux fossiles ;
  - 

Figure 26 – Coupe stratigraphique des terrains paléozoïques du Pic de Navaillo (GéolVal, 09/2011)

- **Carbonifère (h / h)** : il s'agit de terrains schisto-gréseux puis de calcaires tachetés à passées de calcaires dolomitiques et de dolomies. Ils ne sont présents que sur la partie extrême sud de la zone d'étude, dans la vallée du Bergons et sont souvent masqués par les moraines.

- **Terrains mésozoïques :**
  - **Trias inférieur** (**t1-2** / **ti ou rt**) : avec ces grès rouges, il n'est représenté que sur l'extrême sud-ouest de la zone d'étude, bordant la faille nord-pyrénéenne ;
  - **Trias supérieur** ou **Keuper** (**t5-7** / **t**) :il est constitué par des marnes bariolées (vertes, rouge lie de vin) pouvant être gypsifères, et associées à des cargneules (roches carbonatées cariées), de calcaires dolomitiques beige ou des brèches. Ces terrains sont présents au Pic de Larbastan et sur l'extrême sud de la zone d'étude ;
  - **Rhétien** (dernier étage du Trias) et **Hettangien inférieur** (la base de Lias) (**t7-l1** / **l1**) : il est présent sur la structure de la forêt de Très Crouts et est constitué par des brèches et des marnes schisteuses ;
  - **Lias (ou Jurassique inférieur) inférieur (Sinémurien – Hettangien)** (**l1-2** / **l3-2**) : calcaires, des calcaires dolomitiques, des brèches et des dolomies ;
  - **Lias (ou Jurassique inférieur) moyen et supérieur - Pliensbachien à Toarcien (voir Aalénien**) (**l3-4** / **l5-4**), il s'agit de calcaires marneux à bélemnites bien connus des spéléologues puis de marnes (schisteuses, noires à bleutées) ;
  - **Dogger (ou Jurassique moyen)** : un premier niveau pouvant débuter au Lias supérieur (Toarcien supérieur) jusqu'au Bathonien ou la base du Callovien (Dogger supérieur) **(j4-5 / j2-l6)** où il s'agit de calcaires à microfilaments, de teinte noire, avec de nombreux débris de fossiles ;
  - **Dogger (ou Jurassique moyen)** : le deuxième niveau daté du Dogger supérieur (du Bathonien / Callovien) jusqu'à l'Oxfordien (partie inférieure du Jurassique supérieur) **(j4-5** / **j7-3**) est constitué de dolomies noires à Trocolines (foraminifères), nommées souvent dolomies Callovo-Oxfordiennes. Elles forment de hautes falaises sombres à l'aspect ruiniforme. La coupe de la Figure 27 montre bien la diversité de la nature des roches pouvant être décrites pour une couche géologique cartographiée ;
  - **Malm (ou Jurassique supérieur) moyen - Kimméridgien (j6-7 / j8)** : calcaires noirs à Exogyra virgula (fossiles de sortes de petites huitres), avec quelques niveaux peu épais de calcaires marneux noirs et marnes schisteuses noires. Dans la forêt de Très Crouts entre la Génie Braque et la Génie Longue, les calcaires sont métamorphisés et se

présentent sous forme de marbres calcaires blancs entièrement recristallisés (**Mj6** / j8M) ;

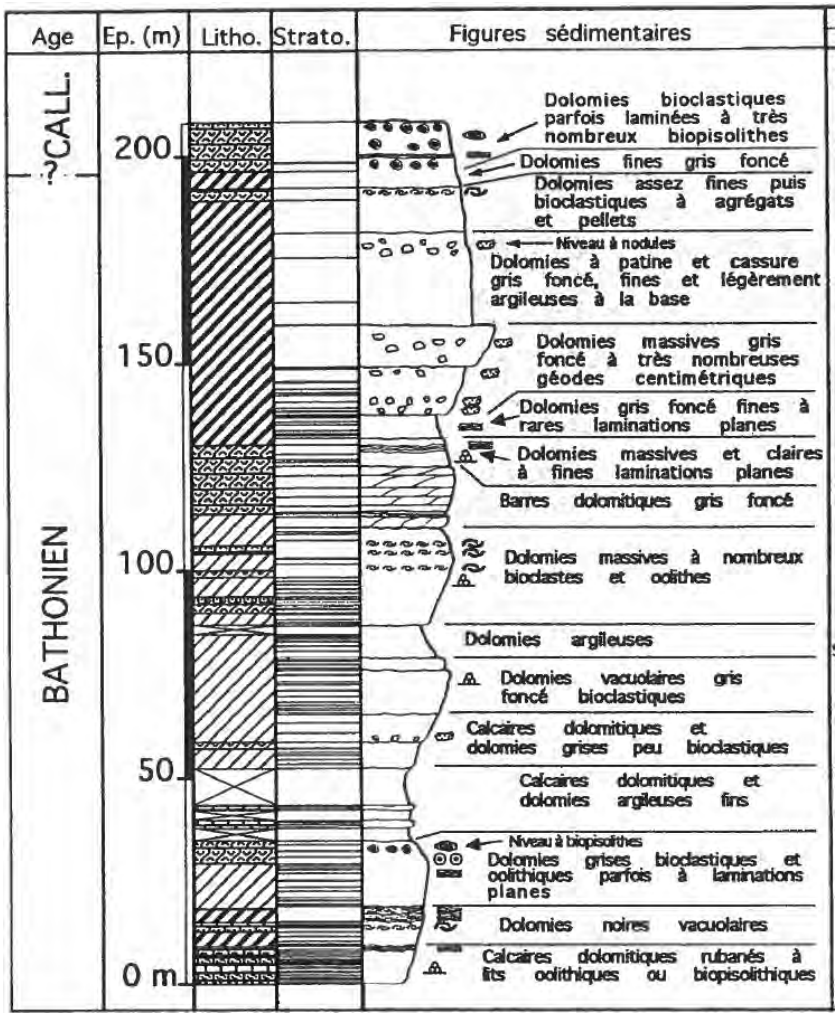


Figure 27 – Coupe stratigraphique du Bathonien du Soum de Granquet (V. James, 1998)

- **Malm (ou Jurassique supérieur) supérieur - Tithonien (ou localement Portlandien) (j7 / j9)** : il est représenté par des dolomies et des calcaires dolomitiques à Ibérines disposés en bancs de 20 à 30 cm et sont de teintes claires contrairement aux dolomies noires du Callovo-Oxfordien ;
- **Crétacé inférieur - Valanginien à Barrémien (n2-4 / n4-2)** : grès à ciment rouge ferrugineux (parfois absents) et calcaires gréseux ou argileux puis calcaires noirs à Annélides et sections de Rudistes ;
- **Crétacé inférieur - Aptien inférieur : Bédoulien (n5 / n5)** : marnes à Deshayesites ou dites de marnes de Sainte-Suzanne (décrites par Leymerie en 1862 au village de Sainte-Suzanne près d'Orthez). Ce sont des marnes schisteuses noires qui présentent parfois un débit ardoisier ;

- **Crétacé inférieur - Aptien supérieur** : nous trouvons les calcaires subrécifaux à Toucasia aussi nommés calcaires urgoniens par analogie avec les séries calcaires à Requiena de l'Urgonien de Provence. Ils sont attribués au Gargasien (base de l'Aptien supérieur, **n5-6C / n6**). Ces calcaires sont très représentés sur les sommets du secteur d'étude : Mobula, Estibette, Conques, Andorre, Prat du Rey, Montné, Béout, … Les calcaires urgoniens font de nouveau l'objet de recherches et leur datation pourrait évoluée quelque peu prochainement.

  Les calcaires à Floridées et les marnes noires à spicules du Clansayésien (sommet de l'Aptien supérieur, **n5-6M / n6M**) succèdent aux calcaires urgoniens. Cette formation occuperait un axe Sud-Ouest – Nord-Est depuis le col du Prat du Rey jusqu'à Ségus, puis obliquant vers l'Est sur Aspin et Viger ;
- **Crétacé inférieur - Albien (n6M / c1)** : marnes noires schisteuses à spicules de spongiaires et calcaires schisteux noirs ;
- **Crétacé supérieur - Cénomanien à Turonien inférieur (n6b-c1b / c2)** : au sud de Saint-Pé-de-Bigorre, il s'agit de schistes noirs très fissiles qui surmontent une brèche polygénique **(n6-c1(BJ) / c2B)** selon la carte géologique de Lourdes, mais qui dans le détail correspondrait à des brèches monogéniques, des brèches dolomitiques polygéniques de l'Hettangien et à des conglomérats polygéniques. Cette série de flyschs schisteux noirs est également cartographiée sur la partie nord-ouest de la zone d'étude entre Arthez-d'Asson et Bétharram.

- **Terrains quaternaires :**

  Les dépôts morainiques (Riss ou Würm) sont des dépôts transportés par les glaciers ou en lien avec la présence proximale d'un glacier. Ils sont variés et complexes, nous retiendrons pour la nature des matériaux déposés : des argiles, des argiles vasardes bleues, des sables, des galets et blocs anguleux.
- **Vallum et moraines du Riss** (**Gx** / **Gx, Gxa**) : dépôts liés au stade maximal d'extension du glacier du Lavedan. Présence de gros blocs de granites ;
- **Vallum et moraines du Würm I** (**Gy** / **Gya**) : dépôts liés au stade de disjonction qui serait datée du Würm ;

  Les alluvions sont des matériaux déposés par les fleuves et rivières, durant les stades interglaciaires et post-glaciaires. Les éléments sont roulés et peuvent être transportés sur de longues distances. Les alluvions sont agencées en terrasses.

- **Alluvions anciennes du Riss** (**Fx** / **Fx**) : elles sont constituées de graviers et galets (granites pour 50 %, schistes) qui sont parfois altérés, pris dans une gangue sablo-argileuse. ;
- **Alluvions récentes du Würm I et II** (**Fy** / **Fya et Fyb**) : galets à dominante de granites, quartzites, schistes, généralement non altérés, dans une matrice graveleuse ou sableuse ;
- **Alluvions récentes du Würm III** (**Fz** / **Fz**) : cordons graveleux avec galets non altérés, matrice sableuse ou dépôts plus fins de faible énergie avec argiles vasardes plus ou moins sableuses ;
- **Eboulis, Eboulis fixés** (**E, Ex-y** / **E**) : débris de roches parfois fixés sur les versants et pentes raides.

Les figures suivantes présentent les colonnes stratigraphiques (l'empilement des couches géologiques avec une description succincte et leur âge) selon divers auteurs.

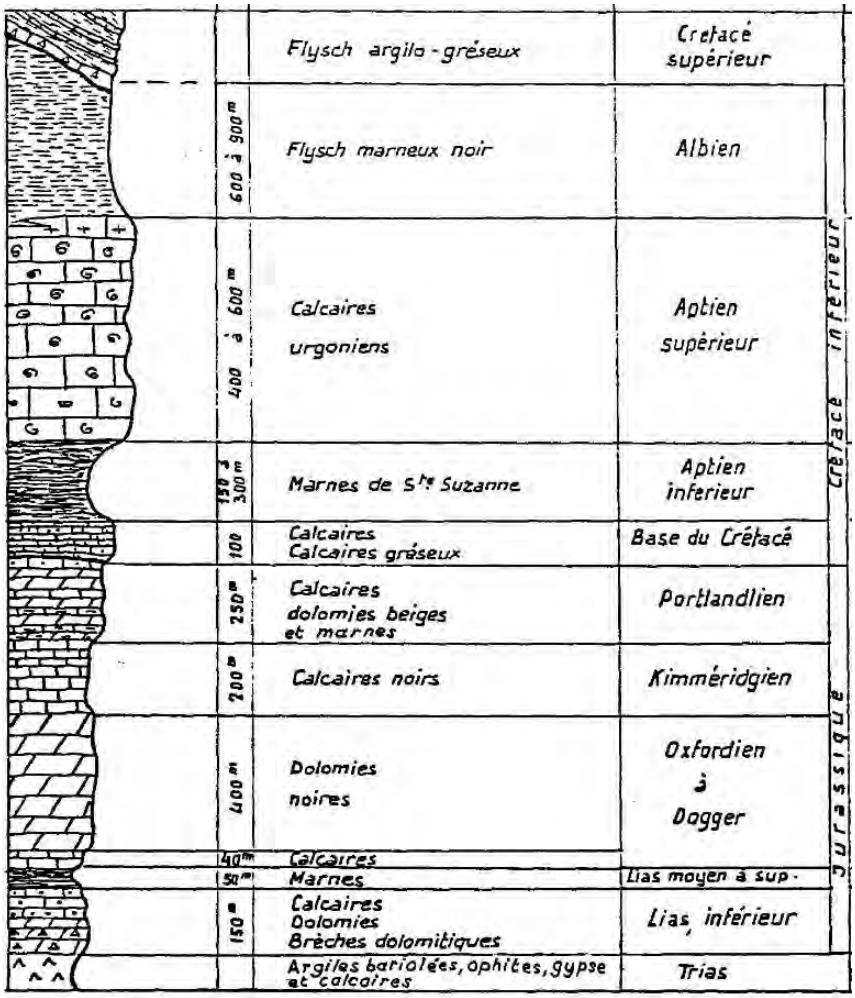


Figure 28 – Stratigraphie de la zone d'étude (BRGM 1986)

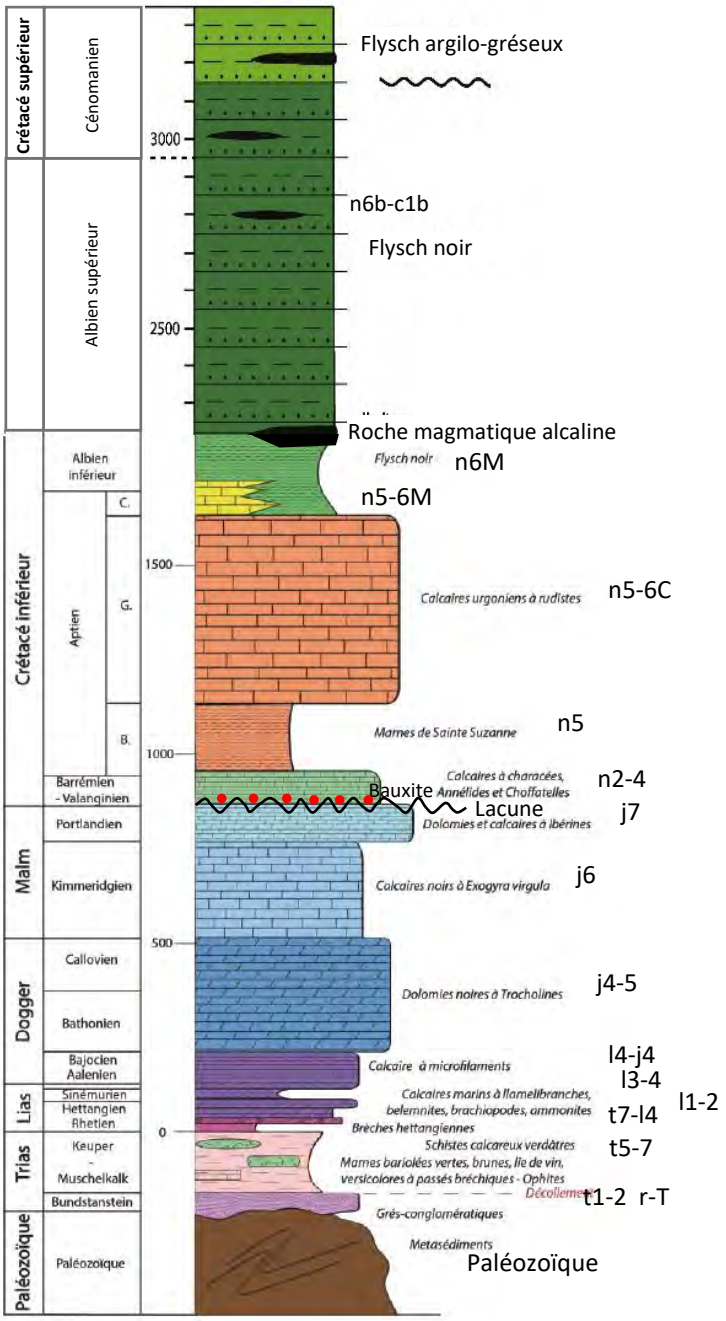


Figure 29 – Stratigraphie de la zone d'étude selon Cloix (2017) et Labaume et al. (2020)

Dans sa thèse, Salardon (Figure 30) reprend les noms des formations utilisés par les pétroliers (équivalence avec les roches réservoirs des forages pétroliers proches) et figure les principaux fossiles caractéristiques retrouvés dans les couches géologiques.

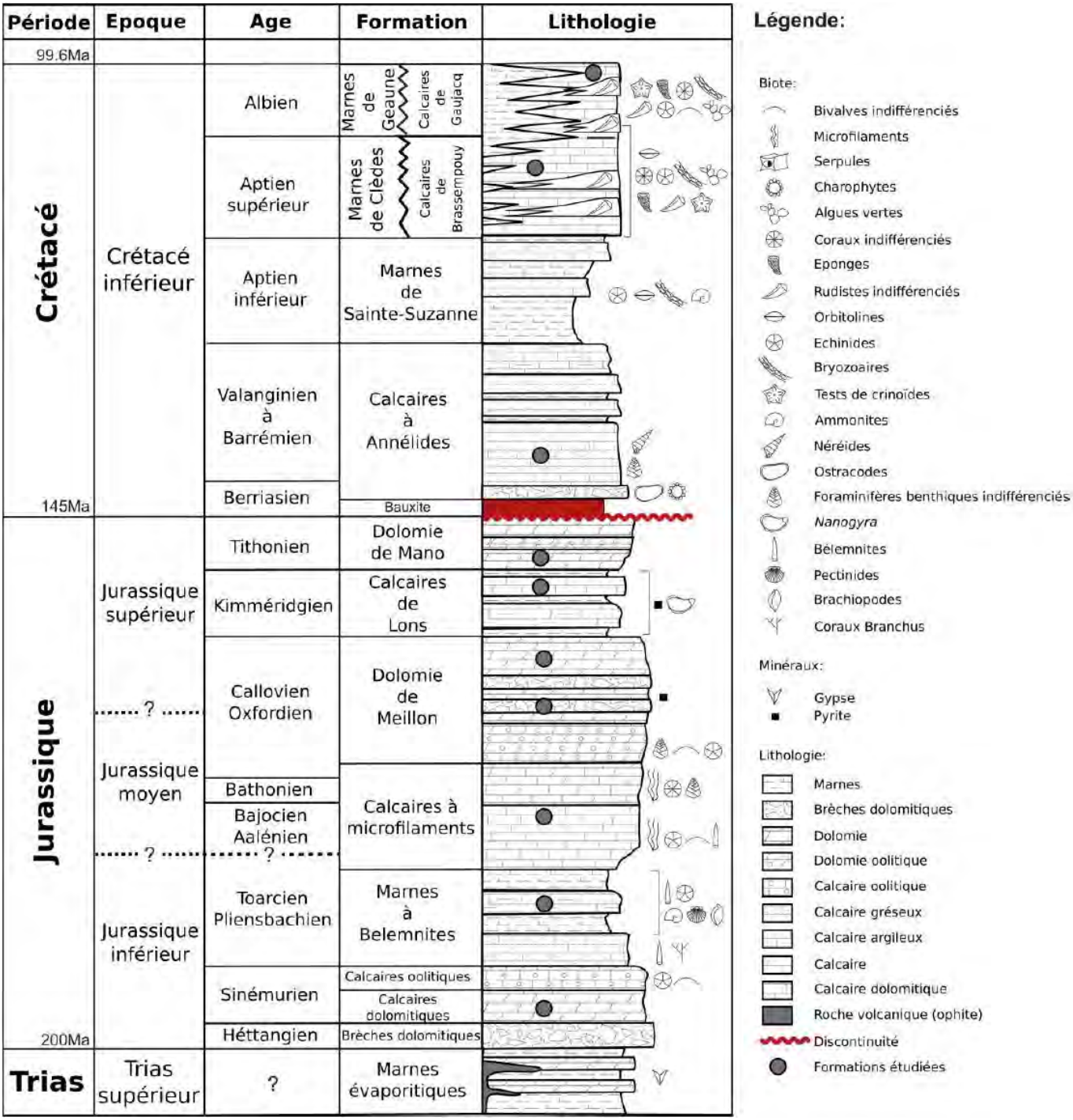


Figure 30 – Stratigraphie de la zone d'étude avec systèmes pétrolier selon Salardon (2016)

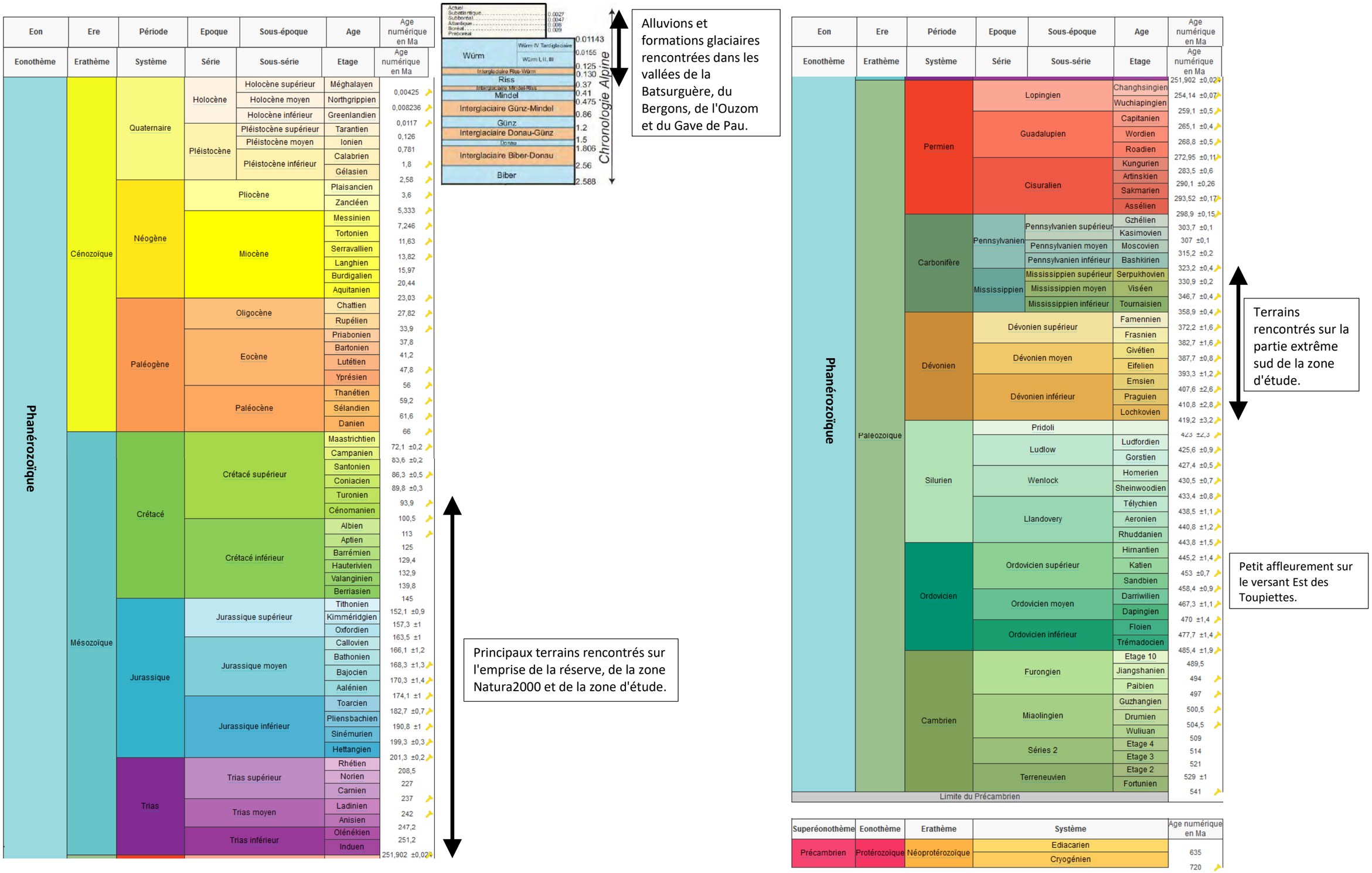


Figure 31 – Echelle chronostratigraphique (BRGM)

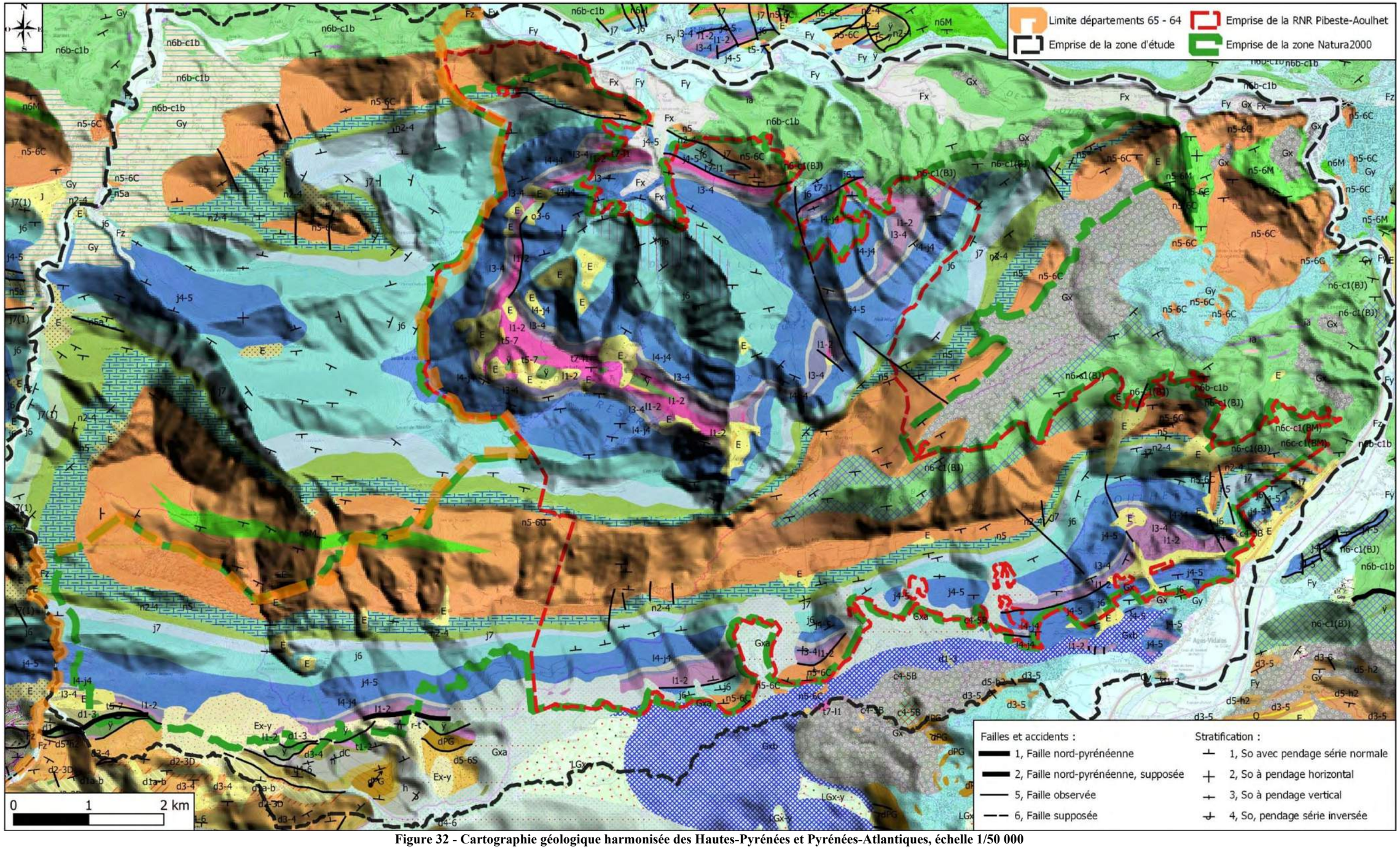


Figure 32 - Cartographie géologique harmonisée des Hautes-Pyrénées et Pyrénées-Atlantiques, échelle 1/50 000

Quaternaire

- E, Eboulis actuels ou récents, cônes d'éboulis et d'avalanches - 2
- Ex-y, Eboulis fixés - 4
- C, Colluvions, dépôts de pente indifférenciés - 5
- LGx-y, Formations glacio-lacustres et glacio-fluvio-lacustres - 10
- Fz, Alluvions fluviatiles actuelles et subactuelles - 13
- Fy, Alluvions du stade du retrait glaciaire - 14
- Fx, Alluvions anciennes du Riss - 17
- Fw, Alluvions anciennes du Mindel - 19
- Gy, Moraines du stade de retrait et de disjonction - 31
- Gx, Moraines du stade d'extension glaciaire maximum - 33
- Gxb, Phase de stationnement - 36
- Gxa, Phase d'expansion - 37

Crétacé

- c4-5B, Santonien - Campanien : Flysch de Lugagnan, brèches "type Ourdon" - 82
- c1-2, Turonien-Cénomanien : flysch marno-gréseux, flysch à silex
- n6c-c1(BM), Vraconien - Cénomanien moyen : Flysch noir des Baronnies, Brèches de Mauvezin à éléments paléozoïques - 104
- n6b-c1b, Albien moyen - Cénomanien moyen : Flysch noir ardoisier de Bigorre (ouest de l' Adour) - 106
- n6-c1(BJ), Albien moyen - Cénomanien moyen : Flysch noir de Bigorre, Brèches de Jarret à éléments mésozoïques - 114
- n6M, Albien : Marnes schisteuses à spicules - 124
- n5-6M, Aptien - Albien : Marnes noires et calcaires argileux - 127
- n5-6C, Aptien - Albien : Calcaires à Toucasia (faciès urgonien), calcarénites à entroques - 128
- n5, Aptien inférieur-supérieur : Marnes à Deshayesites - 134
- n2-4, Valanginien - Barrémien : Calcaires à Characées, Annélides et Choffatelles - 135

Jurassique

- j7, Tithonien inférieur : Dolomies, calcaires et calcaires dolomitiques à ibérines, brèches calcaires - 139
- j6, Kimméridgien : Calcaires noirs à exogyres et lituolidés, brèches dolomitiques - 143
- Mj6, Calcaires kimméridgiens métamorphisés - 145
- j4-5, Callovien - Oxfordien : Dolomies noires à Trocholines, calcaires et calcaires dolomitiques - 146
- l4-j4, Toarcien - Callovien inférieur : Calcaires à microfilaments - 151
- l3-4, Pliensbachien - Toarcien : Marnes et calcaires à Bélemnites - 153
- l1-2, Sinémurien - Hettangien supérieur : Calcaires, brèches et dolomies - 154
- l1tf, Hettangien inférieur : Tufs volcaniques - 155

Trias - Permien

- t7-l1, Rhétien - Hettangien inférieur : Dalle à Diademopsis, brèches, marnes schisteuses - 156
- t5-7, Trias supérieur : Argiles et marnes bariolées, dolomies, cargneules - 157
- t1-2, Trias inférieur : Conglomérat, grès rouges à violacés, pélites quartzites - 159
- r-t, Permo-Trias : Conglomérats, grès, pélites rouges - 160

Paléozoïque

- h, Carbonifère indifférencié - 165
- d6L, Frasnien : Pélites gréseuses et grès calcaires (Unités septentrionale-La Munia, médiane et Chinipro) - 178
- d5-6S, Givétien supérieur - Frasnien : Quartzite de la série de Sia (Unité septentrionale-La Munia) - 184
- d4-6, Eifélien - Frasnien : Calcaires à polypiers, calcschistes et joints pélitiques - 189
- d3-5, Dévonien inférieur et moyen : Schistes sombres à horizons calcaires et pélites gréseuses - 194
- d3-4, Emsien - Eifélien : Pélites sombres à microrythmes gréseux (Unité septentrionale-La Munia et Médiane) - 195
- d2-3D, Praguien - Emsien : Calcaires massifs de la "Dalle" (Unité septentrionale-La Munia) - 199
- d1-3, Lochkovien - Praguien - Emsien indifférenciés - 202
- dC, Dévonien : Calcaires indifférenciés - 203
- dPG, Dévonien : Pélites et grès indifférenciés - 204
- d1a-b, Lochkovien : Siltites, shales noirs et calcaires rubanés (Unité septentrionale-La Munia) - 205
- o3-6, Ordovicien moyen-supérieur : Schistes argilo-silteux et grès - 215
- o, Ordovicien indifférencié : Schistes quartzeux bleutés, niveaux de schistes noirs - 217
- o1-2a, Ordovicien inférieur : Quartzites blancs - 221

Roches éruptives

- ÿ, Ophites - 289
- ïä, Lamprophyres et diabases en dykes et sills - 291
- Q, Quartz - 321

Figure 33 – Légende de la carte géologique harmonisée

5.3 Le cadre structural

La zone d'étude s'inscrit dans les grandes structures de la chaîne Pyrénéenne, chaîne de montagne orientée N110°E. Cette chaîne est compartimentée en trois grands ensembles structuraux, avec du nord au sud : la Zone Nord-Pyrénéenne, la Zone Axiale ou Haute Chaine Primaire et la zone Sud-Pyrénéenne. Ces trois ensembles sont compris entre deux grands bassins sédimentaires : le bassin d'Aquitaine au nord (avec la zone sous-pyrénéenne de transition) et le bassin de l'Ebre au sud (Figure 34 et Figure 35).

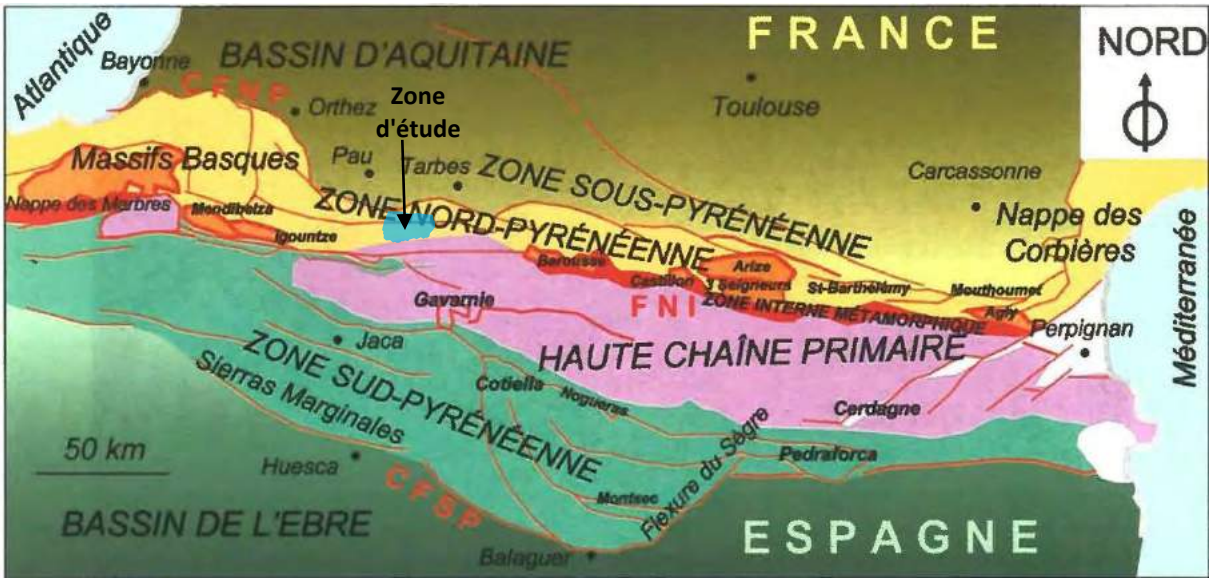


Figure 34 – Grandes unités structurales de la chaîne pyrénéenne (Canérot 2008), échelle graphique

La zone d'étude s'inscrit au sein de la zone Nord-Pyrénéenne qui est délimitée par deux accidents majeurs : le Chevauchement Frontal Nord Pyrénéen (CFNP) au nord et la Faille Nord Pyrénéenne (FNP ou Faille Nord Ibérique FNI) au sud (Figure 35, Figure 36, Figure 37 et Figure 38).

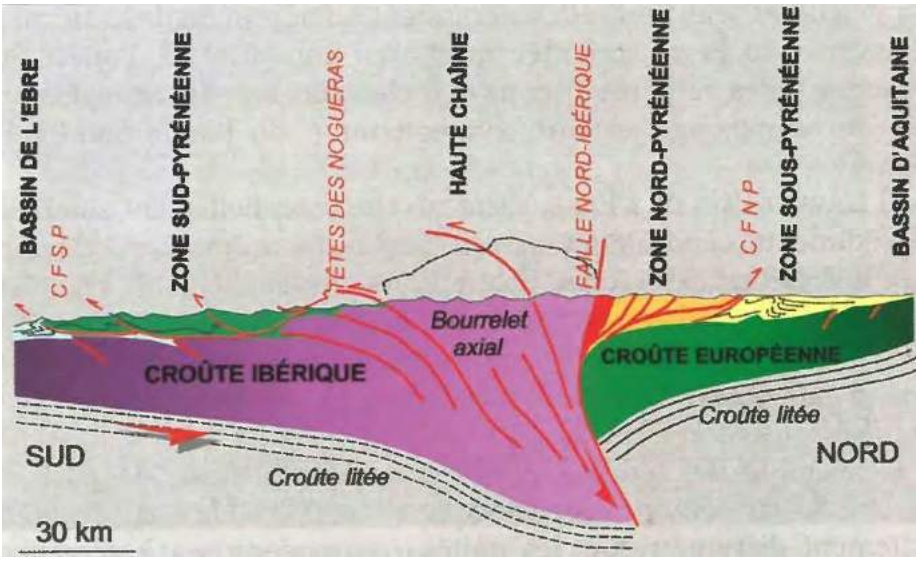


Figure 35 – Coupe structurale de la chaîne pyrénéenne (Canérot 2008), échelle graphique

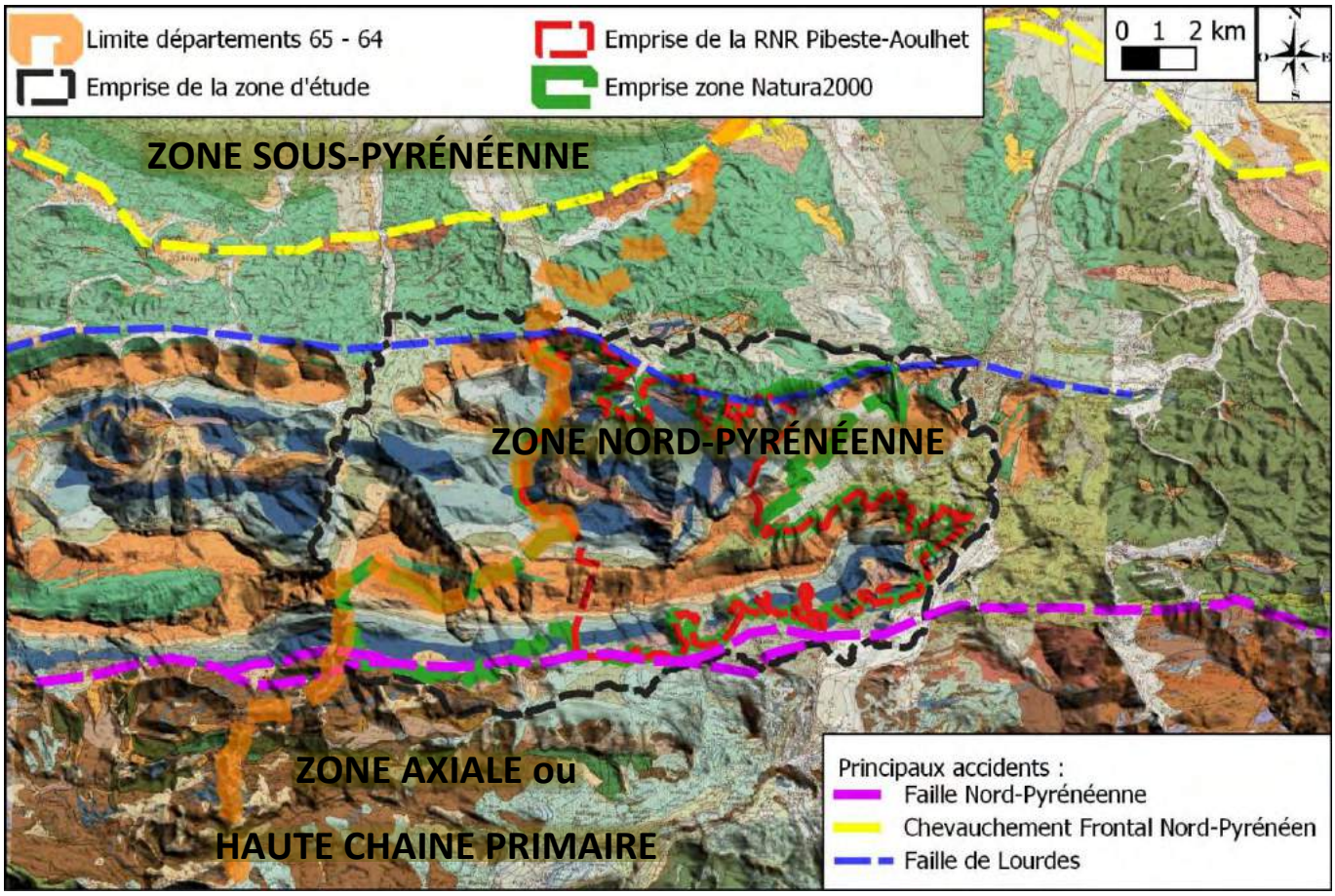


Figure 36 – Grandes unités structurales sur fond de cartes géologiques, échelle 1/200 000

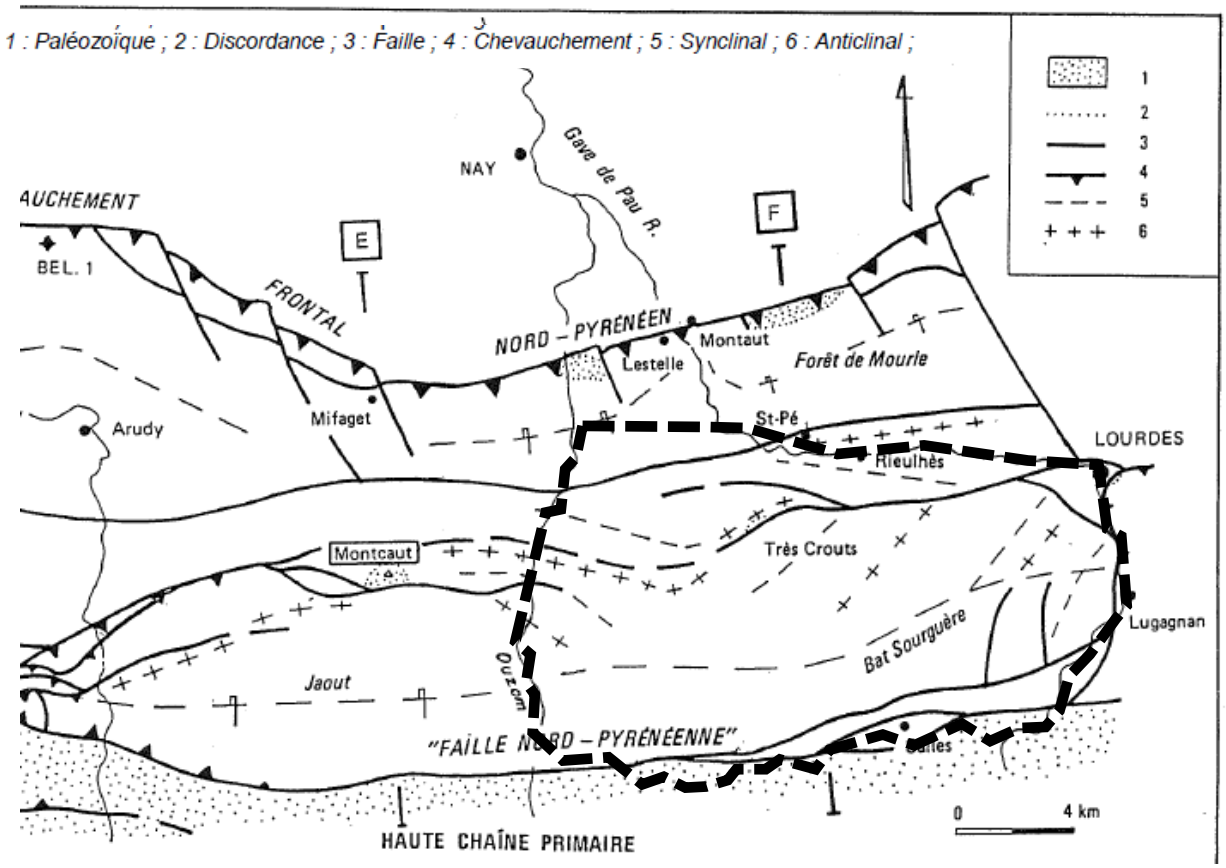


Figure 37 – Schéma structural de la zone d'étude, (Synthèse géologique des Pyrénées1996-2018), échelle graphique

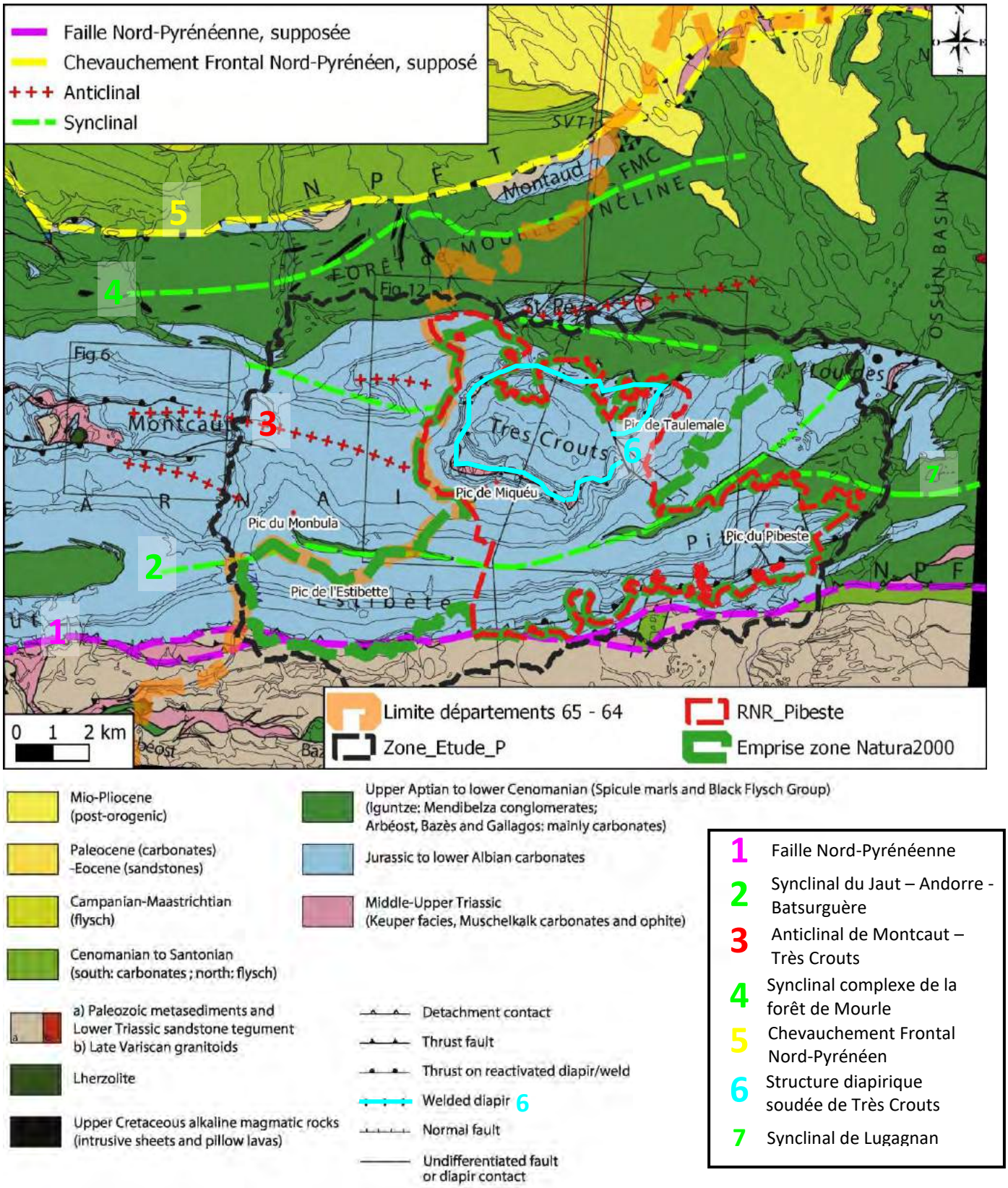


Figure 38 – Schéma structural de la zone d'étude, (Labaume et al., 2020), échelle 1/150 000

Plus précisément, la zone d'étude correspond à la terminaison orientale bigourdane d'un ensemble géologique dénommé "Les Chaînons béarnais". Les Chaînons Béarnais forment un

corps géologique de 50 km de long constitué de roches carbonatées datant du Jurassique au Crétacé inférieur et qui plonge sous le flysch albo-cénomanien des bassins de Mauléon à l'Ouest et d'Ossun à l'Est.

Les terrains ont été déformés pendant la mise en place de la chaîne pyrénéenne, ils sont plissés. Deux grandes familles de plis se succèdent sur l'emprise de l'étude : des synclinaux et des anticlinaux qui peuvent être plus ou moins complexes suivant leur déformation.

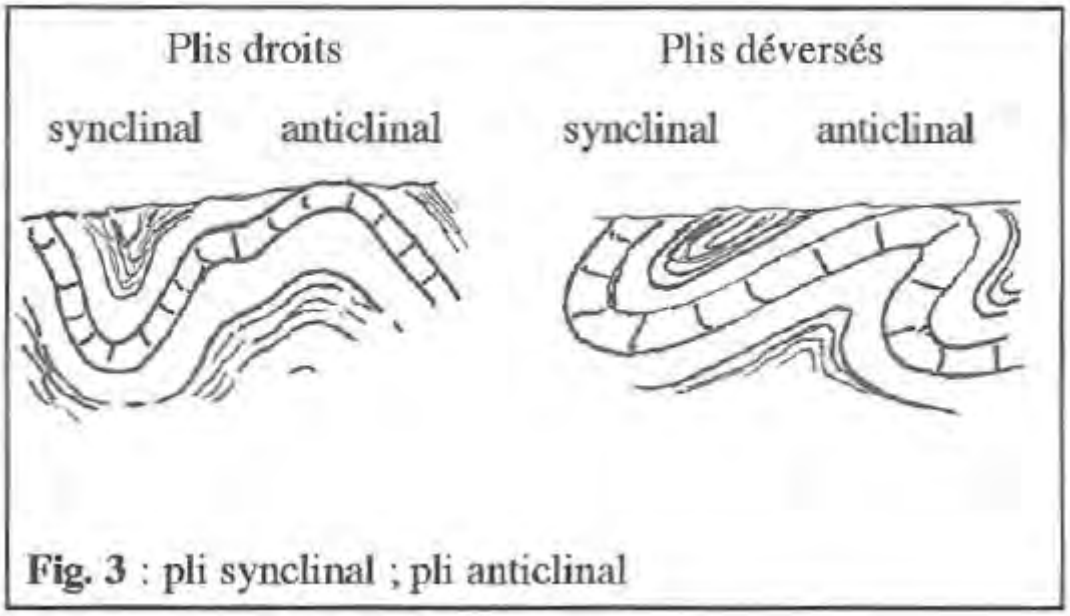


Figure 39 – Pli synclinal, pli anticlinal (J. Bauer 2008, cf. paragraphe Karstologie)

Sur la zone d'étude, nous retiendrons du sud vers le nord (Figure 37, Figure 38) : le synclinal du Jaüt – Andorre – Batsurguère, l'anticlinal de Montcaut – Très Crouts, le synclinal complexe de la forêt de Mourle. Entre ces structures plissées principales s'insèrent des anticlinaux et synclinaux secondaires. A hauteur de la forêt de Très Crouts, au sud de Saint-Pé-de-Bigorre, une structure particulière est présente apparaissant comme une structure anticlinale refermée sur elle-même en forme de cercle : il s'agit d'une structure diapirique soudée (welded diapir, Figure 38) dont le cœur se présente sous forme d'un synclinal et la périphérie sous forme d'un anticlinal.

De nombreuses coupes structurales ont été établies sur la zone d'étude par les différents auteurs ayant travaillé sur le secteur. Ces coupes sont localisées sur la Figure 40 et détaillées en annexe 1. Nous présentons ici une coupe de la partie occidentale de la zone d'étude sur la Figure 41, une coupe de la partie centrale sur la Figure 42 et une coupe de la partie orientale sur la Figure 43, sur lesquelles nous avons reporté les numéros de la légende des structures de la Figure 38.

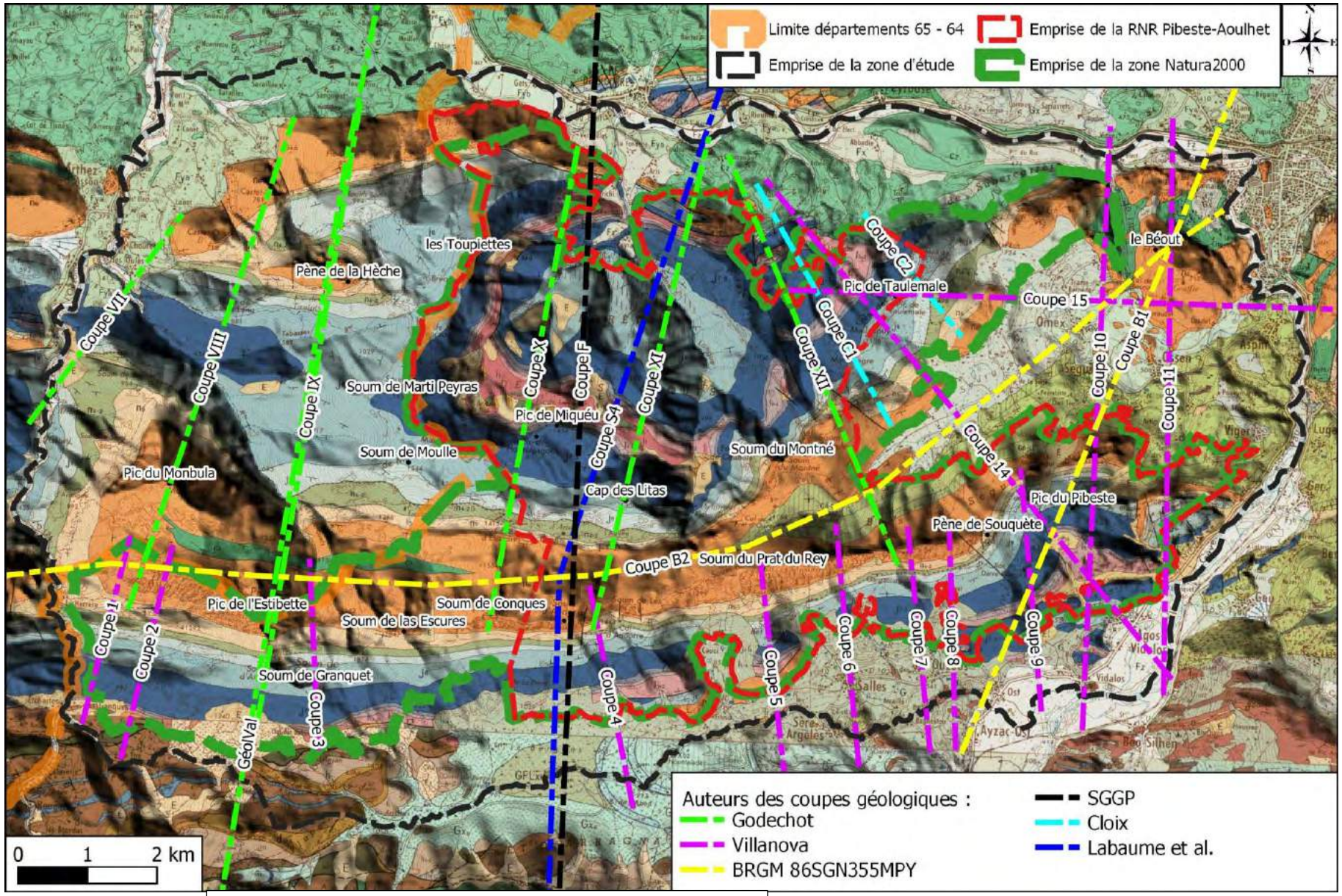


Figure 40 – Localisation des coupes géologiques, échelle 1/80 000

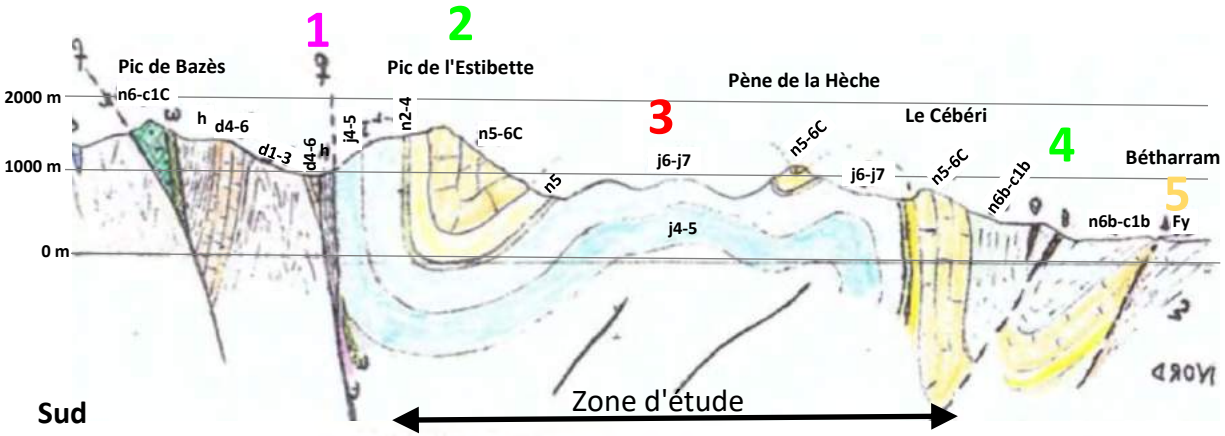


Figure 41 – Coupe GéolVal selon Y. Godechot, 2004, partie occidentale de la zone d'étude

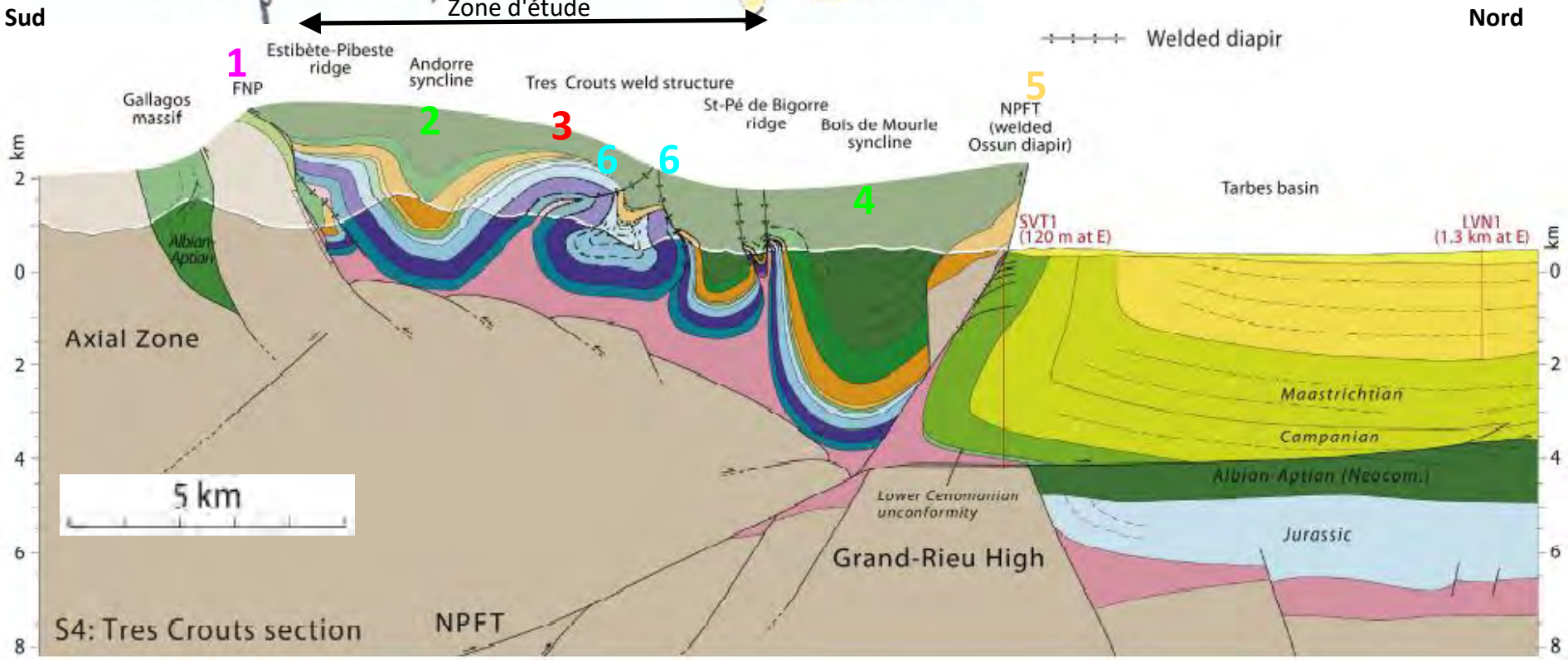


Figure 42 – Coupe S4, partie centrale de la zone d'étude, selon Labaume et al. (2020)

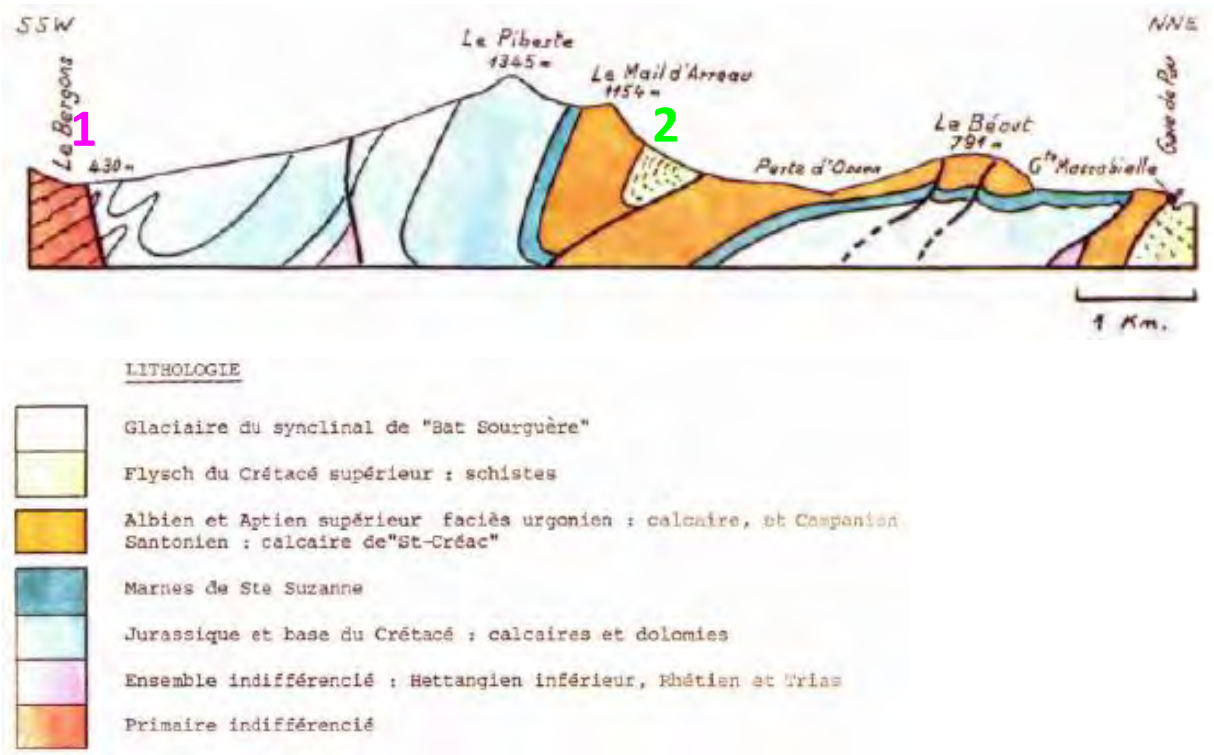


Figure 43 – Coupe B1, partie orientale de la zone d'étude selon BRGM, 1986.

5.4 L'histoire géologique

Les terrains que nous observons à l'affleurement et les structures géologiques que nous avons brièvement décrites sont l'héritage d'une longue histoire géologique qui a façonné ce secteur qui s'insère dans l'histoire plus générale de la chaîne montagneuse des Pyrénées. Cette dernière débute avec le cycle hercynien (entre -560 et -285 millions d'années (Ma), du Cambrien au Carbonifère) qui recouvre en discordance des terrains très anciens précambrien (> 560 Ma). L'orogénèse (formation des systèmes montagneux) hercynienne a une phase compressive d'édification des reliefs au Carbonifère (environ -300 Ma) se développant chronologiquement de l'Est (Pyrénées-Orientales) vers le Pays Basque à l'Ouest : plissements, accidents (failles, chevauchements, …) principalement orientés ONO - ESE. Les structures mises en place à cette époque vont profondément influencer la future chaîne Pyrénéenne qui s'édifiera au cycle dit Alpin. Du Permien au Trias moyen (-295 à -240 Ma), la chaîne hercynienne va subir une forte érosion qui va "effacer" les reliefs hercyniens. Le cycle alpin (-285 Ma à aujourd'hui) fait suite au cycle hercynien et présente une histoire différente selon la position géographique sur la chaîne actuelle des Pyrénées. Nous nous attacherons à l'histoire de notre secteur d'étude. A

partir du Trias, vont se déposer les terrains que nous pouvons observer très majoritairement dans les chaînons béarnais et plus particulièrement sur la zone d'étude.

A partir du Trias, une phase de rifting (ouverture de fossés ou de mers durant une phase d'extension entre deux plaques tectoniques) va créer des bassins toujours orientés ONO – ESE.

A la fin du Trias, l'extension conduirait selon certains auteurs à la mise en place des ophites.

A partir du Lias terminal, une marge passive (plateau continental, pente continentale et glacis, Figure 25) se met en place jusqu'au début du Dogger, avec dépôts de carbonates marins : calcaires, dolomies, marnes). Les variations de la nature des roches et de leur épaisseur traduisent les évolutions des mouvements des blocs effondrés ou basculés et des plaques.

Au Dogger, les variations de dépôts (calcaires à microfilaments puis dolomies) rendent compte du passage d'un plateau continental externe ouvert, à un plateau continental interne. La réduction des épaisseurs témoigne d'une accélération des mouvements verticaux.

Au Jurassique supérieur (Oxfordien et Kimméridgien), les dépôts marno-calcaires, de marnes puis de calcaires et de dolomies (au Portlandien) traduisent l'ennoyage graduel du plateau continental jurassique sous l'effet conjugué de l'eustatisme positif (montée générale du niveau de la mer) et de la tectonique d'ouverture de l'Atlantique.

A la fin du Jurassique supérieur, tout début du Crétacé inférieur (Néocomien), à la suite d'une régression mondiale généralisée (retrait de la mer liée à une baisse du niveau de la mer ou à un soulèvement des continents), les formations du Jurassique ont été portées à émersion et ont été ainsi exposées à l'érosion.

Ensuite, la principale étape de rifting avec la cinématique de la plaque ibérique par rapport à la plaque européenne, qui s'est déroulée au début du Crétacé jusqu'au milieu du Crétacé, est toujours très discutée avec divers modèles d'ouverture du Golf de Gascogne et de déplacement de l'Ibérie par rapport à l'Eurasie (plaque européenne) qui est considérée comme fixe. Trois modèles sont présentés sur la Figure 44 tirée de la thèse de R. Salardon (2016). Nous ne rentrerons pas dans ces discussions, mais nous présentons une synthèse commentée, établie par P. Labaume et al. (2020), montrant l'évolution du secteur étudié (Chaînons béarnais) entre le début du Crétacé et l'époque actuelle en Figure 45. Cette figure montre l'importance selon certains auteurs de l'halocinèse (tectonique particulière liée à la présence de sels et les structures qui en découlent) sur l'histoire géologique des chaînons béarnais et plus particulièrement de la zone d'étude.

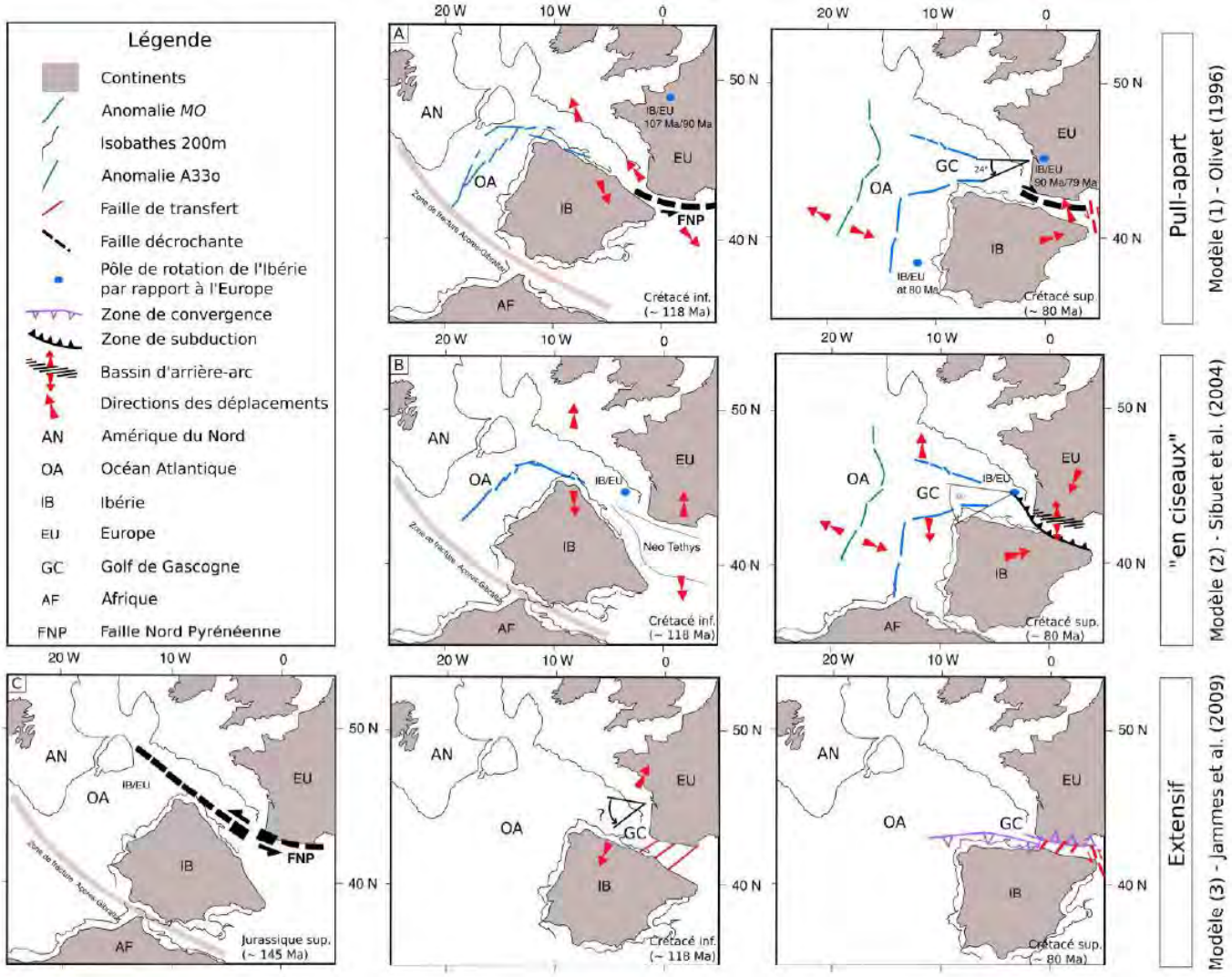
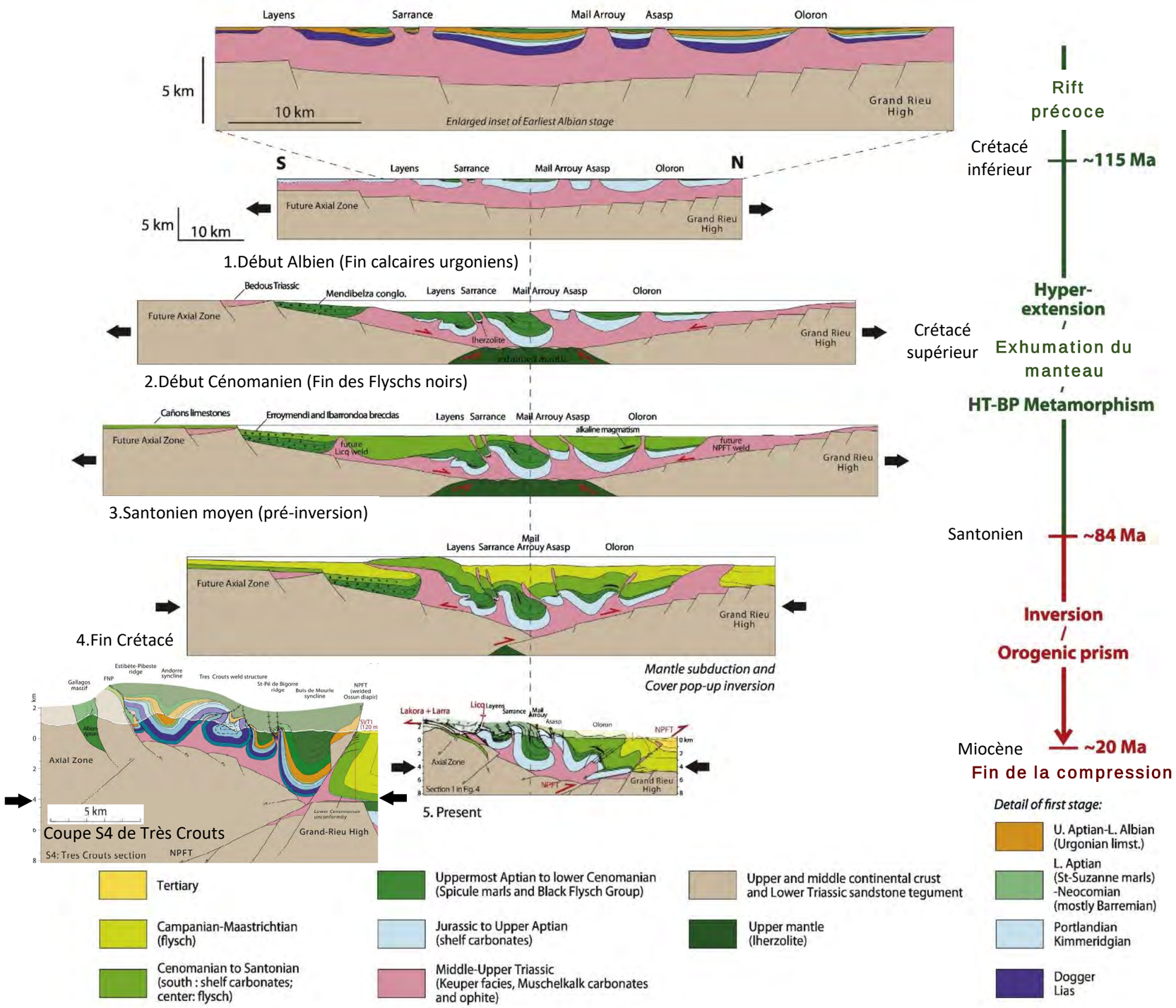


Figure 44 – 3 exemples de modèles de cinématique de la plaque Ibérique (Salardon 2016).

Notons que les séries flyschs qui ont succédé au flyschs noirs albo-cénomanien et éventuellement aux flyschs cénomano-turonien n'ont pas été préservés sur la zone d'étude du fait de l'érosion mais sont bien représentés dans la zone sous-pyrénéenne au nord du Chevauchement Frontal Nord-Pyrénéen. Les terrains cénozoïques (tertiaires) sont également absents de cette zone mais nous les trouvons plus au nord (bassins flyschs pour les dépôts marins et épandages molassiques pour les dépôts continentaux), dans la zone sous-pyrénéenne ou au nord de Lourdes où des lambeaux d'argiles à galets (éléments de l'érosion continentale) coiffent quelques sommets de coteaux.



Phase d'extension depuis le Trias. Après les dépôts salifères, développement des plateformes carbonatées. Initialisation des diapirs salifères.
Au début du Crétacé, la phase d'émersion Berriasien – Barrémien va favoriser la karstification des formations jurassiques.

Point culminant de la phase d'extension :
Création des bassins profonds avec remplissage de séries de flyschs.
Amincissement de la croûte continentale et exhumation du manteau (remontées magmatiques).
Métamorphisme de haute température et basse pression

Phase orogénique qui débute à la fin du Crétacé (84 Ma) jusqu'au Miocène inférieur (20 Ma). Il y a inversion de la tectonique de rift et reprise en compression des structures extensives héritées, avec resserrement des diapirs. La surrection de la chaîne favorise l'érosion.
Subduction continentale de la croute ibérique sous la croute européenne.
La fracturation s'accompagne du phénomène de karstification et de bréchification.

Durant le Miocène, l'érosion se poursuit et les dépôts molassiques s'accumulent en couches subhorizontales en discordances sur les terrains antérieurs au nord de la zone d'étude. Au Quaternaire, une dernière phase érosive importante marque le paysage avec l'action des glaciers.
La karstification se poursuit actuellement.

Figure 45 – Evolution structurale selon Labaume et al. 2020

6 QUATERNAIRE / GLACIATIONS

6.1 Données et bibliographie

La cartographie des formations quaternaires est établie à partir des cartes géologiques du BRGM dont le degré de précision varie entre la feuille de Lourdes et celle d'Argelès-Gazost beaucoup plus détaillée et à partir de la cartographie spécifique du Quaternaire des Pyrénées à l'échelle 1/400 000 dont les couches SIG ont été téléchargés à partir du site de l'IGME (Instituto Geológico y Minero de España). La bibliographie à hauteur de la zone d'étude est peu fournie, en dehors de la thèse de M. Mardones de 1982 et de quelques publications scientifiques. Les datations restent un sujet débattu au sein de la communauté scientifique.

Données acquises	Utilisation	Remarques
Site internet Infoterre.brgm.fr	Intégration couche WMS des cartes géologiques imprimées au 1/50 000 ; Intégration des couches vecteurs des cartes géologiques harmonisées au 1/50 000 ;	Cartographie initiale : carte n°1052 feuille de Lourdes et carte n°1070 feuille d'Argelès-Gazost
Site internet IGME : http://www.igme.es	Couches vecteurs du Quaternaire des Pyrénées à l'échelle 1/400 000	
ENS de Lyon, Université de Lyon https://planet-terre.ens-lyon.fr/	Documents pédagogiques sur le climat, ressources scientifiques pour l'enseignement des sciences de la Terre et de l'Univers	Intégration d'informations sur les cycles de Milankovitch

Bibliographie :

M. Mardones, Université des Sciences de Toulouse, Thèse présentée en décembre 1982. Le Pléistocène supérieur et l'Holocène du piémont de Lourdes : Le gisement de Biscaye ;

V. Andrieu-Ponel et al., 1988.Chronologie de la déglaciation des Pyrénées françaises. Dynamique de sédimentation et contenu pollinique des paléolacs ; application à l'interprétation du retrait glaciaire ;

M. Reille, V. Andrieu, 1995, Vegetation History and Archaeobotany. The late Pleistocene and Holocene in the Lourdes Basin, Western Pyrénées, France: new pollen analytical and chronological data ;

M. Calvet, 2004, Developments in Quaternary Science,Vol. 2. The Quaternary Glaciation in of the Pyrenees.

T. Auly, 2005. Comparaison entre les bassins de Lourdes et d'Arudy ;

T. Auly, Université de Pau, 2008 ?. Quelques morphologies de rapport karst / glaciaire dans les Pyrénées ;
M. Delmas, Thèse de l'Université de Paris 1. Chronologie et impact géomorphologique des glaciations quaternaires dans l'Est des Pyrénées ;
M. Calvet et al., 2011, Developments in Quaternary Science,Vol. 15. Recent Advances in Research on Quaternary Glaciations in the Pyrenees.

6.2 Histoire géologique du Quaternaire et des glaciations

L'élévation de la partie centrale des Pyrénées se poursuit au début du Quaternaire et ne devient que très faible actuellement (<= 1 mm/an). Aux climats chauds du Mésozoïque et du Cénozoïque succède un climat alternant périodes froides et périodes plus tempérées à partir de la fin du Cénozoïque.

En l'absence d'impacts anthropiques, ces alternances sont liées aux cycles dit de Milankovitch ou théorie astronomique du changement climatique. Cette théorie a été en partie confirmée par les datations réalisées sur des carottes de glace mais les liens entre les cycles de Milankovitch et les variations climatiques restent complexes et ne sont pas totalement expliqués. Pour schématiser, les volumes de glace sont en lien avec les variations cumulées de l'excentricité (E) de l'orbite terrestre, de l'inclinaison de l'axe de la Terre (T pour Tilt en anglais) et de la précession de l'axe de rotation et rotation de l'orbite terrestre (P).

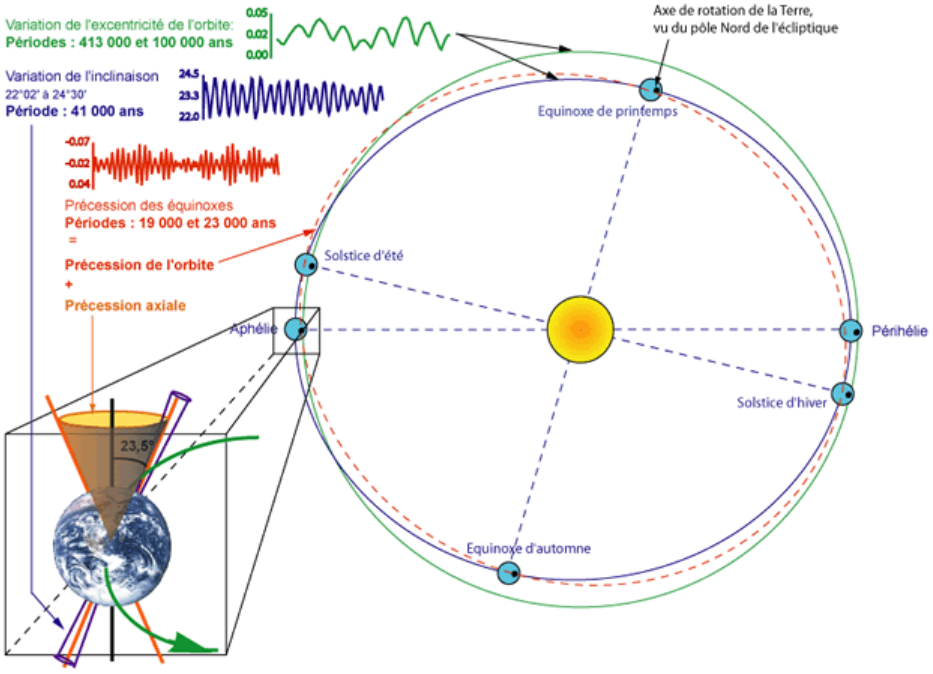


Figure 46 – Cycles de Milankovitch (ENS Lyon, Univ Lyon)

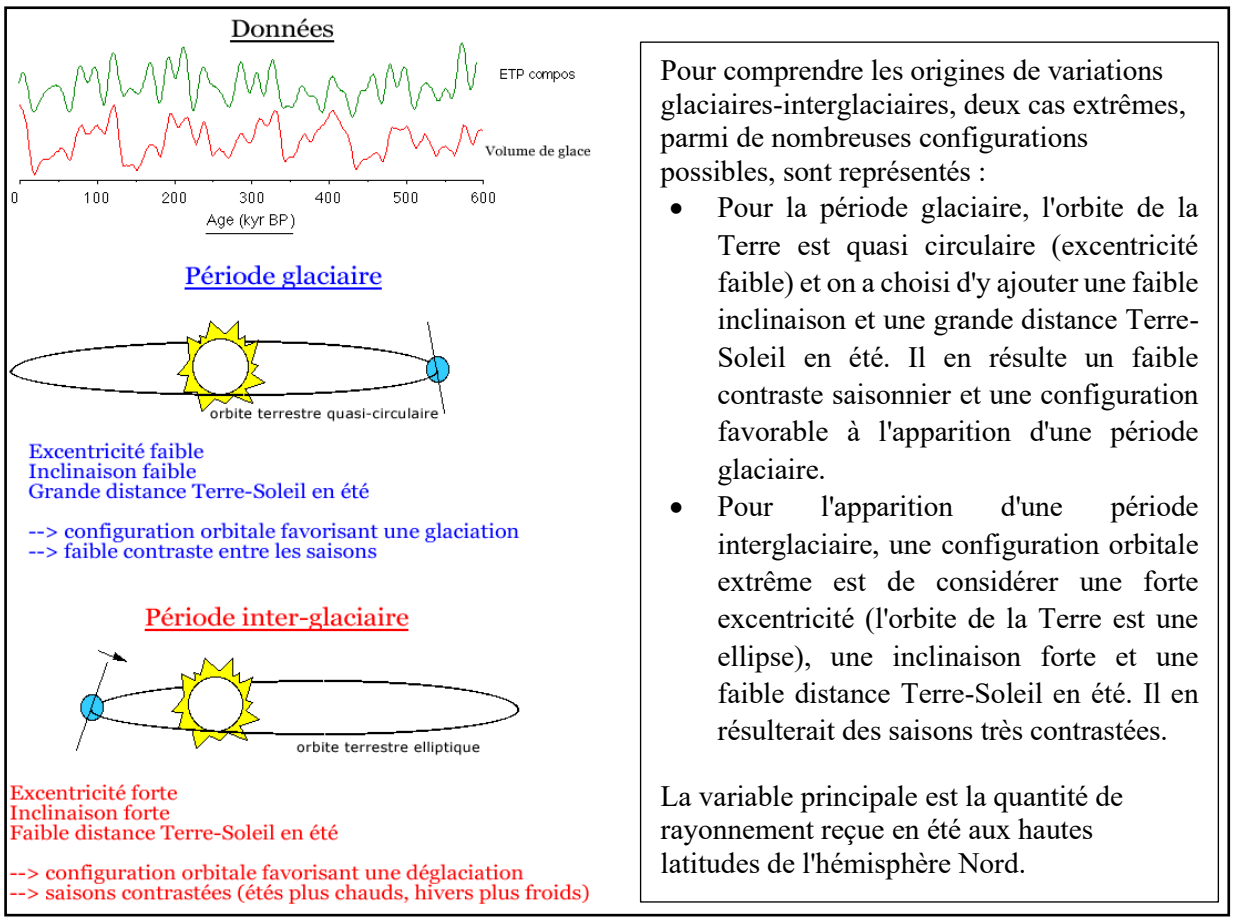


Figure 47 – Relations entre volume des glaces et les cCycles de Milankovitch (ENS Lyon, Univ Lyon)

Durant les temps géologiques, il y a eu plusieurs périodes glaciaires, au Précambrien, à la fin de l'Ordovicien, à la fin du Carbonifère et au Quaternaire, d'intensité et de durée diverses.

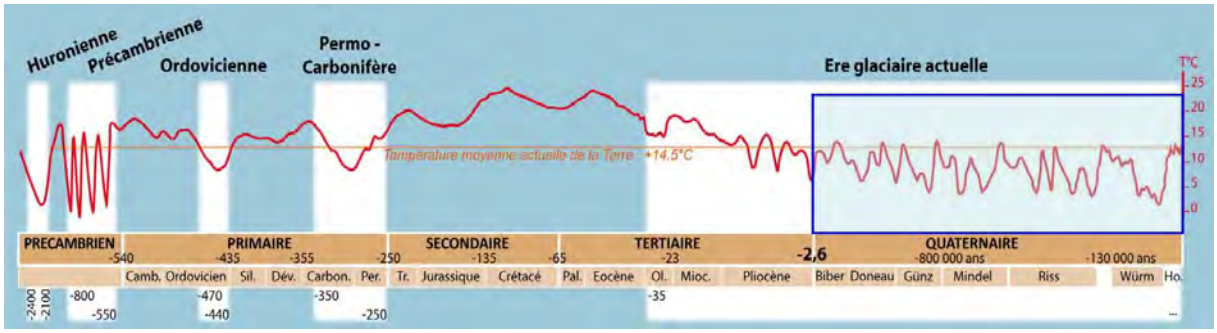


Figure 48 – Périodes glaciaires à travers les temps géologiques (CNRS, Université de Savoie)

Les manifestations visibles sur la zone d'étude correspondent aux glaciations du Quaternaire qui ont façonné une partie des terrains présents à l'affleurement et plus particulièrement celles du Riss et du Würm. Les cinq phases glaciaires et les stades inter-glaciaires des Pyrénées sont présentés sur la Figure 49, avec la chronologie générale.

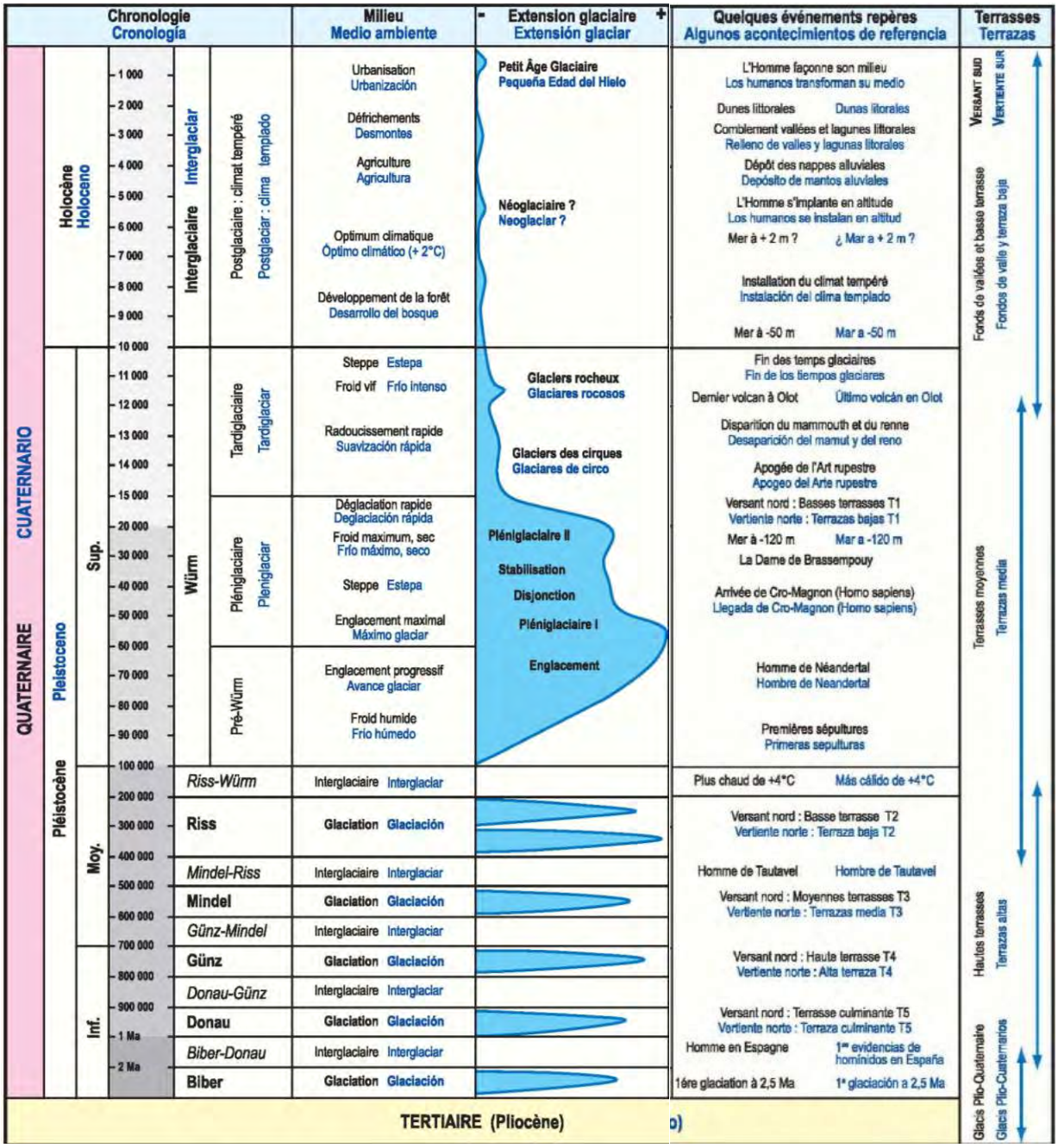


Figure 49 – Esquisse du Quaternaire (BRGM, IGME)

Dans le détail, les datations des maximums des phases glaciaires du Quaternaire ou des phases de déglaciation varient en fonction de la localisation géographique : de la longitude (Est – Ouest, Méditerranée -Atlantique) et de la latitude (Sud – Nord) au sein de la chaîne pyrénéenne. Le dernier maximum glaciaire du Würm est daté d'environ 20 000 ans BP (Before Present). Il s'en suit une déglaciation rapide.

Une datation des évènements des 45 000 dernières années du Würm et du post-Würm sur le secteur de Lourdes issue de la thèse de M. Mardones (1982) et réalisée à partir de l'analyse de carottes de sédiments est présentée sur la Figure 50.

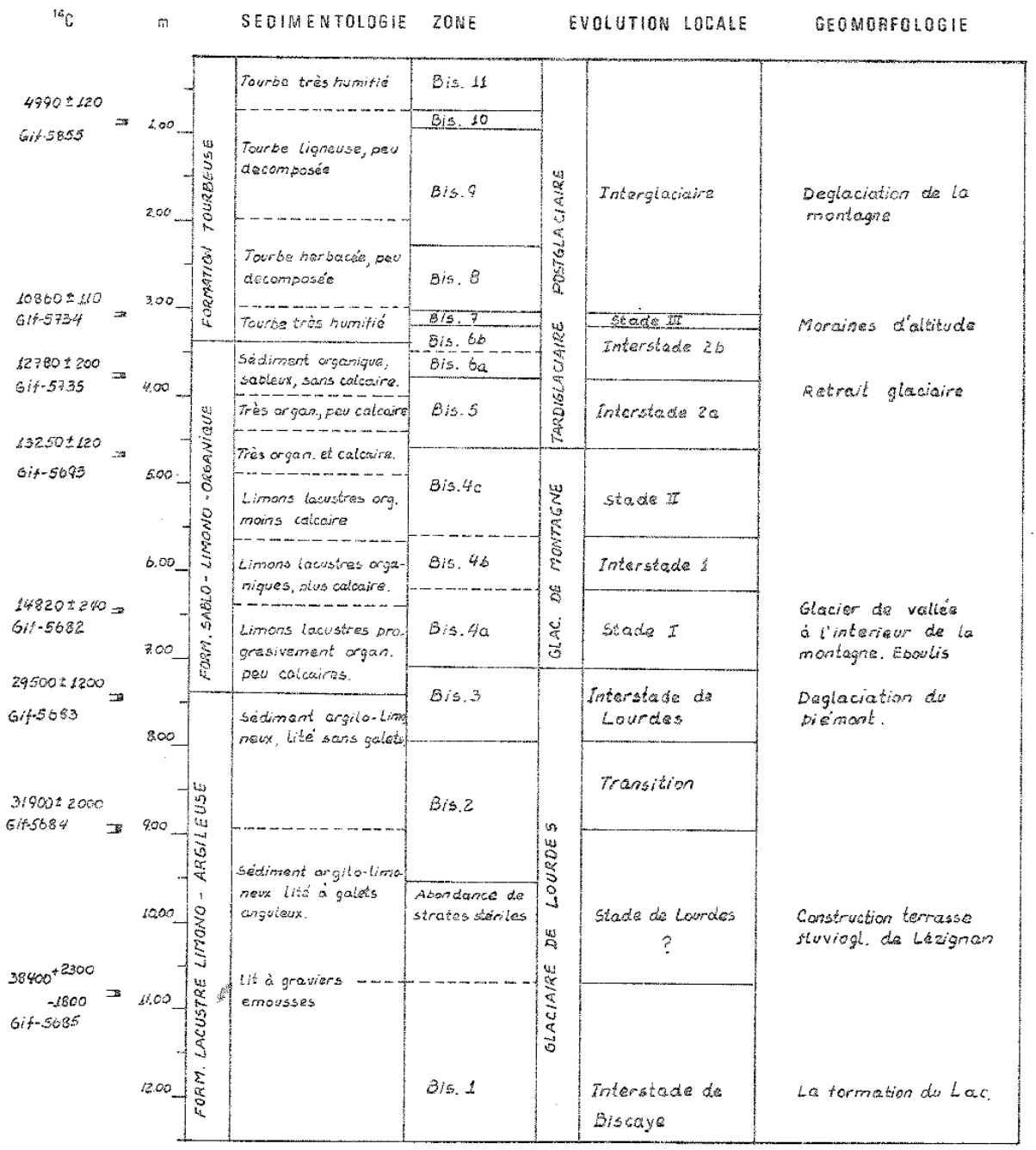


Figure 50 – Datation des évènements glaciaires du Würm et psot-Würm (M. Mardones, 1982)

Nous présentons sur la Figure 51 l'extension du glacier de Lourdes au Würm, selon M. Mardones (1982) et sur la Figure 52 l'extension des glaciers pyrénéens et plus particulièrement celui d'Argelès – Lourdes et sa difluence dans la vallée du Bergons, selon Calvet (BRGM, IGME, carte géologique du Quaternaire des Pyrénées à 1:400 000).

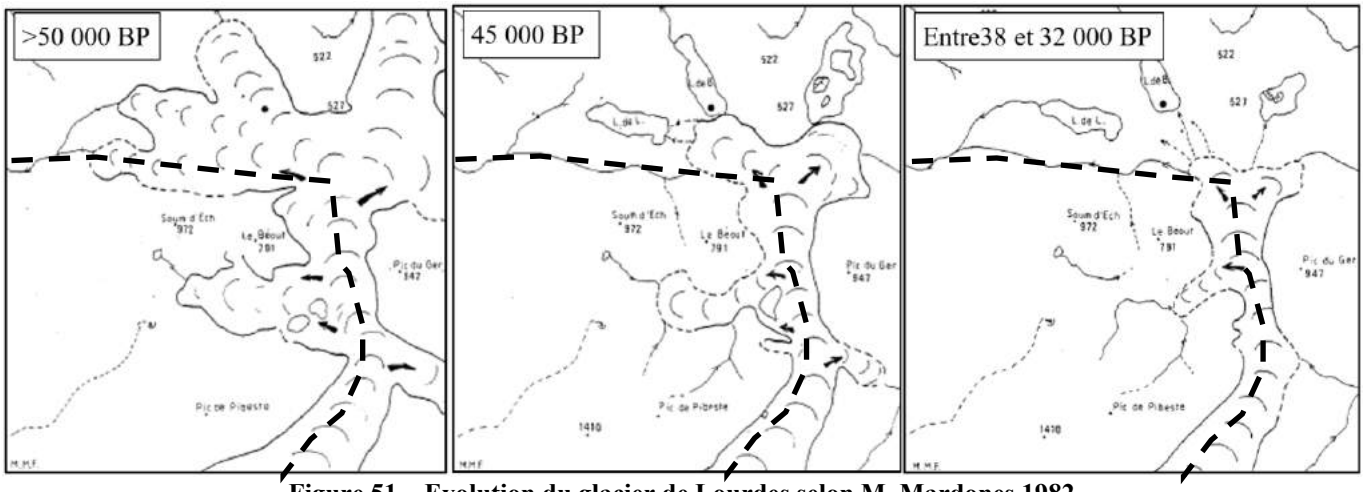


Figure 51 – Evolution du glacier de Lourdes selon M. Mardones 1982

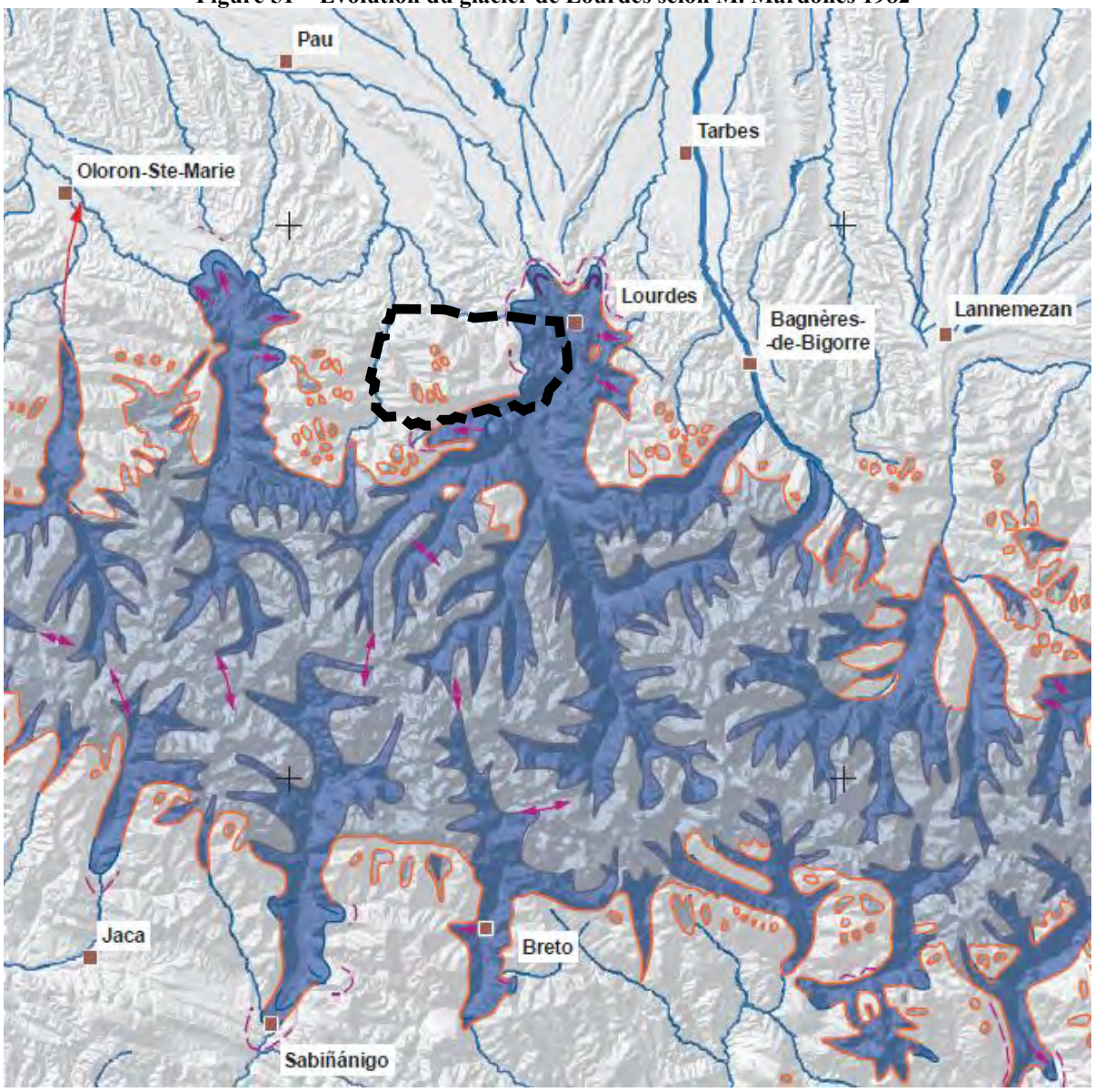


Figure 52 – Extension des glaciers pyrénéens au Quaternaire (d'après M. Calvet 2004 modifié, BRGM – IGME)

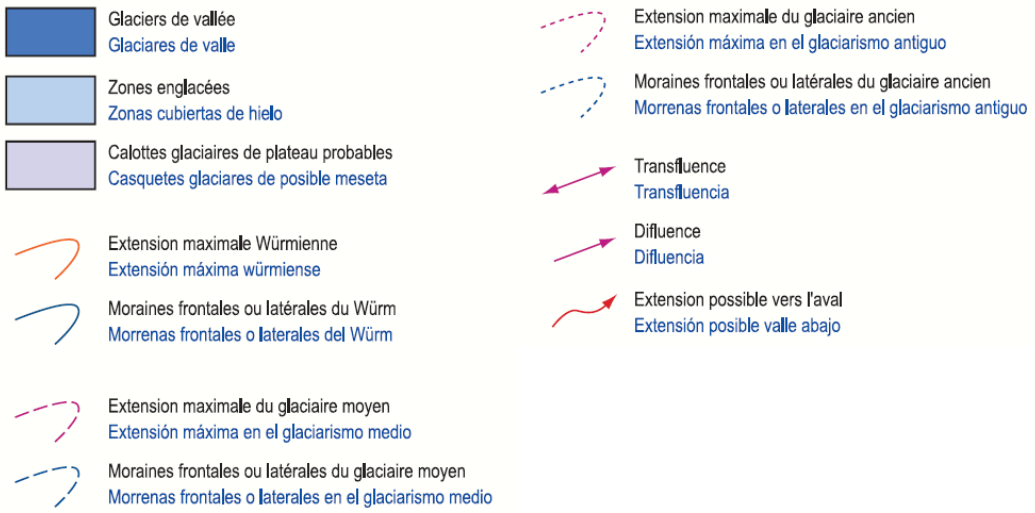


Figure 53 – Légende de la Figure 52

Le glacier a façonné les vallées, érodés des sommets et des surfaces rocheuses et a déposé des moraines. Selon les dépôts morainiques observés sur les versants, le glacier aurait eu une altitude de 800 à 1000 m environ. Il a créé des lacs glaciaires dont des reliques sont visibles à la tourbière du col d'Ech et au lac de Lourdes. Pendant les phases inter-glaciaires et le post glaciaire une sédimentation fine et plus distale s'est mise en place avec des dépôts fluviaux ou fluvio-glaciaires correspondant à des alluvions qui vont s'agencer en terrasses de part de d'autre des cours d'eau actuels mais également dans les paléo-vallées.

Nous avons vu que la limite Est et Nord de la zone d'étude correspond à la vallée actuelle de la rivière du Gave de Pau. Ce cours d'eau n'a pas toujours emprunté cette vallée au cours des temps glaciaires : au Mindel, les moraines frontales (Adé, Bartrès, Poueyferré, Figure 54) ont fermé les anciennes vallées dont les écoulements se faisaient vers le nord (Tarbes et Morlaàs) et le cours d'eau a emprunté l'actuelle vallée de l'Ousse, vers Pau. Puis au Riss, ces moraines frontales auraient provoqué un détournement de la majeure partie des écoulements qui auraient emprunté la vallée actuelle du Gave de Pau dont le creusement principal aurait pu se produire durant l'inter-glaciaire Riss – Würm et les phases d'alluvionnement pendant la période du Würm et surtout au post-Würm. Selon Andrieu et al. (1988), le Gave de Pau se serait engagé dans sa vallée actuelle à partir de 29 500 ans BP, soit à peu près au dernier maximum glaciaire du Würm.

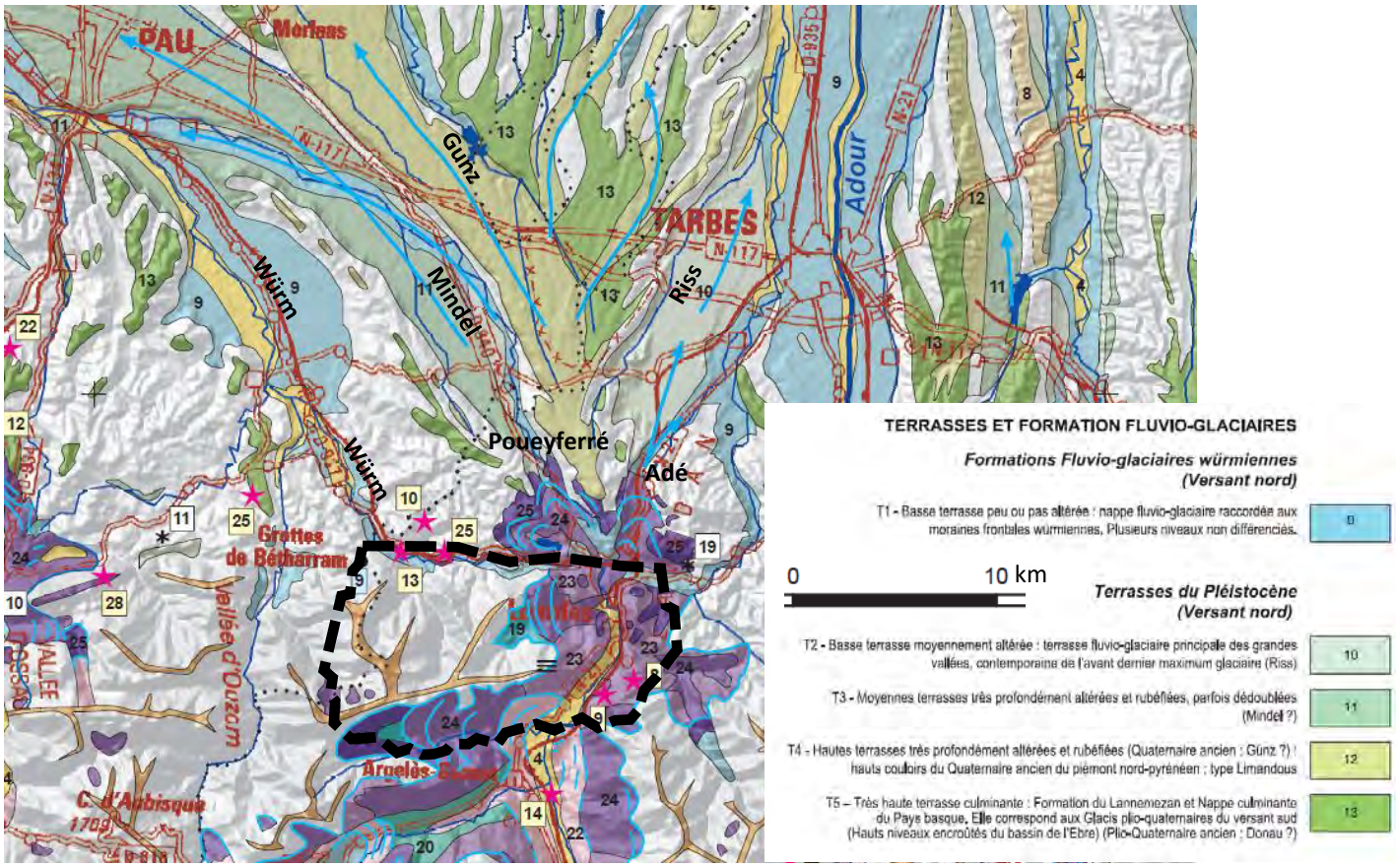
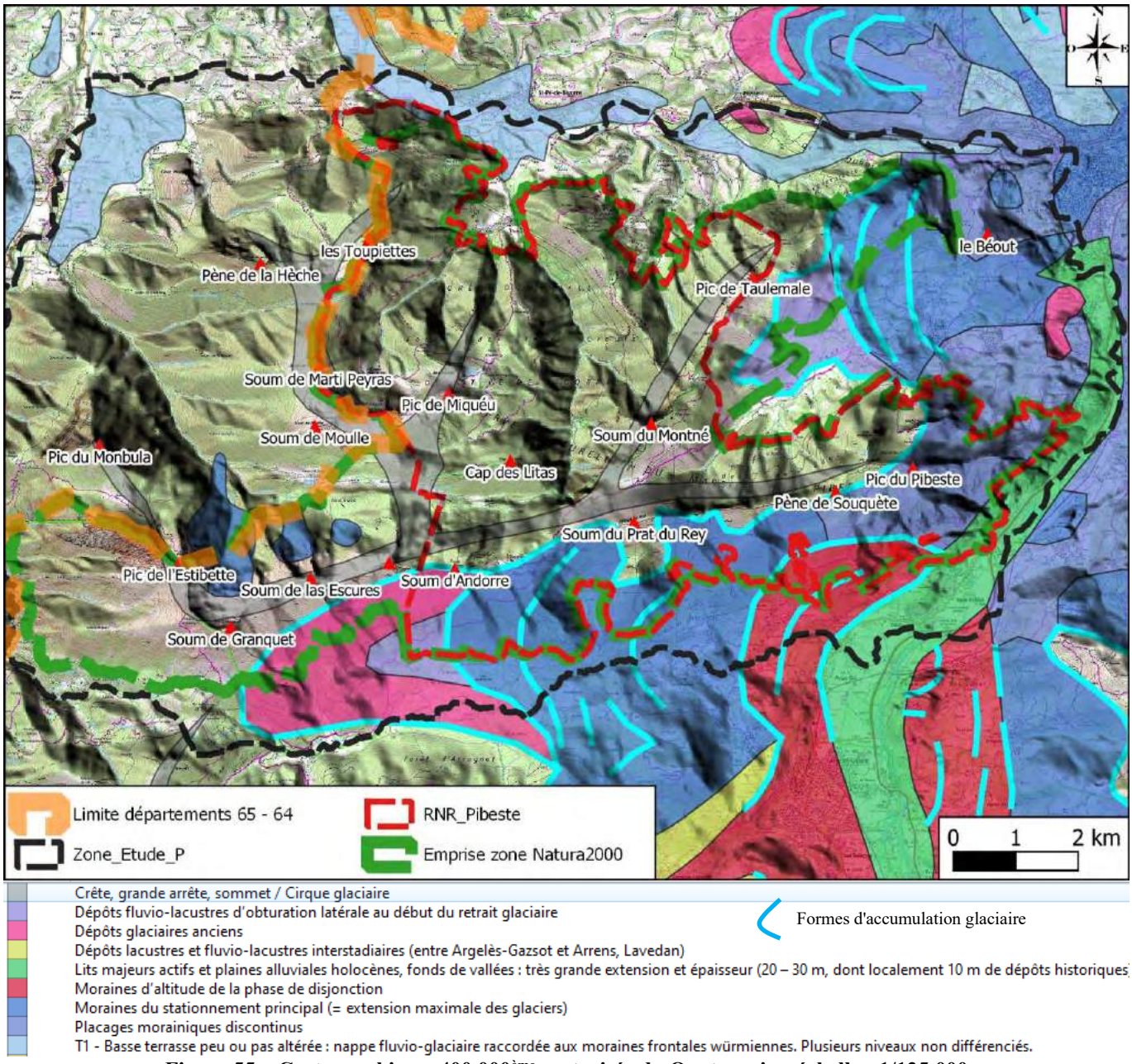


Figure 54 – Evolution des apports issus du glacier de Lourdes, échelle graphique

Sur la zone d'étude, nous trouvons essentiellement (Figure 55), en dehors des terrasses récentes qui jalonnent le cours d'eau du Gave de Pau et de l'Ouzom, des moraines de la phase d'extension maximale dans la vallée du Bergons et dans la vallée de la Batsurguère et en amont de ces corps morainiques, des moraines de la phase de disjonction (déconnection des langues glaciaires des vallées adjacentes au glacier principal lors de la phase de retrait de ce dernier), langues qui amorcent une régression totale sur ce secteur au Würm.

Un extrait à hauteur d'une partie de la zone d'étude de la carte géologique et géomorphologique du Quaternaire tirée de la thèse de M. Mardones (1982) est présentée sur la Figure 56. Il intéresse essentiellement la vallée de la Batsurguère et le massif du Béout.

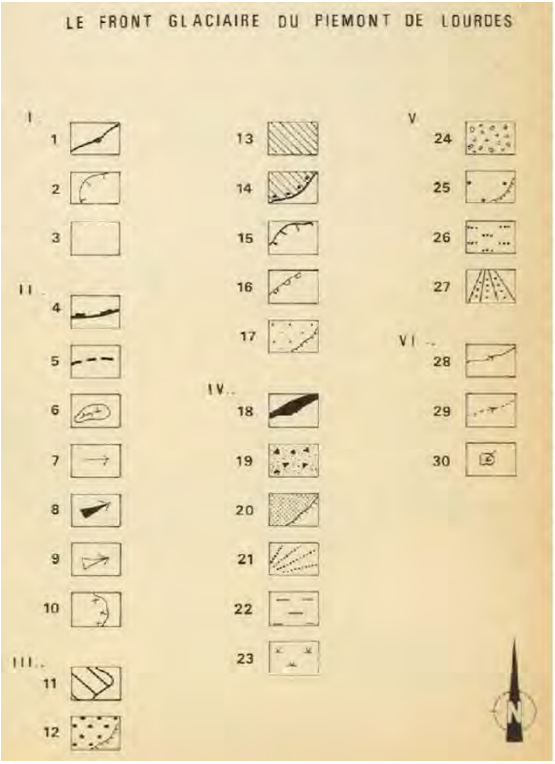


Crête, grande arrête, sommet / Cirque glaciaire
Dépôts fluvio-lacustres d'obturation latérale au début du retrait glaciaire
Dépôts glaciaires anciens
Dépôts lacustres et fluvio-lacustres interstadiaires (entre Argelès-Gazsot et Arrens, Lavedan)
Lits majeurs actifs et plaines alluviales holocènes, fonds de vallées : très grande extension et épaisseur (20 – 30 m, dont localement 10 m de dépôts historiques)
Moraines d'altitude de la phase de disjonction
Moraines du stationnement principal (= extension maximale des glaciers)
Placages morainiques discontinus
T1 - Basse terrasse peu ou pas altérée : nappe fluvio-glaciaire raccordée aux moraines frontales würmiennes. Plusieurs niveaux non différenciés.

Formes d'accumulation glaciaire

Figure 55 – Cartographie au 400 000ème vectorisée du Quaternaire, échelle : 1/125 000

Figure 56 – Géologie, géomorphologie du Quaternaire selon M. Mardones 1982



I. - L'ENVIRONNEMENT MORPHOSTRUCTURAL.
1 - Massif montagnard et crêtes de recoupement.
2 - Escarpement retouché par la karstification.
3 - Plateau de piémont, préglaciaire.
II. -FORMES D'EROSION GLACIAIRE.
4 -Paroi d'auge glaciaire
5- Versant d'auge supposé
6 - Verrou
7 - Chenaux juxtaglaciaires
8 - Transfluence
9 - Diffluence
10 -Replat rocheux (à l'Ouest d'Omex enseveli par des sédiments morainiques).
III. - LES FORMES ET DEPOTS GLACIAIRES DES NIVEAUX SUPERIEURS ET MOYENS.
11 Placages morainiques du niveau supérieur.
12 -Nappe fluvioglaciaire du niveau supérieur
13 - Dépôt morainique du niveau moyen.
14 - Vallums dégradés du niveau moyen.
15 - Surcreusement glaciaire
16 - Moraines latérales du niveau moyen.
17 -Terrasse fluvioglaciaire du niveau moyen.
IV. - FORMES ET DEPOTS GLACIAIRES DES NIVEAUX INFERIEURS. FACIES EXTERNE.
18 - Vallum morainique (> 50000 BP)
19 - Moraine indifférenciée
20 - Terrasse fluvioglaciaire (> 50000 BP)
21 - Cône fluvioglaciaire de transition
22 - Dépression d'obturation latérale.
23 -Tourbière de comblement lacustre.
V. - FORMES ET DEPOTS GLACIAIRES DES NIVEAUX INFERIEURS. FACIES INTERNE.
24 - Placages morainiques (38000 BP - 32000 BP)
25 - Terrasse fluvioglaciaire (Idem).
26 - Alluvions subactuelles.
27 - Cône torrentiel postglaciaire.
VI. - HYDROGRAPHIE.
28 - Cours d'eau permanent.
29 -Cours d'eau temporaire.
30 - Perte.

Figure 57 – Légende de la Figure 56

Les processus de karstification amorcés au Paléogène vont s'accentuer au Quaternaire. Les formes d'altération superficielles sur les formations carbonatées et la fracturation souterraine avec l'individualisation de conduits, de drains et de cavités vont se développer durant cette période et s'organiser en réseaux hiérarchisés. Les formes majeures selon les travaux de T. Auly (2005 et 2008) sont présentées sur les Figure 58 et Figure 59.

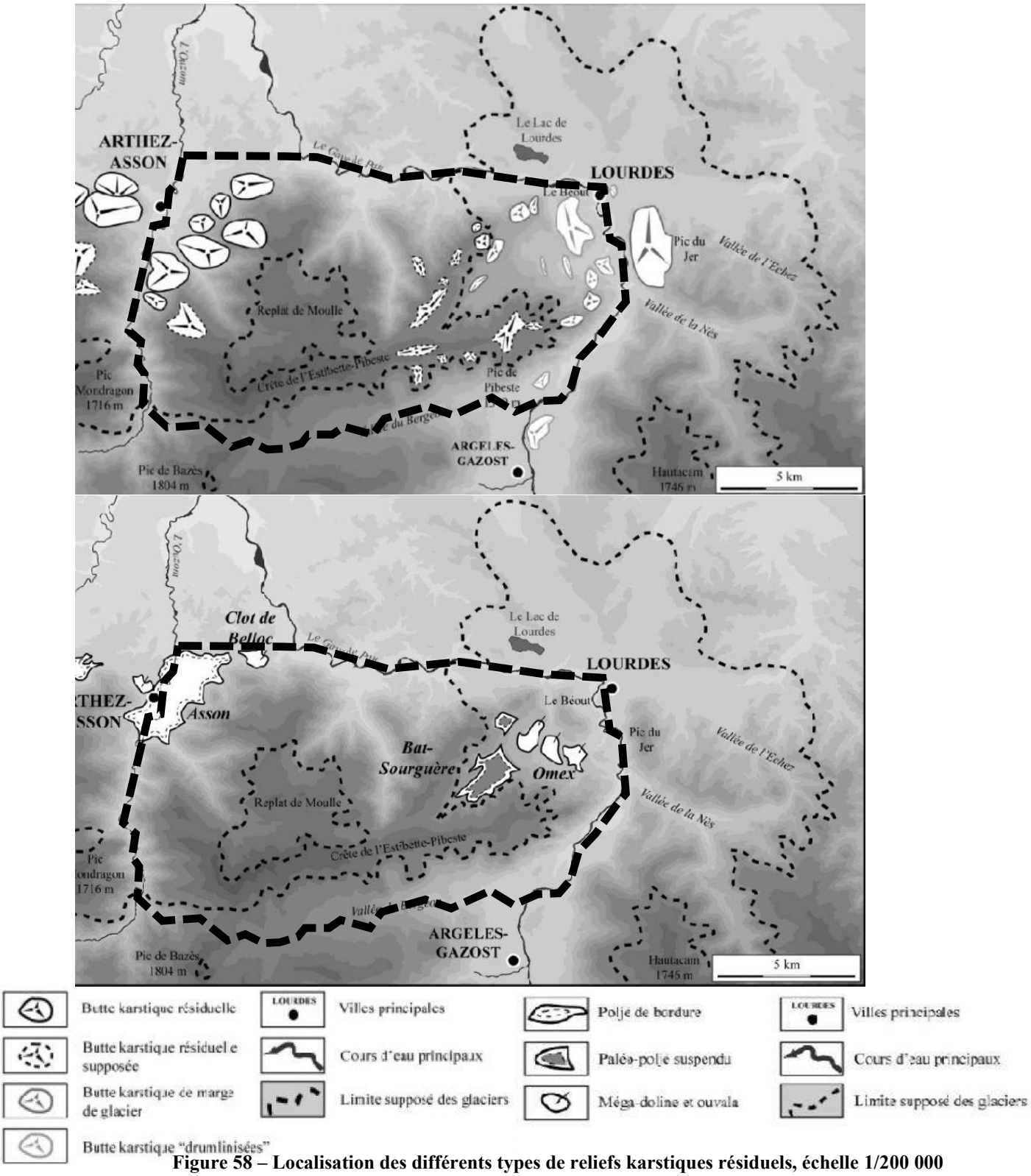


Figure 58 – Localisation des différents types de reliefs karstiques résiduels, échelle 1/200 000

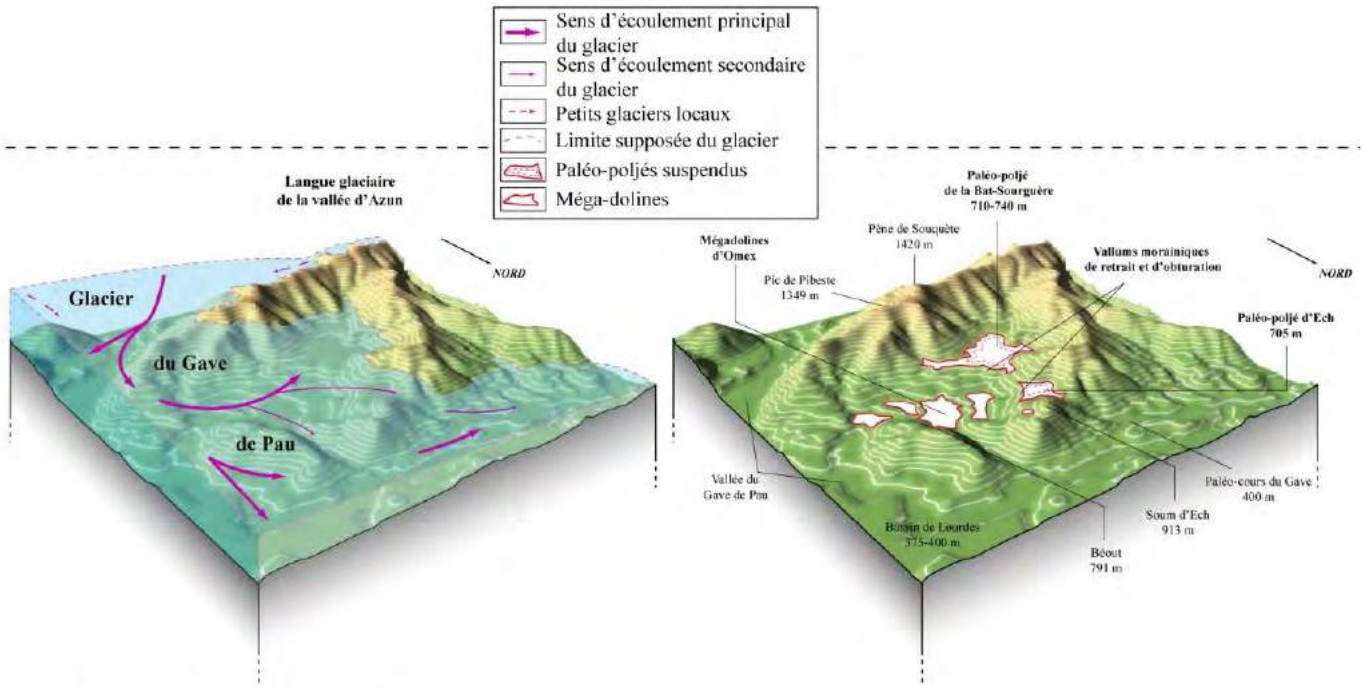


Figure 59 – Le paléo-poljé de la Batsurguère (T. Auly, 2008)

Les formes ponctuelles de la karstification sont présentées dans le paragraphe dédié, paragraphe et cartographies principalement fondés sur les données du Comité Départemental Spéléologique et de Canyon des Hautes-Pyrénées (CDSC65).

7 KARSTOLOGIE

La karstologie est une **science pluridisciplinaire** qui s'attache a étudié un objet particulier : le karst.

Le terme Karst qui provient de l'allemand et désigne une géomorphologie particulière de plateaux calcaires de Slovénie (Kras), d'Italie (Carso) et de Croatie (Krs). Le karst se développe sur des roches carbonatées ou salines qui sont propices à la dissolution sous certaines conditions de climat et de couverture.

Aux études **géomorphologiques** et **géologiques** de ces paysages particuliers sont venues s'ajouter les sciences de **l'hydrochimie** et de **l'hydrologie** avec l'exploitation des ressources en eau que ces formations peuvent contenir. La **spéléologie** bien-sûr contribue grandement à l'étude du karst. L'**archéologie**, la **biologie** s'intéressent également aux karsts pour les habitats développés au sein des formes de dissolution de la roche.

Sur l'ensemble du globe terrestre, le karst occuperait 15 à 20 % des terres émergées. Fabrice Rey précise dans sa thèse que "*les aquifères karstiques représentent d'importantes réserves en eau potable, on estime que 25 % de l'humanité est alimentée en eau potable par des eaux d'origine karstique /.../ et dans certains pays d'Europe comme la Slovénie, ou l'Autriche, la moitié de l'eau distribuée est d'origine karstique. En France, 25 % (40 % en 2018 NDLR) des eaux souterraines destinées à l'alimentation en eau potable sont d'origine karstique et certaines grandes villes comme Montpellier, Besançon, Angoulême, Périgueux et Poitiers sont en grande partie alimentées par des eaux de ce type*". Plus proche de la zone d'étude, la ville de Pau est également alimentée par une ressource karstique et les sources des Aygues en vallée de l'Ouzom représentent une part importante de l'alimentation en eau potable produite par le Syndicat Mixte du Nord-Est de Pau.

Sur le secteur d'étude, le karst est fortement présent dans les unités géologiques carbonatées. Selon les spéléologues du CDSC65, le massif de Saint-Pé qui s'étend sur l'ensemble de la zone d'étude est un karst de moyenne montagne qui est "*spéléologiquement*" le plus connu et le plus parcouru des Hautes-Pyrénées.

Un rapport d'étude patrimoniale du massif karstique de Saint-Pé-de-Bigorre a été établi par le CDSC65 en octobre 2013, pour le compte du SIVU de la réserve naturelle du massif Pibeste – Aoulhet.

Nous nous attacherons ici à l'aspect géologique et hydrogéologique des données sur le karst de la zone d'étude avec quelques définitions sur des éléments caractéristiques du karst.

Données acquises	**Utilisation**	**Remarques**
Site internet Infoterre.brgm.fr	Base de données sur les cavités souterraines	Attention aux localisations pas toujours bonnes
Site internet karsteau.org	Base de données du comité départemental de spéléologie 65	Convention d'utilisation des données
Photographies aériennes de l'IGN	Stéréoscopie	Pour vérification

Bibliographie :

J. Bauer, Les cahiers de l'EFS n°7, 1996. Principes de karstologie physique ;

J. Bauer, SCB – GSO, 1997. Les grottes de Bétharram et du Mélat dans leur cadre géologique ;

J-N. Salomon, Presses Universitaires de Bordeaux, 2000. Précis de karstologie ;

S. Klarica, Y. Hervouet et J. Bauer, Karst & Tectonics, 2001. Karst et extensions gravitaires d'altitude : le massif du Jaout (Pyrénées occidentales – France) ;

F. Rey, Thèse de l'Université de Bordeaux 1, 2007. Ressources en eau souterraine dans les chaînons béarnais (Pyrénées-Atlantiques, France). Géométrie et fonctionnement hydrogéologique de quatre aquifères carbonatés ;

R. Maire, N. Vanara, Pyrénées d'hier et d'aujourd'hui, 2008. Le karst du domaine pyrénéen, témoins des paléoenvironnements depuis le paléozoïque (Transect zone axiale – Zone nord pyrénéenne dans les Pyrénées-Atlantiques ;

R. Valois, Thèse de l'Université Paris 6, 2011. Caractérisation structurale de morphologies karstiques superficielles et suivi temporel de l'infiltration à l'aide des méthodes électriques et sismiques ;

CDSC65, RNR Pibeste-Aoulhet, octobre 2013. Etude patrimoniale du massif karstique de Saint-Pé de Bigorre (65) ;

E; Husson, Thèse de l'Université de Montpellier II, 2013. Interaction géodynamique/karstification et modélisation géologique 3D des massifs carbonatés : Implication sur la distribution prévisionnelle de la karstification. Exemple des paléokarsts crétacés à néogènes du Languedoc montpelliérain ;

E; Husson et al., BRGM RP-66812-FR, 2016. Origine, caractérisation et distribution prédictive du Karst sur la bordure Nord-Aquitaine – OkaNa ;

A. Sartegou, Thèse de l'Université de Perpignan, 2017. Évolution morphogénique des Pyrénées orientales : apports des datations de systèmes karstiques étagés par les nucléides cosmogéniques et la RPE ;

J. Jouves, Thèse de l'Université d'Aix-Marseille, 2018. Origine, caractérisation et distribution prédictive des structures karstiques.

7.1 Quelques notions générales sur le karst

Actuellement, trois types de karst sont différenciés principalement en fonction de la source d'agressivité des fluides (d'après E. Husson 2016 et J. Jouves 2018) :

- **les karsts "gravitaires" ou "épigènes"** formés sous l'action d'eau météorique rendue acide en surface par le CO2 biogénique, et d'un gradient d'écoulement (ou potentiel altimétrique) entre la zone de recharge et la zone de restitution (sources) ;
- **les karsts "hypogènes"** résultants de la remontée de fluides profonds indirectement liés aux zones de recharges environnantes et où l'acidité des fluides (couramment CO2 et H2S) est acquise en profondeur ;
- **les karsts littoraux** où l'agressivité de l'eau est issue du mélange eau douce/eau salée.

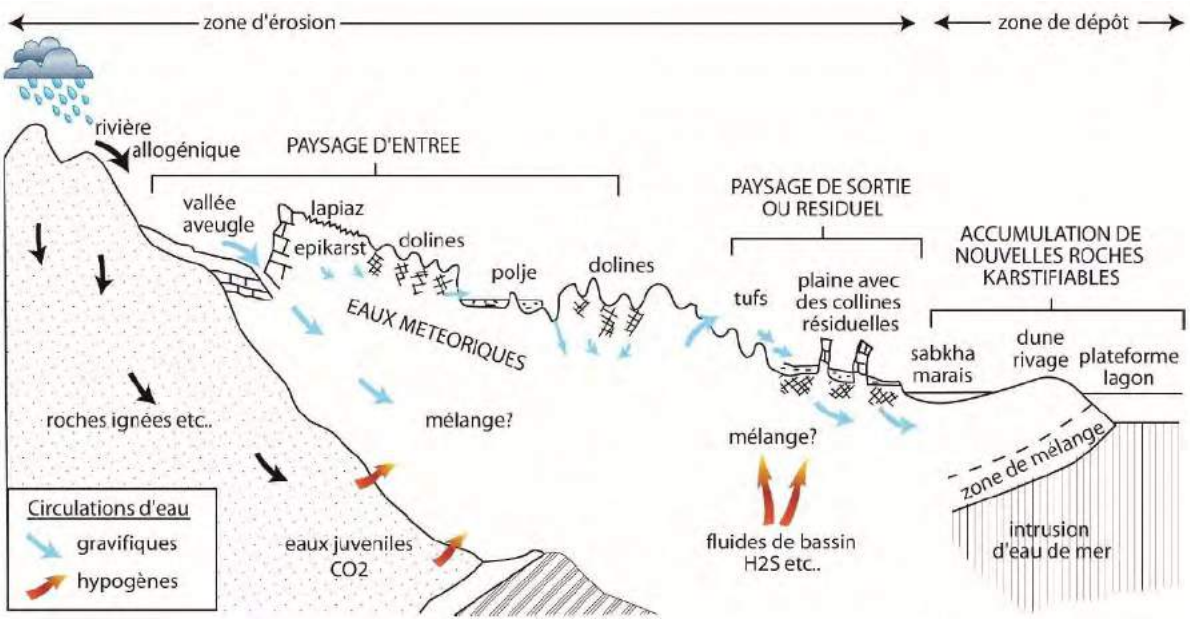


Figure 60 – Le système karstique (in E. Husson 2013, modifié d'après Ford & Williams, 1989)

Sur le secteur d'étude, nous sommes dans le cas d'un karst épigène ou gravitaire, mais des formes de karstification hypogènes ne peuvent être exclues.

Trois processus de karstification (ensemble des processus d'altération et d'érosion qui conduisent à la formation des figures particulières du karst), peuvent être distingués : la corrosion, la crypto-karstification et la fantômisation. Le Tableau 4 présente de façon synthétique les divers paramètres en relation avec les trois processus de karstification.

Tableau 4 – Synthèse des processus de karstification et formes engendrées (E. Husson, 2016)

Formes observée sur le terrain	alterites *in situ* (fantômes de roche)	hums, mogotes, pinacles...	Structures spéléogénétiques (galeries, cavités, spéléothemes...)
Processus	Fantômisation	Crypto-corrosion	Corrosion
Conditions	- Aquifere captif - Sous le niveau de base - Gradient très faible	Sous couverture sédimentaire semi-permeable	Mise en place d'un gradient hydraulique. Circulations d'eau ascendantes (karst hypogène) ou gravifiques (karst épigène)
Temps de formation	> Million d'années ↓ Dissolution lente		< Million d'années ↓ Dissolution rapide
Conséquences hydrogéologiques	- Prestructuration du réservoir - Augmentation de la porosité et de la perméabilité	Zone de concentration et d'infiltration des eaux de surface	Structures organisées sous forme de réseaux (bassins versants, sources, traçages...)
Evolution	Chute du niveau de base	Quand la couverture est érodée	

Sur le secteur d'étude, le processus principal de karstification est la corrosion, sous conditions de circulations d'eau à forte dominante gravifique d'un karst épigène et la présence de nombreuses galeries, et réseaux hypogés structurés. Cette structuration est étroitement liée au niveau de base qui est considéré comme le point de base de l'écoulement à la surface en sortie du système karstique et qui conditionne le gradient hydraulique (ou gradient d'écoulement ou potentiel altimétrique).

7.2 Le karst, une évolution liée à l'histoire géologique, tectonique et climatologique

L'histoire géologique de la zone d'étude joue également un rôle fondamental dans les interactions entre ces processus et dans le développement particulier au sein d'un même processus. Nous avons vu au paragraphe de l'histoire géologique et notamment avec la Figure

45 que des phases de surrection ont été accompagnées de phases de karstification dès le Crétacé inférieur sous un climat chaud et humide.

Sur le massif karstique des Arbailles sur la partie Est du Pays Basque, karst de moyenne montagne dont les armatures carbonatées sont également d'âges Jurassique et Crétacé, la karstification a été étudiée précisément et comporte une première grande période synorogénique anté-miocène et une néotectonique de la fin du Miocène à la période actuelle (R. Maire et N. Vanara, 2008). Ces différentes phases sont décrites dans le Tableau 5 suivant.

Tableau 5 – Phases de karstification sur le massif des Arbailles depuis la fin du Jurassique (R. Maire et N. Vanara, 2008)

Périodes et âges	Composante de surrection Tectonique	Karsts et morphogenèse	Dépôts corrélatifs du Piémont nord
Actuel	Surrection en cours (zone sismique active)	Karstification active, dissolution spécifique 92 $m^3/km^2/an$	Basses terrasses
Pléistocène moyen	>160 m (0,4 mm/an)	Surcreusement des vallées	Moyennes terrasses
Pléistocène inférieur	>450 m (dernière grande phase de surrection)	Déconnexion du syst. fluviatile avec l'amont de Mendibelza	Hautes terrasses
Pléistocène inf.-Pliocène sup.	>700 m	Déconnexion des vallées affluentes autochtones	Cône de Ger, Cieutat, Bagnères, Lannemezan
Pliocène	>1000-1500 m début épirogenèse	Début de formation du karst à buttes et des mégadolines	
Fin Miocène	>1500 m environ	Début de creusement du réseau hydrographique et de l'érosion des altérites	Dépôts à lignite sous la formation de Lannemezan
Oligocène sup.-Miocène	Phase de stabilité et d'altération	Altér. de la couverture, cryptokarstification	Dépôts argileux dominants
Lutétien moyen-Oligocène inf.	Compression, charriage, Plissement pyrénéen	Grande phase d'érosion Décapage des flyschs	Poudingues de Jurançon et de Palassou
Barrémien-Aptien.	Distension, rifting et diapirisme	Dissolution des gypses, brèches, surface d'atération	Poudingues de Mendibelza Sillon du flysch
Limite Jurassique-Crétacé	Phase néo-cimérienne	Bauxites, brèche (Andoche, Belchou)	-

Ces phases historiques de compression et de distension ont permis la formation de plis avec joints de stratification, de failles et de fractures, toutes ces discontinuités ont favorisé la karstification.

Dans son histoire récente, les phénomènes gravitaires d'altitude ont permis la ré-ouverture de certaines de ces fractures sur les parties sommitales et les flancs de cette zone montagneuse qui couplée à l'ouverture d'un réseau de failles "profondes" par la compression actuelle aboutissent à la structuration du réseau karstique que nous connaissons. Les formes karstiques superficielles ont également subi les effets de l'érosion glaciaire récente.

Les variations du niveau de base jouent un rôle important dans la morphologie et l'étagement des réseaux karstiques. Sur la zone d'étude, ces variations sont liées aux phases de surrection

(approfondissement du niveau de base) ou de subsidence (remontée du niveau de base), aux variations eustatiques (du niveau de l'océan) qui ont favorisé le creusement des principales vallées (approfondissement du niveau de base) et aux comblements des vallées par alluvionnement (réhausse du niveau de base).

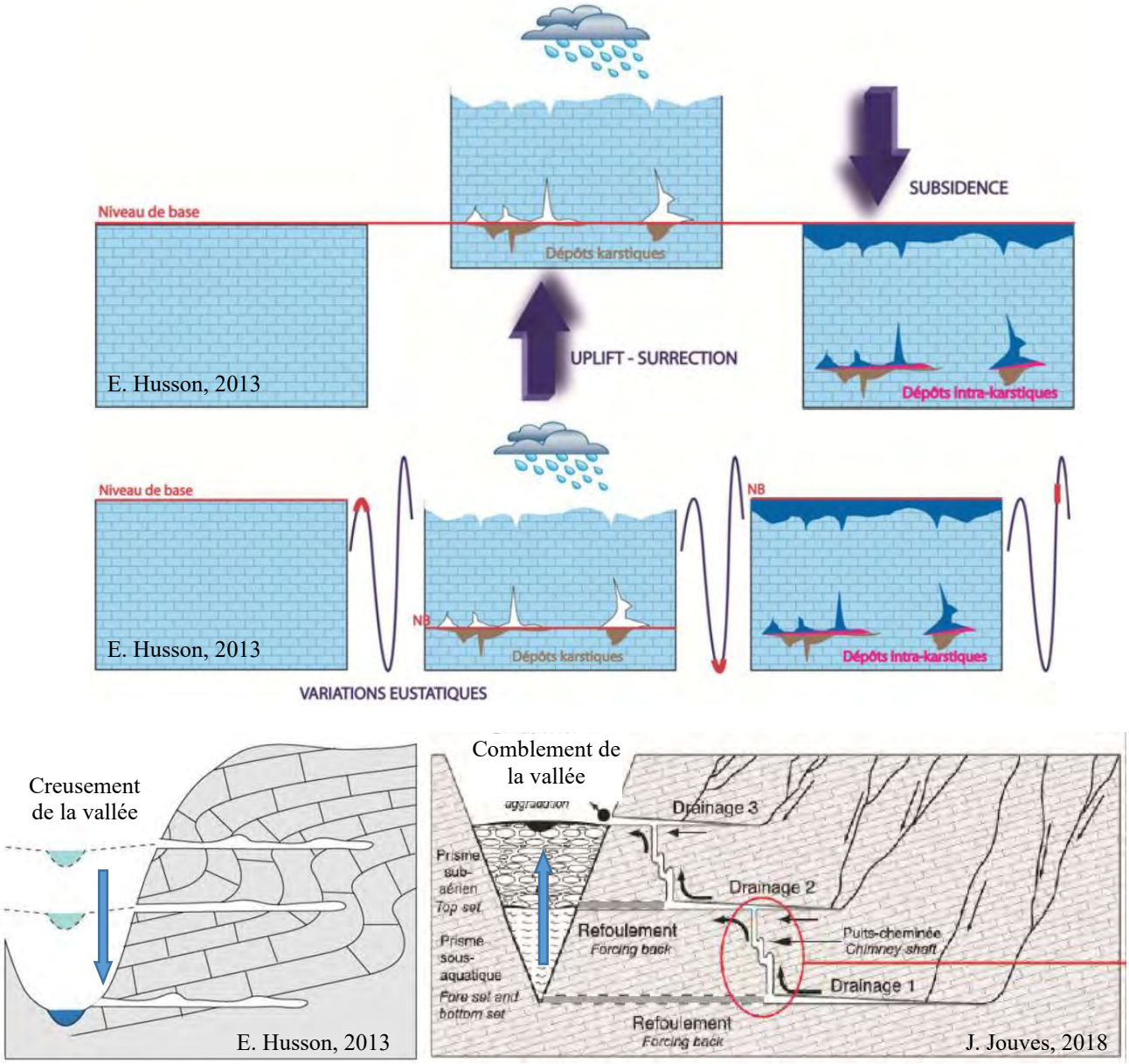
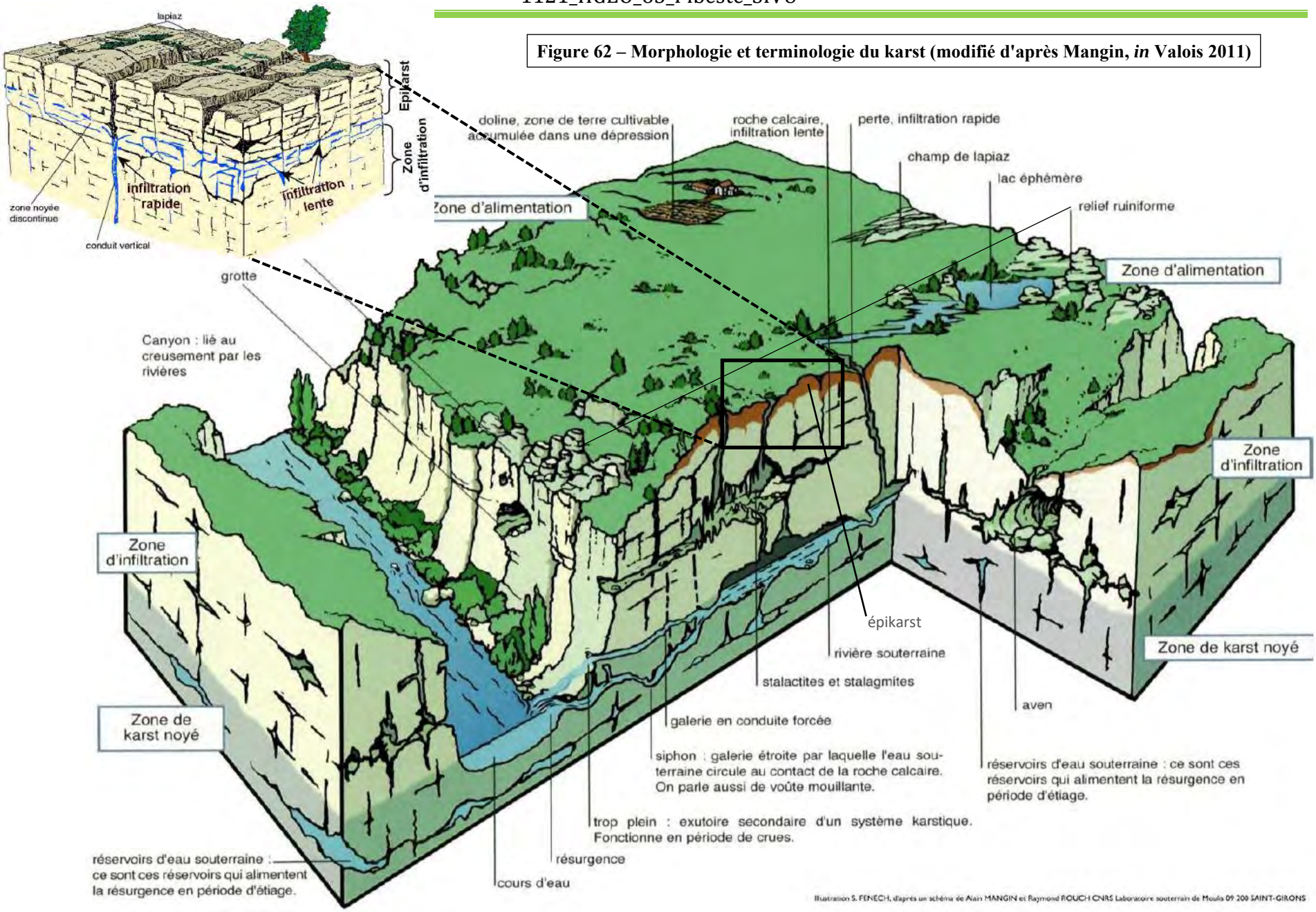


Figure 61 – Les variations du niveau de base

7.3 La morphologie du karst

Les diverses formes de dissolution du karst dont nous connaissons les vocables : doline, aven, grotte, conduit, lapiaz, rivière souterraine, … sont représentées sur la Figure 62 suivante.

Figure 62 – Morphologie et terminologie du karst (modifié d'après Mangin, *in* Valois 2011)



Nous distinguons les grands ensembles du karst :

- **L'exokarst** : ceux sont les formes karstiques de surface ;
- **L'endokarst** : ceux sont les formes karstiques souterraines ;
- **L'épikarst** : partie superficielle du karst, décomprimée et très perméable. Il joue donc le rôle d'un aquifère particulier avec une nappe temporaire. Il est épais de quelques mètres à quelques dizaines de mètres ;
- **La zone d'infiltration (ou zone non saturée ou zone vadose)** : c'est la partie de l'aquifère karstique qui, par le biais de drains (fissures, fractures, conduits), fait le lien entre l'épikarst ou la surface et la zone épinoyée plus profonde ;
- **La zone épinoyée** : c'est la zone de l'aquifère où le niveau de l'eau fluctue entre les basses eaux et les hautes eaux ;
- **La zone noyée** : les réseaux de drainage sont en permanence en eau.

Les principales formes karstiques observables sur la zone d'étude :

- **Les lapiaz ou lapiés :** présents sur le Béout ou sur le secteur de l'Estibette ou du Soum de Marti Peyras, ils correspondent à des surfaces ciselées où la dissolution a créé des rigoles qui suivent des fractures ou les lignes d'écoulement selon la pente.

- **Les dolines :** les dolines sont des dépressions superficielles de forme ronde ou ovale, dont la profondeur est généralement inférieure au diamètre (cf photo ci-contre, "Les culs dets Aousets"). Leur origine peut être variée.

- **Les poljés :** ce sont de vastes dépressions à fond plat ou cuvette, fermées entièrement ou non par des parois rocheuses. Le fond est parfois comblé par des terrains peu perméables fertiles (cf photo ci-contre, paléo-poljé d'Ech).

- **Les pertes :** ouverture en surface d'un conduit par lequel un cours d'eau (permanent ou temporaire) s'infiltre partiellement ou en totalité dans le sous-sol.

- **Les résurgences :** ceux sont des exsurgences (points de sortie des écoulements souterrains) particulières qui correspondent à des eaux provenant de l'infiltration d'un cours d'eau superficiel (au moins en partie).

- **Les cavités :** vide karstique pénétrable. Il peut s'agir de gouffres, grottes, galeries, …

- **Les conduits :** drain vertical ou horizontal qui permet le transit de l'eau, formé par élargissement d'une faille, fissure, fracture ou contact entre couches géologiques. Les terminologies dépendent de leur taille et de leur inclinaison.

- **Les gouffres, puits et avens :** il s'agit de conduits ouverts depuis la surface avec des parois sub-verticales et dont le diamètre est inférieur à la profondeur. Elles sont souvent engendrées par l'effondrement de la voûte d'une cavité et sont en relations avec un réseau de galeries plus ou moins développé.

- **Les galeries :** conduits pénétrables dont la pente moyenne générale est plutôt faible.

- **Les grottes :** cavité souterraine pénétrable dont la pente est faible. Leur morphologie est très variée et leur formation peut être engendrée par divers phénomènes. Lorsqu'une occupation humaine ou animale est avérée, le terme caverne est également utilisé. (Ci-contre, grotte Massabielle en 1858)

- **Les siphons :** conduit qui reste en eau, dont la voute est ennoyée.

Exemple du réseau karstique de la Ratasse – SC132 – SC133. Le puits débute sur le flanc nord-est du Soum de Conques à une altitude de 1417 m, dans les calcaires aptien à faciès urgonien et le réseau se poursuit au cœur du synclinal de ces mêmes calcaires jusqu'à une altitude de 980 m (445 m de profondeur).

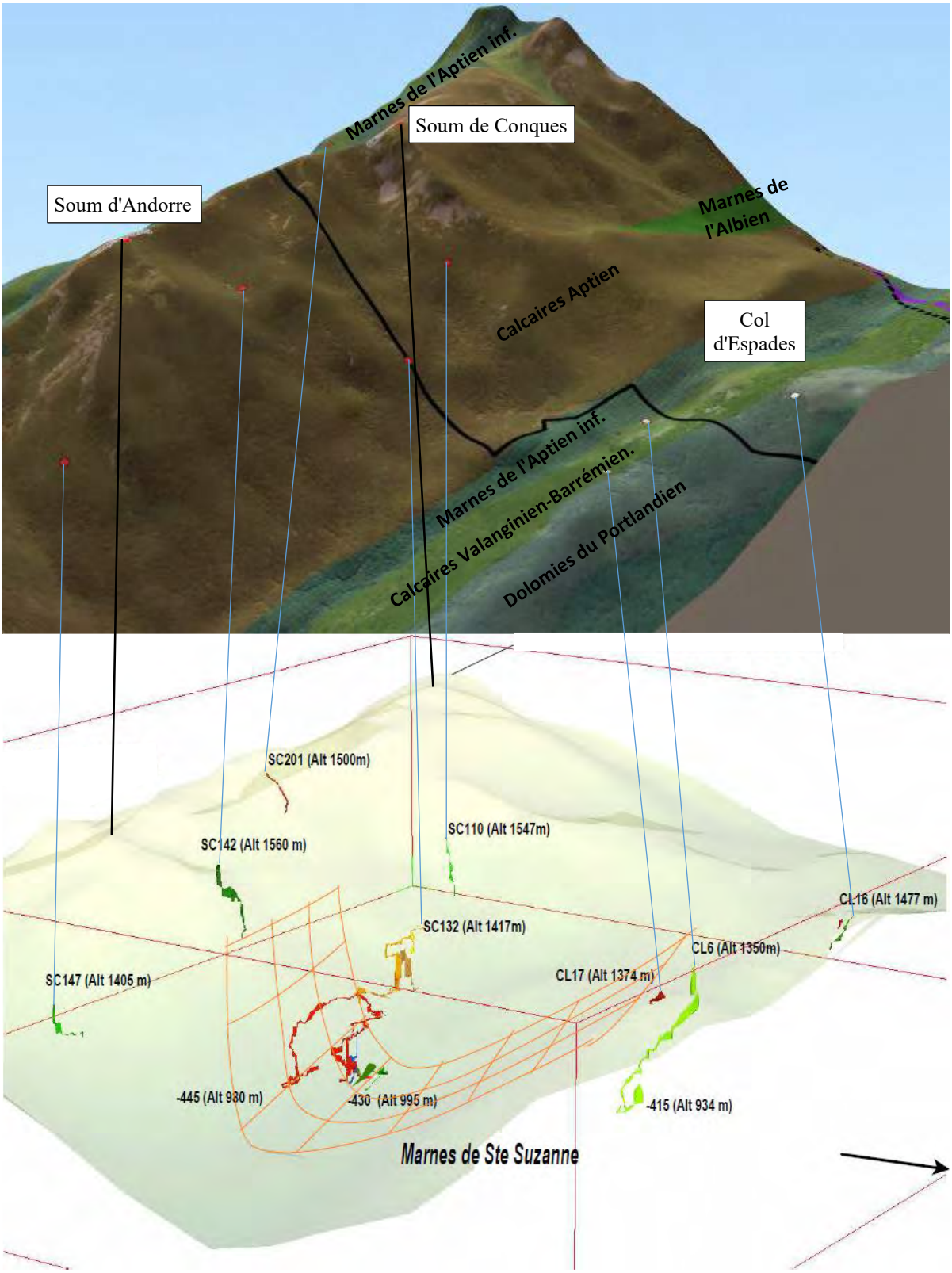


Figure 63 – Bloc diagramme du secteur Soum de Conques et col d'Espades (CDSC65)

Les principales directions des conduits semblent être :

- Est – Ouest (direction de fracturation issue de l'extension nord-sud albienne),
- N20-40 et N150-160 qui représentent un système de décrochements conjugués issu de la compression majeure pyrénéenne (Klarica et al., 2001).

Des réseaux sub-horizontaux orientés dans l'axe du synclinal sont bien visibles à – 200 m de profondeur et -440 m environ.

Le CDSC65 a répertorié une grande partie des données sur le karst en les a intégrant dans la base de données KARSTEAU accessible via internet. Le CDSC65 nous a fourni l'ensemble des données numérisées dans l'emprise de la zone d'étude et nous les remercions à nouveau pour leur partenariat.

Toutes ces formes et notamment les dolines, les gouffres, les pertes, sont des points de vigilance dans le cadre de la protection des eaux souterraines destinées à l'alimentation en eau potable. Les pertes actives ou non ont également été recensées dans cette étude et doivent faire l'objet d'une attention particulière car elles sont les points de passage des réseaux superficiels vers les réseaux souterrains. Tous ces éléments sont cartographiés sur la Figure 64, en complétant les données du CSDC65 par les données que nous possédions et celles de la bibliographie. La légende du fond de couches géologiques de cette figure est consultable sur la Figure 33 page 42.

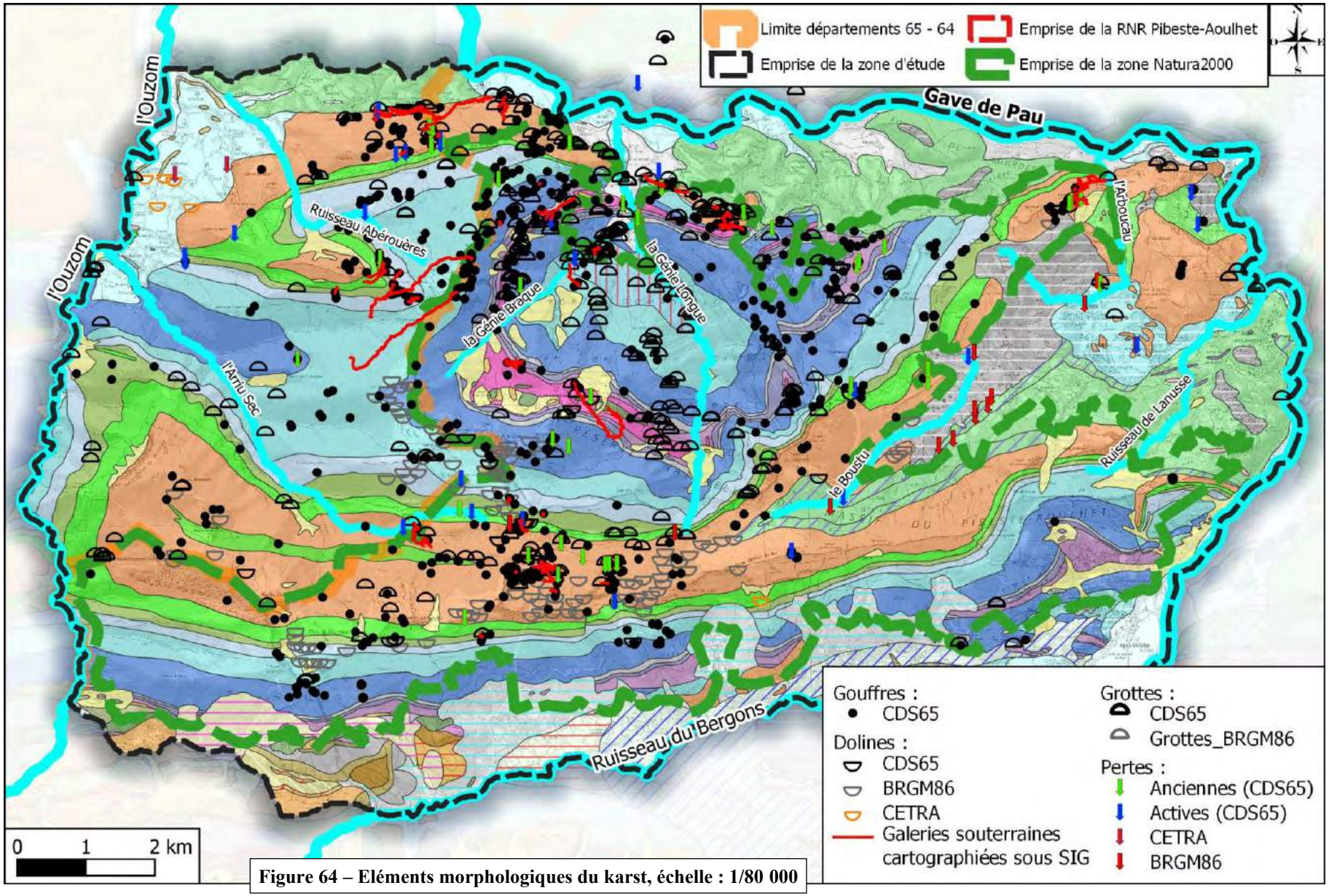


Figure 64 – Eléments morphologiques du karst, échelle : 1/80 000

8 HYDROGEOLOGIE

8.1 Données et bibliographie

Les données utilisées pour la partie hydrogéologie sont diverses : issues des administrations ayant compétence en eau potable, BRGM (études et rapports, site Infoterre), Comité Départemental de Spéléologie et de Canyon des Hautes-Pyrénées (CDSC65) avec lequel le SIVU a établi une convention d'utilisation des données, études diverses des bureaux d'études BERRE (qui n'est plus en activité) et CETRA ainsi que des données acquises sur le terrain.

Données acquises	Utilisation	Remarques
Site internet Infoterre.brgm.fr	Base de données sur les points d'eau, les masses d'eau, cartographie des IDPR	
Site internet ades.eaufrance.fr	Données quantitatives et qualitatives sur les eaux souterraines	
Site internet cartelie.application.developpement-durable.gouv.fr	Données sur la cartographie des périmètres de protection des points d'alimentation en eau potable et leurs arrêtés préfectoraux	Autorisation d'accès aux données par l'ARS 65 et par l'ARS 64. Données non divulgables au public.
Site internet karsteau.org	Base de données du CDSC65	Accès libre restreint ou Convention d'utilisation des données.

Bibliographie :

BRGM, 75-SGN-018-AQI-MPY, janvier 1975. Action concertée Adour. Ressources en eaux souterraines ;

BGRM, 76-SGN-071-MPY, février 1975. Evaluation des ressources hydrauliques de la France – Etat des connaissances et synthèse hydrogéologique du Département des Hautes-Pyrénées ;

G. Astruc, J.P. Paris, J. Roche, R. Vernet, BRGM, 86-SGN-355-MPY, juillet 1986. Etude hydrogéologique de la région de Lourdes ;

F. Rey, Thèse de l'Université de Bordeaux 1, 2007. Ressources en eau souterraine dans les chaînons béarnais (Pyrénées-Atlantiques, France). Géométrie et fonctionnement hydrogéologique de quatre aquifères carbonatés.

F. Carrière, Université Pierre et Marie Curie, 2008. Test sur un secteur karstique d'une méthodologie de protection de la ressource en eau : Application de la méthode RISKE 2 - PaPRIKa aux sources de l'Aygue Blanque et de l'Aygue Nègre (Pyrénées Occidentales, vallée de l'Ouzoum, chaînons béarnais) ;

A. Abou Akar et B. Ayache, BRGM, RP-60613-FR, avril 2012. Cartographie des Unités de Gestion de la qualité des eaux continentales des Pyrénées-Atlantiques. Aptitude au ruissellement/infiltration ;
J.J. Seguin et A. Wuilleumier, BRGM, RP-66802-FR, Mai 2017 Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine. Recherche d'évolutions climatiques et hydrologiques dans les bassins versants des Gaves de Pau et d'Oloron ;
Institution Adour, Novembre 2017. Etude prospective Adour 2050 - Rapport de phase 1 – Réalisation d'un diagnostic prospectif ;
D. Dobrzyński et D. Rossi, ASGP, 2017. Geochemistry of trace éléments in spring waters of Lourdes area (France) ;
M. Saplairoles, J.M. Gandolfi, B. Monod, BRGM, RP-66912-FR, Septembre 2017. Diagnostic des potentialités aquifères des formations géologiques de la chaîne pyrénéenne dans les départements des Hautes-Pyrénées, de la Haute-Garonne et de l'Ariège (Projet POTAPYR) ;
M. Saplairoles, J.M. Gandolfi, B. Monod, BRGM, RP-68134-FR, Mars 2019. Actualisation de la synthèse hydrogéologique du département des Hautes-Pyrénées ;
Cabinets d'études BERRE et CETRA : diverses études hydrogéologiques sur les sources captées pour l'AEP ;
P. Le Cointe, L. Arnaud, S. Beranger, Y. Caballero, S. Lanini, BRGM/RP-67149-FR Octobre 2019. Réponse des Eaux souterraines au CHangement climatique dans le bassin AdouR-GaronnE (RECHARGE),

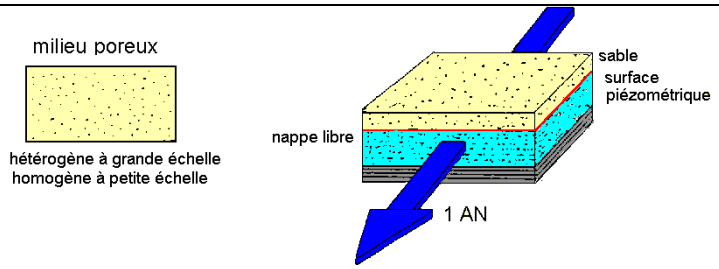
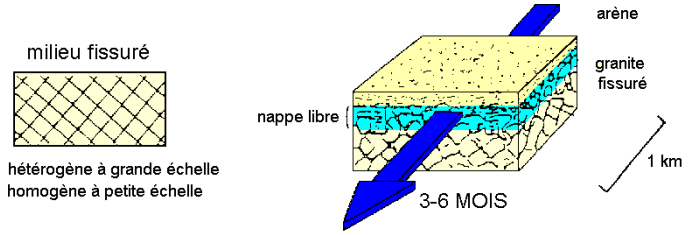
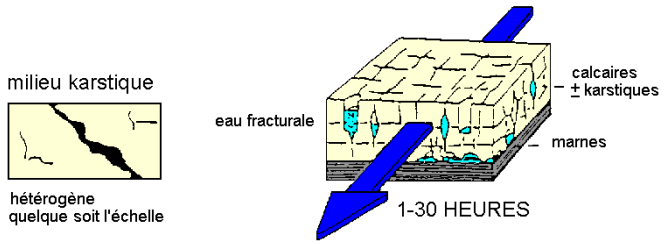
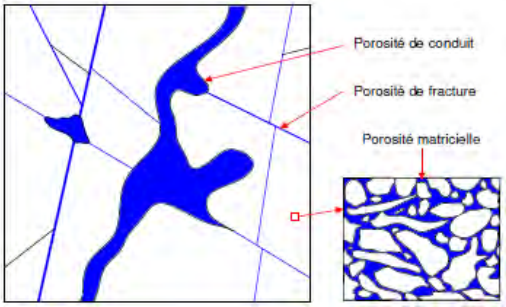
8.2 Quelques définitions

L'hydrogéologie est la science des eaux souterraines, comprise dans les sciences de la Terre. Elle nécessite la connaissance des conditions géologiques et hydrologiques et des lois physiques qui régissent l'origine, la présence, les mouvements et les propriétés des eaux souterraines. Elle concerne également les applications de ces connaissances aux actions humaines sur les eaux souterraines : prospection, captage, protection. [Définition *in* Dictionnaire français d'Hydrogéologie par G.Castany et J. Margat, BRGM – 1974].

Sur le secteur d'étude, les eaux météoriques peuvent circuler au sein des roches présentes. On parle de milieu aquifère lorsque ces roches contiennent de l'eau en partie mobilisable par gravité. Un aquifère est l'ensemble du milieu solide et de l'eau contenue, le milieu étant suffisamment conducteur pour permettre l'écoulement significatif de la nappe d'eau souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables. Une nappe d'eau souterraine est l'ensemble des eaux comprises dans la zone saturée de l'aquifère et dont toutes les parties sont en liaison hydraulique.

Les aquifères peuvent être également classés en fonction du type de porosité :

Tableau 6 – Types de porosité d'un aquifère

Type de porosité :	***Illustration :*** *(Tirée de GUILLEMIN et ROUX, Pollution des eaux souterraines en France - BRGM éditions)*
Aquifères poreux à porosité d'interstices : porosité « primaire » lors de la sédimentation des roches (alluvions, sables éoliens ou marins, …). Exemple : plaine alluviale du Gave de Pau, formations glaciaires	
Aquifères fissurés : porosité « secondaire » liée à la tectonique - massifs de roches dures (granites, quartzites, calcaires, …). Exemple : Flysch noir ardoisier de Bigorre	
Aquifères karstiques : porosité « secondaire » liée à la dissolution des roches, fractures ouvertes, cavités et conduits - massifs de roches dures carbonatées (calcaires, craie, dolomies). Exemple : Calcaires urgoniens de la source Aygue Nègre ou Hount des Lasvasses	
Double porosité : Plusieurs types de porosité sont présentes – Roches calcaires karstifiées par exemple	

8.3 Cartographie des masses d'eau et des formations aquifères

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE-2000/60/CE), établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, introduit la notion de « masses d'eaux souterraines » qu'elle définit comme « un volume distinct d'eau souterraine à l'intérieur d'un ou de plusieurs

aquifères » (article 5 et Annexe II). Les masses d'eau sont classées par niveau en fonction de leur ordre de reconnaissance depuis la surface.

Sur le secteur d'étude, nous trouvons pour le niveau 1 (Figure 65), la masse d'eau codifiée FG051 : Terrains plissés du bassin versant des gaves, secteurs q4, q5, q6 et q7. Il s'agit des roches "dures" du Secondaire et du Primaire de la chaine pyrénéenne. Pour ce niveau, nous avons également la masse d'eau codifiée FG030 : Alluvions du Gave de Pau qui comprend les alluvions de la vallée du Gave mais également les terrains glaciaires s'y raccordant.

Une masse d'eau de niveau 2 (Figure 66) est présente sous la masse des alluvions du Gave de Pau et correspond à la poursuite de la masse d'eau codifiée FG051 : Terrains plissés du bassin versant des gaves, secteurs q4, q5, q6 et q7 dont les terrains se trouvent sous les alluvions du Gave et supportent les terrains glaciaires.

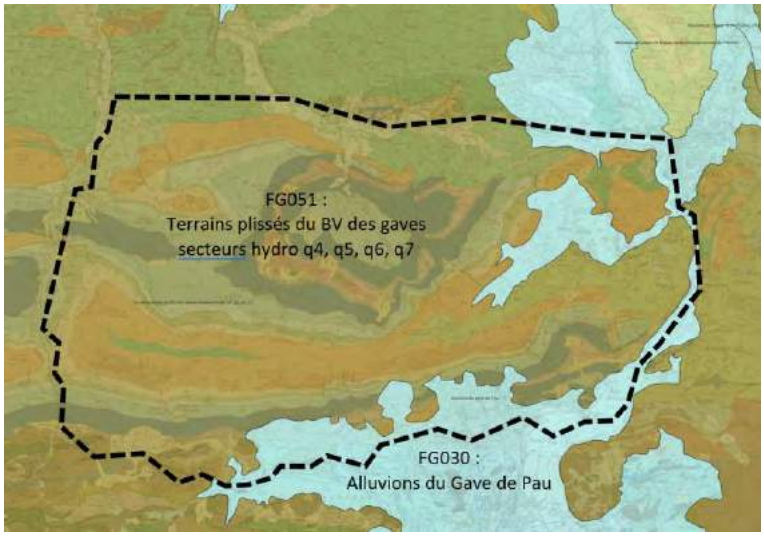


Figure 65 – Cartographie des masses d'eau de niveau 1 du secteur d'étude, sans échelle.

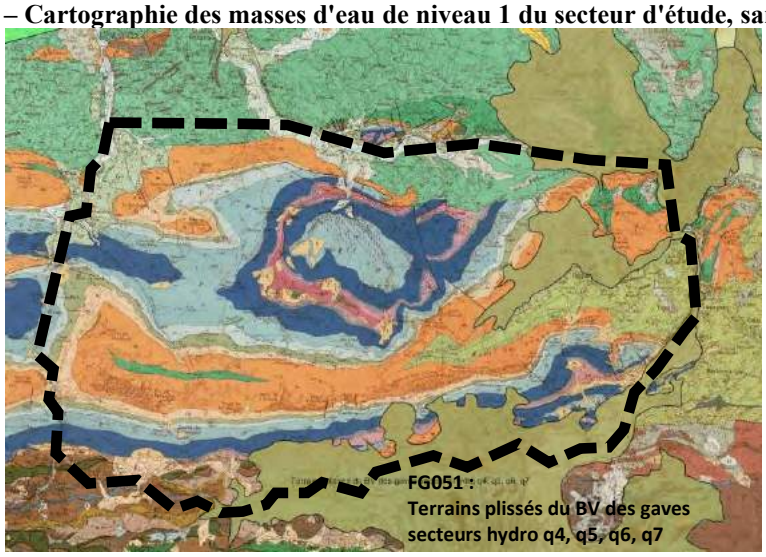


Figure 66 – Cartographie des masses d'eau de niveau 2 du secteur d'étude, sans échelle.

Le référentiel hydrogéologique BDLISA (Base de Données des LImites des Systèmes Aquifères) est un outil qui permet de localiser et de caractériser les formations géologiques aquifères, semi-perméables et imperméables, à l'échelle du territoire national (départements métropolitains et d'outre-mer) sous trois niveaux de visualisation (national, régional et local). La BDLISA prend part à la constitution des données du Système d'Information sur l'Eau en France.

Les grands types d'aquifères (perméable ou aquifère, semi-perméable ou imperméable) sont cartographiés sur la Figure 67.

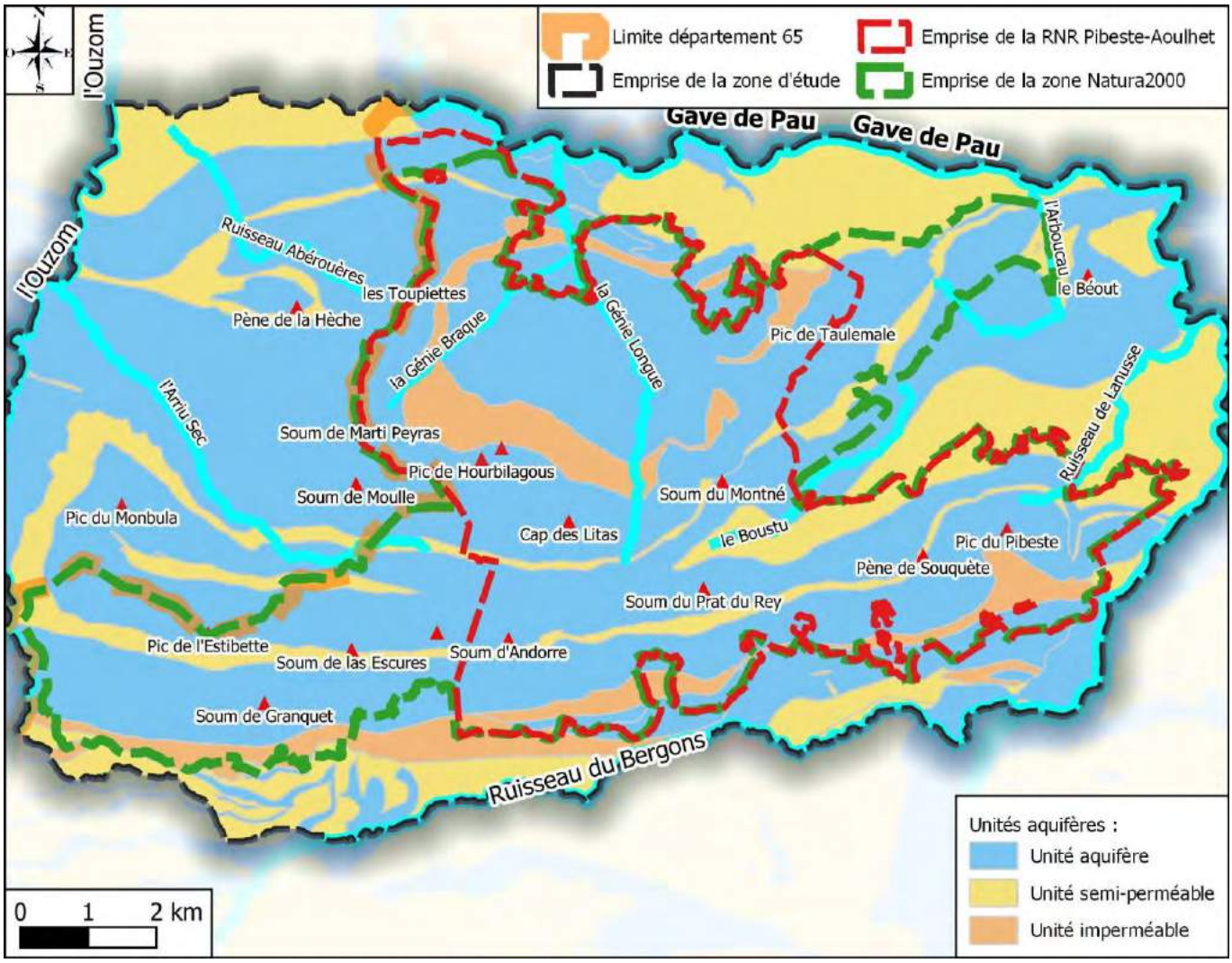


Figure 67 – BDLISAv2, Unités aquifères, échelle : 1/100 000.

Les dénominations des entités hydrogéologiques homogènes de niveau national, régional et local sont présentées respectivement sur les Figure 68, Figure 69 et Figure 72.

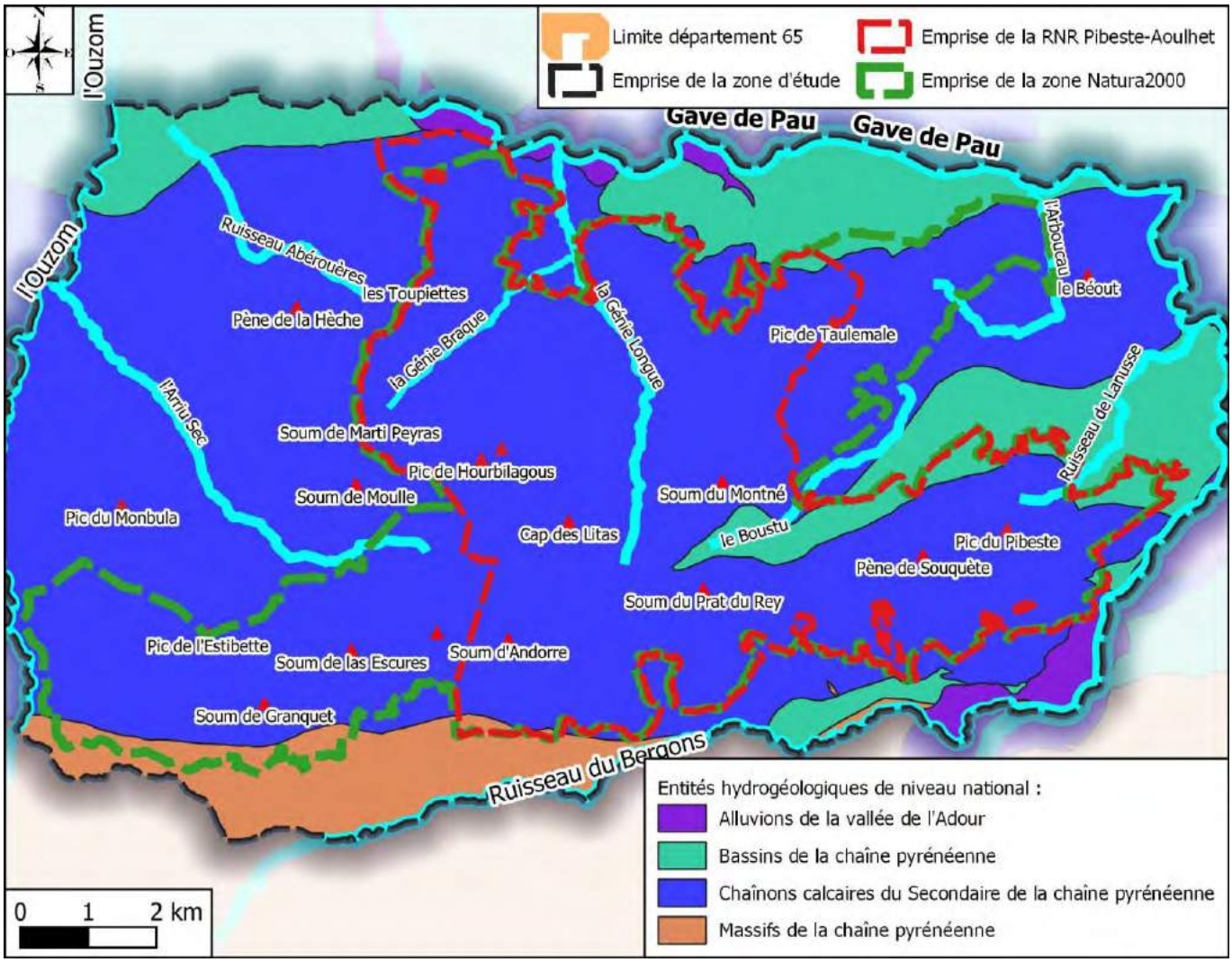


Figure 68 – BDLISAv2, Entités hydrogéologiques de niveau national, échelle : 1/100 000.

L'entité hydrogéologique dénommée Chaînons calcaires du Secondaire de Durban-Bétharram, qui intéresse la majeure partie de la zone d'étude et la quasi-globalité des emprises de la zone Natura 2000 et de la réserve, s'étend sur les deux départements et sa limite occidentale s'arrête à la vallée d'Ossau (Figure 70), elle englobe logiquement la structure du Jaoüt entre la vallée de l'Ouzom et la vallée d'Ossau.

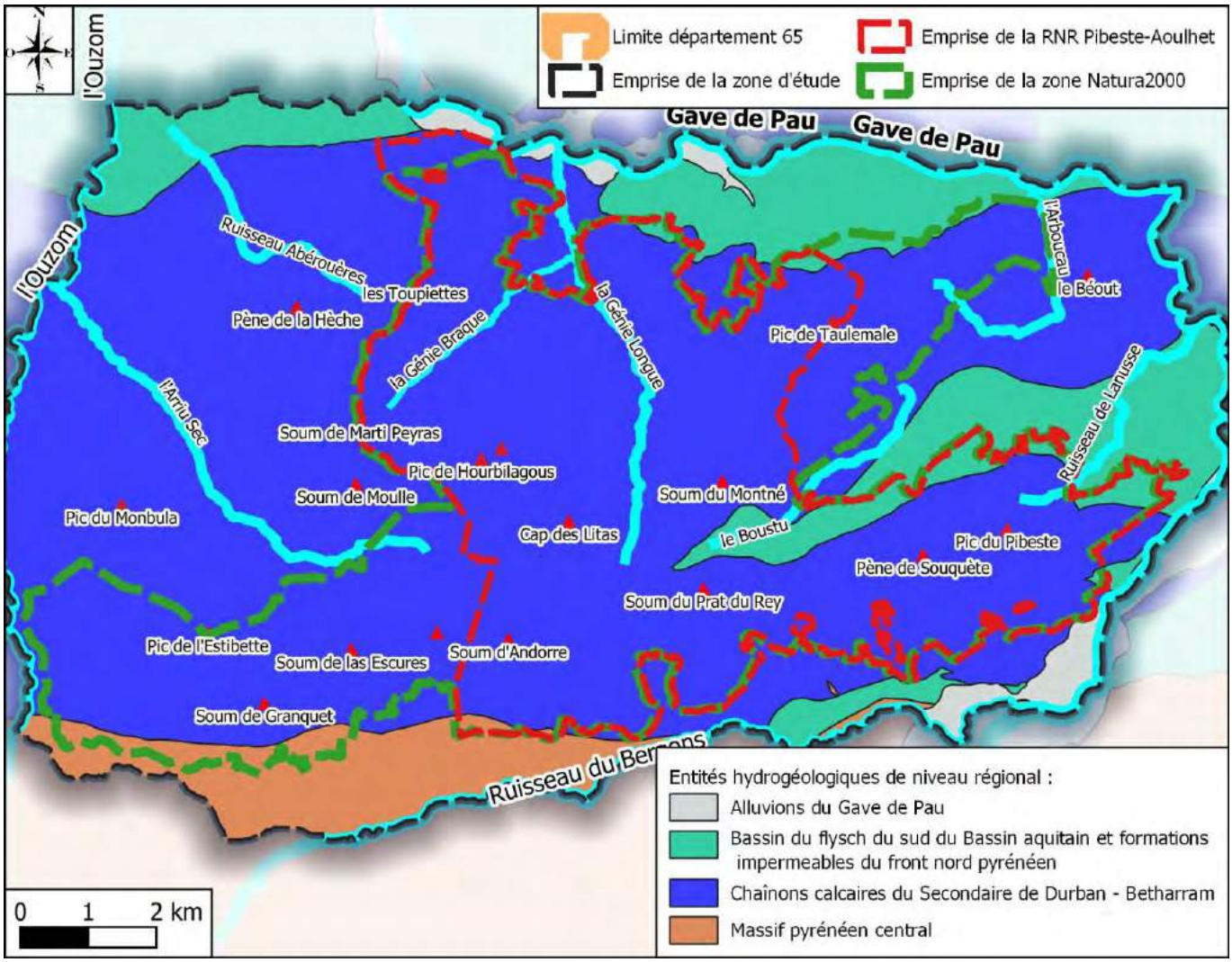


Figure 69 – BDLISAv2, Entités hydrogéologiques de niveau régional, échelle : 1/100 000.

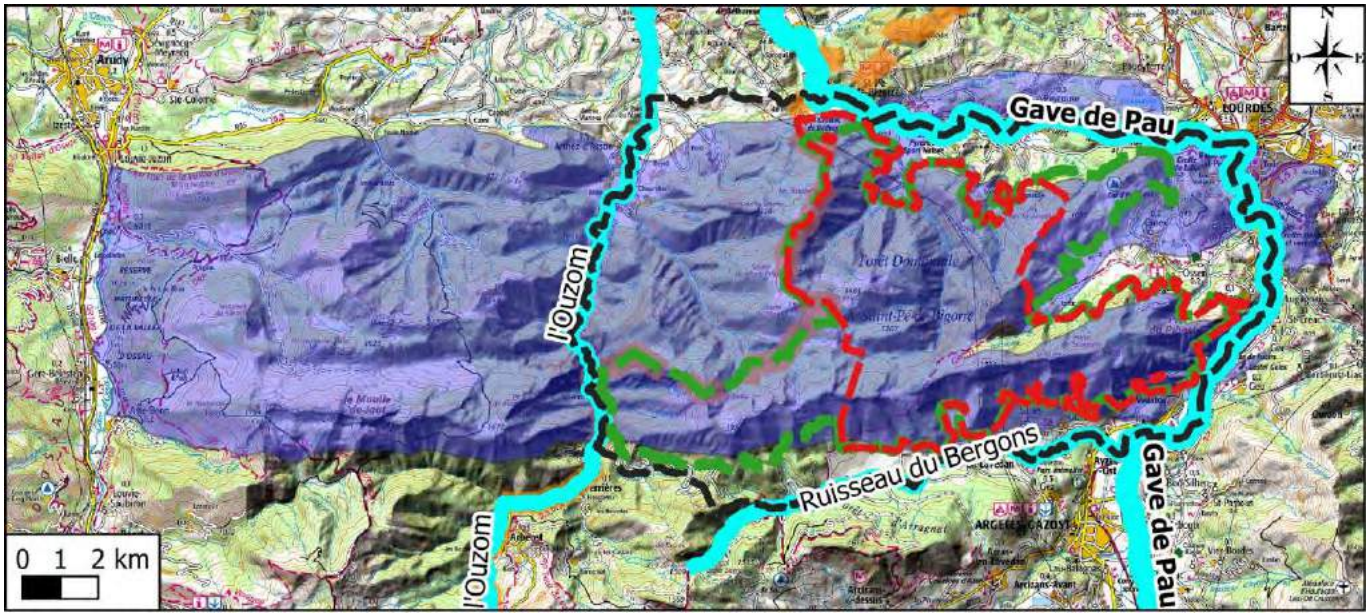


Figure 70 – BDLISAv2, Extension de l'entité hydrogéologique "Chaînons calcaires du Secondaire de Durban-Bétharram", échelle : 1/200 000.

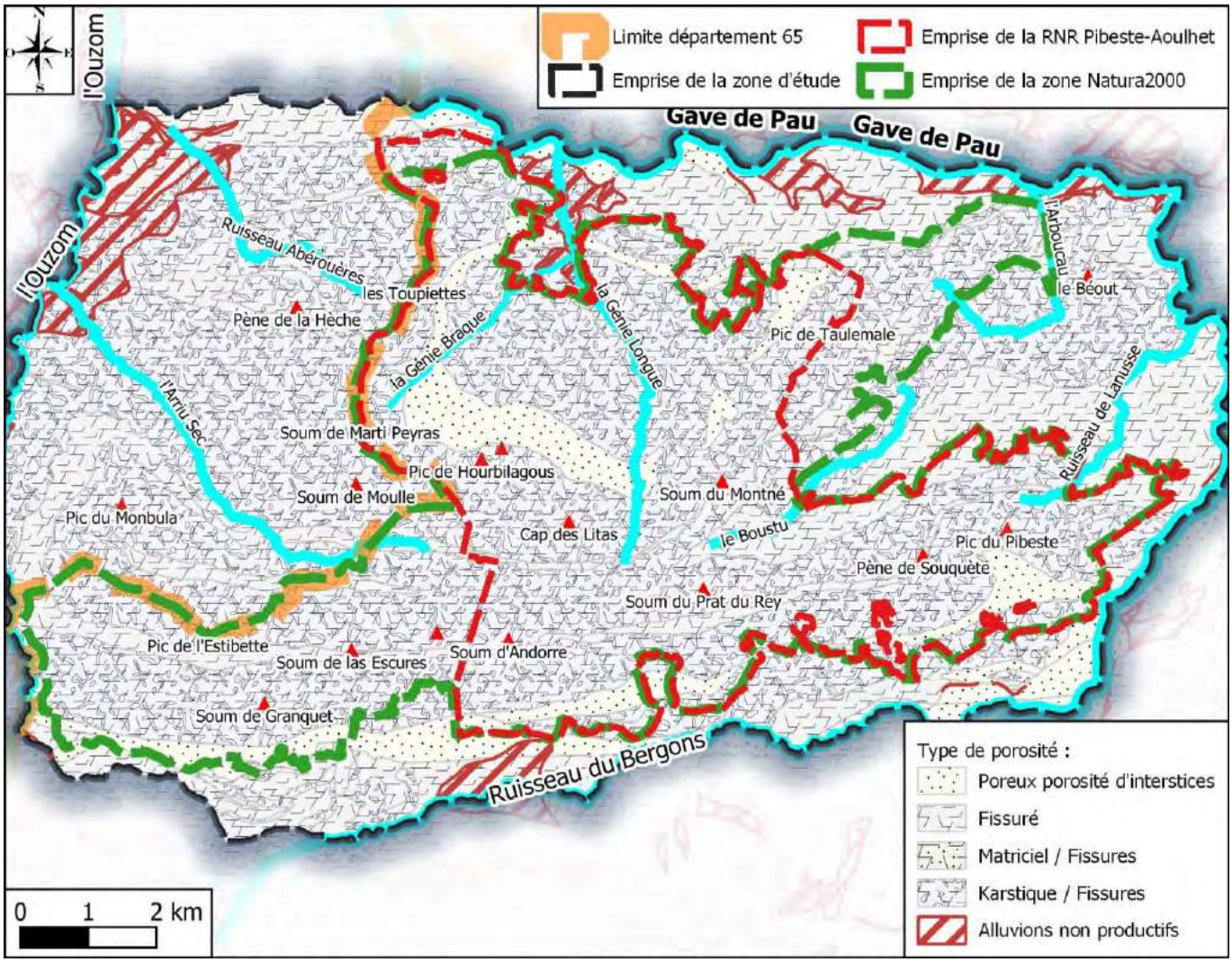


Figure 71 – BDLISAv2, Types de porosité des entités hydrogéologiques, échelle : 1/100 000.

Les grandes entités des masses d'eau peuvent être également affinées par la cartographie des potentiels aquifères des formations géologiques. La cartographie présentée sur la Figure 73 est basée sur les données du projet POTAPYR (BRGM 2017 et 2019). La distinction se fait en fonction des caractéristiques de l'aquifère : aquifère poreux à porosité d'interstices, aquifère fissuré, aquifère karstique mais également du potentiel productif.

Le rapport du BRGM concernant l'étude hydrogéologique de la région de Lourdes (1986) présente une colonne stratigraphique avec les caractéristiques hydrogéologiques des roches reconnues en fonction de leur nature (Figure 74). Ce rapport montre également les échanges qui peuvent avoir lieu entre aquifères, principalement entre l'aquifère des calcaires urgonien de l'Aptien supérieur et les aquifères calcaires ou dolomitiques du Jurassique sous-jacents (Figure 75).

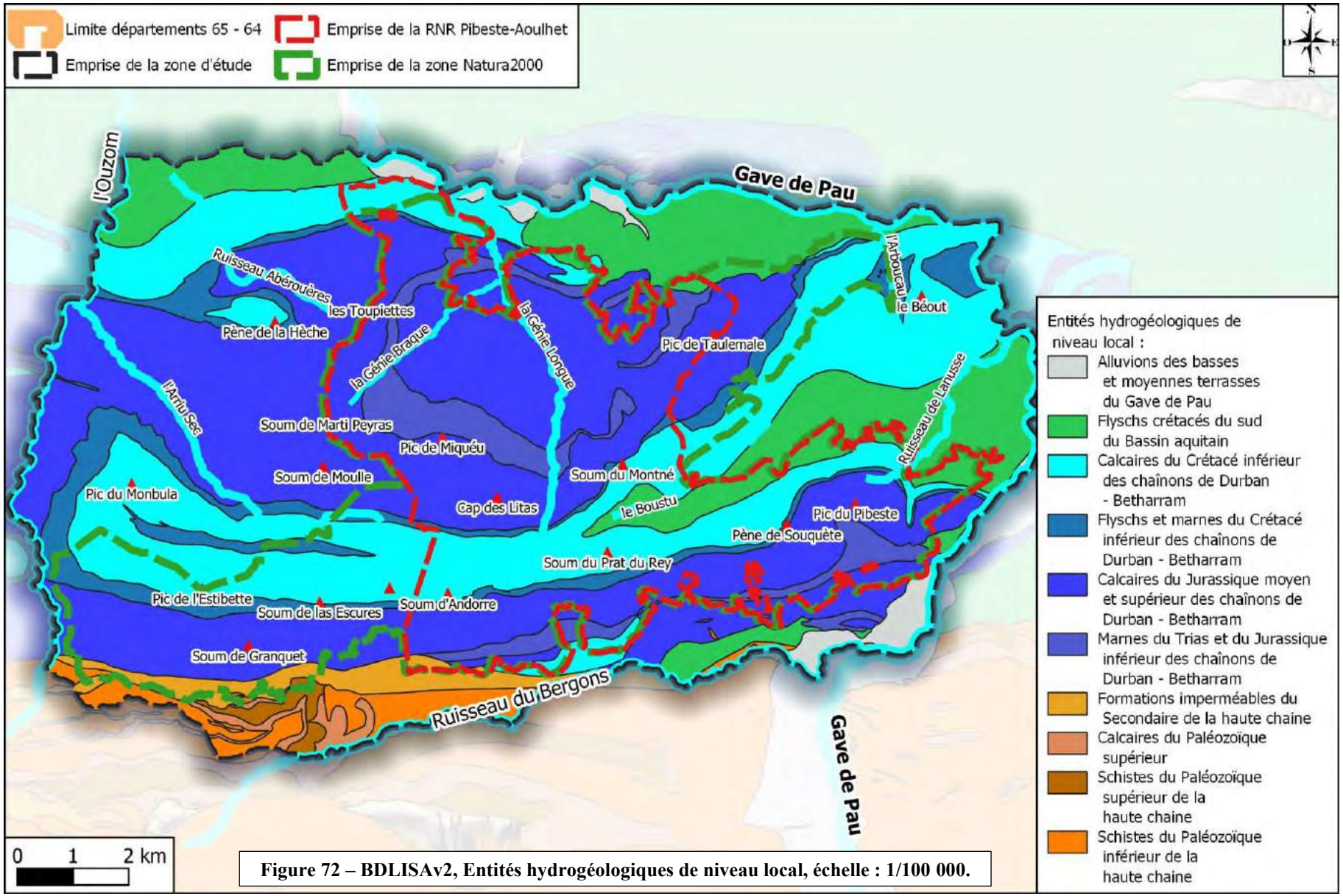


Figure 72 – BDLISAv2, Entités hydrogéologiques de niveau local, échelle : 1/100 000.

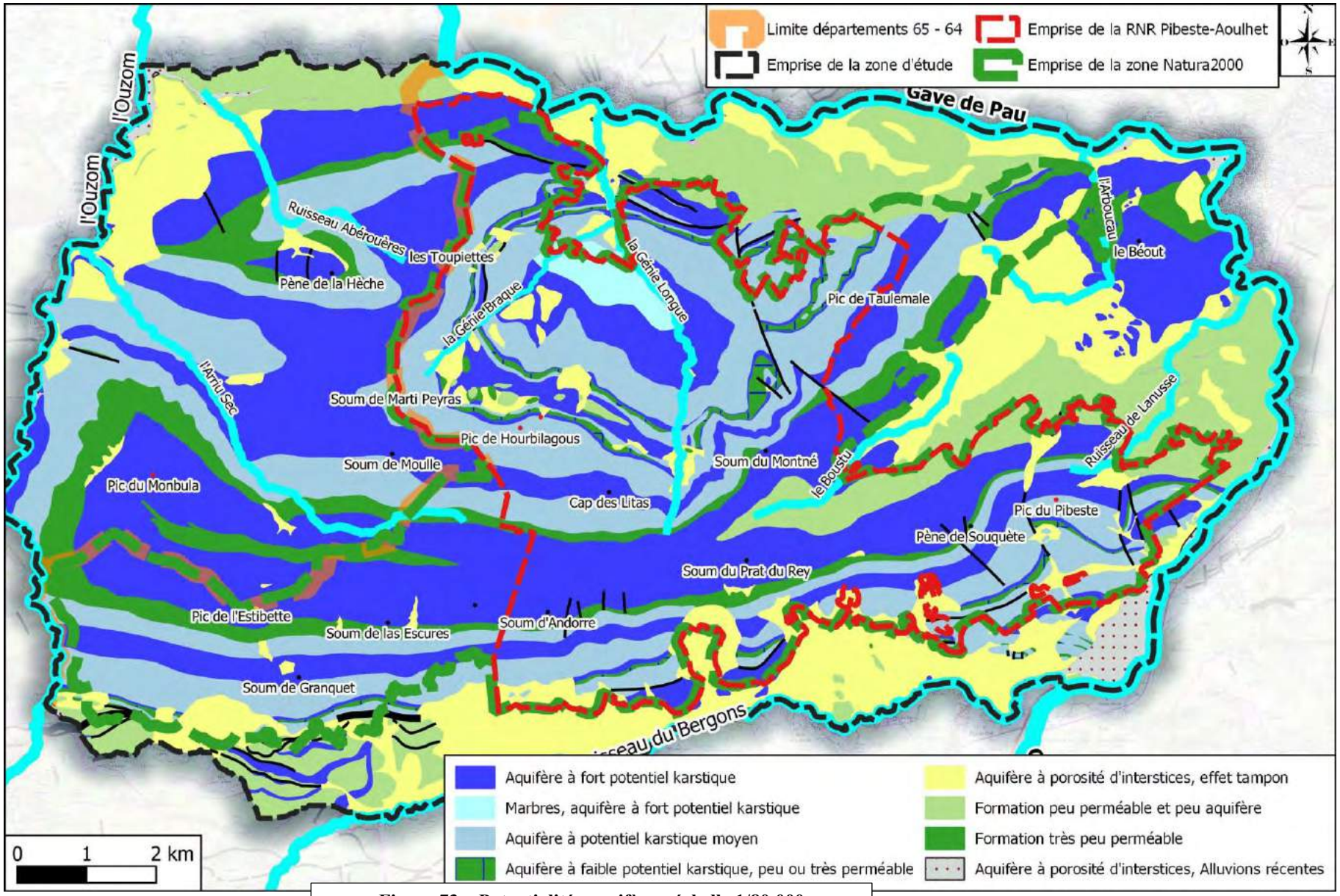


Figure 73 – Potentialités aquifères, échelle 1/80 000

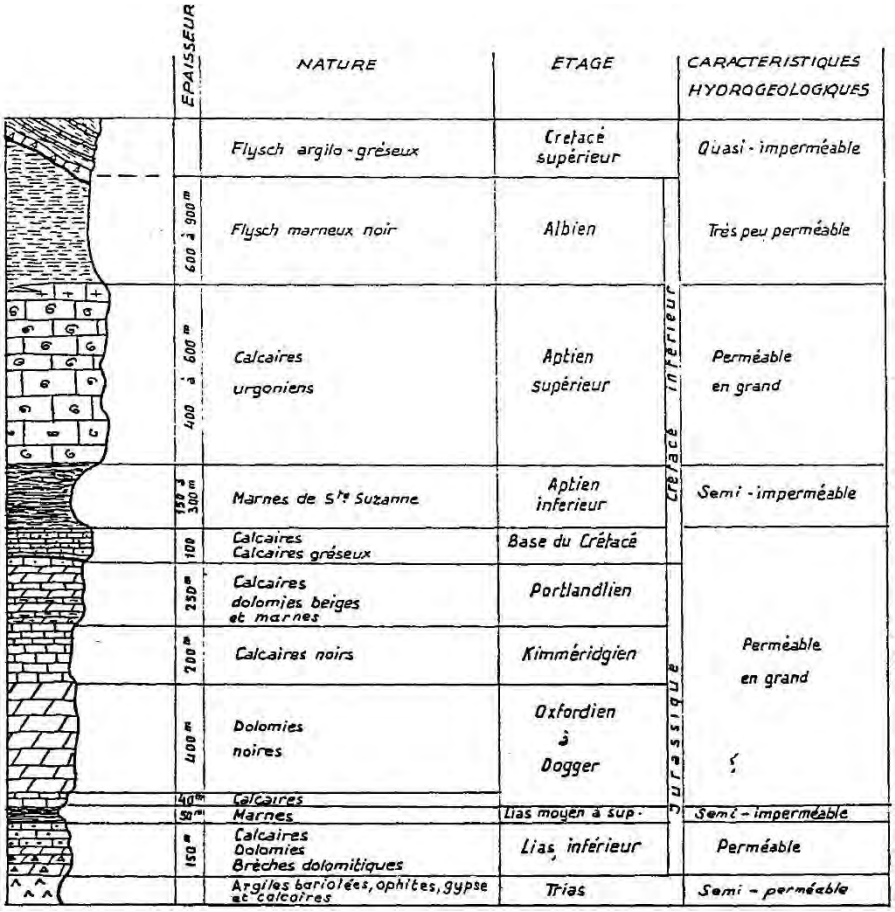


Figure 74 – Potentiels aquifères des formations géologiques, selon BRGM 1986

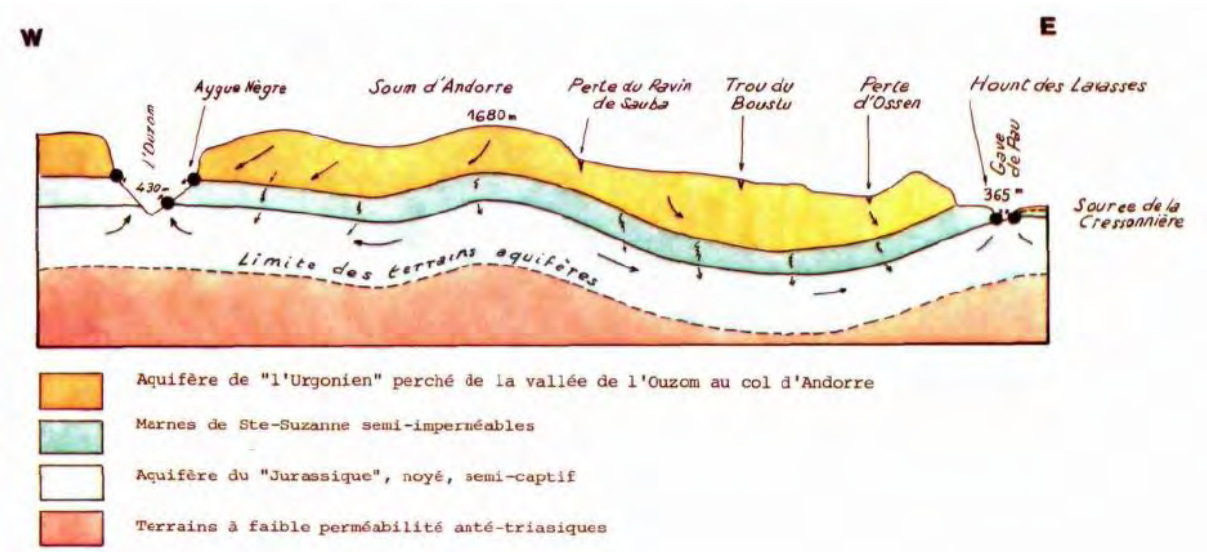


Figure 75 – Relations hydrogéologiques inter-aquifères, selon BRGM 1986

8.4 Recensement des sources

L'ensemble des sources recensées dans les études (BRGM, divers BE, …), les bases de données (BRGM, CDSC65, …) et lors des investigations de terrain ont fait l'objet d'une cartographie avec intégration dans le SIG. Plus d'une centaine de sources ont été localisées sur la zone d'étude (Figure 76, la légende du fond de couches géologiques est consultable sur la Figure 33 page 42).

Nous avons également recensé de façon identique les pertes c'est-à-dire les points d'infiltration dans le sous-sol des écoulements de surface (Figure 77).

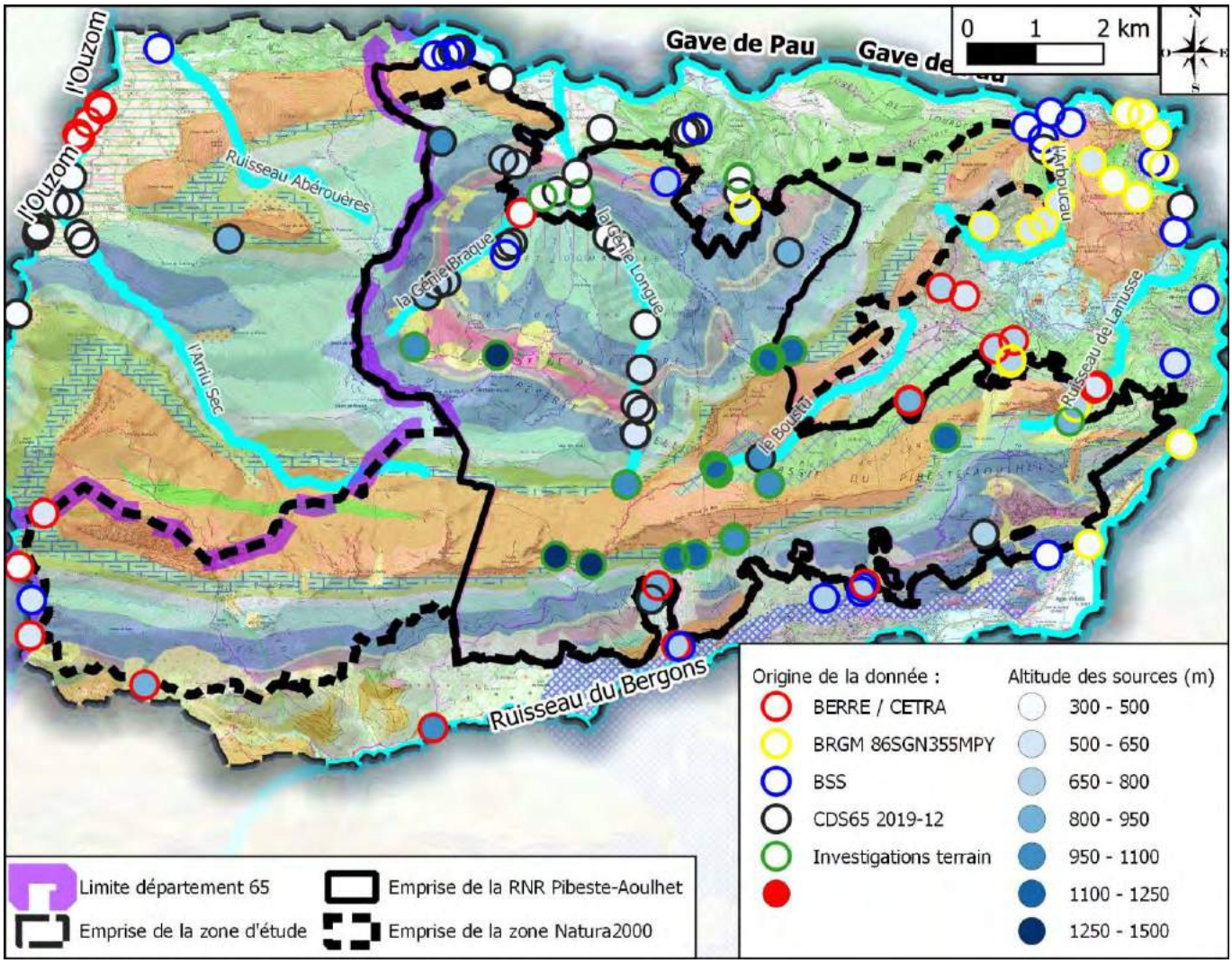


Figure 76 – Recensement des sources principales, échelle : 1/100 000

Nous constatons que le secteur de l'Arriu Sec et ceux du Pic de l'Estibette au Soum de Granquet et au Soum de Conques ne présentent pas ou très peu de sources recensées. Ceci est dû soit à la nature géologique du secteur soit à une moins bonne connaissance et prospection de ces zones.

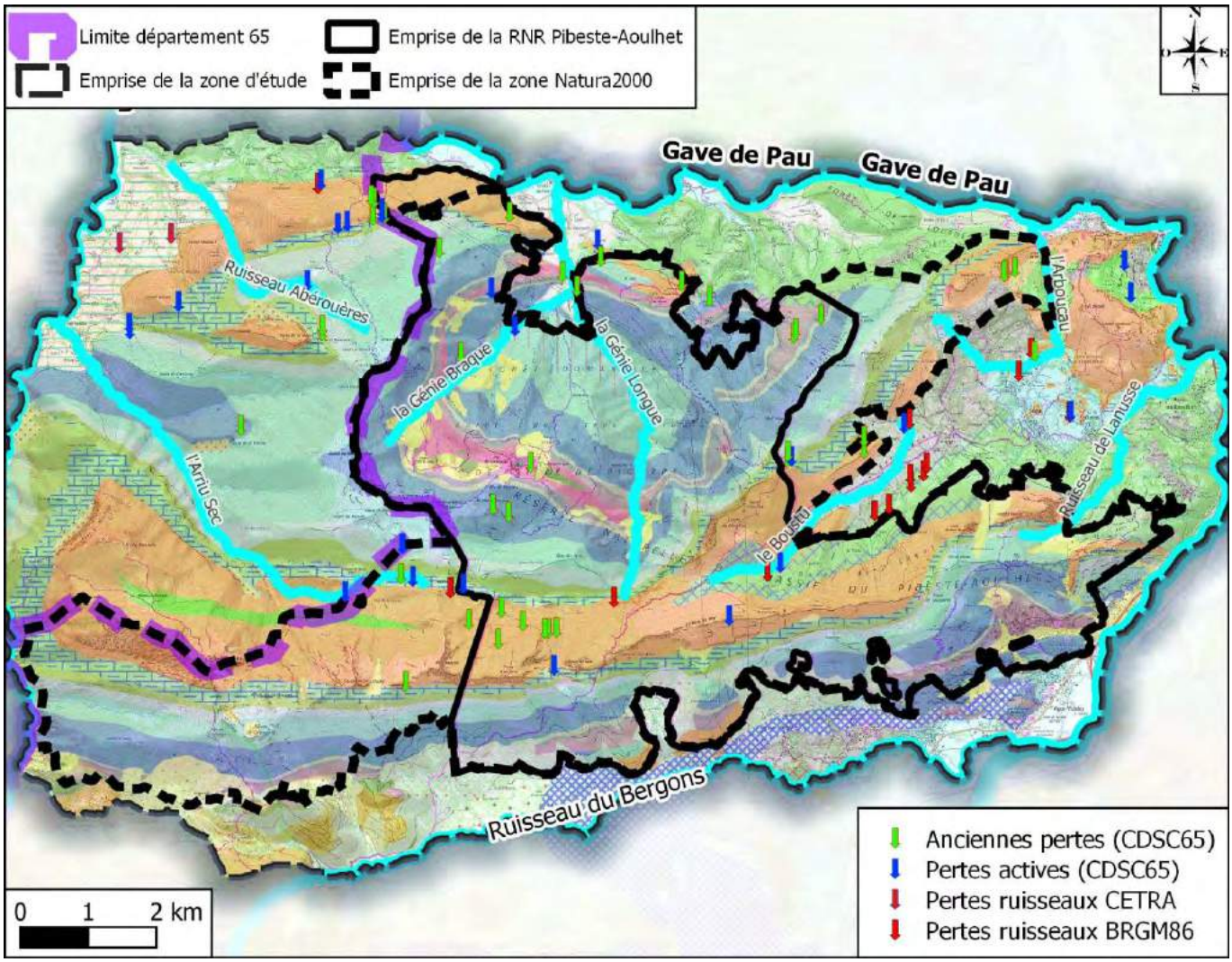


Figure 77 – Recensement des pertes principales, échelle : 1/100 000

Le graphique de la Figure 78 représente la distribution des altitudes des sources inventoriées. Elles vont de 321 m à 1435 m.

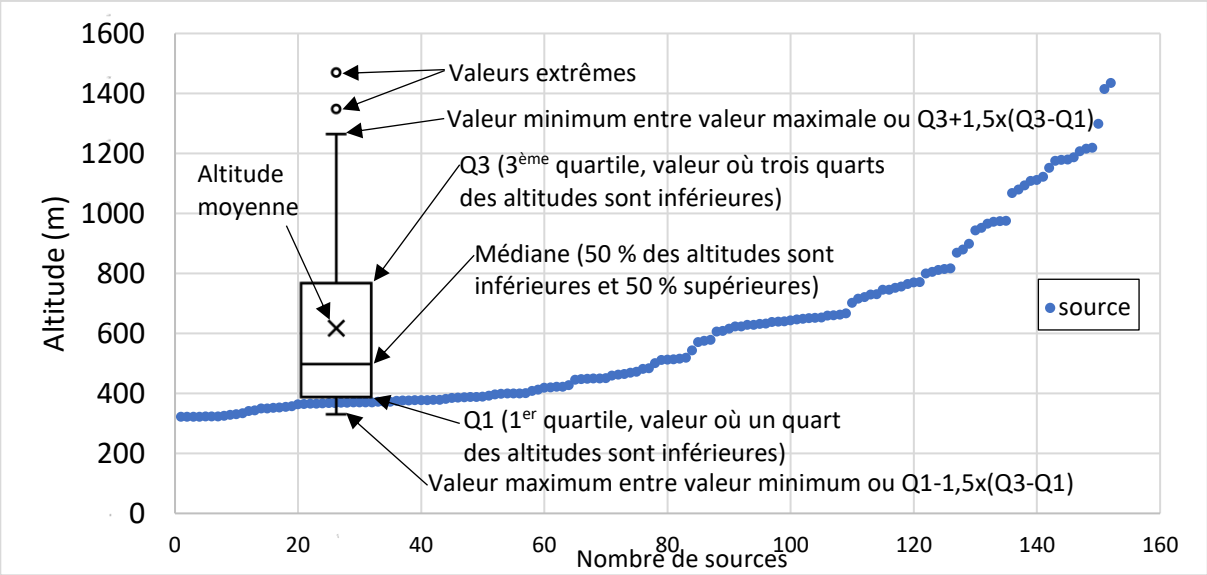


Figure 78 – Répartition de l'altitude des sources inventoriées

8.5 Vulnérabilité

Les aquifères sont vulnérables aux pollutions d'origine naturelle (turbidité, …) ou anthropiques (pesticides, nitrates, turbidité, polluants industriels, …). La vulnérabilité intrinsèque (terme utilisé pour représenter les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques naturelles qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la contamination par les activités anthropiques, c'est une propriété générale.) peut être étudiée par le biais d'une analyse multicritères selon une méthodologie nationale en grande partie fondée sur des guides méthodologiques (par exemple pour les aquifères karstiques : Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques - Guide Méthodologique de la méthode PaPRIKa - BRGM/RP-57527-FR, Octobre 2009). Les critères principaux sont : la pluie efficace, les sols, l'indice de Développement et de Persistance des Réseaux ou l'infiltration efficace (qui prend en compte un sous-critère pente), l'épaisseur de la zone non saturée et la perméabilité de l'aquifère, la fracturation, la nature de la roche, la nature de l'épikarst, ….

La spatialisation des valeurs d'indice des divers critères est reportée sur des couches rasters d'un SIG afin d'obtenir une cartographie de la vulnérabilité intrinsèque avec attribut très faible, faible, modéré, élevé ou très élevé sur un maillage adapté à l'emprise des aires d'alimentation et aux données de traitement.

Cette étude n'a pas pour vocation de définir la vulnérabilité intrinsèque des aquifères de la zone d'étude, mais nous présentons sur la Figure 79 la cartographie de l'IDPR (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux) qui est un indice important dans cette définition. Nous l'avons extrait de la cartographie du BRGM accessible via le site Infoterre.

La Figure 80 montre un exemple d'application de la méthode PaPRIKa pour la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère karstique, appliquée à un secteur de la partie sud-ouest de la zone d'étude, réalisée par F. Carrière dans son mémoire de DES (2008).

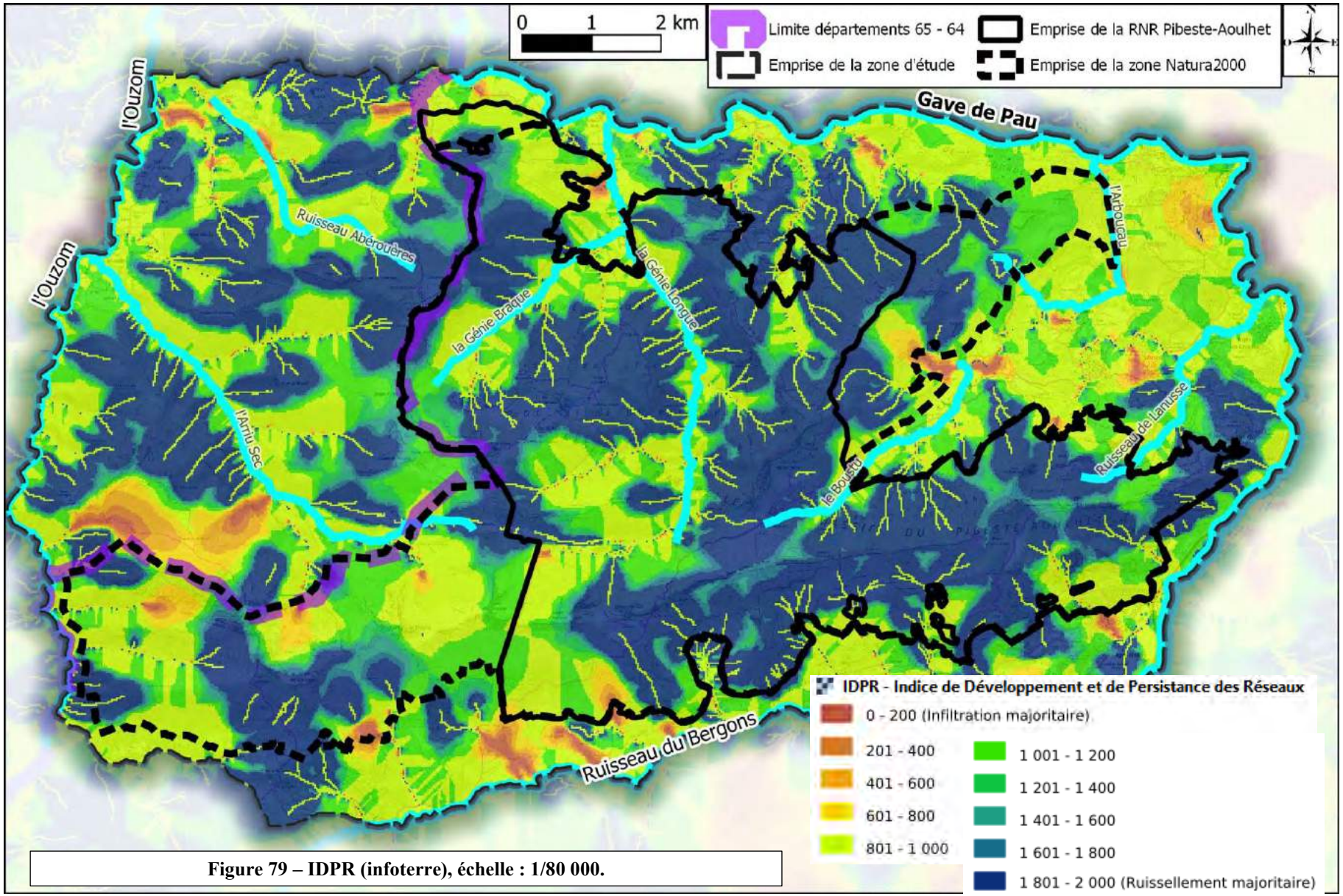


Figure 79 – IDPR (infoterre), échelle : 1/80 000.

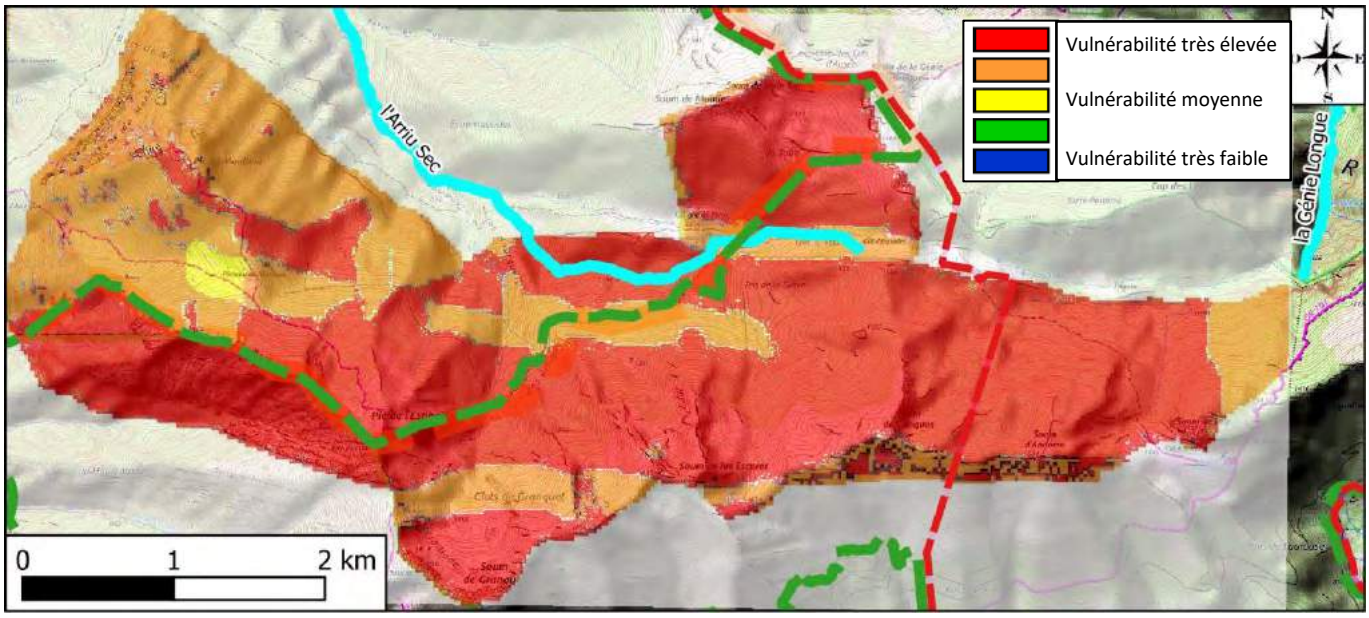


Figure 80 – Vulnérabilité intrinsèque, échelle : 1/50 000

Des mesures sont mises en place afin de préserver la qualité de la ressource en eau. Nous présentons sur la Figure 81 les emprises des zones de patrimoine naturel de l'eau sur la zone d'étude. Les ARS (Agences Régionales de Santé) des Pyrénées-Atlantiques et des Hautes-Pyrénées sont à la disposition du public afin d'apporter de plus amples informations sur ces zones.

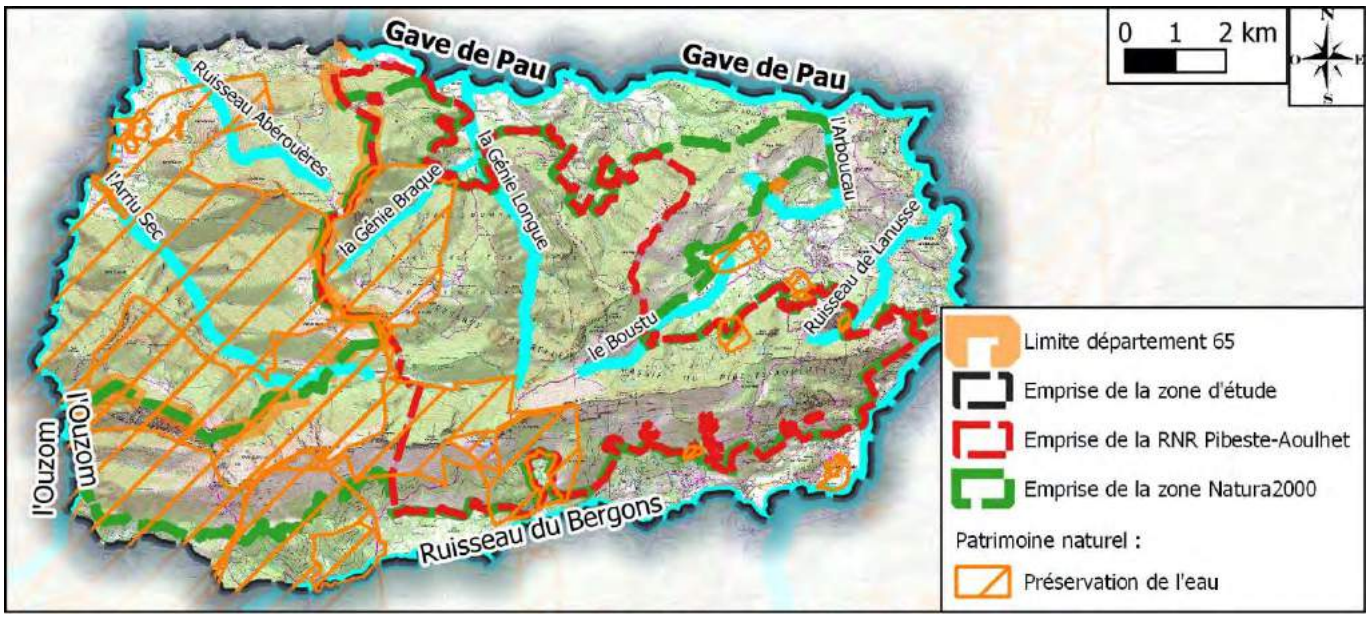


Figure 81 – Patrimoine naturel, préservation de l'eau, échelle : 1/100 000

8.6 Apport des traçages

Afin de comprendre les circulations souterraines parfois complexes à appréhender et définir les aires d'alimentation des sources (lieu des points de la surface du sol qui contribuent à l'alimentation d'une source), des opérations de traçage des eaux souterraines ont été réalisées à des fins diverses et par divers organismes : BRGM, CDSC65, Syndicats d'eau. Ces investigations permettent parfois d'apporter des informations importantes sur ces circulations : grands axes de drainage souterrain, points de sortie, temps de transit et suivants les données collectées peuvent fournir également des informations sur la structure du réseau de circulation souterrain et son hydrodynamique.

Dans le cadre de cette étude, une opération particulière de traçage a été menée le 26 mai 2021, avec injection de fluorescéine dans le gouffre de Pladi. Le compte rendu de cette opération est présenté en annexe 2.

Toutes les données que nous avons pu collectées font l'objet d'une intégration dans le SIG et permettent une visualisation des principaux résultats des traçages existants qui sont reportés sur la Figure 82 (fond IGN) et la Figure 83 (fond de cartographie géologique harmonisée dont la légende est consultable sur la Figure 33 page 42).

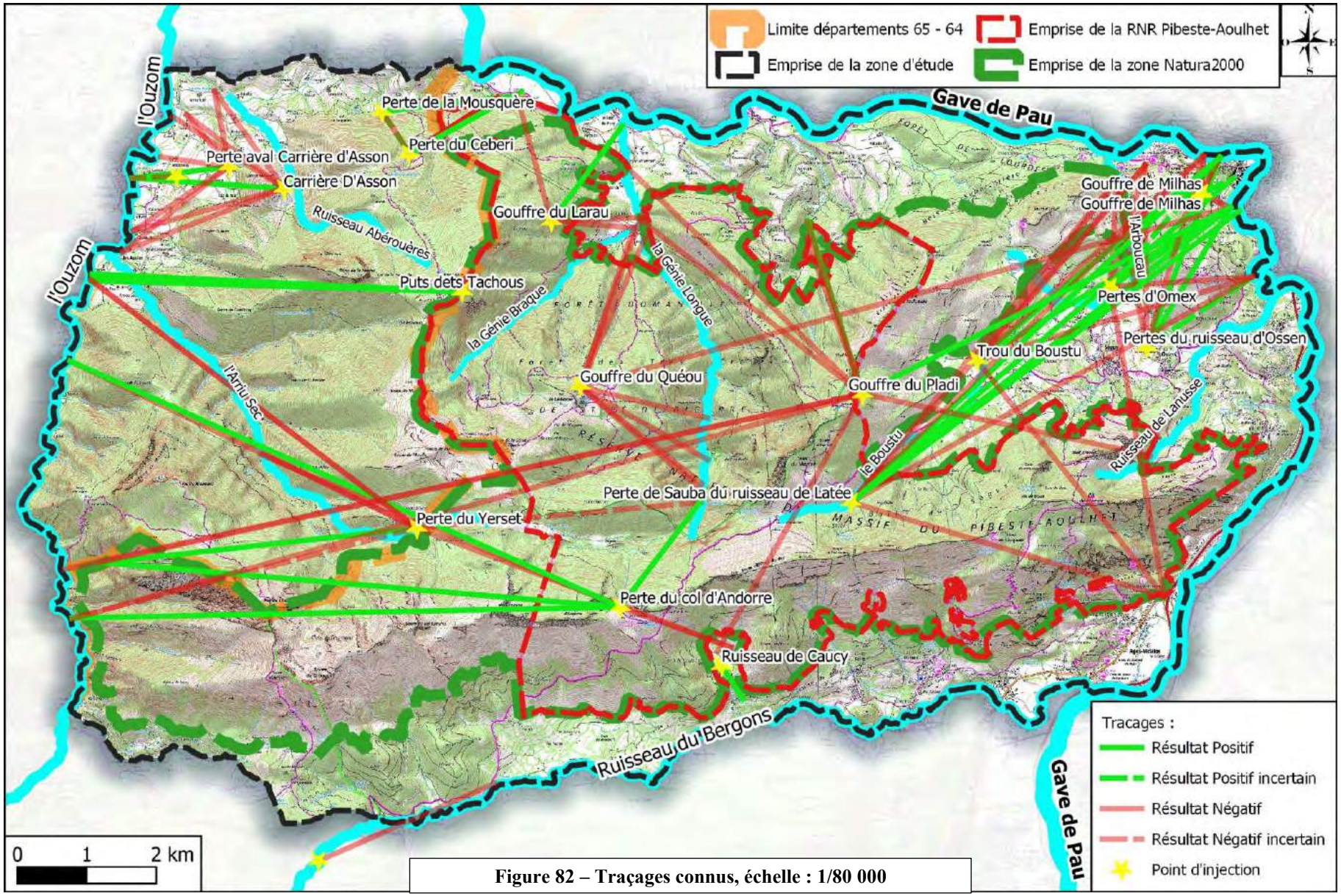


Figure 82 – Traçages connus, échelle : 1/80 000

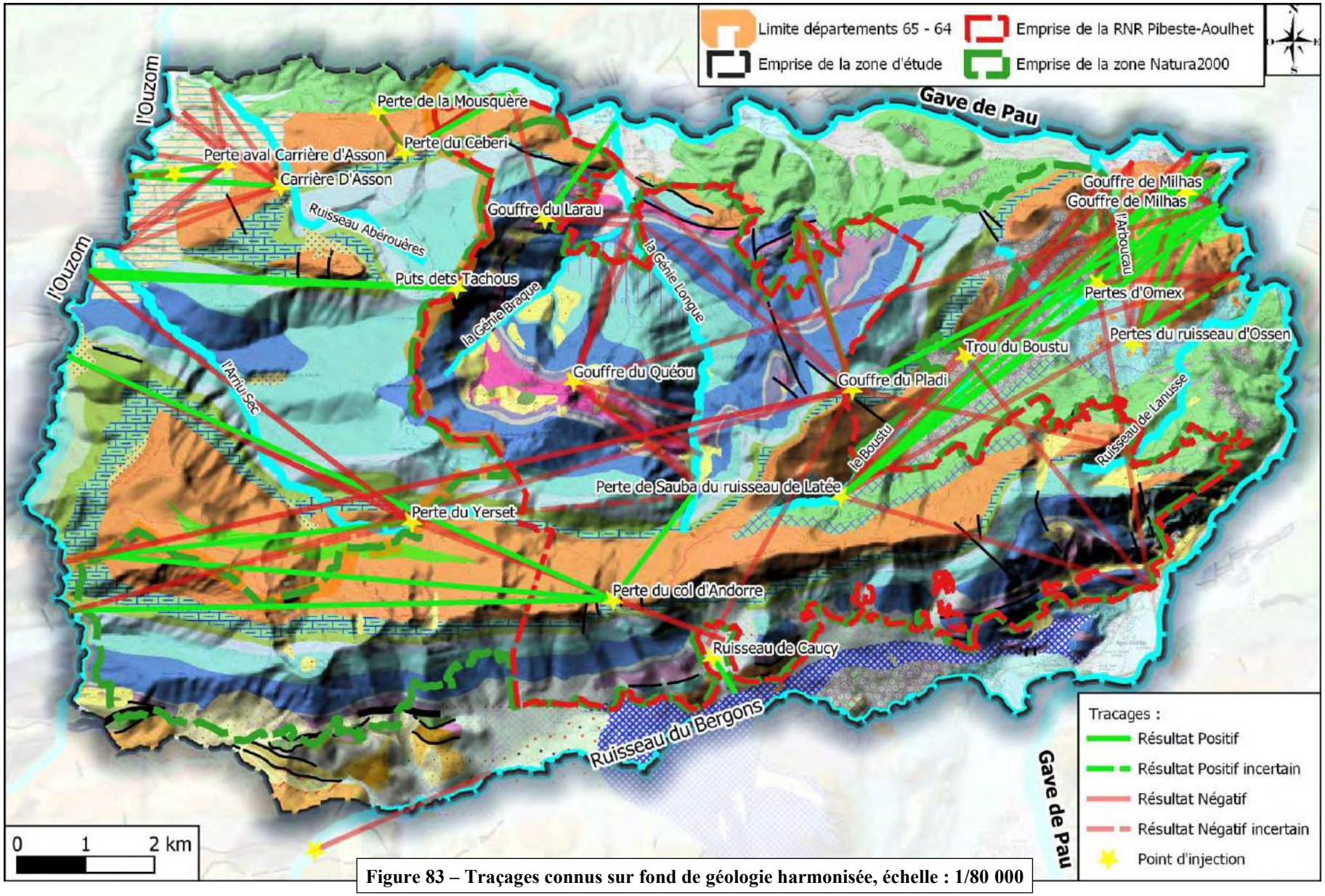


Figure 83 – Traçages connus sur fond de géologie harmonisée, échelle : 1/80 000

8.7 Qualité des eaux

La qualité des eaux est étudiée à partir des données accessibles du site ADES, des données de l'ARS65 et de diverses études spécifiques par le BRGM, des universités et des bureaux d'études. La qualité de l'eau des sources et des cours d 'eau est appréhendée, pour ce rapport, à partir des mesures de température de l'eau, de la conductivité du pH et de la minéralisation à partir des concentrations en ions majeurs.

La température permet d'avoir une idée du temps de circulation des eaux à travers les couches géologiques et de sa profondeur de circulation. La température de l'eau à l'émergence est influencée par la température de la pluie qui va s'infiltrer, par la température de l'air sur la zone d'infiltration et de circulation (température moyenne annuelle et écarts de température saisonniers), par la profondeur de circulation au sein des couches géologiques car la roche va subir les fluctuations externes de température en surface puis avec la profondeur, le gradient géothermique va favoriser une augmentation de la température avec la profondeur (plus l'eau circulent profondément plus elle est chaude). Pour simplifier :

- Une eau qui va montrer des écarts de température en lien avec la température extérieure sera le signe d'une circulation très superficielle au sein des roches ;
- Une eau qui va montrer une température relativement stable et proche de la température moyenne annuelle de la zone d'infiltration sera le signe d'une circulation moyennement profonde mais non superficielle ;
- Une eau qui va montrer une température stable mais plus élevée que la température moyenne annuelle rendra compte d'une circulation profonde au sein des roches.

Dans les réseaux karstiques à circulation rapide, l'effet "tampon" des roches pour la température peut être diminuer.

Le pH rend compte de la concentration en ions hydrogène et mesure l'acidité (ph > 7) ou la basicité (pH > 7) d'une eau. Il est influencé par la qualité de l'eau de la pluie et par la nature des roches que l'eau traverse. Dans les terrains carbonatés comme sur la zone d'étude, les pH sont plutôt basiques.

La conductivité rend compte de l'aptitude de l'eau à laisser passer un courant électrique. C'est l'inverse de la résistivité. Elle se mesure en µS/cm (microSiemens par cm). Elle est en relation avec la minéralisation de l'eau ou les concentrations en ions, la nature des ions (leur mobilité ionique) et la température. Pour standardiser les mesures de conductivité, les valeurs sont

données pour une température de 25°C. Pour être consommées, les eaux devraient avoir une conductivité comprise entre 200 et 1100 µS/cm à 25°C.

Conductivité (µS/cm)	Minéralisation	Qualité de l'eau
C < 100	Très faible	Utilisable
100 < C < 200	Faible	Utilisable
200 < C < 400	Peu accentuée	Excellente
400 < C < 600	Moyenne	Bonne
600 < C < 1100	Importante	Utilisable
C > 1100	Excessive	Utilisable

La minéralisation est appréhendée ici à partir des concentrations en ions majeurs : Calcium (Ca^{2+}), Magnésium (Mg^{2+}), Sodium (Na^{+}), Potassium (K^{+}), Chlorures (Cl^{-}), Sulfates (SO_4^{2-}), Hydrogénocarbonates (HCO_3^{-}) et Carbonates (CO_3^{2-}), Nitrates (NO_3^{2-}). Cette minéralisation est acquise avec la dissolution des roches traversées par l'eau de pluie, sous l'effet de mécanismes plus ou moins complexes. Généralement, plus une eau va circuler longtemps dans une même roche, plus sa minéralisation sera importante. Suivant la nature des roches (granites ou dolomies par exemple) les minéralisations seront différentes en termes de concentration pour un même ion et en concentrations globales.

Ces ions permettent d'établir un profil chimique de l'eau qui peut être comparé facilement à d'autres eaux par visualisation en utilisant par exemple un diagramme de Schöeller-Berkaloff. Avec ce type de diagramme, nous visualisons rapidement si une eau à un profil :

- - Bicarbonaté – Calcique : pôles Calcium et Hydrogénocarbonates très majoritaires, typique des eaux circulant dans les calcaires de la zone d'étude ;
- Bicarbonaté – Calco-Magnésien : pôles Calcium, Magnésium et Hydrogénocarbonates très majoritaires, typique des eaux circulant dans les dolomies de la zone d'étude ;
- Sulfaté – Calcique : eaux circulant dans des gypses (Trias par exemple) ;
- Chloruré – Sodique : eaux circulant dans des terrains salifères (Trias par exemple).

Plusieurs pôles sont possibles : des mélanges d'eaux circulant dans des calcaires et dans les terrains salifères auront un profil bicarbonaté - Chloruré – Calco - Sodique.

Le Tableau 7 et le Tableau 8 présentent les valeurs de pH, Température (Temp.) et Conductivité à 25°C (Cond.) mesurées sur le terrain pour les petites sources investiguées (sources localisées sur la Figure 85) et le Tableau 9 présentent ces mêmes valeurs issues de la bibliographie et des données ADES pour les sources principales de la zone d'étude. La Figure 86 présente les

diagrammes de Schöeller-Berkaloff pour les sources principales et les petites sources du secteur du Pibeste.

Tableau 7 – Mesures de terrain sur les sources du secteur du Pibeste

Date	27/02/20	27/02/20	02/11/21		27/02/20	02/11/21		02/11/21	02/11/21
Source	pH	Temp. (°C)	Temp. (°C)	Variation de Temp. (°C)	Cond. (µS/cm)	Cond. (µS/cm)	Variation de Cond. (µS/cm)	Débit (l/s)	Débit (m3/j)
Caucy Abreuvoir	7.72	9.5	9.9	0.4	260	261	1	0.03	2.16
Caucy Amont	7.6	8.9	9.4	0.5	236	240	4	0.02	1.728
Haut Hitte Abreuvoir	7.61	9.5	13.8	4.3	290	290	0	0.01	1.08
Bas Andorre	7.54	5.7	11.9	6.2	240	284	44	0.01	0.9
Col Andorre	7.76	5	9.5	4.5	214	246	32	0.25	21.6
Pladi Est	7.36	6.8	7.8	1	261	248	-13	0.17	14.4
Pladi Ouest	7.8	6.7	7.1	0.4	196	198.6	2.6	0.05	4.32
Pladi abreuvoir aval	7.58	7.3	6.6	-0.7	268	265	-3	Mesure impos.	Mesure impos.
Col du Prat de Rey Ouest	7.85	5.8	10.8	5	230	354	124	0.11	9.795918 37
Col du Prat de Rey Centre						-		Très faible	Très faible
Col du Prat de Rey Est			9.3			322		0.07	6.031413 61
Sauba	7.92	6.9	7.4	0.5	242	280	38	0.25	21.6
Picharots	7.97	5.8	Non accessible		229	Non accessible		Non accessible	Non accessible

Tableau 8 – Mesures de terrain sur les sources du secteur de Saint-Pé

Date :	27/10/2021			
Nom :	Temp. (°C)	Cond. (µS/cm)	Débit (l/s)	Observation
Bétharram Est Bassin	10.7	271	15 à 20	
Bétharram Ouest	10.7	278		
Mélat Ouest	10.3	293	10 à 15	
Mélat griffon Est 1			0	sec
Mélat griffon Est 2	9.8	300	0	eau stagnante
Mélat griffon Est 3	9.8	304	0.1	
Mélat griffon Est 4			0	3 griffons à sec
Génie Braque Pont	10.1	290	50 à 80	
Génie Longue gué	9.6	378	100 à 150	
Génies Aval Confluence	9.5	367	150 à 200	
Hount det Cournets	11.4	306	25 à 30	
Génie Longue, amont Hount det Cournets	9.7	366		
Aiguo Blanco	8.8	297	10 à 15	
Aiguo Blanco entrée regard				
Quinta n°1	11.5	360	0	eau stagnante
Quinta n°2	11.5	304	5 à 8	
Quinta n°3 grotte			sec	coule en temps de pluie

Tableau 9 – Données bibliographiques sur les sources principales de la zone d'étude

	Moyenne			Minimum			Maximum		
Source	Temp. (°C)	pH	Cond. (µS/cm)	Temp. (°C)	pH	Cond. (µS/cm)	Temp. (°C)	pH	Cond. (µS/cm)
Aygue Nègre	7.947	7.923	217	6	7.2	167	13	8.6	261
Sep	11.467	8.105	296.5	11	7.92	288	12	8.23	306
Glesia	10.636	7.676	320	9.4	7	255	13.3	8.11	387
Faure	7.1	7.85	290						
Source Arribes	13.07	7.6	294	11.2	7.2	243	14	7.9	367
Oulhet	11.145	7.743	297	9	7.5	255	12.4	8.05	359
Bois du Boustu	8.8	7.859	281	7.7	7.35	228	10.7	8.23	335
Bois du Boustu amont	8.8	7.98	271						
Paulede amont	9.7	7.702	280	8.8	7.4	264	11	8.1	305
Belasse	10.483	7.639	400	9.6	7.3	379	12.5	7.95	429
Bears	10.02	7.686	335	8.2	7.45	312	11.4	8.25	364
Hourquet amont	9.5	8.01	300	8.7	8.01	269	10.5	8.01	334
Yunka	11.8	8.46	173	8.6	8.46	151	16.2	8.46	205
Paulède aval	9.4	7.883	337	8.4	7.6	332	10	8.05	343
Œil du Bergons	8.7	7.82	227	4	7.05	206	10.3	8.16	266
Hount des Lavasses	11.3	7.5	484						
Massabielle	13.1	7.64	438						
Merlasses	12.3	7.64	514						
Pont de l'Arboucau	12.2	7.68	435						

Toutes les sources présentent des pH légèrement basiques (généralement compris entre 7,5 et 8 Unité pH) en relation avec les roches carbonatées dans lesquelles leurs eaux circulent.

Les conductivités sont généralement comprises entre 200 et 400 µS/cm, les valeurs des quatre dernières sources du Tableau 9 sont issues d'une seule analyse par un même laboratoire et semblent un peu élevées. Pour les petites sources investiguées, celles de Bas Andorre, du col d'Andorre, du Col du Prat de Rey et de Sauba montrent des variations significatives entre les deux dates de mesure qui peuvent laisser penser à des interactions marquées avec les eaux superficielles ou les eaux météoriques.

En ce qui concerne les températures, pour les sources principales, la température moyenne varie entre 7 et 13 °C. Nous avons reporté sur la Figure 84 les températures moyennes des sources que nous possédions avec les altitudes des sources issues de leur positionnement sur le MNT au pas de 5 m de l'IGN. Nous observons bien la relation entre température de l'eau à l'émergence et altitude de l'émergence : plus la source est haute, plus son eau est froide. Quelques points divergent de la droite de tendance mais données sont parfois peu nombreuses surtout quand il n'y en a qu'une pour certaines sources. Pour les sources Haut Hitte, Abreuvoir, Bas Andorre, Col Andorre et Col du Prat de Rey Ouest, les variations de température entre les deux mesures de février 2020 et novembre 2021 semblent indiquer des circulations à très faible profondeur

avec des liens étroits possibles avec les eaux de surface ou météoriques et/ ou avec la température de l'air.

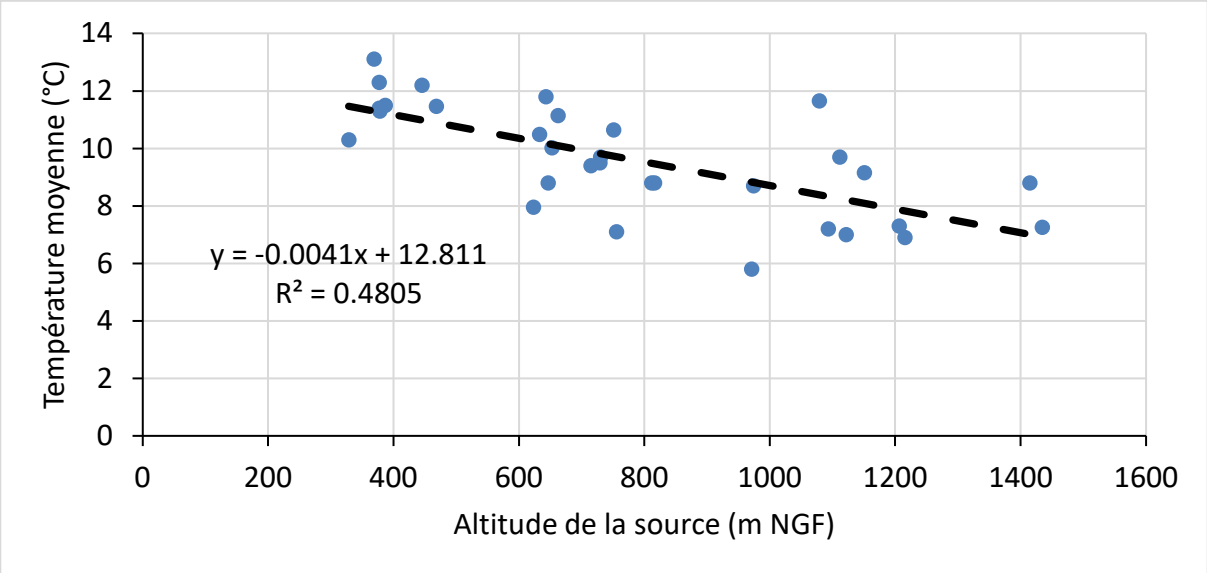


Figure 84 – Température moyenne de l'eau d'une source en fonction de son altitude.

Les profils chimiques présentés sur la Figure 86 rendent compte d'eau de type Bicarbonatée – Calcique avec un pôle magnésien plus marqué pour la source SEP et celle de Glésia. La source Bears montre un pôle sulfaté bien marqué, mais nous ne pouvons affirmer qu'il s'agisse d'un marquage de trias gypsifère. Pour les petites sources investiguées, les profils sont bien Bicarbonatés – Calciques en lien avec les calcaires urgoniens, avec juste un marquage magnésien plus prononcé sur Picharots et Sauba. Pour les sources de Massabielle et de Hount de Lavasses, le pôle chloruré semble difficilement explicable sur la base d'une seule analyse sur ces sources, réalisée par un même laboratoire.

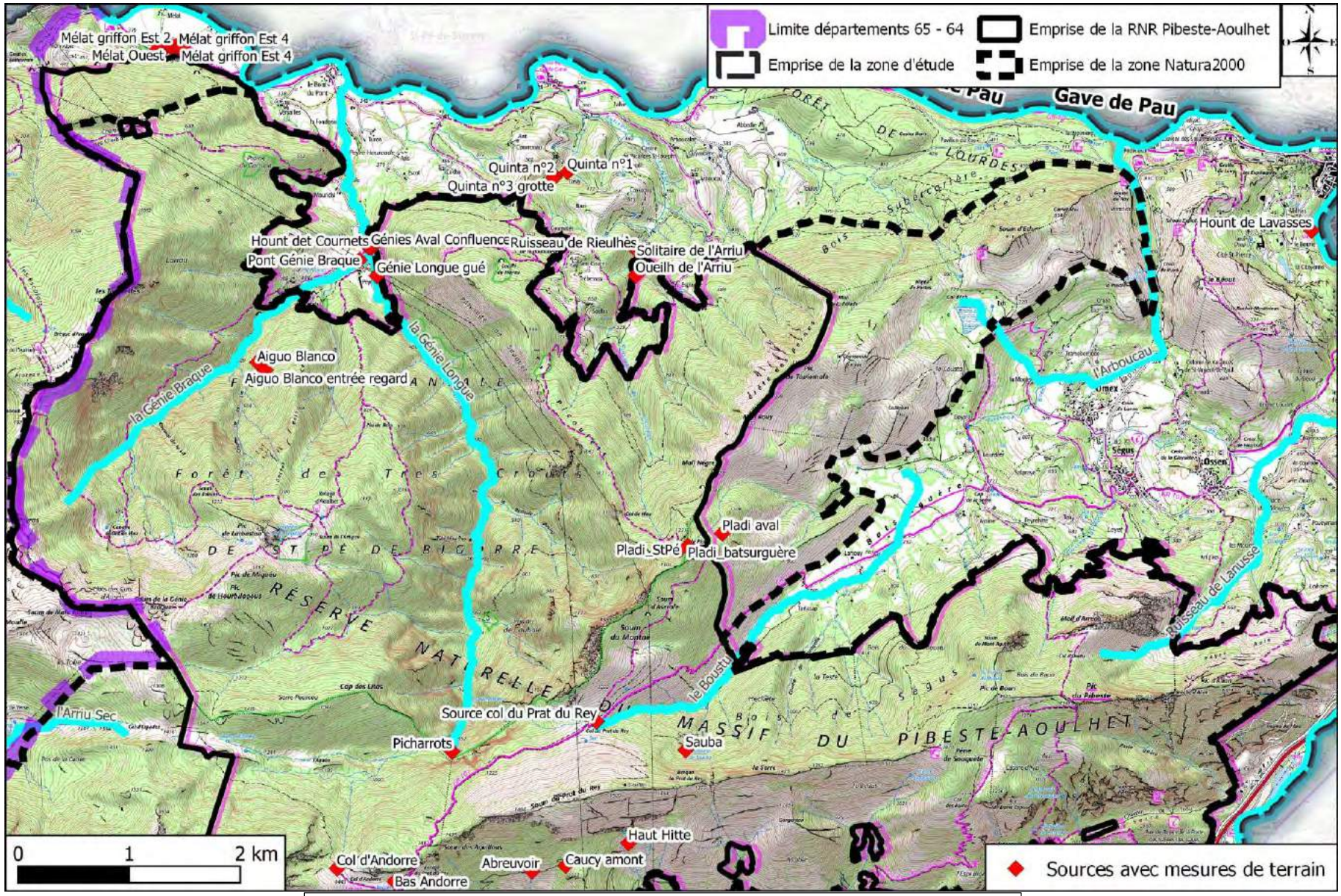


Figure 85 – Inventaire des sources avec mesures de terrain, échelle : 1/50 000

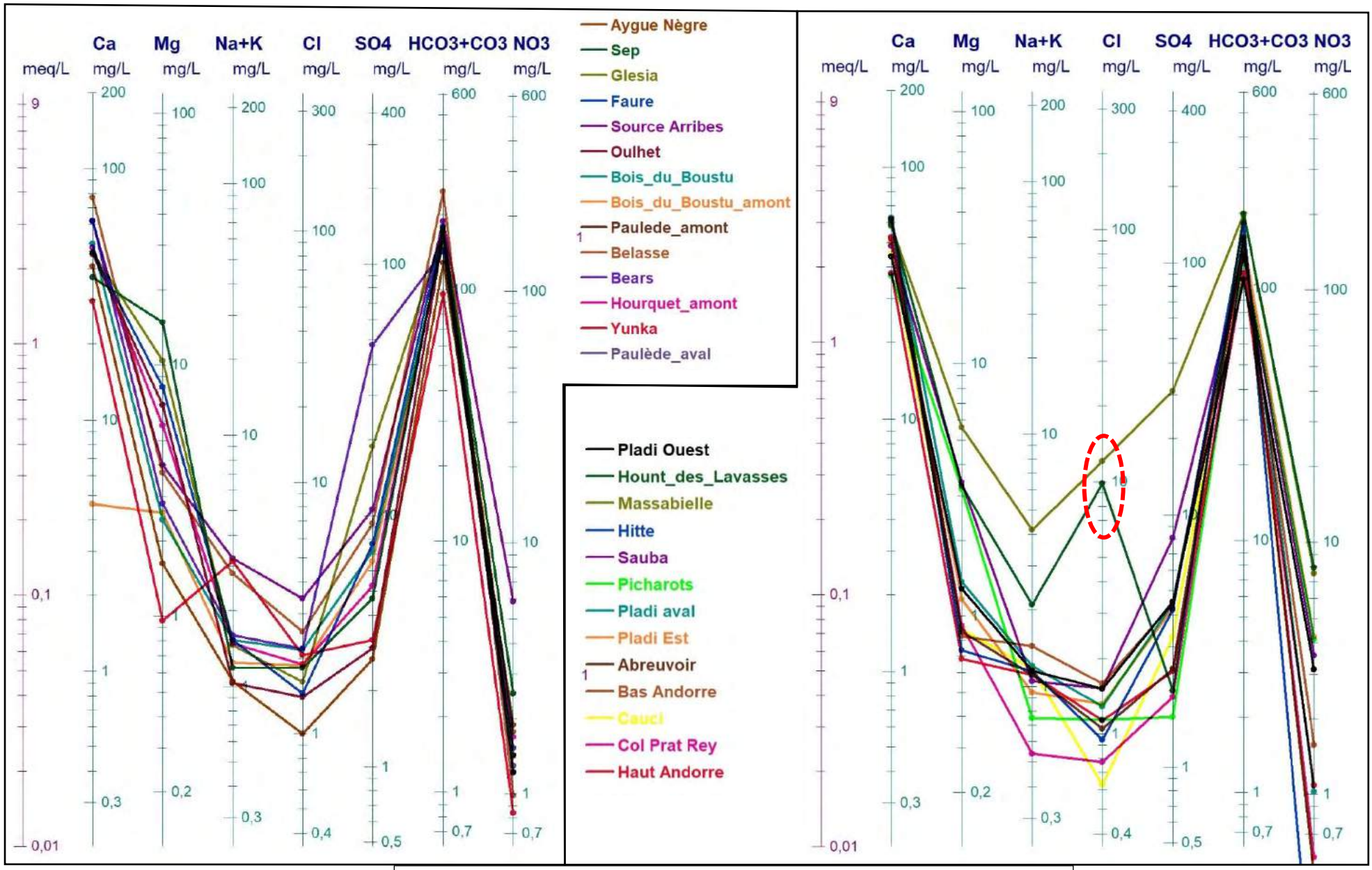


Figure 86 – Diagramme Schöeller-Berkaloff de quelques sources du secteur d'étude

8.8 Synthèse hydrogéologique

L'analyse des données recueillies permet de faire une première cartographie des bassins versants hydrogéologiques supposés (Figure 87). Ils sont fortement influencés par la nature des roches à dominante carbonatée mais avec la présence de niveaux marno-argileux peu ou imperméables, la fracturation et la karstification qui s'y sont développés en lien avec l'histoire géologique du secteur étudié et par les structures géologiques présentes : plis anticlinaux, ^mis synclinaux, failles, chevauchements, diapir soudé, …

Il reste de nombreuses zones à affiner, qui ne peuvent être définies qu'avec des études hydrogéologiques et des campagnes de traçage complémentaires, qui ne font pas l'objet de cette étude.

Ces bassins versants hydrogéologiques sont définis par des aires d'alimentation superficielles et souterraines et des points de sorties de ces bassins.

Pour les unités des calcaires urgoniens, les points de sorties sont souvent bien individualisés avec une ou plusieurs grosses exsurgences sur la partie aval et avec une limite inférieure (mur de l'aquifère urgonien ou des calcaires de l'Aptien) relativement bien définie et correspondant aux marnes bédouliennes, bien que localement ces marnes puissent mettre en relation l'aquifère sous-jacent des formations jurassiques. Sur l'unité de l'Estibette, le CDSC65 aurait reconnu le drain principal noyé dont l'exutoire se trouve dans les falaises en rive droite de l'Ouzom. Selon des résultats peut probant de certains traçages, il peut y avoir localement des diffluences d'un bassin vers un autre (Estibette vers Génies par exemple). La limite entre les deux grands bassins urgo-aptiens de l'Estibette et de Batsurguère est supposée vers le col d'Andorre mais elle n'est pas connue précisément.

Sur le secteur des Génies, les sorties semblent plus diverses et les écoulements souterrains sont moins bien connus. Il peut également y avoir localement des diffluences d'un bassin vers un autre.

Il existe également de grandes inconnues sur le versant sud des crêtes du Soum de Granquet – Pibeste, principalement sur la source du Bergons et sur le secteur de Caucy qui présente des sources à débits soutenus mais dont aucun traçage ne semble avoir détaillé le bassin d'alimentation.

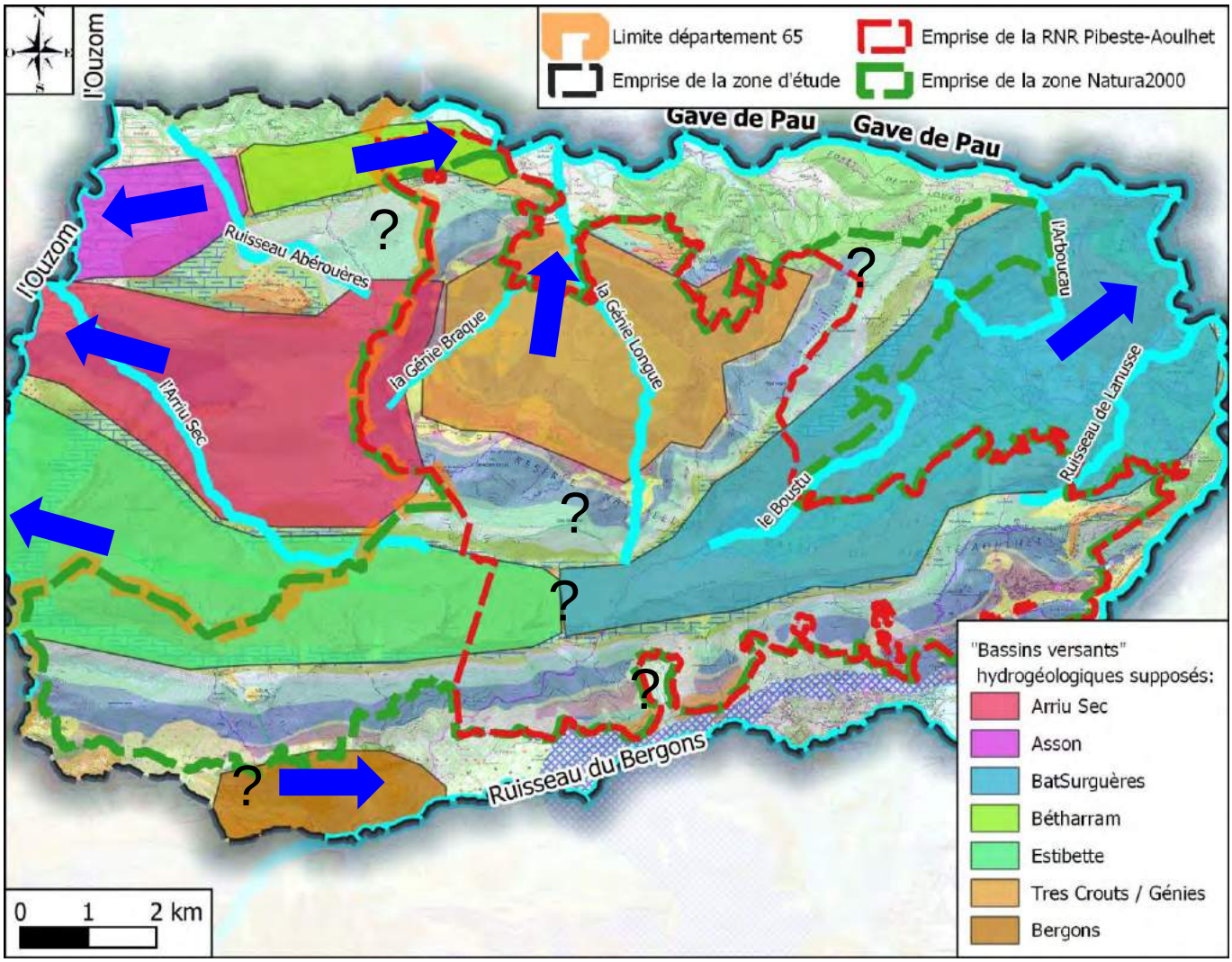


Figure 87 – Bassins versants hydrogéologiques supposés, échelle : 1/100 000

8.9 Réflexions sur les impacts liés au changement climatique

Les écoulements superficiels et les ressources en eaux souterraines sur le secteur d'étude sont étroitement liés à la pluviométrie et plus particulièrement à la pluie efficace qui correspond à la partie de la pluviométrie qui participe réellement aux écoulements superficiels par ruissellement et à la recharge des eaux souterraines par infiltration. Cette pluie efficace est fonction de la pluviométrie et de l'évapotranspiration, cette dernière est en lien avec les températures.

Les aquifères servent à la fois de réservoir d'eau et de vecteur de transport de l'eau souterraine. Sur le secteur d'étude, les sources participent grandement aux débits des cours d'eau, surtoçut en période sans pluie. Les volumes d'eau relargués et les débits aux sources sont liés aux conditions d'écoulements au sein de l'aquifère régis par :

- les paramètres physiques intrinsèques de l'aquifère et non liés aux conditions hydrologiques (porosité, perméabilité, son étendue et son épaisseur) ;
- les paramètres variables liés aux conditions hydrologiques (épaisseur saturée, charges hydrauliques) ;
- les paramètres liés aux caractéristiques physiques du point d'exsurgence pour les sources : diamètre des ouvertures des griffons, mise en charge potentielle, …

Les variations de débit vont donc être étroitement liées aux variations de charges hydrauliques :

- les périodes de recharge correspondent à des périodes d'augmentation naturelle des charges hydrauliques. Pour les sources nous aurons une augmentation du débit ;
- les périodes de décharge correspondent à des périodes de diminution naturelle des charges hydrauliques. Pour les sources nous aurons une diminution des débits.

La recharge, qui de façon générale peut être décrite comme le flux d'eau qui traverse le sol et le sous-sol pour atteindre l'aquifère, est donc un paramètre très important dans les variations des débits aux points de captage. Sa quantification ne dépend pas seulement des précipitations mais de nombreux paramètres et variables : climatologie (précipitations, neige, température, vent, évaporation, évapotranspiration, …), géomorphologie (pentes, rugosité, densité de réseaux de drainage, …), les sols (type, épaisseur, capacité de stockage en eau, …), la couverture végétale et ses variations temporelles (mode de cultures), et bien sûr les paramètres physiques de l'aquifère (propriétés hydrodynamiques, propriétés géométriques).

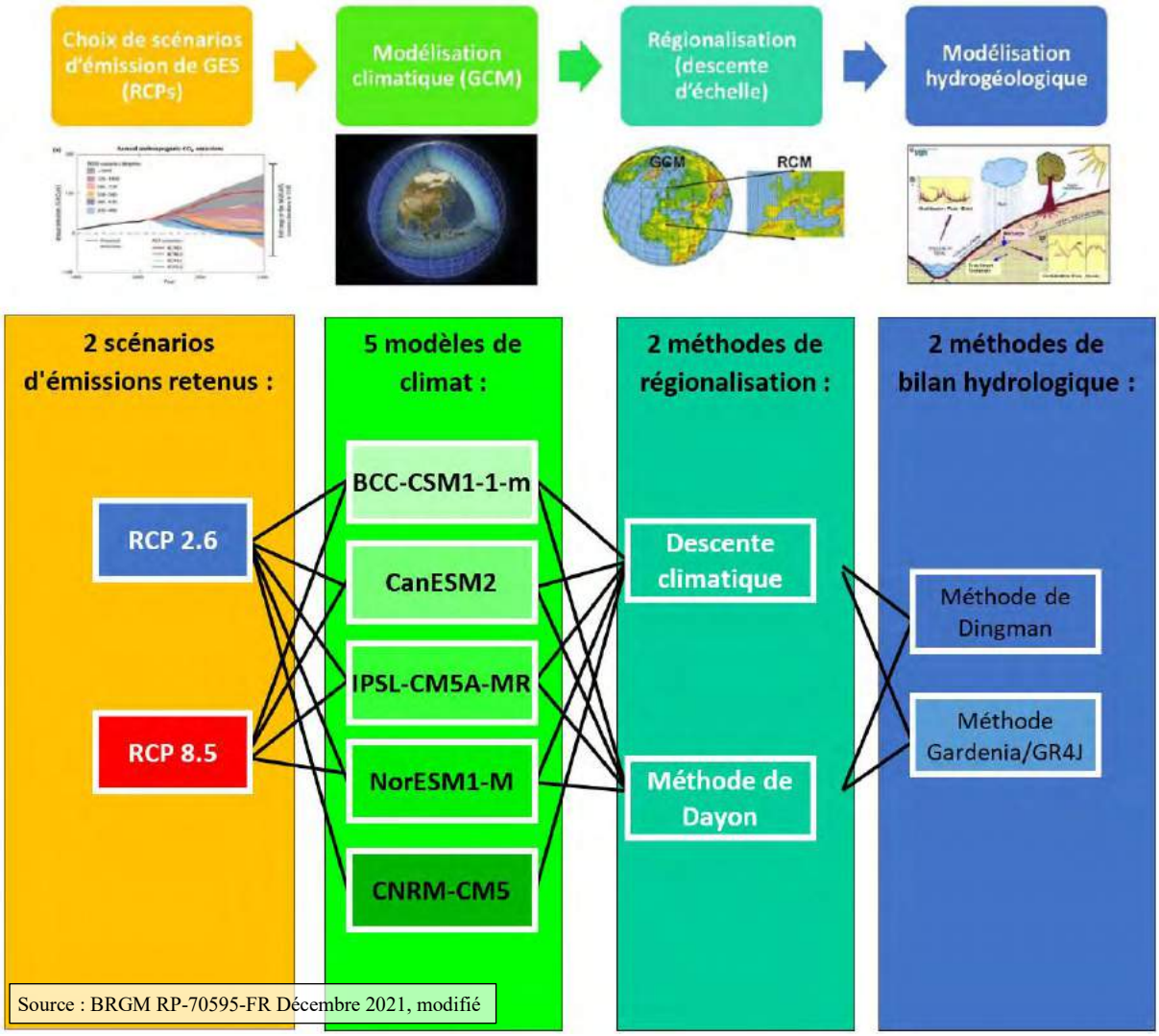
Diverses méthodes d'estimation de la recharge existent, plus ou moins adaptées en fonction du type d'aquifère. Elles peuvent utiliser ou "se caler" sur des données de séries de suivis de débits ou mettre en formulation divers paramètres et variables précisés précédemment.

En l'absence de séries chronologiques de suivi de débits de sources ou de niveaux piézométriques de nappe suffisamment longues sur le secteur d'étude pour permettre une

définition de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau souterraine et d'établir des prévisions à plus ou moins longues échéances., nous nous baserons sur une relation directe entre estimation de l'évolution de la recharge et impact sur la ressource en eau souterraine.

Des études à l'échelle du bassin Adour-Garonne :

A l'échelle du bassin Adour-Garonne, le BRGM a appliqué une méthodologie d'estimation de la recharge des aquifères à nappe libre sur la base de l'estimation de la pluie efficace, elle ne prend donc pas en compte les échanges entre aquifères et les échanges nappe – rivière. Nous reprendrons dans ce paragraphe les principaux résultats et les conclusions issus de cette étude : rapport BRGM RP-67149-FR, octobre 2019. Le schéma de la figure suivante présente l'organisation de la méthodologie.



Source : BRGM RP-70595-FR Décembre 2021, modifié

Figure 88 – Méthodologie d'estimation de la pluie efficace

Cette méthodologie a abouti à la réalisation de cent cinquante-deux simulations pour le calcul de la pluie efficace (composée de la recharge et du ruissellement), en prenant en compte les 4 périodes : 1981-2010 (période de référence actuelle), 2021-2040 (horizon 2030), 2041-2060 (horizon 2050) et 2071-2090 (horizon 2080).

Pour chaque simulation correspondant à une période future (2021-2040, 2041-2060, 2071-2090), le déficit (ou un excédent) relatif de pluie efficace sur la période considérée par rapport à la période de référence, à modélisation équivalente, a été calculé :

$$\Delta(P_{eff}) = \frac{P_{eff}(futur) - P_{eff}(actuel)}{P_{eff}(actuel)}$$

(soit 38 simulations de la différence de pluie efficace entre une période future et la période actuelle)

Une hypothèse forte émise est que le ratio d'infiltration de la pluie efficace étant constant dans le temps, la variation relative de recharge est égale à la variation relative de pluie efficace :

$\Delta(Rch) = \Delta(P_{eff})$ Les simulations rendent donc compte de la différence relative de la moyenne interannuelle de recharge d'une période future par rapport à la période actuelle.

Les simulations sont réalisées sur des mailles de 8 km x 8 km (mailles SAFRAN de Météo-France) puis sont moyennées à l'échelle des masses d'eau souterraine (MESO, Figure 65 page 80).

Pour chaque maille et chaque simulation l'étude donne donc une valeur de différence relative de la moyenne interannuelle de recharge d'une période future par rapport à la période actuelle qui est ensuite traduite pour la masse d'eau. Pour une même période future, des différences importantes peuvent être mise en évidence entre les simulations unitaires ou moyennées selon les scénarios, modèles et méthodes retenus, comme nous le visualisons sur les figures suivantes tirées du rapport BRGM RP-67149-FR d'octobre 2019.

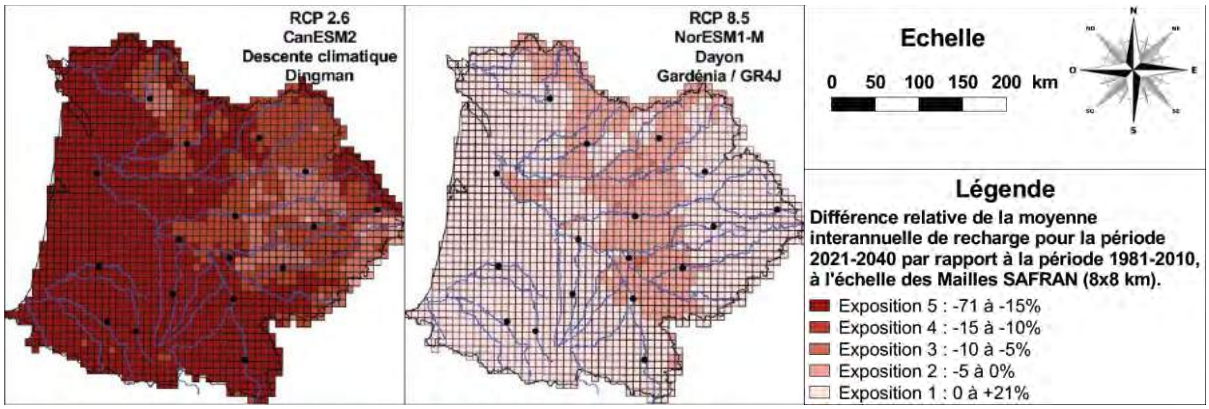


Figure 89 - Simulations à valeurs extrêmes sur mailles SAFRAN pour l'horizon 2030

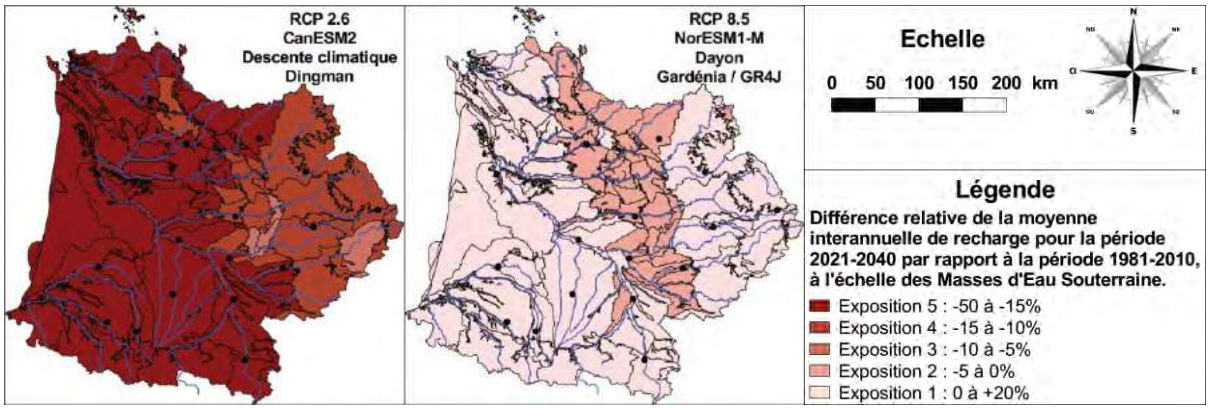


Figure 90 - Simulations à valeurs extrêmes sur masses d'eau souterraine pour l'horizon 2030

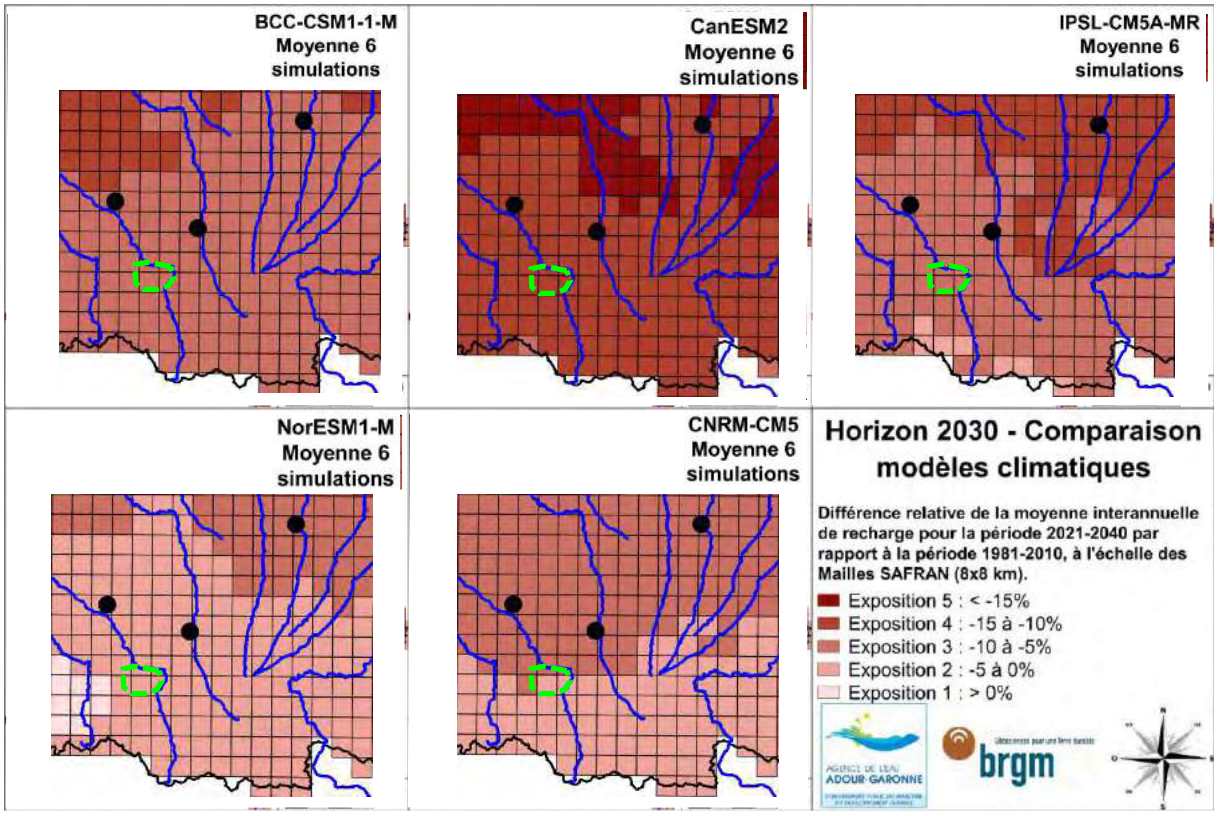


Figure 91 - Variabilité des valeurs moyennées en fonction des modèles climatiques pour l'horizon 2030

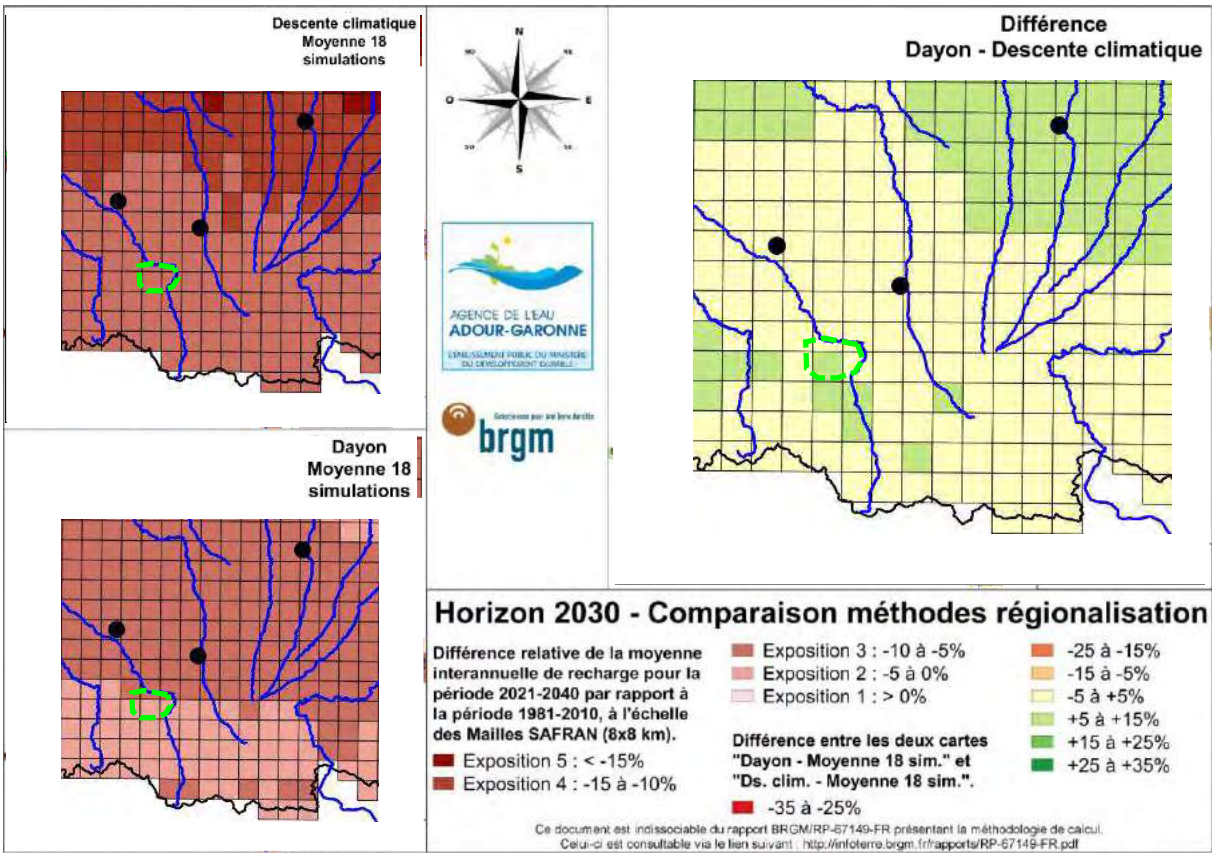


Figure 92 - Variabilité des valeurs moyennées en fonction des méthodes de régionalisation pour l'horizon 2030

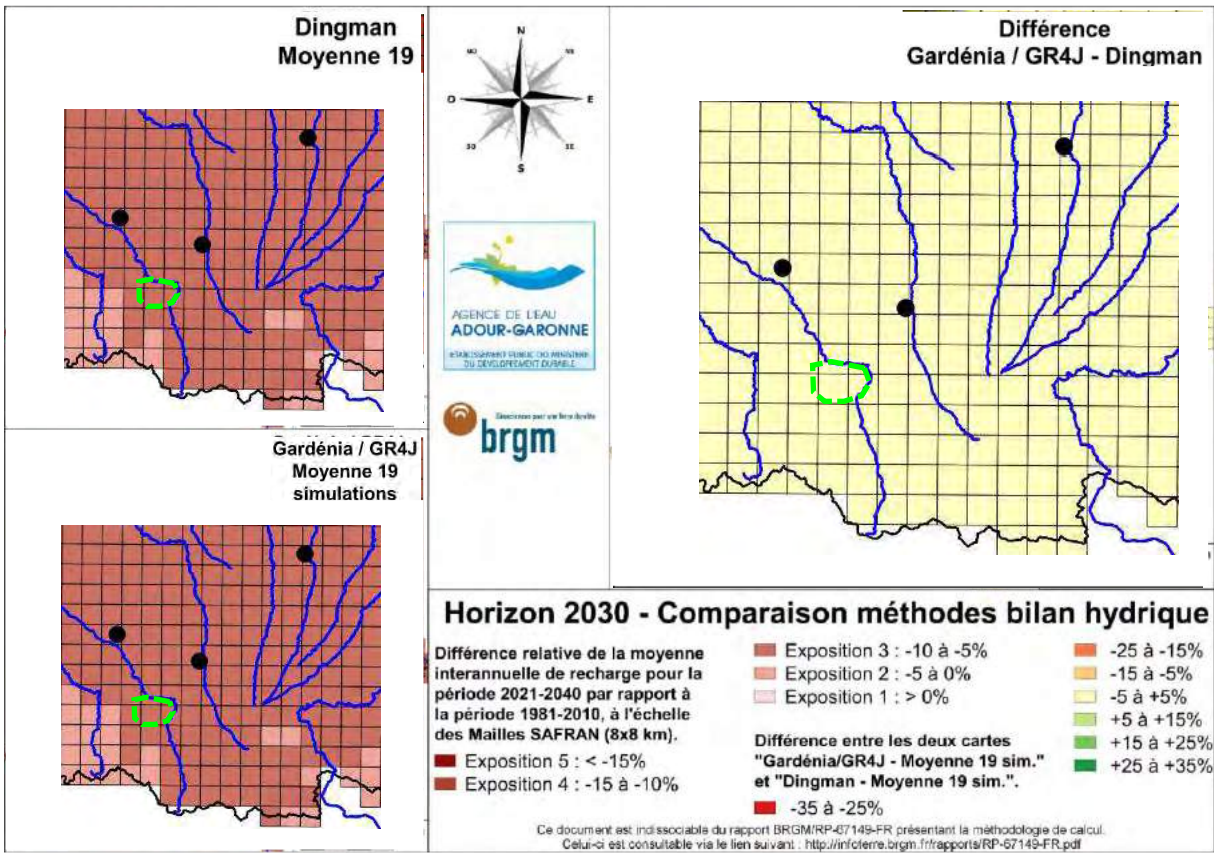


Figure 93 - Variabilité des valeurs moyennées en fonction des méthodes de bilan hydrologique pour l'horizon 2030

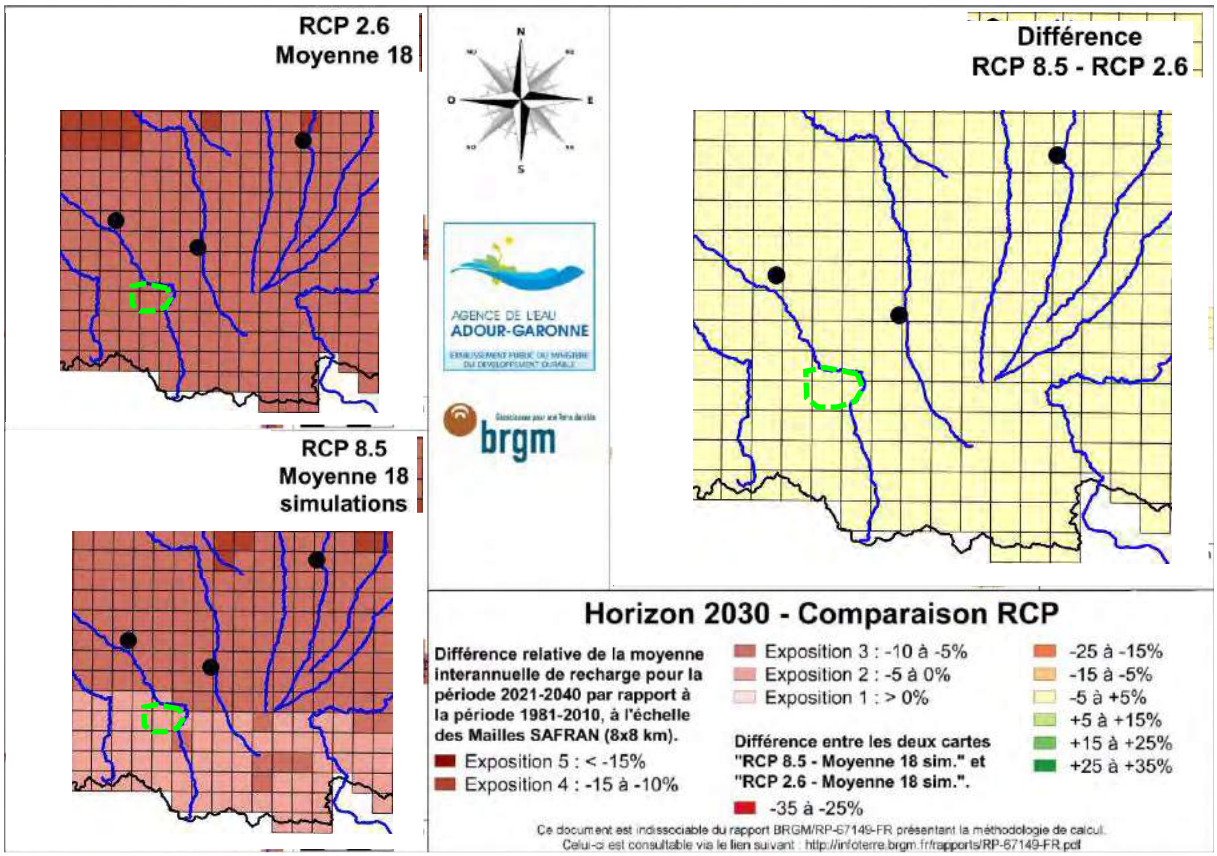


Figure 94 - Variabilité des valeurs moyennées en fonction des scénarios d'émissions pour l'horizon 2030

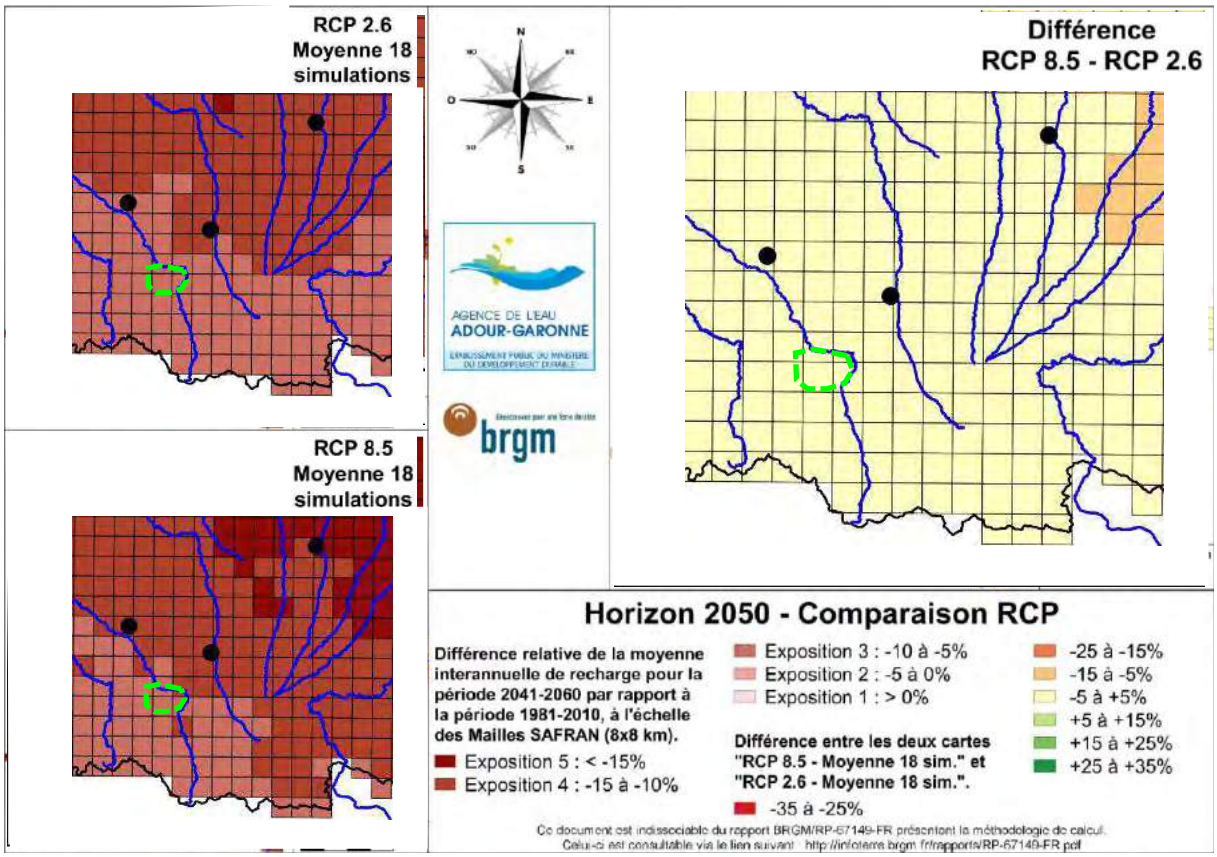


Figure 95 - Variabilité des valeurs moyennées en fonction des scénarios d'émissions pour l'horizon 2050

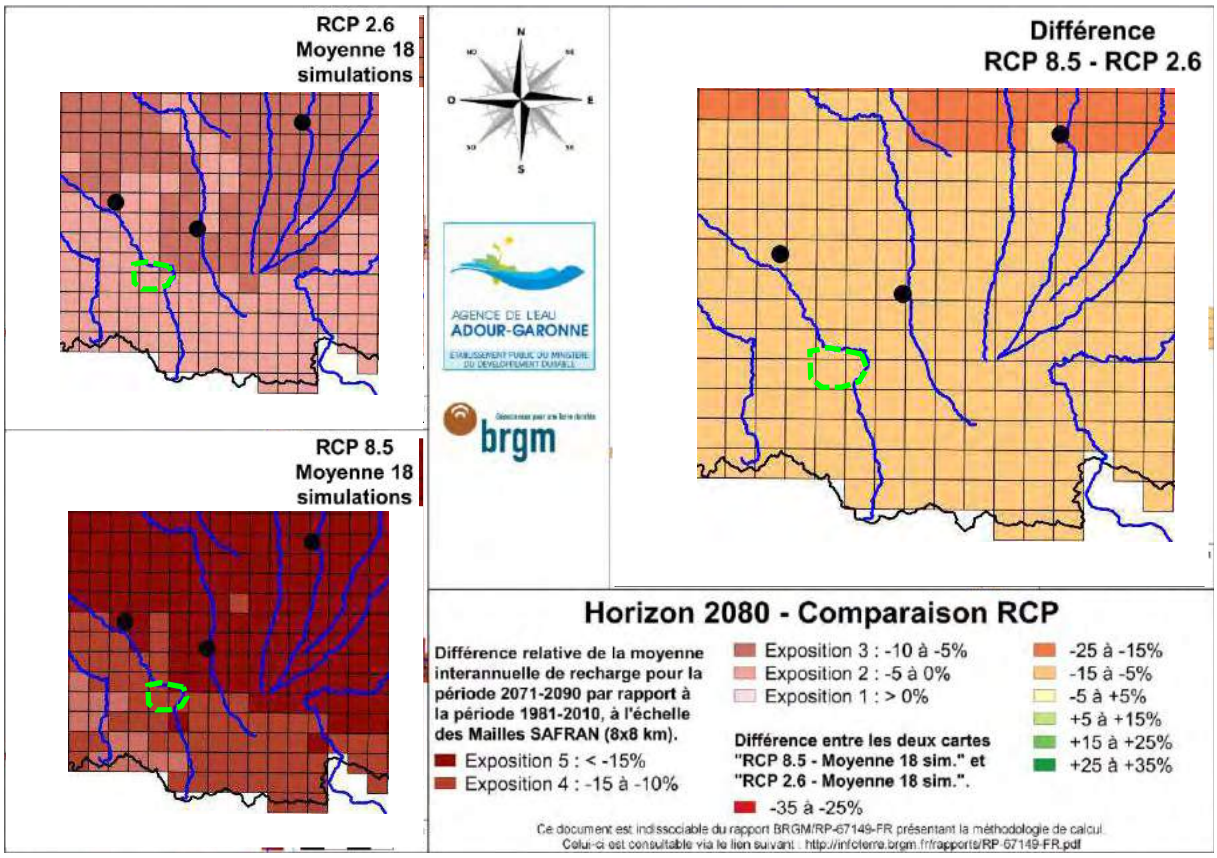


Figure 96 - Variabilité des valeurs moyennées en fonction des scénarios d'émissions pour l'horizon 2080

A l'échelle de chaque masse d'eau souterraine présente sur l'emprise de la zone d'étude, la différence relative de moyenne annuelle de recharge pour les trois horizons retenus est :

Nom Masse d'Eau SOuterraine (MESO)	Code MESO	% surface MESO dans zone d'étude	Horizon 2030	Horizon 2050	Horizon 2080
Alluvions du Gave de Pau	FRFG030	5,8 %			
Terrains plissés du BV des gaves secteurs hydro q4, q5, q6, q7	FRFG051	3,5 %			

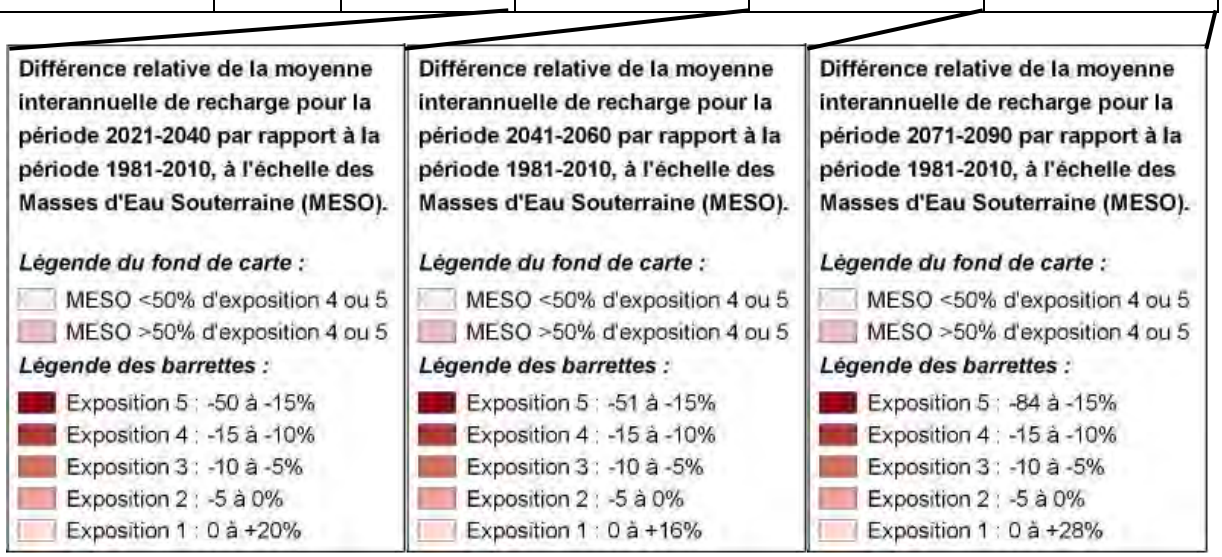


Figure 97 - Résultats des simulations pour les masses d'eau présentes sur la zone d'étude pour les 3 horizons.

Il est précisé dans ce rapport que "*les cartes présentées correspondent à une moyenne interannuelle de la recharge des nappes libres par les précipitations atmosphériques au cours de la période de référence (1981-2010), qui permet d'appréhender les différences liées à la quantité de précipitations et au contexte géologique, mais ne doit toutefois pas être considérée comme une estimation précise en valeur absolue, en raison des limitations induites par la méthode choisie pour le calcul, notamment dans les secteurs où le ratio d'infiltration est conditionné par le niveau piézométrique (Plio-Quaternaire), ou ceux dans lesquels l'occupation des sols ou l'intensité des précipitations (zones de montagne) peuvent augmenter la part du ruissellement*".

Sur le secteur de la zone d'étude, de nombreux bassins versants de sources se trouvent en zone de montagne, où les pentes sont souvent importantes et où le ruissellement est un paramètre important. De plus l'aspect karstique du secteur ajoute à la complexité.

Nous retiendrons de cette étude importante de 2019, qu'il subsiste une forte incertitude quant aux prévisions de l'évolution de la recharge. Si nous retenons les valeurs moyennées des deux scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5, il en ressort néanmoins une prévision de baisse de la recharge annuelle à l'horizon 2030 comprise entre -5 et -10 %, à l'horizon 2050 comprise entre -5 et -15 % et à l'horizon 2080 comprise entre -5 et -15 %.

En ce qui concerne les eaux superficielles, plusieurs travaux ont étudié les tendances d'évolution des débits des cours d'eau à proximité du territoire d'étude. Le projet Adour 2050 indique que "*les étiages (auparavant observés sur les mois de juillet et août) sont plus précoces et plus longs (de juin à octobre), ce phénomène étant en particulier lié à la baisse de contribution du manteau neigeux".* Une simulation de l'évolution des débits est présentée en Figure 98 qui montre les modifications du régime de ce cours d'eau en fonction des saisons.

Les travaux menés par le BRGM sur les gaves de Pau et d'Oloron indiquent que sur les 15 dernières années (2000-2015) on constate plutôt une tendance à la hausse des débits (et des niveaux de nappe) mais qu'une analyse sur une période plus longue indique au contraire une tendance de long terme globalement à la baisse. Sur la période 1967-2011, 9 des 12 stations étudiées montrent une tendance de baisse statistiquement significative des débits d'étiage (QMNA) et 8 sur 12 montrent une tendance significative de baisse des débits moyens annuels.

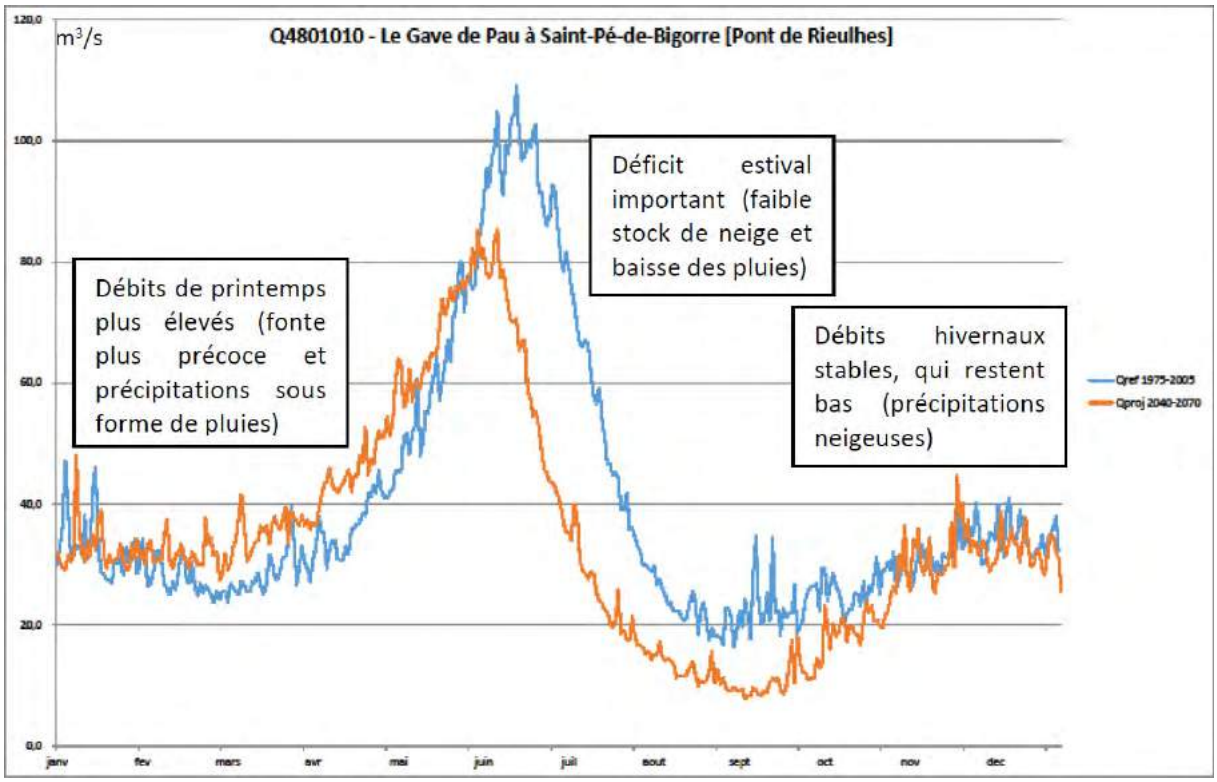


Figure 98 - Evolution des débits sur le Gave de Pau à Saint-Pé à l'horizon 2055 selon le projet Adour 2050.

Ces travaux mettent en évidence une tendance à la baisse des débits des cours d'eau, principalement visible en période estivale.

Toutes ces études montrent la difficulté de prévision des impacts du changement climatique sur la ressource en eau souterraine, en l'absence de chroniques suffisamment longues de débits et surtout de leur quantification.

Nous retiendrons dans le cadre de cette étude les principaux **effets potentiels** liés au changement climatique sur la ressource en eau souterraine :

- **Baisse de la recharge** : essentiellement liée à l'augmentation de l'évapotranspiration et potentiellement aux changements d'intensité des précipitations et à la baisse des stocks de neige, elle aura pour effet une **baisse des débits** des sources et pas seulement sur les débits d'étiages ;
- **Augmentation de la durée des périodes sans pluie** : les périodes d'étiage seront plus longues et les **débits d'étiage** probablement **plus faibles** ;

- **Augmentation des périodes de précipitation à fort cumul** : les effets porteront sur les aspects qualitatifs essentiellement mais également sur les aspects quantitatifs, avec :
    - une augmentation de la fréquence des épisodes de **turbidité** sur certaines sources sensibles à ce paramètre (ceci est déjà observé sur les sources des Aygues, mais le manque de données ne permet pas d'affirmer qu'il s'agisse d'un changement sur le long terme) ;
    - une augmentation des **teneurs en pesticides et en nitrates** ainsi qu'en **matière organique dissoute**, liée à un lessivage plus important des sols ;
    - une **augmentation du ruissellement** qui peut dans certains contextes pédo-géologiques et géomorphologiques **réduire la recharge** de l'aquifère.

9 PROPOSITIONS D'ACTIONS A MENER

Afin de mieux comprendre le fonctionnement hydrogéologique de la zone d'étude, nous proposons quelques actions à mener. Nous orientons ces actions vers un suivi quantitatif et qualitatif de la ressource en eau :

Action 1 : Pluviométrie

C'est la donnée de base, la donnée d'entrée de la ressource en eau superficielle et souterraine. Dans un contexte de changement climatique, il est important de pouvoir suivre cette donnée qui est fortement influencée par la topographie à hauteur de la zone d'étude (influence orogénique). Des pluviomètres sont déjà présents dans l'emprise ou le pourtour de la zone d'étude, citons par exemple : celui de la tourbière du col d'Ech (Université de Toulouse ?), celui du Golf du lac de Lourdes (PLVG), celui de Calibet (SMNEP) et depuis peu celui du lac vert à Agos-Vidalos (PLVG). Deux ou trois autres pluviomètres pourraient être implantés à l'intérieur de la zone d'étude : à minima 1 dans le secteur des Génies, et 1 ou deux sur le secteur entre le Soum de Granquet et le Pène de Souquet.

Il s'agit d'acquérir en continu les données de pluviométrie sur de longues périodes, afin de voir l'évolution possible des précipitations, pas tellement en termes de quantités d'eau annuelles précipitées mais plus sur la fréquence et l'intensité des évènements à forts cumuls pluviométrique et les périodes d'étiages (durée sans pluie). Cette acquisition permettra de mettre en place des outils de prédiction qui pourront permettre d'anticiper des périodes critiques. Pour cela, de nombreuses années d'acquisition seront nécessaires.

Le coût de mise en place d'un pluviomètre avec report des données en continu sur un serveur est de l'ordre de 3000 euros et le report des données de 300 à 500 euros par an.

Action 2 : Suivi des débits sur des sources

Sur des sources à fort intérêt pour le SIVU (par exemple les sources du Pladi), des équipements de suivi des débits en continu peuvent être mis en œuvre : il s'agit de corréler les débits de la source avec la pluviométrie locale. Pour cela des aménagements doivent être réalisés avec mise en place d'ouvrage hydraulique de type seuil déversoir, installation de sonde de suivi en continu du niveau, de la température et de la conductivité. Ces paramètres permettront de mieux

connaitre les relations entre les eaux de la source, et les conditions hydrologiques et météorologiques.

Il s'agit d'observer les éventuels impacts du changement climatique sur le débit de la source et sa qualité.

L'aménagement hydraulique pour une source est de l'ordre de 2000 à 4000 euros suivant la complexité de mise en œuvre du déversoir, le coût de la sonde multiparamètres avec renvoi des données est de 3500 euros et le report des données est de 300 à 500 euros par an.

Action 3 : Suivi des débits sur les Génies

Les Génies sont probablement l'exutoire de nombreuses sources sur leurs bassins versants. Pouvoir quantifier les écoulements avant leur confluence permettrait d'avoir une vision globale des écoulements sur ce secteur.

Préalablement, un parcours d'une partie de leur lit, depuis l'aval, avec mesure de la conductivité et de la température permettra de vérifier d'éventuels apports souterrains ponctuels significatifs.

Ensuite il faudra équiper deux sections (une sur la Génie Braque et l'autre sur la Génie Longue en amont de leur confluence) avec une échelle limnimétrique et/ou une sonde de niveau, température et conductivité avec acquisition en continu et renvoi vers un serveur (abonnement). Des jaugeages seront entrepris sur au moins 6 périodes hydrologiques afin de pouvoir établir une courbe de relation hauteur – débit à hauteur des échelles.

Le coût estimatif est de 1200 euros pour la phase préalable de mesure dans le lit des rivières, 4000 euros pour chaque échelle et sonde et 6000 euros pour les jaugeages.

Action 4 : Effets de l'augmentation du pastoralisme

Le développement du pastoralisme sur la zone d'étude et plus particulièrement dans les emprises de la zone Natura 2000 et de la réserve naturelle aura des effets sur la flore (et la faune) mais également sur la ressource en eau. L'augmentation des animaux va conduire à une consommation d'eau supérieure, ces volumes seront soustraits à l'alimentation des écoulements superficiels et souterrains par ré-infiltration.

Des effets indirects seront l'augmentation des déjections animales et donc potentiellement ne augmentation de la contamination bactériologique des eaux souterraines et une contamination potentielle par des produits phytosanitaires de traitement du bétail.

Nous proposons une étude des zones de développement potentielle du pastoralisme avec recensement des ressources d'eaux souterraines ou superficielles exploitées (à la fois pour l'alimentation du bétail et/ou pour l'alimentation en eau potable), vérifier les volumes disponibles (il faut que les animaux puissent s'abreuver suffisamment), estimer les impacts potentiels de la soustraction des volumes consommés sur le milieu hydrologique (superficiel et souterrain) et vérifier les unités hydrogéologiques impactées et particulièrement les sources captées pour l'AEP. Dans ce cadre, l'action 2 de suivi du débit des sources sera adaptée à cette action 4 afin de cibler les sources à équiper. Cette action sera complétée par des opérations de traçage, qui auront pour objectif de vérifier les points de sorties des eaux infiltrées sur les zones de repos et d'abreuvage des animaux, les temps de transit et les concentrations. Ils permettront d'appréhender les impacts de ces zones sur la ressource en eau potable essentiellement.

Le coût estimatif est de 6000 euros pour la phase préalable d'étude, 6000 euros par opération de traçage (avec le soutien du personnel de la réserve et des spéléologues du CDSC65) et 3000 euros pour l'analyse hydrogéologique.

Action 5 : Analyses qualitatives sur les Génies

La qualité des eaux des Génies peut être appréhendée par la réalisation d'analyses physico-chimiques et bactériologiques des eaux. Il s'agira de vérifier la présence de produits phytosanitaires en au moins deux points sur chaque Génie (avant confluence et à mi- parcours) et la qualité bactériologique. La problématique de ces analyses est que la qualité des eaux est dépendante des conditions hydrologiques et des périodes d'utilisation des produits phytosanitaires et de leur mobilité dans les sols et le sous-sol. Nous proposons pour une première année, la réalisation d'analyses trimestrielles, soit 8 analyses la première année pour un montant estimatif de 800 euros par analyse, prélèvement compris.

Synthèse des coûts estimatifs :

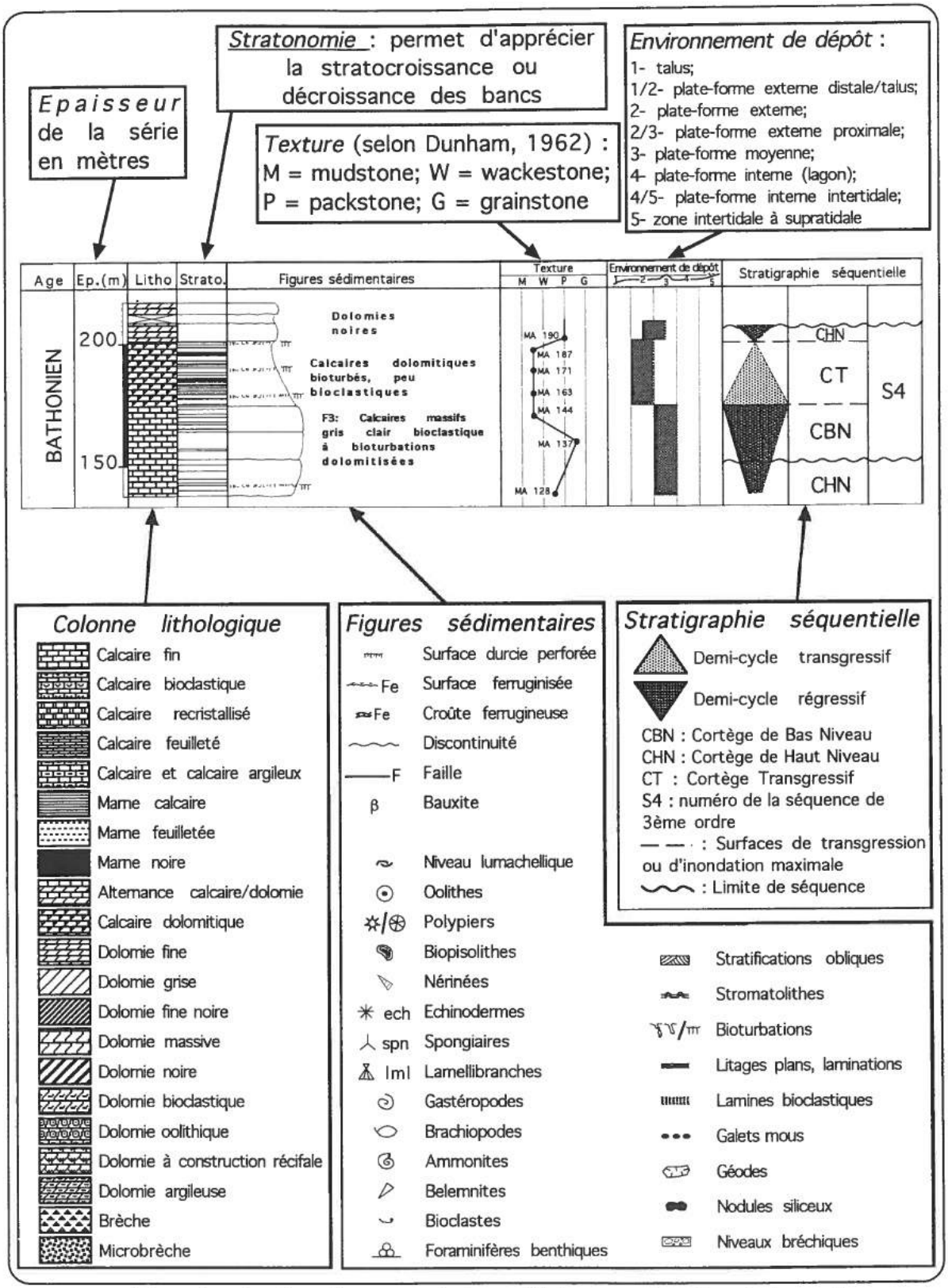
Action	Coût estimatif unitaire	Quantité	Coût estimatif
Action 1 : pluviométrie			
Pluviomètre	3000	3	9 000
Abonnement	500	3	1 500
Action 2 : Suivi des débits sur des sources			
Aménagement	3000	3	9 000
Sonde	3500	3	10 500
Abonnement	500	3	1 500
Action 3 : Suivi des débits sur les Génies			
Mesure C,T	1200	1	1 200
Echelle + sonde	4000	2	8 000
Abonnement	500	2	1 000
Jaugeage	1000	6	6 000
Action 4 : Augmentation du pastoralisme			
Etude préalable	6000	1	6 000
Traçages	6000	3	18 000
Synthèse hydrogéologique	3000	1	3 000
Action 5 : Analyses qualitatives sur les Génies			
Analyses	800	8	6 400
Montant Total H.T.			**81 100**

ANNEXES

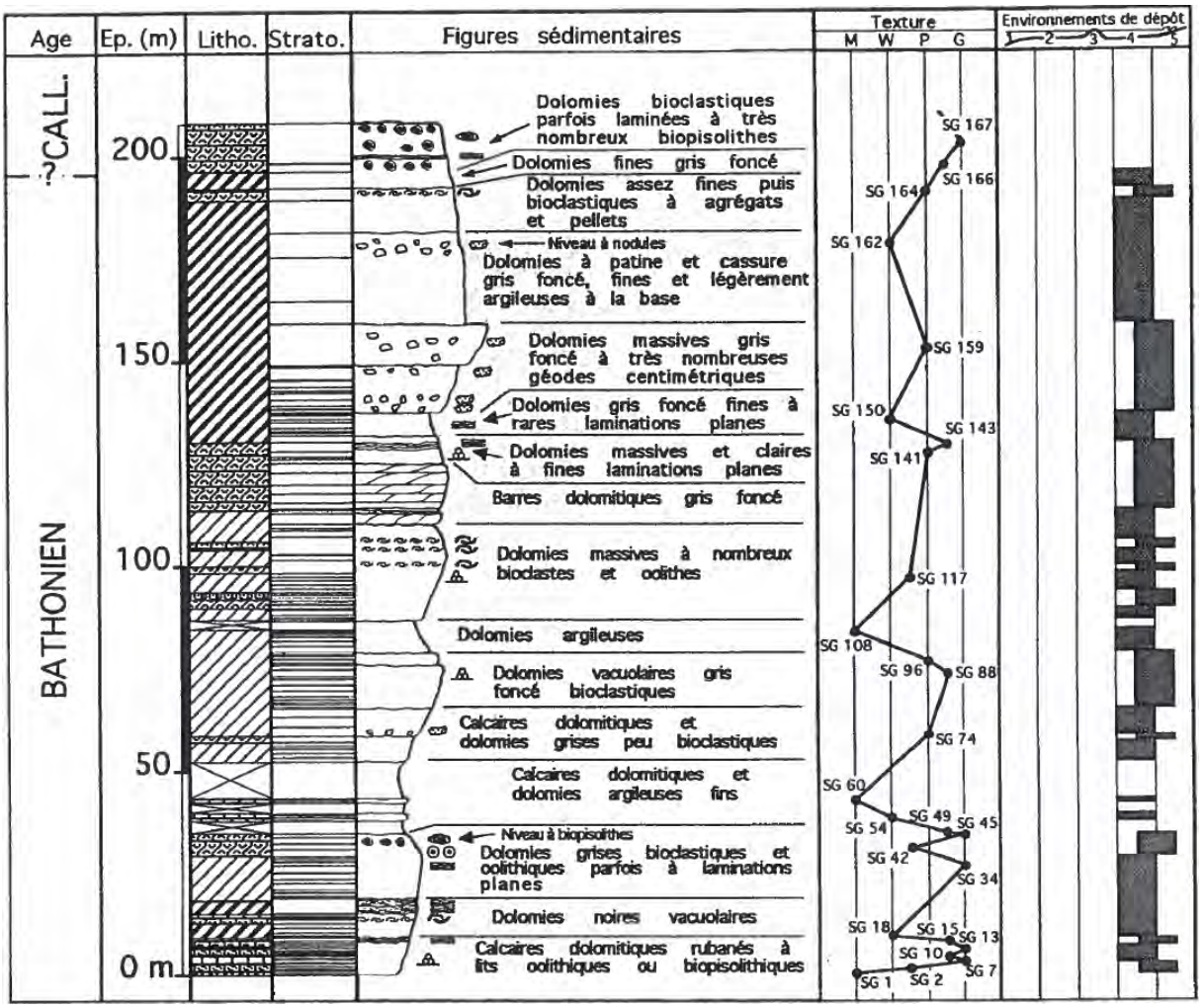
Annexe 1 :

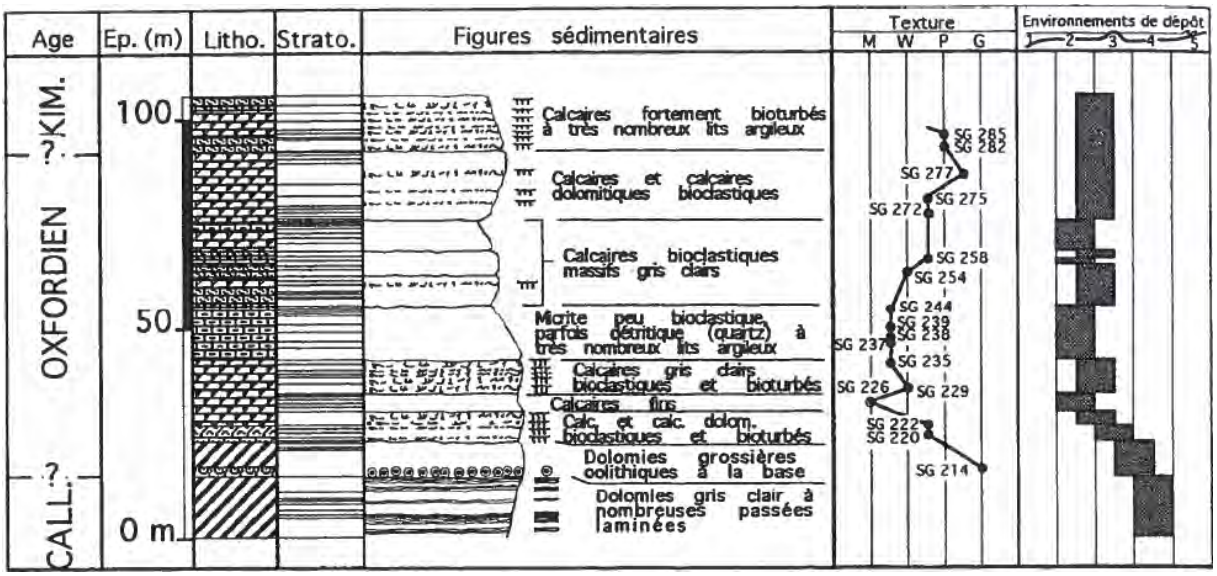
Coupes géologiques et colonnes stratigraphiques

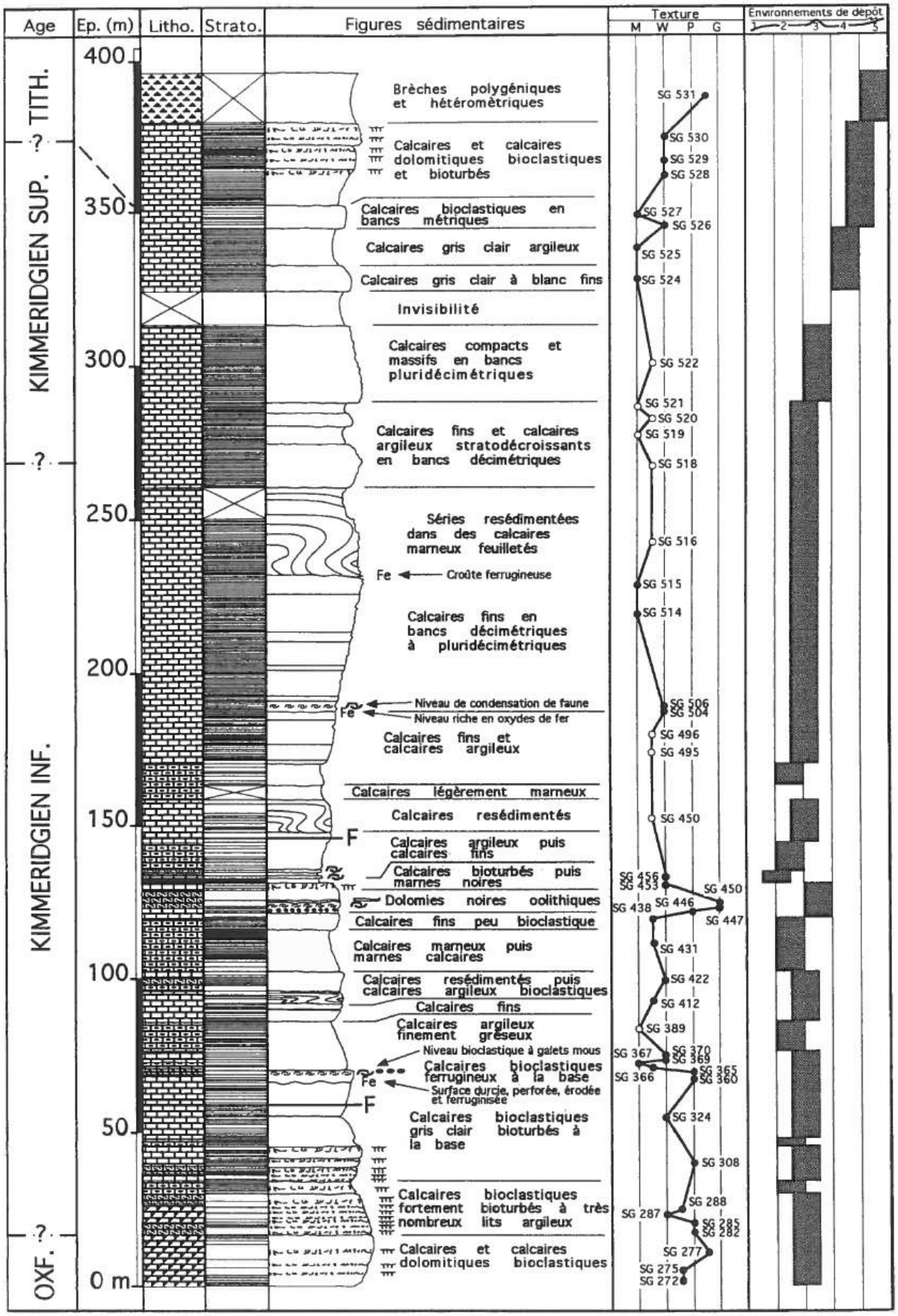
Annexe 1A : Colonnes stratigraphiques de la coupe du Soum de Granquet d'après la thèse de V. James (1998)

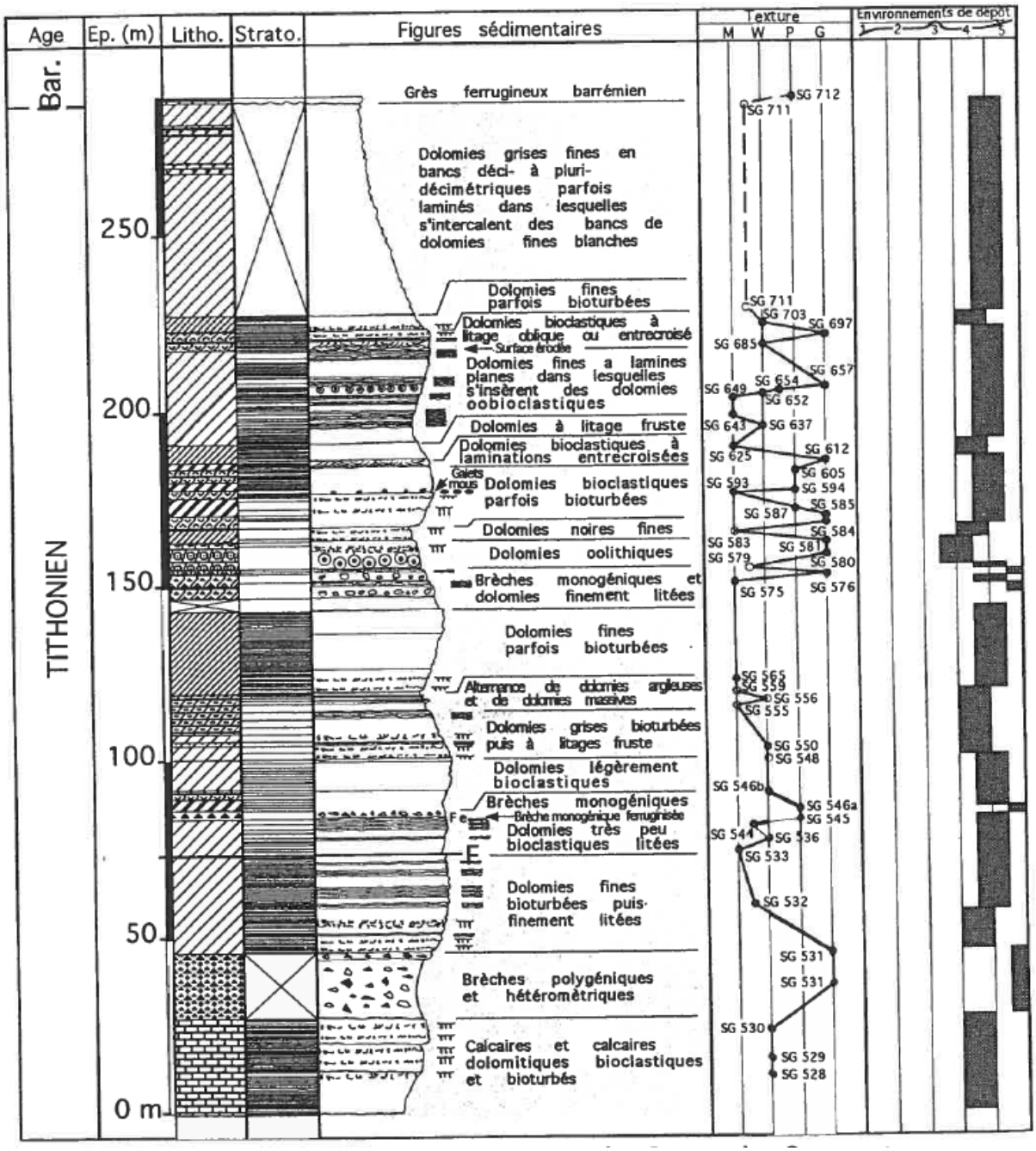


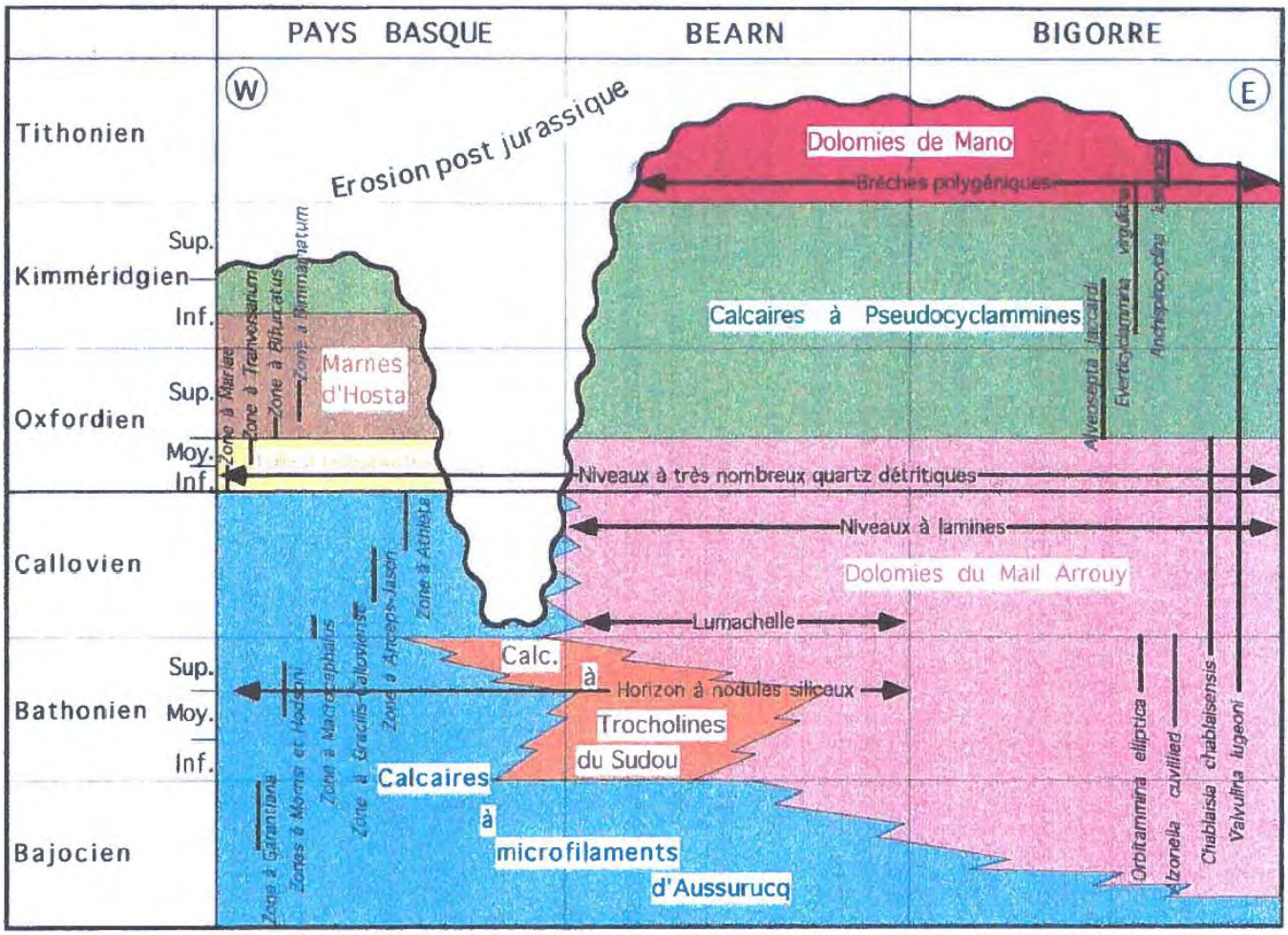
Légende des figurés et symboles utilisés pour les descriptions de coupes


Age
Ep. (m)
Litho.
Strato.
Figures sédimentaires
Texture
M W P G
Environnements de dépôt
1 2 3 4 5
?CALL.
BATHONIEN
200
150
100
50
0 m
Dolomies bioclastiques parfois laminées à très nombreux biopisolithes
Dolomies fines gris foncé
Dolomies assez fines puis bioclastiques à agrégats et pellets
Niveau à nodules
Dolomies à patine et cassure gris foncé, fines et légèrement argileuses à la base
Dolomies massives gris foncé à très nombreuses géodes centimétriques
Dolomies gris foncé fines à rares laminations planes
Dolomies massives et claires à fines laminations planes
Barres dolomitiques gris foncé
Dolomies massives à nombreux bioclastes et oolithes
Dolomies argileuses
Dolomies vacuolaires gris foncé bioclastiques
Calcaires dolomitiques et dolomies grises peu bioclastiques
Calcaires dolomitiques et dolomies argileuses fins
Niveau à biopisolithes
Dolomies grises bioclastiques et oolithiques parfois à laminations planes
Dolomies noires vacuolaires
Calcaires dolomitiques rubanés à lits oolithiques ou biopisolithiques
SG 167
SG 166
SG 164
SG 162
SG 159
SG 150
SG 143
SG 141
SG 117
SG 108
SG 96
SG 88
SG 74
SG 60
SG 49
SG 45
SG 54
SG 42
SG 34
SG 18
SG 15
SG 13
SG 10
SG 7
SG 1
SG 2


Age
Ep. (m)
Litho.
Strato.
Figures sédimentaires
Texture
M W P G
Environnements de dépôt
1 2 3 4 5
?KIM.
OXFORDIEN
?
CALL.
100
50
0 m
Calcaires fortement bioturbés à très nombreux lits argileux
Calcaires et calcaires dolomitiques bioclastiques
Calcaires bioclastiques massifs gris clairs
Micrite peu bioclastique parfois détritique (quartz) à très nombreux lits argileux
Calcaires gris clairs bioclastiques et bioturbés
Calcaires fins
Calc. et calc. dolom. bioclastiques et bioturbés
Dolomies grossières oolithiques à la base
Dolomies gris clair à nombreuses passées laminées
SG 285
SG 282
SG 277
SG 275
SG 272
SG 258
SG 254
SG 244
SG 239
SG 238
SG 237
SG 235
SG 226
SG 229
SG 222
SG 220
SG 214

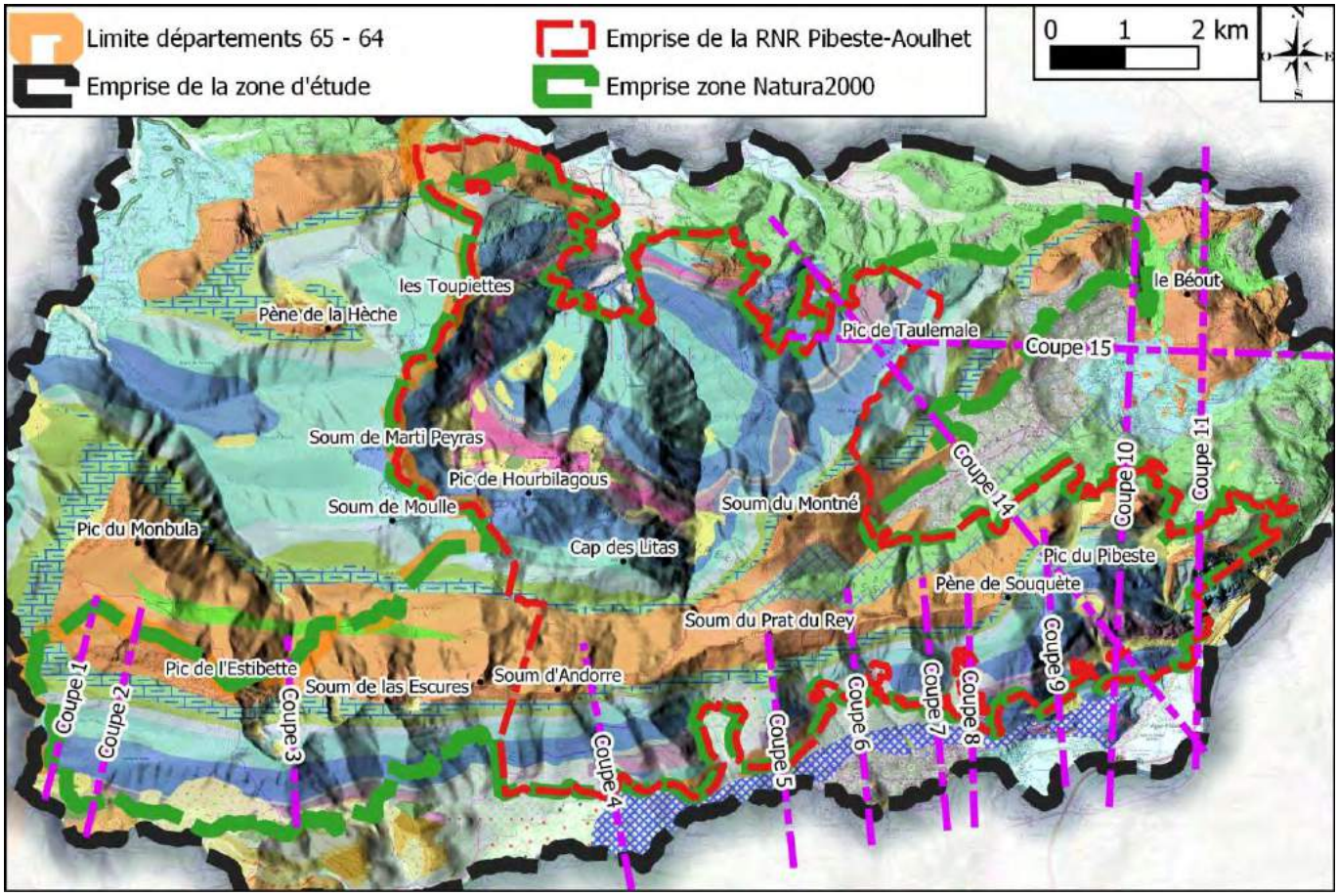

Age
Ep. (m)
Litho.
Strato.
Figures sédimentaires
Texture
M W P G
Environnements de dépôt
1 2 3 4 5
TITH.
KIMMERIDGIEN SUP.
KIMMERIDGIEN INF.
OXF.
400
350
300
250
200
150
100
50
0 m
Brèches polygéniques et hétérométriques
Calcaires et calcaires dolomitiques bioclastiques et bioturbés
Calcaires bioclastiques en bancs métriques
Calcaires gris clair argileux
Calcaires gris clair à blanc fins
Invisibilité
Calcaires compacts et massifs en bancs pluridécimétriques
Calcaires fins et calcaires argileux stratodécroissants en bancs décimétriques
Séries resédimentées dans des calcaires marneux feuilletés
Fe
Croûte ferrugineuse
Calcaires fins en bancs décimétriques à pluridécimétriques
Niveau de condensation de faune
Niveau riche en oxydes de fer
Calcaires fins et calcaires argileux
Calcaires légèrement marneux
Calcaires resédimentés
F
Calcaires argileux puis calcaires fins
Calcaires bioturbés puis marnes noires
Dolomies noires oolithiques
Calcaires fins peu bioclastique
Calcaires marneux puis marnes calcaires
Calcaires resédimentés puis calcaires argileux bioclastiques
Calcaires fins
Calcaires argileux finement gréseux
Niveau bioclastique à galets mous
Calcaires bioclastiques ferrugineux à la base
Surface durcie, perforée, érodée et ferruginisée
Calcaires bioclastiques gris clair bioturbés à la base
Calcaires bioclastiques fortement bioturbés à très nombreux lits argileux
Calcaires et calcaires dolomitiques bioclastiques
SG 531
SG 530
SG 529
SG 528
SG 527
SG 526
SG 525
SG 524
SG 522
SG 521
SG 520
SG 519
SG 518
SG 516
SG 515
SG 514
SG 506
SG 504
SG 496
SG 495
SG 450
SG 456
SG 453
SG 450
SG 438
SG 446
SG 447
SG 431
SG 422
SG 412
SG 389
SG 367
SG 370
SG 369
SG 366
SG 365
SG 360
SG 324
SG 308
SG 288
SG 287
SG 285
SG 282
SG 277
SG 275
SG 272

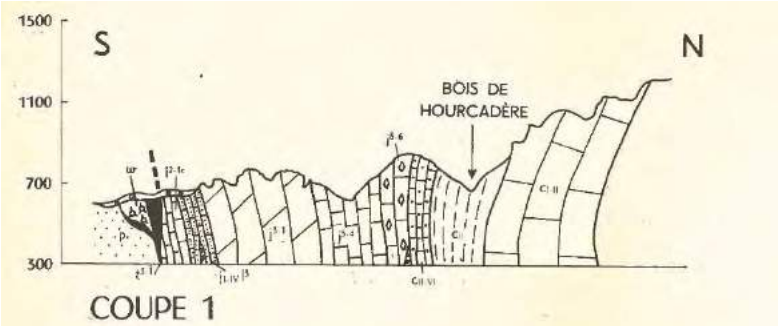

Age
Ep. (m)
Litho.
Strato.
Figures sédimentaires
Texture
M W P G
Environnements de dépôt
1 2 3 4 5
Bar.
TITHONIEN
250
200
150
100
50
0 m
Grès ferrugineux barrémien
Dolomies grises fines en bancs déci- à pluri-décimétriques parfois laminés dans lesquelles s'intercalent des bancs de dolomies fines blanches
Dolomies fines parfois bioturbées
Dolomies bioclastiques à litage oblique ou entrecroisé
Surface érodée
Dolomies fines a lamines planes dans lesquelles s'insèrent des dolomies oobioclastiques
Dolomies à litage fruste
Dolomies bioclastiques à laminations entrecroisées
Galets mous
Dolomies bioclastiques parfois bioturbées
Dolomies noires fines
Dolomies oolithiques
Brèches monogéniques et dolomies finement litées
Dolomies fines parfois bioturbées
Alternance de dolomies argileuses et de dolomies massives
Dolomies grises bioturbées puis à litages fruste
Dolomies légèrement bioclastiques
Brèches monogéniques
Brèche monogénique ferruginisée
Dolomies très peu bioclastiques litées
Dolomies fines bioturbées puis finement litées
Brèches polygéniques et hétérométriques
Calcaires et calcaires dolomitiques bioclastiques et bioturbés
SG 712
SG 711
SG 711
SG 703
SG 697
SG 685
SG 657
SG 654
SG 649
SG 652
SG 643
SG 637
SG 625
SG 612
SG 605
SG 593
SG 594
SG 585
SG 587
SG 584
SG 583
SG 581
SG 579
SG 580
SG 575
SG 576
SG 565
SG 559
SG 556
SG 555
SG 550
SG 548
SG 546b
SG 546a
SG 545
SG 544
SG 536
SG 533
SG 532
SG 531
SG 531
SG 530
SG 529
SG 528



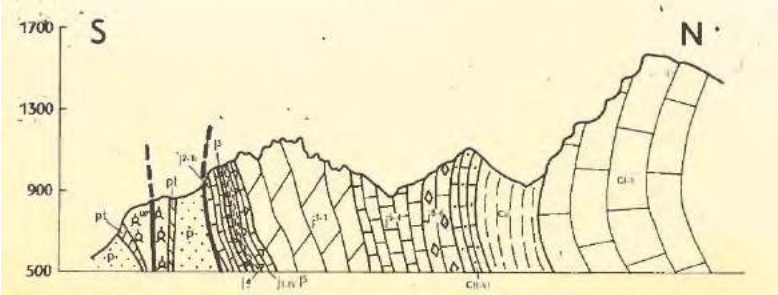
: Tableau de synthèse des corrélations est-ouest englobant les principaux repères biostratigraphiques et sédimentologiques utilisés.

Annexe 1B : Coupes 1 à 15 tirées de la thèse de M. Villanova de 1962

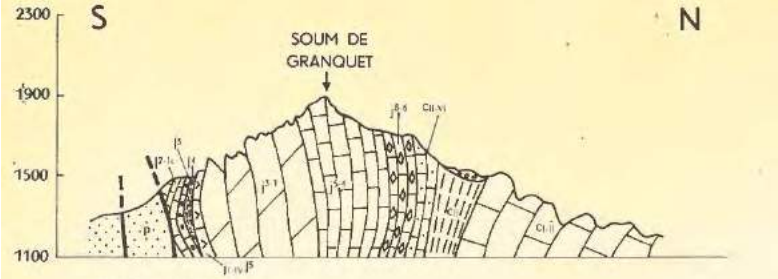




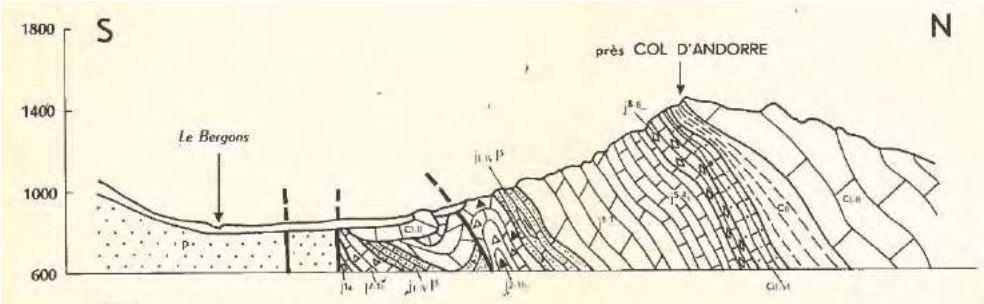
COUPE 1



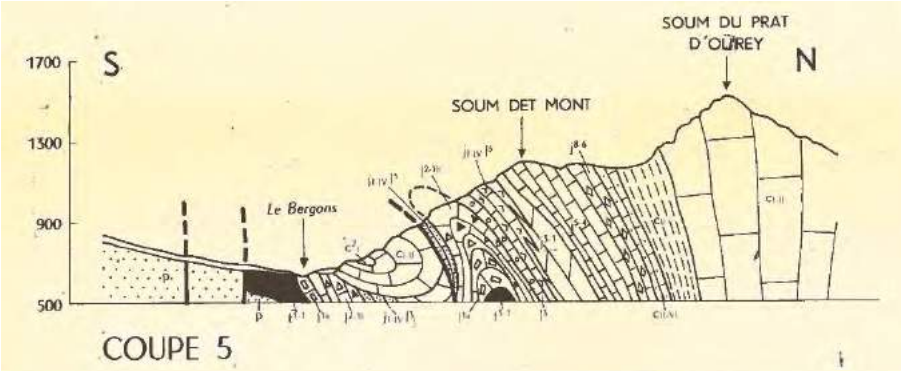
COUPE 2



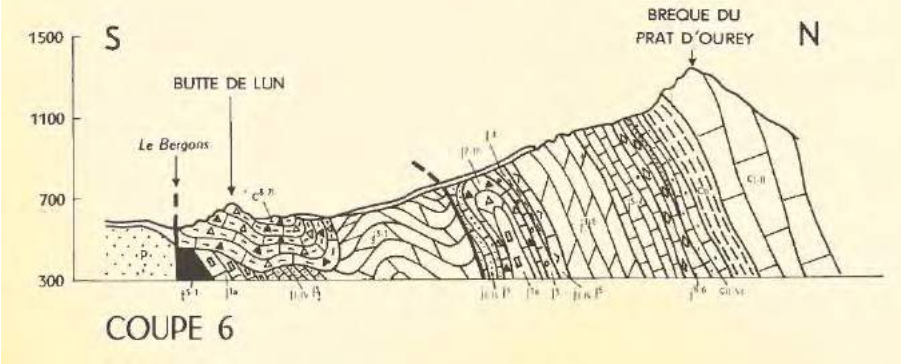
COUPE 3



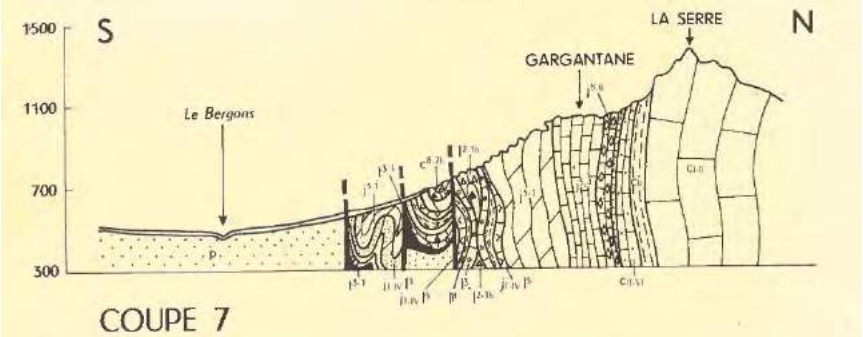
COUPE 4



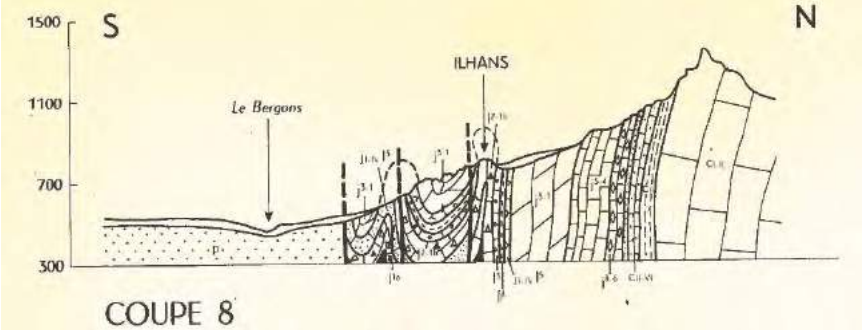
COUPE 5



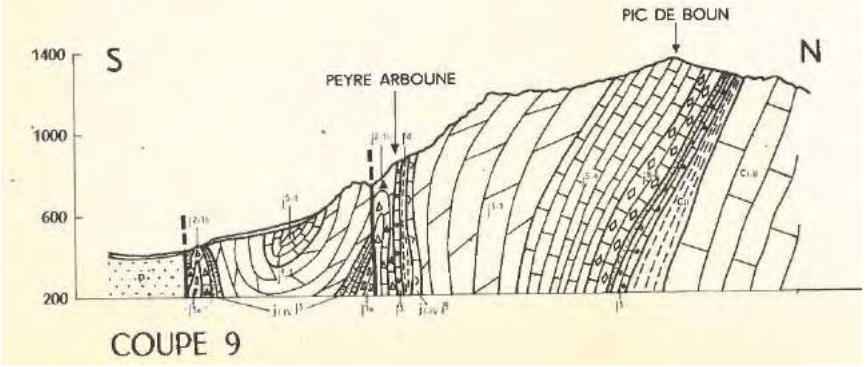
COUPE 6



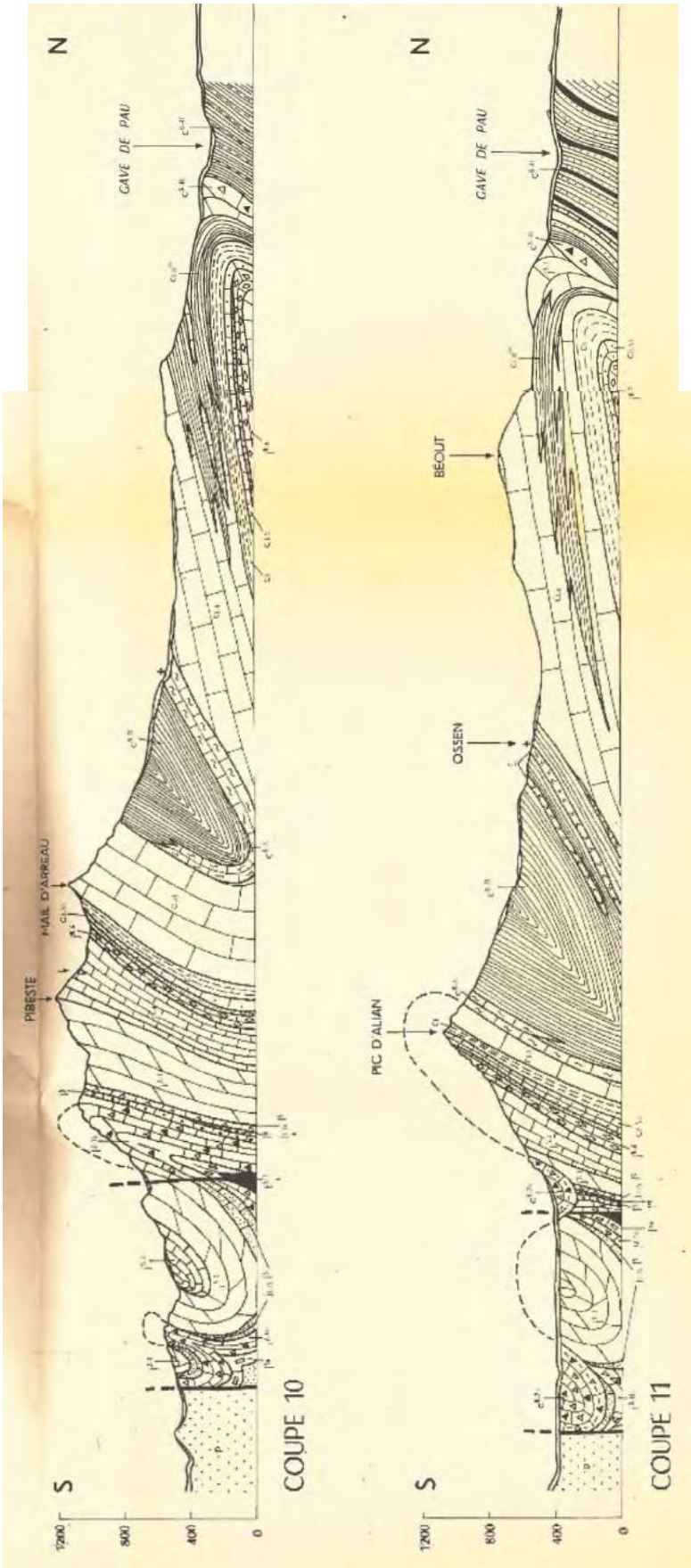
COUPE 7

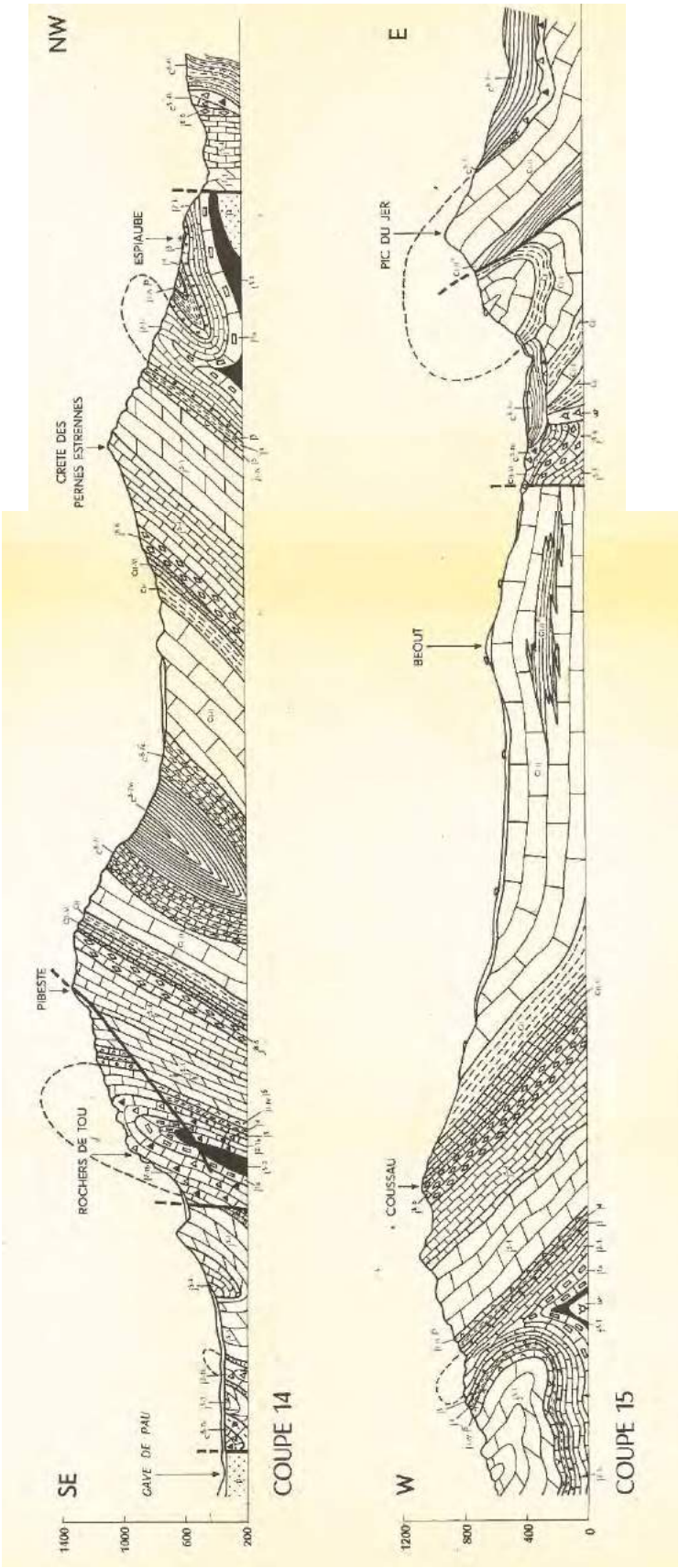


COUPE 8

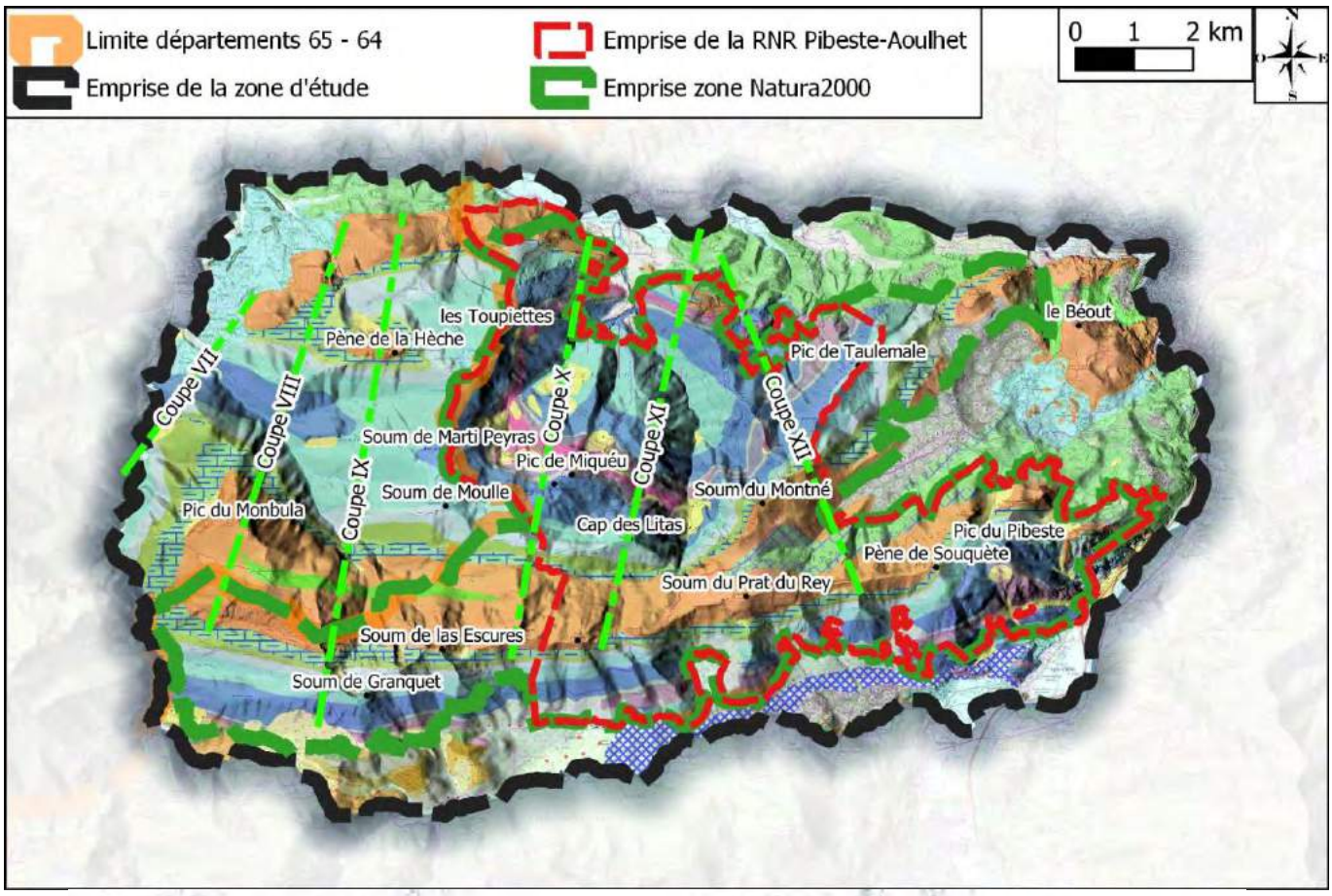


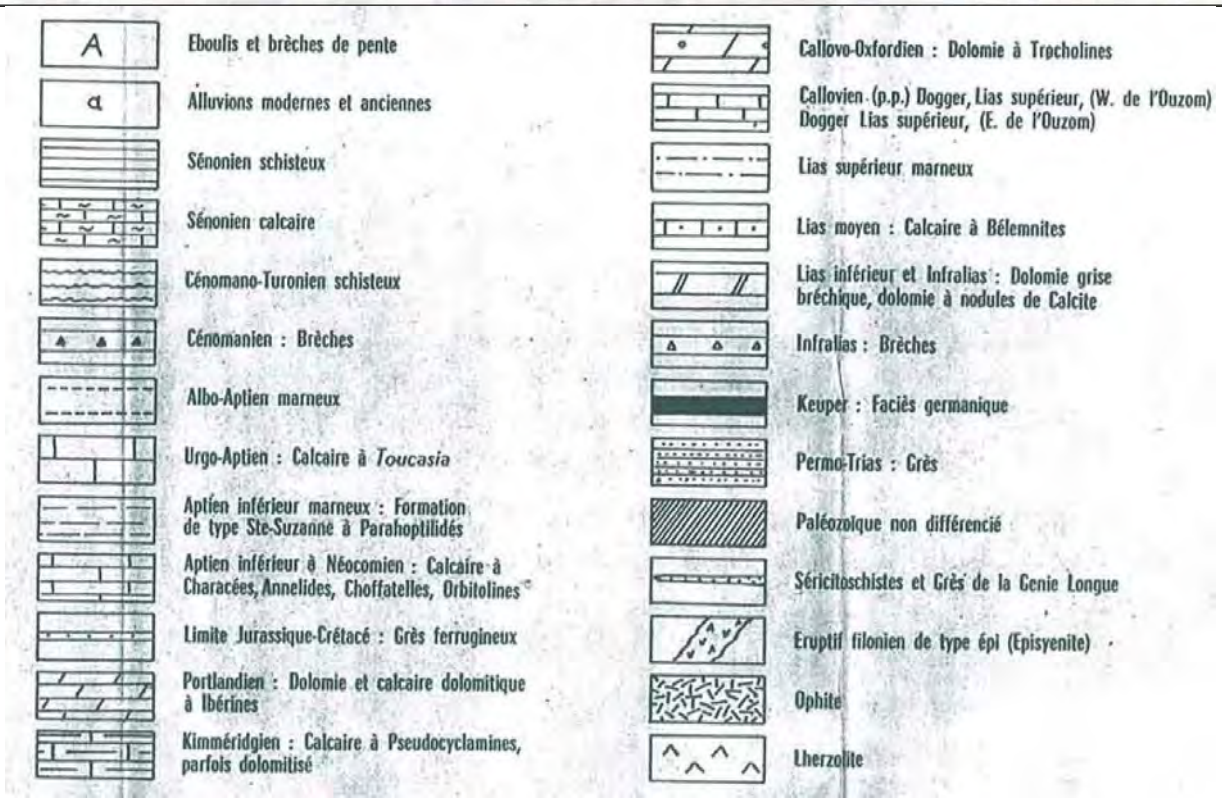
COUPE 9

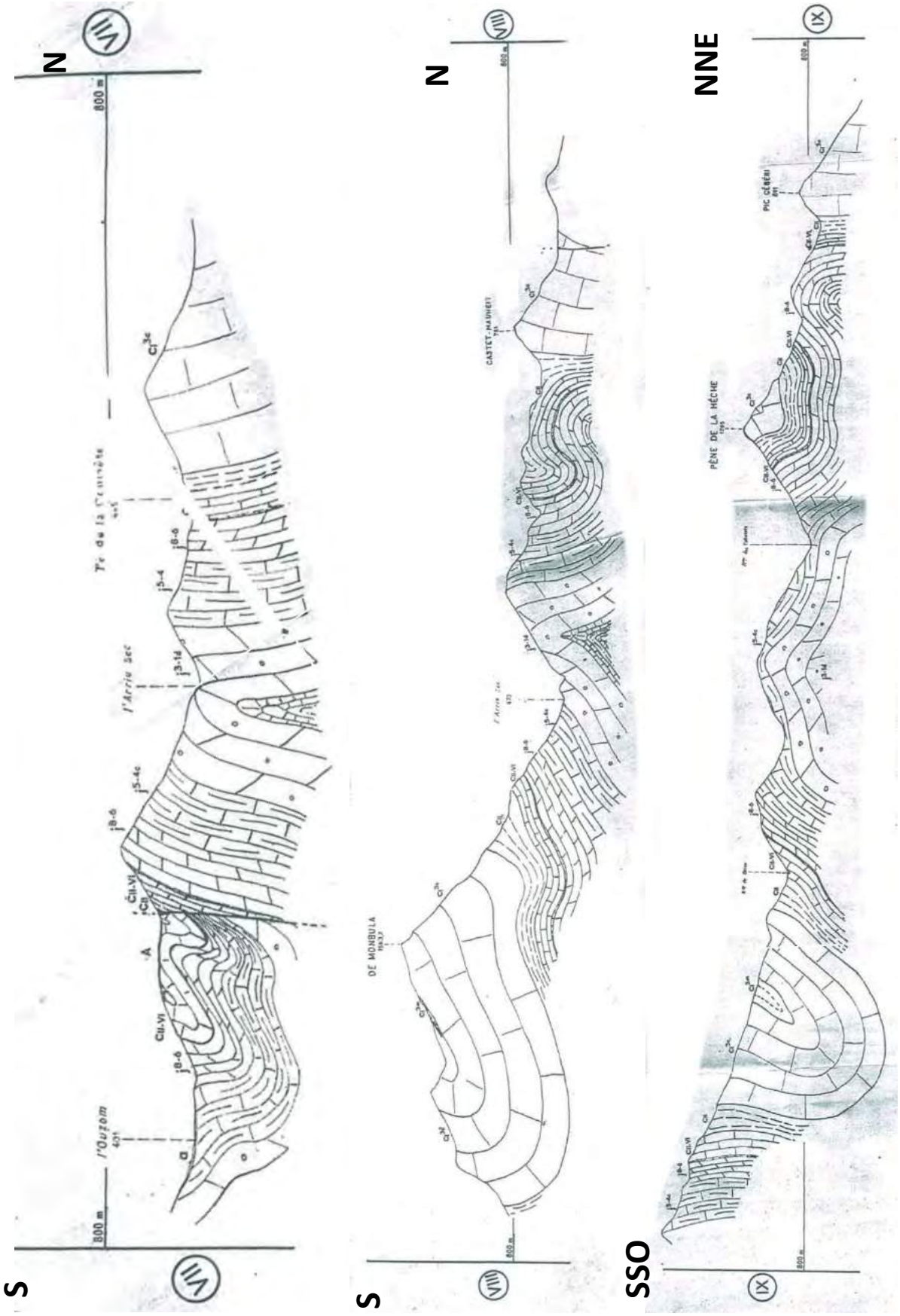

S
N
PIBESTE
HAIL D'ARREAU
CAVE DE PAU
COUPE 10
S
N
PIC D'ALIAN
OSSEN
BÉOUT
CAVE DE PAU
COUPE 11
1200
800
400
0

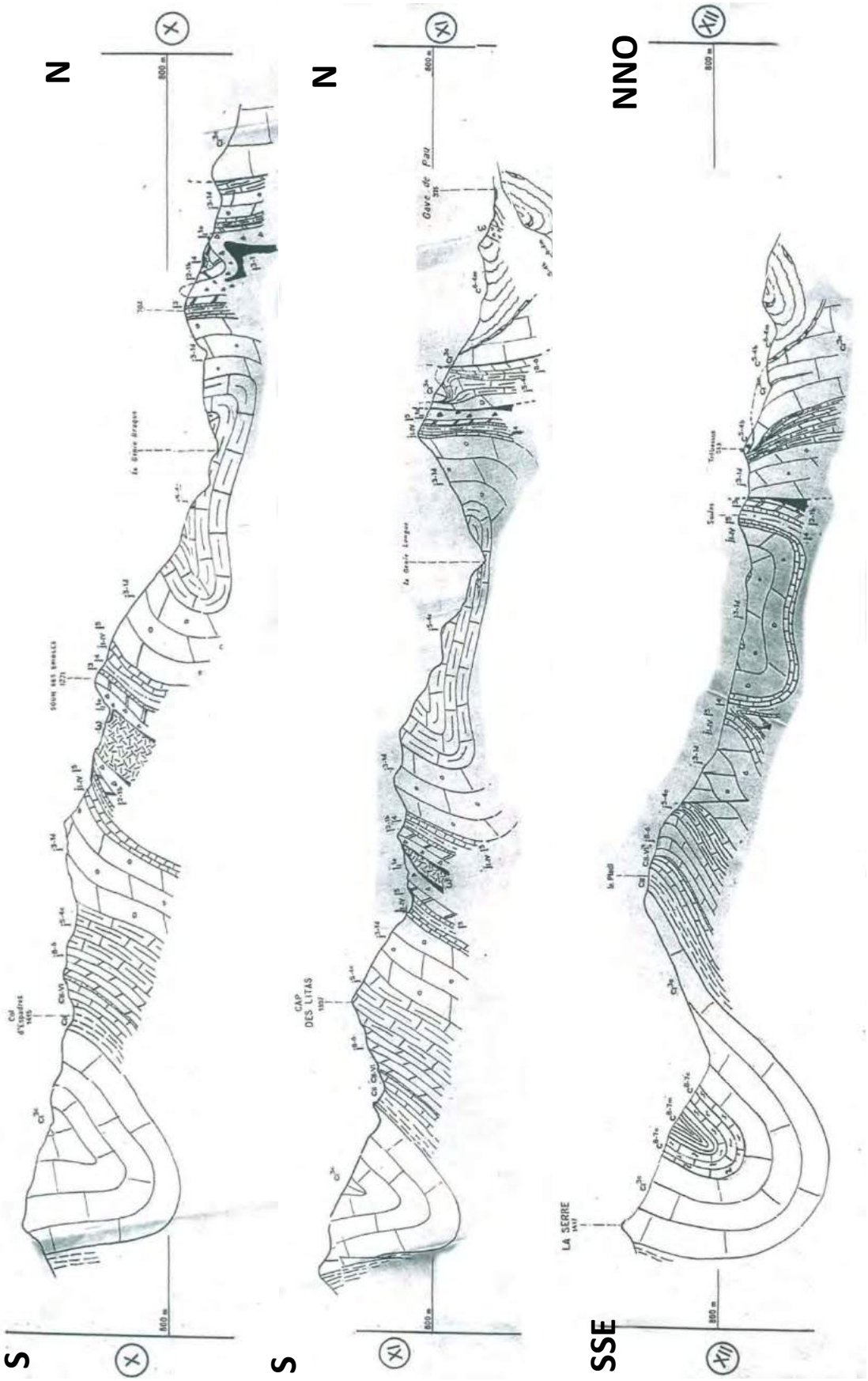

SE
NW
CAVE DE PAU
ROCHERS DE TOU
PIBESTE
CRETE DES PERNES ESTRENNES
ESPIAUBE
1100
1000
600
200
COUPE 14
W
E
COUSSAU
BEOUT
PIC DU JER
1200
800
400
0
COUPE 15

Annexe 1D : Coupes VII à XII tirées de la thèse de Y. Godechot de 1962

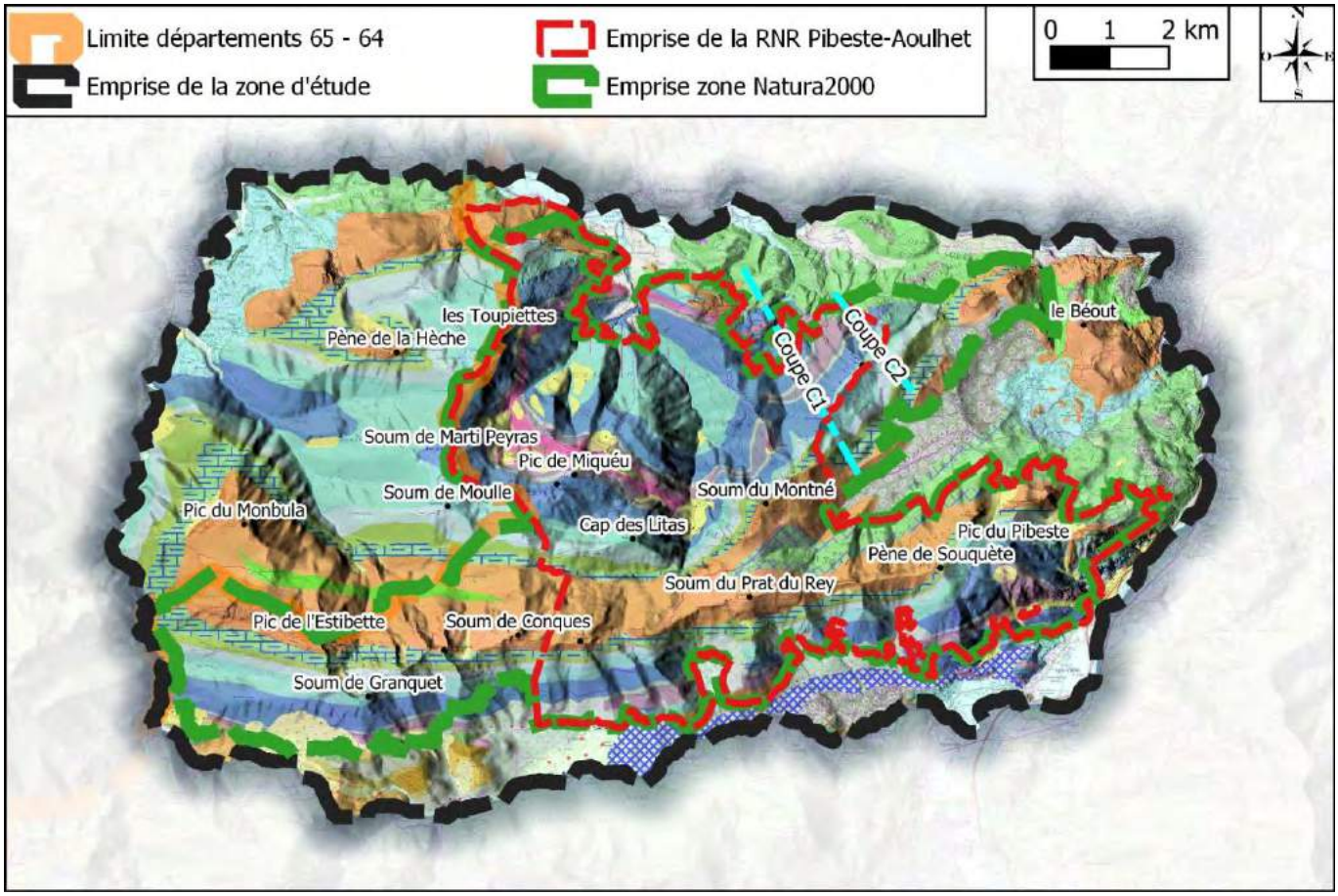





N
S
N
S
NNE
SSO
800 m
l'Arriu sec
l'Ouzom
DE MONBULA
CASTET-MAUHEIT
PÈNE DE LA HÈCHE
PIC GÉBÉRI


S
N
S
N
SSE
NNO
CAP DES LITAS
LA SERRE

Annexe 1E : Coupes 20 et 21 tirées du rapport de M2 de A. Cloix de 2017

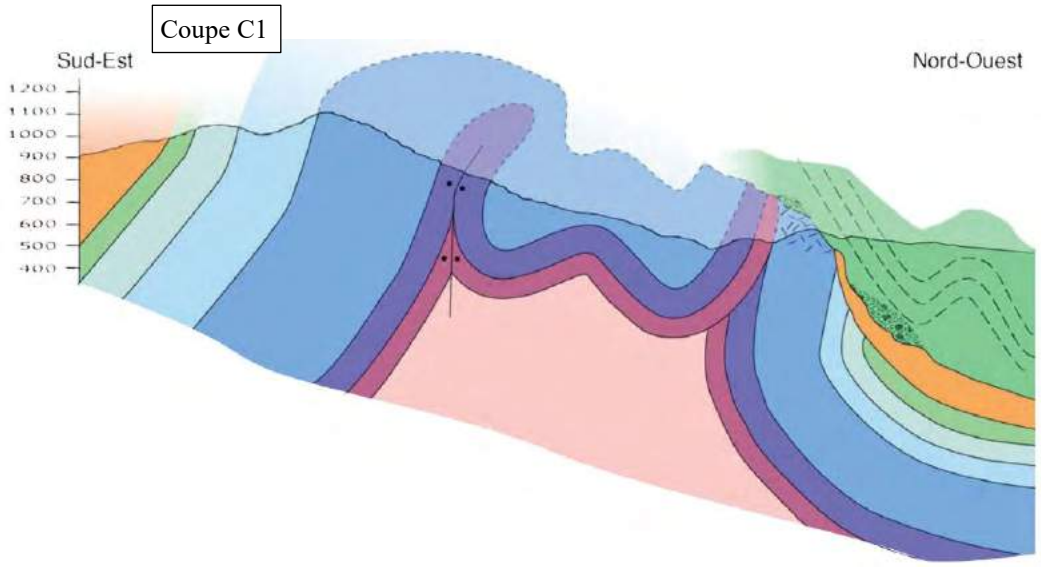


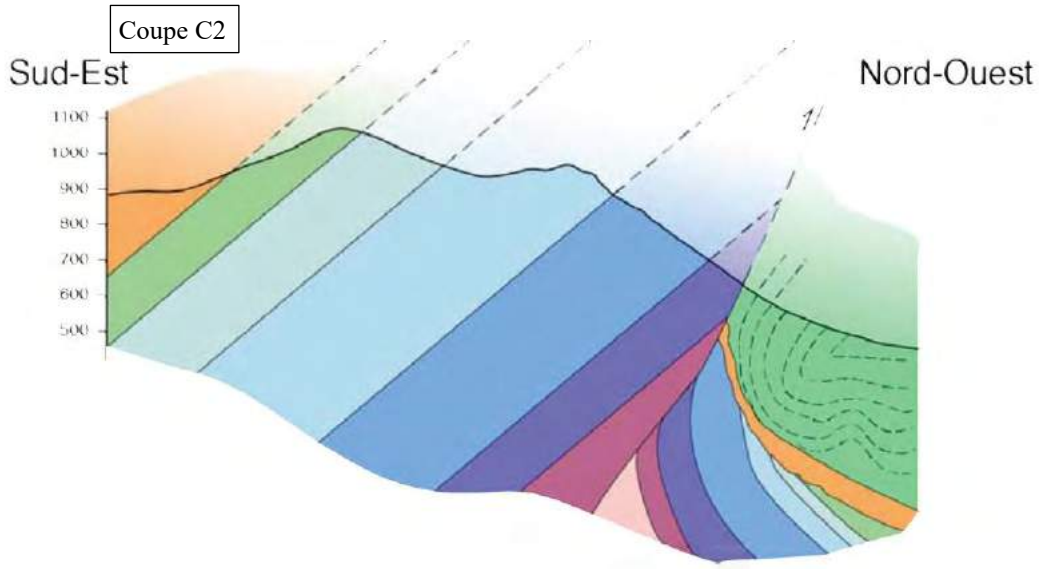
Légende

Unités lithologiques (faciès)

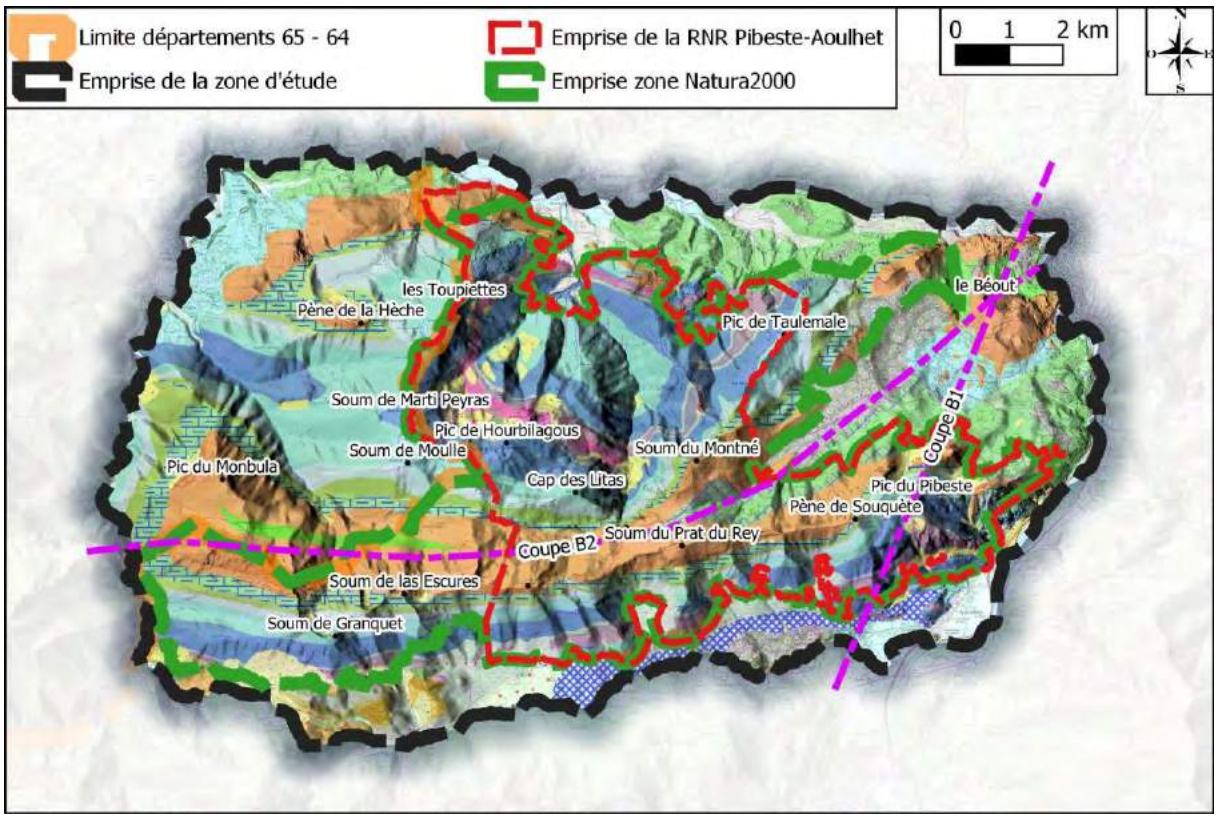
- Conglomérat Apto-Albien
- Zone bréchique
- Albien (flysch)
- Aptien supérieur (calcaire Urgonien)
- Barrémien-Valanginien (calcaire)
- Portlandien (calcaire et dolomie)
- Kimméridgien (calcaire)
- Dogger (dolomie)
- Lias moy et sup (calcaire)
- Hettangien (brèche dolomitique grise)

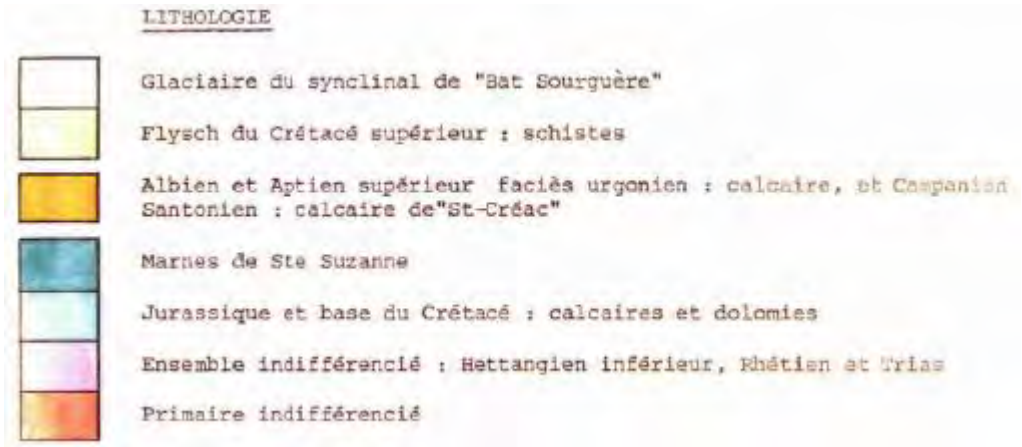
- Trait de coupe
- Faille


Coupe C1
Sud-Est
Nord-Ouest
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400

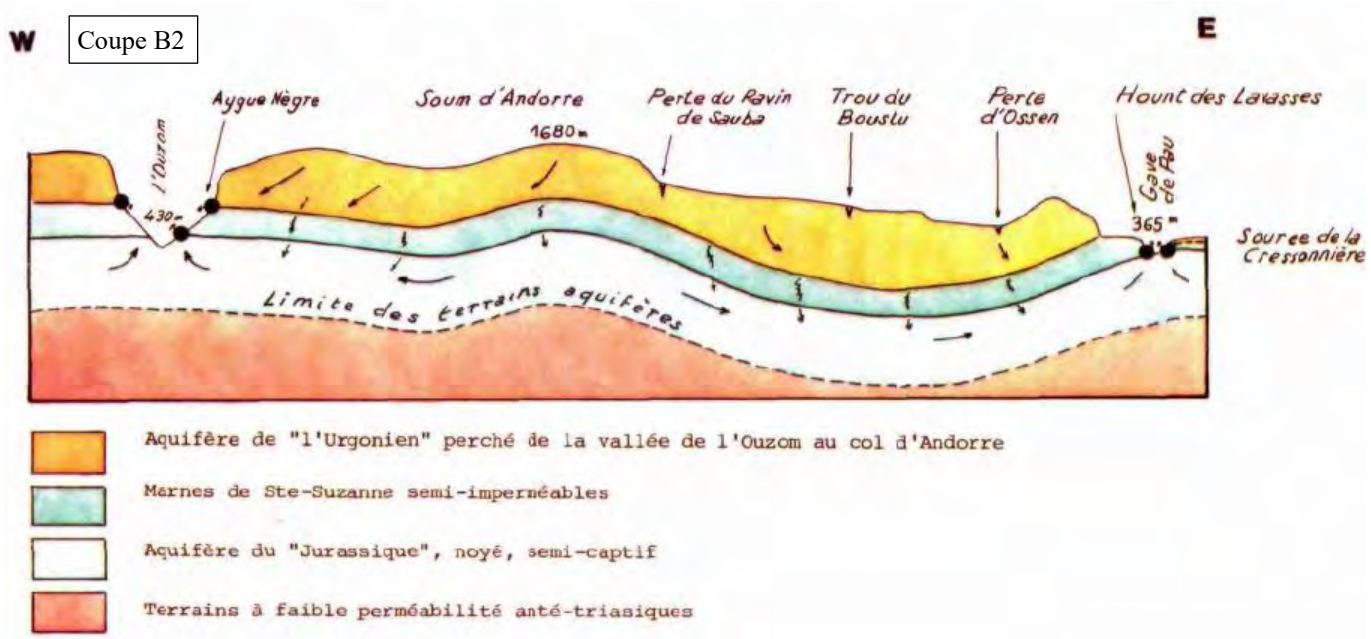

Coupe C2
Sud-Est
Nord-Ouest
1100
1000
900
800
700
600
500

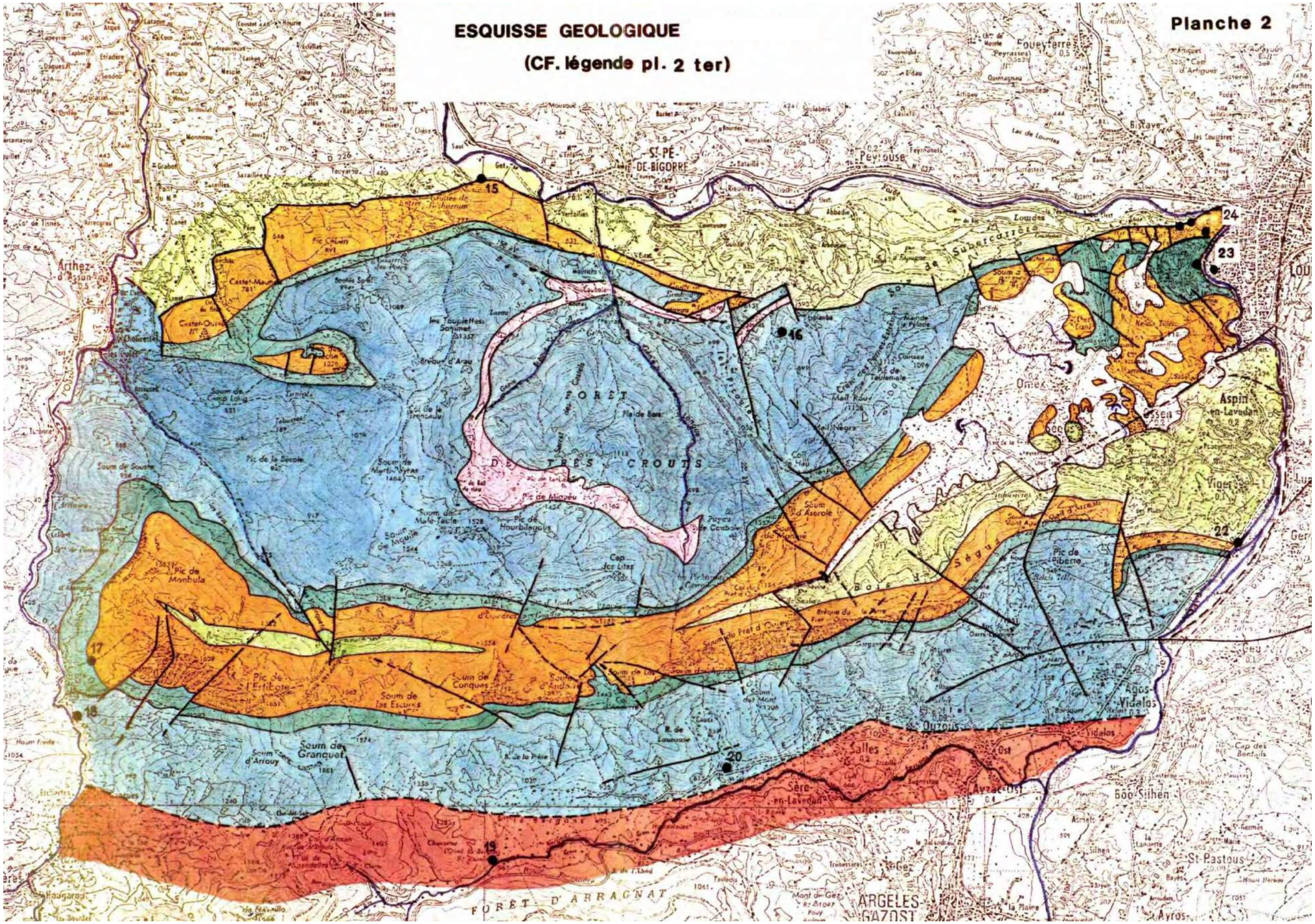
Annexe 1E : Coupes B1 et B2 tirées du rapport du BRGM 86SGN355MPY de 1986





Coupe B1
SSW
NNE
Le Bergons
430 m
Le Pibeste
1345 m
Le Mail d'Arreau
1154 m
Perte d'Ossen
Le Béout
791 m
Gve de Pau
1 Km.


Coupe B2
W
E
Aygue Nègre
Soum d'Andorre
1680 m
Perte du Ravin de Sauba
Trou du Boustu
Perte d'Ossen
Hount des Lavasses
l'Ouzom
430 m
Gave de Pau
365 m
Source de la Cressonnière
Limite des terrains aquifères
Aquifère de "l'Urgonien" perché de la vallée de l'Ouzom au col d'Andorre
Marnes de Ste-Suzanne semi-imperméables
Aquifère du "Jurassique", noyé, semi-captif
Terrains à faible perméabilité anté-triasiques


ESQUISSE GEOLOGIQUE
(CF. légende pl. 2 ter)
Planche 2
15
16
17
18
19
20
22
23
24
FORÊT DE TRÈS CROUTS
FORÊT D'ARRAGNAT
Pic de Monbula
Pic de l'Ertibote
Soum de Granquet
Soum de Conques
Soum de las Escures
Pic de Hourbilagous
Pic de Pibeste
Omex
Aspin-en-Lavedan
Ouzous
Salles
Ayzac-Ost
Agos-Vidalos
Bôo-Silhen
St-Pastous
ARGELES-GAZOST
Peyrouse
Arthez-d'Asson
Bistave
Lourdes

Annexe 2 :

Rapport de l'opération de traçage au gouffre de Pladi