POLYTECH PARIS-UPMC

MÉMOIRE DE STAGE DE FIN D'ÉTUDES

ETUDE SÉDIMENTOLOGIQUE DES MOLASSES DU BASSIN NORD-PYRÉNÉEN : Le Poudingue de Palassou

5^{ème} année des Sciences de la Terre

Année Scolaire 2014-2015

02 Mars - 28 Août 2015





Elève ingénieur : Johan Miguet

Maître de Stage à l'ISTEP : Nicolas Loget

Maître de Stage au BRGM : Éric Lasseur

TUTEUR À POLYTECH PARIS-UPMC: BRIAN MITCHELL

COORDONNÉES DES RESPONSABLES DE STAGE

Maître de Stage à l'ISTeP: Mr Nicolas LOGET, Maître de Conférences – Géologue à l'UPMC

Adresse: Laboratoire ISTeP, UMR7193 UPMC-CNRS

Université Pierre et Marie Curie

4 Place Jussieu

Case 129, T. 46-00, Et. 2 75252 Paris Cedex 05

FRANCE

Téléphone: 01 44 27 38 71

Email: nicolas.loget@upmc.fr

Maître de Stage au BRGM: Mr Éric Lasseur, Chercheur – Géologue au BRGM

Adresse: Unité Géologie des Bassins et des Stockage

Bureau de Recherches Géologiques et Minières

3 Avenue Claude Guillemin

BP 36009

45060 Orléans Cedex 02

FRANCE

Téléphone: 02 38 64 30 83

Email: e.lasseur@brgm.fr

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu mes deux maîtres de stages qui m'ont tant apporté. Ils m'ont permis d'enrichir mes connaissances en géologies, car il s'agit là d'une science aux multiples facettes : géologie structurale, tectonique, géomorphologie, sédimentologie, stratigraphie... Ils m'ont aussi aidé à comprendre et voir les objets géologiques sur le terrain, mais aussi à apprécier les bonnes choses nécessaires au géologue : la bonne nourriture et le bon vin (des Corbières évidemment !). Je les remercie profondément pour la confiance et l'autonomie qu'ils m'ont accordées quand j'étais sur le terrain tout en restant toujours disponibles lorsque j'étais un peu perdu dans mes interprétations. Leur engagement dans la réussite de ceux qu'ils encadrent et leur humilité m'ont impressionné !

Je tiens à remercier mon tuteur à Polytech, Brian Mitchell, pour sa disponibilité, sa flexibilité et son aide pour la construction de ce rapport. Je remercie aussi ma mère pour sa relecture des deux manuscrits et leur correction.

Je souhaite aussi remercier mes collègues de bureau, tous en thèse, avec qui l'aventure Palassou s'est très bien passée! Je remercie Vasilis pour ses cours de Grec, d'Anglais et ma découverte de l'Ouzo, Ramadan pour les parties de fléchettes et les bonnes pâtisseries libanaises, Marine pour ses explications sur le pitch des failles et pour les jolies plantes qui poussent bien (quand on les arrose!) et Maé pour les parties de fléchettes mais aussi pour les gâteaux (même s'ils ne valent pas les brookies!), les moments de détente (chasseur un jour, chasseur toujours)! C'est en partie grâce à eux que ce fut une superbe expérience.

Je remercie aussi Justine, post-doc au BRGM, qui a découvert avec nous le Poudingue de Palassou et qui nous a aidés à bien voir les « planar cross-beds » dans les barres de graviers, mais aussi pour son aide précieuse à la dénomination des affleurements : « Falaise aux Fleurs », « Col de la Machette »... dures sont les journées dans les Corbières !

Je tiens enfin à remercier, avec beaucoup d'autodérision, le chien noir en liberté des Métairies de Saint-Auriol qui a bien failli croquer mes mollets si je n'avais pas couru à perdre haleine, jeté mon carnet de terrain sur sa truffe pour gagner une seconde (au péril de perdre toutes les données acquises pendant 6 jours) et enfin grimpé sur un portail en guise de refuge. Merci aux deux habitants qui l'ont fait reculer! Dans la même catégorie, je remercie la salsepareille, fameuse herbe à schtroumfs aux feuilles esquissant des cœurs, mais aux lianes couvertes d'épines fort peu agréables. Je remercie enfin les sangliers, bien que les ayant entendus tout proches de moi, de ne pas m'avoir rendu visite, dans des endroits où il n'y a pas de sentiers et où le téléphone ne passe pas. Dernier extra: je remercie la météo, qui a été clémente (enfin, étant maintenant habitué à celle de Paris ...).

SOMMAIRE

COORDONNEES DES RESPONSABLES DE STAGE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES & TABLEAUX

ABREVIATIONS

INTRODUCTION				
ı.	PI	RESENTATION DU PROJET		
		LES PARTIES PRENANTES : L'ISTEP ET LE BRGM		
A				
	1.			
	2.	LE PROJET RGF		
В				
	1.			
_	2.	,		
С		Mon projet d'etude		
	1.			
	2.	3 , ,		
	3.	. Contexte géologique		
II.	M	METHODES	15	
Α		METHODOLOGIE GENERALE POUR MONTER UN LOG		
	1.	. Définition		
	2.	. Méthodologie utilisée pour ce projet		
В		CARACTERISATION DES FACIES CONTINENTAUX FLUVIATILES	16	
	1.	. Les Lithofaciès		
	2.	. Les Eléments architecturaux		
	3.	. Les Systèmes fluviatiles		
	4.	. Difficultés & Solutions	21	
С		GRANULOMETRIE	23	
	1.	. Objectifs et procédure	23	
	2.	. Statistiques	24	
	3.	. Programmation		
	4.	. Difficultés & Solutions	26	
III.	RI	ESULTATS	29	
А		RESULTATS DE L'ETUDE	29	
	1.	. Caractérisation des faciès	29	
	2.	•		
В		Interpretations Scientifiques	37	
	1.	. Phases de Progradation à l'échelle du bassin	37	
	2.			
	3.	· ·		
С		APPORTS PEDAGOGIQUES ET METHODOLOGIQUES		
_	1.			
	2.			
	3.	···		
CON	CLI	USION	Δς	
		~ ~ · ~ · · · · · · · · · · · · · · · ·		

BIBLIOGRAPHIE

RESUME

ABSTRACT

LISTE DES FIGURES & TABLEAUX

FIGURES

Figure 1 : Organigramme du pôle scientifique et du sous-pôle Direction des Géo-Ressources du BRGM, modifié d'après le site web	
* Directions et unités hôtes du stage	
Figure 2 : Les métiers du BRGM au 1 ^{er} Janvier 2015, d'après de rapport d'activité 2014 du BRGM	
Figure 3 : Les quatre principales missions du BRGM, modifié d'après le site web du BRGM.	
Figure 4 : Organigramme de l'ISTeP d'après le site internet du laboratoire. * Département hôte du stage	
Figure 5 : Répartition des fonctions et métiers au sein de l'ISTeP au 1 ^{er} Janvier 2015, d'après le site internet de l'ISTeP	
Figure 6 : Partenaires de l'ISTeP : Nationaux (orange), Internationaux (jaune), Industriels (vert) et Locaux (bleu)	
Figure 7 : Le RGF intègre aussi des données hydrogéologiques permettant de mieux modéliser et évaluer les ressources en eau ic	
au Fossé Rhénan, d'après le journal d'information du BRGM n°28	
Figure 8 : Les 4 majeures étapes du programme permettant de traiter les données granulométriques.	
Figure 9 : Organisation des missions de terrain. «j » indique la durée de la mission en jours, EL et NL indiquent la présence de mes e	
(Éric Lasseur et Nicolas Loget)	
Figure 10 : Journée type de travail sur le terrain. Exemple de la journée du 10 Avril 2015	
Figure 11 : Coupes Nord-Sud dans le bassin d'avant pays Nord pyrénéen. Les coupes A, B et C sont modifiées d'après Crochet 1991 e	
D est modifiée d'après Christophoul, 2003. Localisation des coupes sur la carte géologique au 1/1 000 000 éditée par le BRGM	
Figure 12 : Les trois étapes principales du levé de log. Un affleurement est interprété sur le terrain. Il est transcrit sur le carnet de te	
remit au propre à l'aide d'Illustrator	
Figure 13 : Processus méthodologique de Miall permettant à partir d'un corpus de lithofaciès de déterminer un élément architec	
partir d'éléments architecturaux de définir un système fluviatile	
Figure 14 : Les éléments structuraux de Miall dans sa version de 2014 (Miall, 2014).	
Figure 15 : Gravel-bed braided with sediments gravity flow Rivers (Miall, 1996).	
Figure 16 : Shallow, gravel-bed braided Rivers (Miall, 1996).	
Figure 17 : Deep, gravel-bed braided Rivers (Miall, 1996).	
Figure 18 : Gravel-bed Wandering Rivers (Miall, 1996).	
Figure 19 : Deep, perennial, sand-bed braided Rivers (Miall, 1996).	
Figure 20 : Distal, Sheetflood, sand-bed rivers (Miall, 1996)	
Figure 21 : Modèle d'évolution des systèmes fluviatiles sur un axe Proximal-Distal dans la région de Saint-Martin-des-Puits en se l	
la classification de Miall	
Figure 22 : Affichage graphique réalisé par le script Scilab. Exemple du stand F41	
Figure 23 : Logigramme du script scilab de traitement des données granulométriques	
Figure 24 : Exemple théorique permettant de mettre en valeur l'importance des petits galets (diamètre inférieur au centimètre) et	et l'impact
sur les mesures théoriques	
Figure 25: Localisation des logs et des stands granulométriques géolocalisés sur carte géologique. A : Région de l'Orbieu (carte géol	
Capendu). Légende : Rose-saumon : e4-6 : Cuisien-Lutétien-Bartonien, molasse de Carcassonne ; Jaune clair : e3b – e3c – e3d : llerdien i	-
– sup., calcaire, marnes et grès marins ; Orange : e3a : Sparnacien inférieur, calcaires lacustres ; Mauve : e2a – e2b : Thanétien, ca 	
limons.	
Figure 26 : Log des séries de Palassou dans les gorges de l'Orbieu. A : Argile ; S = Silt ; Sf : Sable fin ; Sm : Sable moyen ; Sg : Sable	
G : Graviers ; Ga : Galets ; B : Blocs. Les logs sont numérotés de A à I selon leur localisation (cf. Figure 25)	
Figure 27 : Log synthétiques des gorges de l'Orbieu, obtenu à partir du log de la Figure 26. Les phases A, B, C, D et E correspondence de la Figure 26. Les ph	
interprétations paléoenvironnementale de la Figure 30.	
Figure 28 : Evolution topographique, granulométrique et morphologique de l'Orbieu actuel.	
Figure 29 : Evolution granulométrique des D50 et D84 sur un transect Sud-Nord le long du banc F dans les gorges de l'Orbieu.	
obtenues en moyennant les données brutes et simulées.	
Figure 30 : Implications paléogéographiques de l'étude dans la région de l'Orbieu. A : Ilerdien Sup., au cours de la régression m	
Cuisien, formation des environnements lacustes de Talairan. C : Cuisien-Lutétien Inf., régression des systèmes lacustres de Ta	
Lutétien Moy.ou Sup., proximalisation du système fluviatile. E : Lutétien-Bartonien : Phase proximale maximale atteinte, le cône de	-
est installé au nivceau de Saint-Martin-des-Puits. SMDP : Saint-Martin-des-Puits ; SPDC : Saint-Pierre-des-Champs	
Figure 31 : Parties du projet entièrement gérées par le stagiaire	43
Tableaux	
MULLION	
Tableau I : Les principaux lithofaciès des séries de Palassou, leurs structures sédimentaire et leur interprétation (modifié de Mia	II 1996). «
Horizontal beddings » = litages horizontaux. « Planar cross beddings » = litages plans. « Trough cross beddings » = litages incurvés.	17
Tableau II : Les principaux éléments architecturaux des séries de Palassou, leur géométrie et les lithofaciès les composant (modifie	é de Miall,
1996)	18
Tableau III : Variations du temps de calcul et de l'incertitude sur les fractiles en fonction du nombre de simulations générées. E	
partir de l'échantillon F11	25
Tableau IV : Différences entre l'étude expérimentale (omission des petits galets) et l'étude théorique (prise en compte de tous	les petits
galets) présentées dans la figure 23	27

ABRÉVIATIONS

AERES : l'Agence d'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

BSS : Banque de données du Sous-Sol

CIFRE: Convention Industrielle de Formation par la REcherche

CNRS: Centre National de la Recherche Scientifique

EPIC : Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial

GBS : Géologie des Bassins et des Stockages

IFPEN: Institut Français du Pétrole Energies Nouvelles

ISTeP: Institut des Sciences de la Terre de Paris

OM: Ordre de Mission

RGF: Référentiel Géologique de la France

TFE: Travail de Fin d'Etudes

UMR: Unité Mixte de Recherche

UPMC: Université Pierre et Marie Curie

Introduction

Mon stage de fin d'étude s'est déroulé dans une unité mixte constituée, d'une part, par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) commanditaire du travail, et d'autre part, par l'Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP) m'hébergeant. Le BRGM est un Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC) spécialisé dans le géosciences et principalement en géologie. Il a lancé en 2013 le projet Référentiel Géologique de la France (RGF), qui a pour objectif de centraliser toutes les données géologiques du sous-sol français, de les mettre à jour en fonction de nouvelles avancées technologiques et scientifiques et de les intégrer dans un outil de visualisation 3D. C'est dans ce projet que s'inscrit le sujet de recherche qui m'a été confié sous la direction d'Éric Lasseur (BRGM) et de Nicolas Loget (ISTeP).

Le projet RGF débute dans les Pyrénées, mon sujet de recherche s'intéresse aux formations continentales, datées de l'Eocène, du bassin d'avant pays Nord-Pyrénéen afin de les caractériser d'un point de vue stratigraphique et sédimentologique pour en déduire les évolutions de la mise en place de chaîne Pyrénéenne. Durant ce stage de 6 mois, j'ai fait plus de 5 semaines de géologie de terrain entre les Corbières et la région de Pamiers. Les études de terrain se sont déclinées en trois catégories : levées de logs, relevés granulométriques et mesure de paléocourants. Elles ont été combinées et comparées aux données bibliographiques afin de dresser un modèle de progradation/rétrogradation des cônes alluviaux durant l'Eocène.

Ce rapport présente dans un premier temps le projet au travers des deux structures que sont l'ISTeP et le BRGM, puis détaille d'une part le projet RGF, puis mon projet de recherche. Dans une seconde partie je détaillerai assez succinctement les deux méthodes les plus importantes développées dans ce projet. Les résultats de l'étude seront présentés dans une troisième partie, incluant les résultats scientifiques et leur interprétation et les apports pédagogiques et techniques de cette étude.

I. Présentation du Projet

A. <u>Les parties prenantes : l'ISTeP et le BRGM</u>

Mon Travail de Fin d'Etudes (TFE) s'est construit entre le BRGM et l'ISTeP (Unité Mixte de Recherche : UMR 7193). Pour cela, deux conventions ont encadré mes activités : une première entre le BRGM et l'UPMC, puis une seconde entre le laboratoire de géologie de l'UPMC : l'ISTeP et Polytech Paris-UPMC. Je vais donc présenter succinctement les deux organismes encadrants.

1. Le BRGM

Présentation et Organisation de la Structure

Le BRGM est un Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial composé d'un centre national de recherches situé à Orléans, et couvrant tout le territoire national grâce à ses 22 des antennes régionales en France métropolitaine et en outre-mer (délimitations des régions avant la fusion de 2015). Cet EPIC créé en 1959 est placé sous la tutelle de trois ministères publics, à savoir le ministère de l'Education nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Economie, de l'Industrie et du Numérique.

Le BRGM est composé d'un pôle dirigeant en interaction avec trois autres pôles majeurs :

- Un pôle administratif comprenant les activités de gestion des ressources du BRGM,
- Un pôle stratégique définissant les stratégies de développement en France et à l'étranger,
- Un pôle scientifique hôte du cœur de métier du BRGM : les géosciences.

Ce stage se déroule dans ce troisième pôle. Celui-ci se subdivise en plusieurs directions concentrées sur des thématiques scientifiques, lesquels se subdivisent une fois de plus en unités selon des thématiques encore plus précises (Figure 1). J'ai été encadré par Éric Lasseur, sédimentologue au sein de l'unité Géologie des Bassins et des Stockages (GBS) de la Direction des Géo-Ressources.

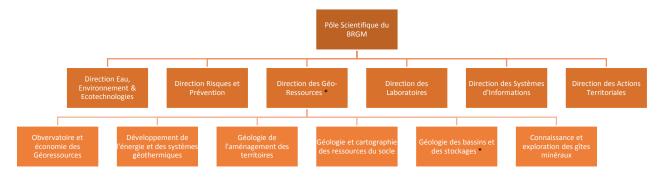


Figure 1 : Organigramme du pôle scientifique et du sous-pôle Direction des Géo-Ressources du BRGM, modifié d'après le site web du BRGM. * Directions et unités hôtes du stage.

Les Métiers du BRGM

Dans les trois pôles majeurs présentés dans la partie précédente se répartissent un total de 1052 collaborateurs entre les fonctions opérationnelles (807 personnes) et de support (245 personnes). Le corps de métier principal de la partie opérationnelle reste la géologie, représentant près de 25% des salariés (Figure 2). La répartition de ces métiers montre le choix stratégique de la transversalité des géodomaines d'expertises du BRGM, lui permettant de traiter toutes les thématiques des géosciences.



Figure 2 : Les métiers du BRGM au 1^{er} Janvier 2015, d'après de rapport d'activité 2014 du BRGM.

Les Missions du BRGM

Les missions du BRGM sont d'utilité publique permettant, en particulier, l'accès à tous et gratuitement au savoir, via la web-plateforme informatique InfoTerre. Elles s'organisent autour de 4 points majeurs (Figure 3). Le projet de recherche auquel j'ai pris part s'inscrit dans la première mission : la compréhension des phénomènes géologiques. Mais à l'échelle du projet RGF, celui-ci est transversal, s'inscrivant dans toutes les missions.

1. Comprendre les phénomènes géologiques et risques associés.
 2. Développer des méthodologies et des techniques nouvelles.
 3. Produire et diffuser des données pour la gestion du sol, du sous-sol et des ressources, à la prévention des risques et pollutions, aux politiques et réponses au changement climatique.

Figure 3 : Les quatre principales missions du BRGM, modifié d'après le site web du BRGM.

Les missions de l'unité GBS sont définies par le BRGM comme « relatives à l'acquisition et à la valorisation des données géologiques du sous-sol pour une gestion durable ou une exploitation raisonnée des ressources » d'après le site internet du BRGM. Mon travail d'acquisition sur le terrain entre bien évidement dans cette politique d'acquisition et de valorisation de données géologiques.

Les Objectifs Stratégiques du BRGM relatifs au TFE

Les objectifs sont étroitement liés aux missions de l'EPIC. Cependant, tous les 5 ans, le BRGM et l'Etat Français définissent une ligne d'objectifs stratégiques scientifiques et technologiques sur laquelle l'EPIC va concentrer ses efforts. La ligne actuelle stipule en particulier une « Exigence plus forte d'expertise scientifique » et un « Renforcement de l'innovation ». C'est en englobant ces deux lignes de conduite que s'ancre mon projet, et à plus grande échelle, le projet de RGF : améliorer les connaissances géologiques via des expertises dont la précision est épaulée par l'innovation scientifique et rendre ces connaissances disponibles et facilement utilisables via une plateforme plus performante que InfoTerre car intégrant une représentation 3D des formations géologiques.

2. L'ISTeP, UMR 7193

Présentation et Organisation de la Structure

L'ISTeP est une UMR créé en 2009 régie d'une part par l'UPMC et par le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). Ce laboratoire de recherche s'organise en 5 grandes équipes (Figure 4) et mon projet s'est déroulé dans l'équipe DéSIR sous la responsabilité de Nicolas Loget, Maître de conférences.

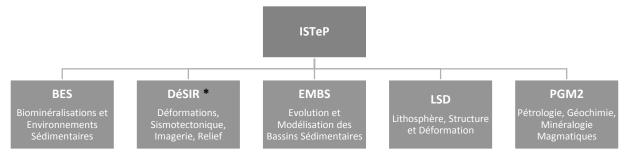


Figure 4 : Organigramme de l'ISTeP d'après le site internet du laboratoire. * Département hôte du stage.

Les Métiers de l'ISTeP

Un très large panel de métiers est regroupé dans ce laboratoire permettent des études transversales. L'ISTeP peut donc travailler sur des thématiques de géologie (sédimentologie, stratigraphie, pure pétrographie ...), mais aussi s'intéresser à des thématiques alliant plusieurs sciences comme par exemple les études des propriétés physiques (rhéologie, cristallographie, thermodynamique) mais aussi chimiques (biominéralisations, chimie des roches, pétrochimie) ou encore des activités de modélisation et calculs numériques. L'ISTeP compte 145 collaborateurs répartis selon des

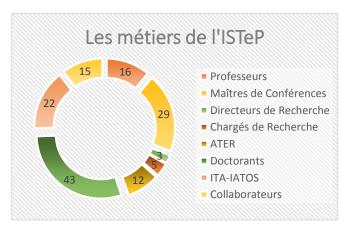


Figure 5 : Répartition des fonctions et métiers au sein de l'ISTeP au 1^{er} Janvier 2015, d'après le site internet de l'ISTeP.

fonctions de recherche, d'encadrement ou administratives (Figure 5).

Les Objectifs de l'ISTeP en lien avec le TFE

La ligne de conduite de l'ISTeP est définie tous les 5 ans par le comité directeur du laboratoire et par l'Agence d'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur (AERES). Dans le dernier rapport de l'AERES, concernant la campagne d'évaluation 2012-2013, l'ISTeP souhaite « se positionner clairement comme une unité pluridisciplinaire capable d'aborder des questions scientifiques majeures de manière originale ». Concernant l'unité DéSIR, le plan quinquennal 2014-2018 donne des perspectives sur « l'acquisition de données pertinentes et contraignantes sur la durée, l'amplitude et la répartition des déformations de la lithosphère et sur les facteurs qui en contrôlent la localisation, afin de mieux comprendre la mécanique lithosphérique à différentes échelles de temps et d'espace, puis de la modéliser ». Mon travail de recherche s'ancre aussi au sein de ces deux politiques, à savoir la pluridisciplinarité du sujet de recherche : utiliser la sédimentologie comme indicateur de paramètres

tectoniques dans le bassin Nord-Pyrénéen – et l'acquisition de données pertinentes et contraignantes pour modéliser la mécanique lithosphérique : relever des données granulométriques afin de caler un modèle de subsidence du bassin Nord-Pyrénéen.

Les partenaires de l'ISTeP

Le laboratoire s'associe, pour ses projets de recherche, avec différents partenaires qu'ils soient locaux, nationaux, internationaux ou industriels (Figure 6). Ces associations permettent de mettre en commun des hommes et des femmes, des compétences, des savoirs mais aussi des financements essentiels à l'aboutissement de projets de grande envergure. Dans cette optique-là, on trouve de nombreuses thèses financées via le dispositif de Convention Industrielle de Formation par la REcherche (CIFRE). Dans l'équipe de DéSIR, les thèses CIFRE sont majoritairement financées par TOTAL et l'Institut Français du Pétrole Energies Nouvelles (IFPEN).

D'autres projets internationaux sont aussi développés tel que le projet DARIUS : étude transversale des bassins sédimentaires d'Europe de l'Est à l'Asie Centrale, alliant tectonique et géodynamisme. Ce projet rassemble d'une part des centres de recherche (27 pays différents) et des industriels, majoritairement pétroliers.



Figure 6 : Partenaires de l'ISTeP : Nationaux (orange), Internationaux (jaune), Industriels (vert) et Locaux (bleu).

B. <u>Le projet RGF</u>

Lancé en 2013 par le BRGM, le projet RGF a pour objectif de centraliser toutes les données géologiques du sous-sol français et de les représenter en 3D plutôt qu'au format habituel des cartes géologiques 2D.

1. Présentation du RGF

Présentation générale du projet

Le Référentiel Géologique de la France est un projet programmé sur une durée de plus de 30 ans dont l'objectif est de centraliser et de synthétiser l'ensemble de l'information géologique via une plateforme polyvalente. Aujourd'hui intégré dans les cartes géologiques, demain l'ensemble de ces données sera directement visualisable et utilisable via cette plateforme en 3D et 4D (Figure 7). En plus des informations géologiques présentes sur les cartes géologiques, des données des domaines de la géophysique, de la géotechnique, de la géochimie et de la physique et mécanique des roches pourront aussi être intégrées aux modèles géologiques créés par le BRGM.

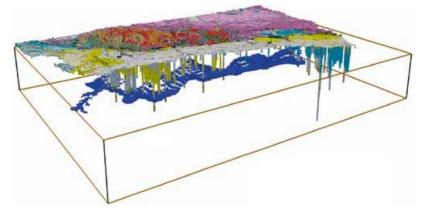


Figure 7 : Le RGF intègre aussi des données hydrogéologiques permettant de mieux modéliser et évaluer les ressources en eau ici appliqué au Fossé Rhénan, d'après le journal d'information du BRGM n°28.

Déroulement du projet

Le territoire français sera découpé selon des objets géologiques, soit en grandes zones d'études. Par exemple, la première étape de ce projet se concentre sur les Pyrénées. Chaque zone fera l'objet d'études poussées et de révision des anciennes études pouvant être obsolètes compte tenu de l'avancée des connaissances et de l'innovation. De plus, il est prévu de mettre en place des partenariats avec des industriels ou à l'échelle européenne permettant de dynamiser certaines études permettant une accélération du projet RGF. Dans le communiqué de presse du BRGM sur le RGF, il est expliqué que ce projet est prévu en plusieurs temps :

- 1. Réunir, réinterpréter et valider les informations géologiques déjà acquises (cartes géologiques, BSS, forages...).
- 2. Intégration des données géophysiques du BRGM.
- 3. Acquisition de nouvelles données afin de combler les lacunes via des activités de recherche menées dans le cadre de thèses ou de stages de recherche de fin d'études.
- 4. Intégrer toutes les données émanant des autres partenaires du projet.
- 5. Conception de la base de données du RGF en compilant et harmonisant les données.
- 6. Mise au point d'une interface de consultation de gestion et d'extraction des données.

Les bénéficiaires du RGF

Ce projet de grande envergure, a pour objectif de rendre accessible des données essentielles à de nombreuses entités. Le caractère d'utilité publique de l'EPIC se retrouve dans l'ensemble des entités pouvant utiliser ces données, à savoir l'Etat, les collectivités territoriales, les bureaux d'études et surtout le BRGM lui-même. Toutes les données nécessaires à un projet, pourront être extraites via un accès internet à la plateforme, dans le même style que l'outil InfoTerre.

Le RGF a donc pour objectif de rassembler des informations afin de mieux connaître le soussol. Cette amélioration de la connaîssance permettra de mieux connaître les potentiels des géoressources (ressources minérales, géothermales, pétrolières et en eau) mais aussi de mieux planifier des systèmes de stockage (gaz, CO₂, déchets radioactifs, eau chaude...).

2. Première étape : les Pyrénées

Après la mise en place d'un démonstrateur (prototype) sur le territoire très documenté du Fossé Rhénan, l'aventure RGF commence pleinement dans la région des Pyrénées.

Choix de la première zone d'étude

C'est en 2014 que débuta le projet RGF, avec comme première zone d'étude les Pyrénées, et ce pour une durée de 5 ans. « Ce choix s'est fait naturellement car c'est la région française la plus étudiée actuellement, en particulier pour ses bassins sédimentaires et pour le front la zone axiale de l'orogène. Dans un premier temps, il a été prévu de remettre à niveau toutes les connaissances géologiques synthétisées par les cartes géologiques. » explique Thierry Baudin responsable du projet dans Géorama, le journal d'information du BRGM. La première grande étape du RGF se veut à la fois concrète, complète et complexe, dans le but de pouvoir améliorer en continu le projet et sa réalisation.

Le TFE dans l'organisation du RGF Pyrénées

Pour mener à bien cette première étape, un appel à manifestation auprès de la communauté scientifique a été passé permettant de mettre en place des partenariats académiques avec le BRGM. Ces unions permettent de mettre ne place des projets de recherche sérieux structurés par des TFE et des thèses. Mon projet se situe bien entendu dans la catégorie TFE. Pour gérer tous les TFE du RGF, le BRGM a mis en place une sous-traitance par des universités. Pour cela, un contrat est établi entre l'EPIC qui finance le TFE et une université, laquelle héberge et encadre le stagiaire. Un second contrat entre l'université et l'école de l'étudiant permet de rattacher le BRGM à la formation du stagiaire.

Concernant les TFE, c'est plus de 20 stages qui se sont déroulés dans plusieurs universités différentes. Les grandes thématiques développées par ces stages concernent le bassin d'avant pays, le piedmont et la chaîne pyrénéenne.

C. Mon projet d'étude

Le projet d'étude que j'ai mené est une des briques constituant le vaste projet RGF dirigé par le BRGM. Il s'organise autour d'une problématique cherchant à relier les données stratigraphiques du bassin nord pyrénéen à l'évolution de la chaîne : Les systèmes sédimentaires continentaux éocènes sur le versant Nord-Pyrénéen : quelles contraintes pour l'évolution du rétro-foreland pyrénéen ?

1. Présentation du projet

L'étude sédimentologique des Poudingues de Palassou

L'étude se concentre sur les sédiments continentaux déposés tout au long de l'exhumation de la chaîne Pyrénéenne au cours de l'Eocène. Ces sédiments font partie des formations des Poudingues de Palassou et appartiennent aux formations molassiques Nord Pyrénéennes.

Objectifs

Le projet scientifique que j'ai mené se base sur des objectifs à la fois techniques et scientifiques. Les objectifs principaux du projet ont été fixés au début du stage, et certains ont été revus, voire abandonnés, au cours de ces six mois d'étude.

Connaître la stratigraphie des Poudingues de Palassou pour reconstruire l'évolution fluviatile régionale au cours de l'Eocène.

Le projet scientifique s'intéresse à une formation géologique dont la mise en place est contemporaine de la formation des Pyrénées : les poudingues de Palassou. Cette formation a été l'objet de plusieurs études, la première menée par l'abbé Palassou en 1784 – qui donna son nom à ces formations conglomératiques – jusqu'au dernières réalisées au cours des XX^e et XXI^e siècles par des auteurs tels que Plaziat ou Crochet. Cependant, aucune de ces études ne dresse une coupe stratigraphique suffisamment détaillée permettant d'introduire une étude des milieux de dépôt fluviatile. Afin de pouvoir reconstruire une évolution fluviatile régionale, j'ai levé de nombreux logs dans deux régions espacées d'Est en Ouest de 40 km : la première au Nord du massif du Mouthoumet dans les Gorges de l'Orbieu, et la seconde au Nord Est de Chalabre.

Relever des paléocourants afin de connaître les directions d'écoulement des systèmes fluviatiles Eocènes.

Les paléocourants sont les directions d'écoulements de cours d'eau fossilisées. Ces directions sont enregistrées par des figures sédimentaires et peuvent être mesurées sur le terrain. Les études portant sur le poudingue de Palassou évoquées plus tôt, se sont aussi intéressées aux directions d'écoulement. Nous avons choisi de réitérer les mesures afin d'avoir plus de données pour modéliser au mieux les paléocourants Eocènes mais aussi pour mieux choisir un transect pour réaliser une étude granulométrique.

Mener des études granulométriques du Palassou pour définir le caractère proximal des cours d'eau et en déduire une avancée de l'axe du piedmont.

Une étude granulométrique s'intéresse à la répartition du diamètre maximal des galets déposés par une rivière. Plus, on se situe proche de la source, dans notre cas les Pyrénées, plus les galets déposés par le cours d'eau sont gros, et, dans la même logique, plus on se situe loin de la source, plus les galets sont petits. Dans notre projet, cette étude permet d'apporter des informations sur ce caractère proximal/distal des environnements de dépôts des poudingues de Palassou. Un cas concret

a aussi été planifié dans l'actuel Orbieu pour permettre de comparer aux données des poudingues Eocènes.

<u>Caler temporellement les séries de Palassou par magnétostratigraphie</u>

Le problème principal relatif aux séries continentales réside en la difficulté de datation. Il est principalement dû à la très faible préservation de fossiles permettant une datation par biostratigraphie principalement utilisée dans les dépôts marins que j'avais pu utiliser pendant mon stage de BE. La magnétostratigraphie se base sur les inversions de la polarité du champ magnétique terrestre au cours du temps. Ces inversions sont datées avec précision et à partir d'un relevé systématique de l'enregistrement de ce paléomagnétisme sur un profil en profondeur, on peut caler différents horizons. Cependant, par manque de temps et de budget, cette partie du projet n'a pas pu être réalisé.

Méthodes Ingénieur développées

En plus des méthodes scientifiques basées sur des protocoles et des classifications scientifiques, j'ai su impliquer le savoir-faire ingénieur que j'ai acquis au cours de ces trois années de formation. J'ai proposé à mes tuteurs l'utilisation d'approches scientifiques permettant de nuancer les résultats obtenus sur le terrain, en particulier l'utilisation d'outils statistiques :

<u>Tests Statistiques de Normalité</u>

Des jeux de données (paléocourants relevés et jeux de données granulométriques) ont été utilisés au cours de ce projet. Ces données peuvent êtres modélisées par certaines lois statistiques, et la loi Normale convient à ce genre d'étude afin de représenter de telles variables aléatoires. Pour modéliser un jeu de données avec une loi Normale il faut avant tout vérifier si ce jeu de données obéit à la loi Normale. Pour cela, il existe plusieurs tests statistiques permettant de dire avec une erreur quantifiée si le jeu de données est ou non régi par une loi Normale. Les tests utilisés sont ceux de Lilliefors (pour les séries à effectifs élevé) et de Shapiro-Wilk (pour les séries à faible effectif).

Détermination de valeurs aberrantes

Le jeu de données des paléocourants comportait des valeurs très étalées, en particulier celles mesurées à partir des mégarides. Afin de vérifier la validité de ces données, j'ai utilisé un test permettant de déterminer les valeurs aberrantes : le « box plot » ou boîte à moustache en français.

Simulations Statistiques basées sur la Loi Normale

L'étude granulométrique comporte des obstacles perturbant le bon échantillonnage des données entachant donc tout le processus de traitement jusqu'aux résultats et leurs interprétations. Des simulations statistiques basées sur la loi Normale permettent de limiter ces perturbations évoquées plus loin dans ce rapport, c'est pourquoi nous les avons utilisées.

Programmation informatique et statistique

Tous les objets et tests statistiques utilisés dans ce projet – tests, données aberrantes et simulations – ont été programmés en Scilab. Le choix de ce langage s'est justifié par la facilité d'utilisation, ma maitrise du langage, la facilité et la maniabilité de l'affichage graphique et la gratuité du logiciel. Les programmes fonctionnent tous sur le même principe : chargement des données, traitement, affichage dans l'interface ou graphique (Figure 8).



Figure 8 : Les 4 majeures étapes du programme permettant de traiter les données granulométriques.

2. Organisation du projet

Organisation financière

Organisation budgétaire

Suite à une réponse à un appel d'offre du BRGM, l'ISTeP organise une partie de l'encadrement du stage. Ainsi dans le cadre de la convention reliant le BRGM et l'UPMC, le BRGM se charge de l'ensemble du financement du stage. La signature de la convention BRGM-UPMC a été bien plus longue que prévu et l'ISTeP a donc dû avancer les frais jusqu'à l'obtention de l'enveloppe. Ce financement inclut :

- La gratification du stagiaire de 500.51€ par mois,
- Les frais de missions du stagiaire et des encadrants (incluant le transport, le logement sur place, les frais de bouche et la location d'un véhicule).

Les missions

Avant chaque mission sur le terrain, un Ordre de Mission (OM) était établi si possible deux semaines avant son début. Cet OM permet de déclarer la mission permettant d'une part la couverture légale au niveau des assurances et d'autre part la prise en compte des frais de mission.

Organisation de l'encadrement

Un double encadrement est prévu par la convention du BRGM : un premier dans l'université et un second par un géologue du Bureau. Dans mon cas, Nicolas Loget avait la reponsabilité de mon encadrement au sein de l'ISTeP et Eric Lasseur dirigait mon travail depuis Orléans.

L'encadrement sur l'UPMC se faisait par points réguliers espacés de deux semaines environ pour les périodes de travail en bureau et un point spécial à chaque retour de mission sur le terrain. Lors de ces réunions, les objectifs étaient définis pour la suite du stage, des points de géologie générale étaient clarifiés me permettant ainsi de mieux comprendre les enjeux et les relations entre les données que je détenais.

L'encadrement par le BRGM s'est matérialisé par plusieurs réunions prévues sur une journée au sein du BRGM à Orléans lors desquelles, avec Eric Lasseur et Nicolas Loget, nous réfléchissions aux meilleur modèles de sédimentation et à la pertinences des données relevées.

Mes deux encadrants m'ont aussi guidé lors de mes missions de terrain en venant quelques journées pour d'une part vérifier l'avancée dans mon travail mais aussi pour m'aider dans la compréhension et l'interprétation stratigraphique d'affleurements parfois complexes.

Organisation des missions de terrain

Les 4 Missions

La géologie est une science dite « naturaliste » car elle traite de sciences naturelles nécessitant une étude de terrain pour voir et comprendre la roche et les informations qu'elle a pu enregistrer. Afin de mener à bien mon étude sédimentologique, je suis parti quatre fois en mission pour différentes activités, seul ou accompagné par mes encadrants (Figure 9).

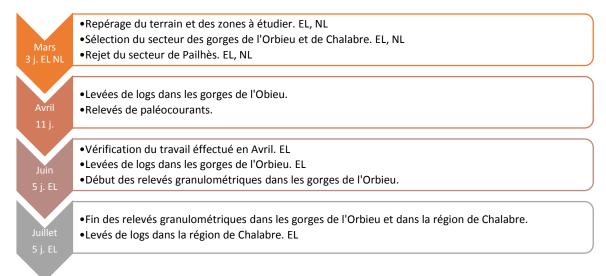


Figure 9 : Organisation des missions de terrain. «j » indique la durée de la mission en jours, EL et NL indiquent la présence de mes encadrants (Éric Lasseur et Nicolas Loget).

Géologue en mission, une journée type

La journée type d'un géologue sur le terrain est une journée assez intense (Figure 10) durant laquelle il faut être à la fois autonome, débrouillard, rapide, prudent et réactif.

Tout au long de la journée, je suis amené à décider quels points je dois étudier et dans quelles circonstances. En cas d'indécisions je peux appeler mes tuteurs pour avoir leurs avis. Sur le terrain le temps est compté, le coup des missions étant très élevé, à la fin de la mission, le travail doit être accompli. Il faut aussi savoir prendre sur soi lorsque le mauvais temps arrive quitte à travailler plus longtemps le soir. De plus, lorsque je suis seul il me faut être vigilant, loin des chemins dans des endroits où le réseau mobile ne capte pas, la moindre chute peut se révéler très dangereuse.

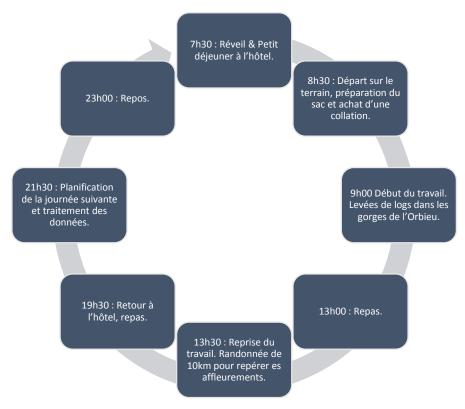


Figure 10 : Journée type de travail sur le terrain. Exemple de la journée du 10 Avril 2015

3. Contexte géologique

Mon projet s'inscrit dans la dynamique d'une part du bassin d'avant pays Nord-Pyrénéen, et d'autre part dans la dynamique de l'orogène pyrénéen. Il semble important de poser un contexte géologique pour permettre de mieux comprendre l'étude dans son contexte général.

Contexte géologique à grande échelle.

Mise en place des Pyrénées

La mise en place de l'Orogène pyrénéen, résultant de la collision de la plaque Ibérique et de la plaque Eurasiatique, s'est faite au Santonien (84 Ma) jusqu'au Miocène (23 Ma). Des études thermochronologiques ont été obtenues récemment au sein de la chaîne pyrénéenne (*Vacherat*, 2014). Elles montrent clairement une propagation de l'exhumation du Nord au Sud et d'Est en Ouest et sont en accord avec le mouvement rotatif antihoraire de la plaque Ibérique lors de la collision. La phase d'exhumation de la chaîne, débute à l'Eocène suite à la régression marine de l'Yprésien, localement appelé Ilerdien (*Plaziat*, 1981) et est due à l'accélération du raccourcissement (*Lacombe & Mouthereau, 1999 & Beaumont et al., 2000*). La mise en place des reliefs permet une dynamique érosive entraînant la formation des molasses Nord et Sud pyrénéennes.

Structure du bassin d'avant pays Nord-Pyrénéen

La mise en place de l'orogène pyrénéen a engendré des perturbations proximales et distales au front de chevauchement qui ont influencé la dynamique de mise en place du bassin d'avant pays :

- A l'Est, dans le secteur des Corbières, de grands chevauchements en piggy-back se mettent successivement en place tels que les anticlinaux de l'Alaric et d'Oupia (Figure 11, D). Leur formation remonte aux différentes phases de compressions pyrénéennes.
- Plus à l'Ouest, dans le secteur de Mirepoix et de même que dans le secteur du Mas d'Azil, la dynamique est différente. Les chevauchements sont moins fréquents excepté celui de Tréziers, et la déformation agit essentiellement en flexion sur la croûte continentale, augmentant la subsidence créant un espace de stockage (Figures 11, A et B). Les formations molassiques atteignent plus de 2 km dans cette région, tandis que dans les Corbières elles se limitent à moins d'un kilomètre.

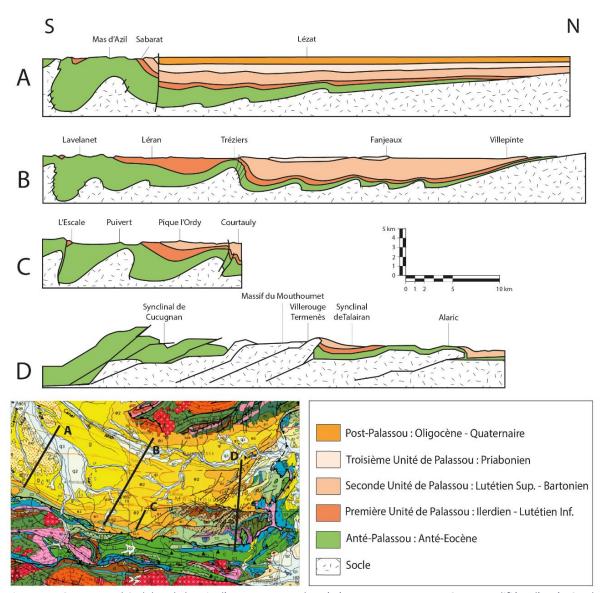


Figure 11 : Coupes Nord-Sud dans le bassin d'avant pays Nord pyrénéen. Les coupes A, B et C sont modifiées d'après Crochet 1991 et la coupe D est modifiée d'après Christophoul, 2003. Localisation des coupes sur la carte géologique au 1/1 000 000 éditée par le BRGM.

Les poudingues de Palassou

Ces formations continentales conglomératiques sont des roches sédimentaires détritiques mises en place au cours de l'Eocène (de 56 à 33.9 Ma). Les argiles, silts, sables, graviers, galets et blocs les composant sont issus du démantèlement des reliefs Pyrénéens en cours de formation par des processus d'érosion. Ces particules ont été charriées par les cours d'eau et déposées dans le bassin d'avant pays grâce aux processus de subsidence flexurale créant de l'espace.

Les Unités Tectono-Sédimentaires (UTS)

Les formations continentales de Palassou peuvent être découpées en trois grands ensembles, en discordance l'un sur l'autre, en fonction de paramètres tectoniques et sédimentaires (*Crochet, 1991*). On distingue :

- L'UTS1: Ilerdien Sup. Lutétien Sup. Cette unité commence dans les dernières assises marines de l'Ilerdien, puis la régression marine entraine une continentalisation du milieu représentée par les poudingues de Palassou. Cette unité se termine par un faisceau calcaire témoin d'un ralentissement de la dynamique globale du système (tectonique, sédimentation, subsidence ...).
- L'UTS2 : Lutétien Sup. Bartonien Sup. La seconde unité commence elle aussi par des horizons calcaires repères (*Crochet, 1991*) rapidement recouverts par des poudingues de plus en plus massifs. La fin de l'unité est marquée par des conglomérats à très fort centile (100 cm) déposés dans les régions les plus distales du bassin.
- L'UTS3: Priabonien. La subsidence caractérise cette unité. Elle migre vers le Nord et est dans un premier temps supérieure à la sédimentation, puis ralentie et s'équilibre. Les dépôts sont donc non isopaques et se mettent en place majoritairement dans le Nord du bassin.

Les faciès du Poudingue de Palassou

Ces formations continentales ont fossilisé des objets géologiques remarquables permettant de comprendre d'une part les environnements de l'époque (paléoenvironnements), la mise en place des séries et l'évolution de la chaine pyrénéenne. Lors des missions de terrain, les observations et l'échantillonnage des données s'est porté sur un certain nombre d'éléments géologiques par la suite analysés à partir de la classification de Miall :

- Les chenaux fossilisés permettant de mieux comprendre les types de rivières les ayant mis en place (rivières en tresses, méandrissantes, anastomosées ...)
- Les plaines alluviales sont observables. A l'affleurement, il s'agit de formations argileuses beiges, brunes, violettes ou ocres.
- Les paléosols témoins d'anciens sols végétalisés dans lesquels on retrouve des marques de racines.
- Les bancs de calcaire lacustre comportant des mollusques
- Les debris-flows, ou lave torrentielle, sont des coulées gravitaires de boue charriant des galets et des blocs. De nombreux debris-flows fossilisés sont observables dans les formations de Palassou.

II. MÉTHODES

Cette section a pour objectif de présenter quelques-unes des différentes méthodes utilisées dans cette étude. Il est important de noter que cette étude est transversale puisque des nombreuses méthodes ont été utilisées : étude stratigraphique, étude granulométrique, étude des paléocourants, programmation Scilab pour le traitement statistique de données, mise en forme par DAO ... Ce rapport va se concentrer sur les méthodes les plus importantes et celles faisant intervenir le plus d'ingénierie dans ce projet : l'étude stratigraphique et l'étude granulométrique. Ces deux sujets seront développés en précisant les difficultés rencontrées et les solutions apportées juste après un rappel quant à la méthodologie nécessaire pour monter un log.

A. Méthodologie générale pour monter un log

1. Définition

Un log géologique est un outil permettant de représenter la succession de l'empilement des séries géologiques ainsi que de leurs caractéristiques. Pour un pendage nul, l'épaisseur du log correspond aux lignes de niveau recoupées. Cependant dès lors que les séries sont pentées, un simple déplacement dans le plan horizontal permet de se déplacer dans cette succession stratigraphique.

2. Méthodologie utilisée pour ce projet

Les logs représentent, d'une part la stratigraphie des poudingues de Palassou et d'autre part, leurs caractéristiques sédimentologiques et leurs interprétations. La première étape pour lever un log est de définir une base (horizon repère) sur laquelle il démarrera. Dans notre cas, il s'agit des

formations marines Ilerdiennes. A partir de cette base, il faut remonter les séries et pour chaque affleurement relever tous les paramètres utiles à l'étude après l'avoir localisé sur une échelle verticale. Sur chaque affleurement était pris en compte les lithofaciès, mais aussi ponctuellement la granulométrie.

Finalement à partir d'un affleurement, les données essentielles sont notées sur un carnet de terrain et plus tard reprises au propre dans un log synthétique (Figure 12)

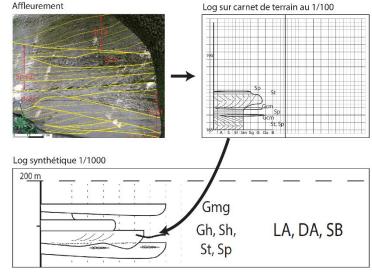


Figure 12 : Les trois étapes principales du levé de log. Un affleurement est interprété sur le terrain. Il est transcrit sur le carnet de terrain puis remit au propre à l'aide d'Illustrator.

B. Caractérisation des faciès continentaux fluviatiles

Les systèmes continentaux fluviatiles ont été largement étudiés par Andrew D. Miall dans la seconde partie du XX^e siècle. Il résulte de ces études, une classification permettant à partir d'informations lithologiques disponibles à l'affleurement, de déterminer les systèmes fluviaux responsables de la mise en place des sédiments. Cette classification se déroule en trois étapes successives faisant intervenir des ordres de grandeur différents allant des indices stratigraphiques centimétriques présents à l'affleurement jusqu'à la morphologie plurikilométrique globale de la rivière (Figure 13).

- Dans un premier temps, il est essentiel de déterminer un lithofaciès. Il s'agit de la façon dont les particules (grains de sable, graviers, galets ...) sont agencées ; par exemple : les particules se touchent-elles ? peut-on suivre des horizons ? les galets sont-ils imbriqués les uns dans les autres ? ...
- Puis, à partir de tous les lithofaciès identifiés, et à partir de la géométrie des affleurements, on détermine les éléments architecturaux correspondant aux systèmes d'accrétion des sédiments dans le cours d'eau : barres de graviers, accrétion de sable latérale...
- Enfin, la combinaison des différents éléments architecturaux définit les caractéristiques en termes de dynamique principale du cours d'eau conduisant à un certain type de cours d'eau.



Figure 13 : Processus méthodologique de Miall permettant à partir d'un corpus de lithofaciès de déterminer un élément architectural, et à partir d'éléments architecturaux de définir un système fluviatile.

Cette étude s'est référée à la classification présentée dans *The Geology of Fluvial Deposits, Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology (Miall, 1996*). A partir des informations relevées sur les logs, via le travail de Miall, nous proposons une reconstruction des environnements de dépôt et déduisons les séquences transgressives et régressives à l'échelle des séries de Palassou.

1. Les Lithofaciès

Les lithofaciès sont les unités élémentaires permettant de décrire une roche sédimentaire. Ils permettent une caractérisation des structures lithologiques apportant une information sur le type de dépôt mais aussi sur la granulométrie. En effet, ils s'organisent suivant les trois grands ensembles granulométriques de Wentworth : les graviers et galets (graviers : taille supérieure à 2mm et galets : taille supérieure à 4 mm, de symbole G pour « gravels ») les sables (taille comprise entre 62,5 μ m et 2mm, de symbole S pour « sands ») et les silts et argiles (taille inférieure à 62.5 μ m, de symbole F pout « fines »). Chaque lithofaciès est repéré par un code de deux ou trois lettres correspondant à la granulométrie (première lettre) et aux structures sédimentaires que présente le faciès (seconde et troisième lettres). Ces structures sont généralement formées par les courants au

sein de la rivière et sont représentatives de l'énergie du cours d'eau lors du dépôt ainsi que des modes de dépôts (accrétion, décantation, charriage, dépôts gravitaires...).

Les séries de Palassou dans les Gorges de l'Orbieu peuvent être caractérisées par certains lithofaciès (Tableau I). Ces lithofaciès sont utilisés sur les logs et permettent une interprétation en éléments architecturaux.

Tableau I : Les principaux lithofaciès des séries de Palassou, leurs structures sédimentaire et leur interprétation (modifié de Miall 1996). « Horizontal beddings » = litages horizontaux. « Planar cross beddings » = litages plans. « Trough cross beddings » = litages incurvés.

Code	Lithofaciès	Structures sédimentaires	Interprétation
Gmm	Conglomérat massif, matrice supportée	Classement faible	Débris flow plastique
Gmg	Conglomérat matrice supportée	Granoclassement normal	Débris flow pseudo plastique
Gci	Gci Conglomérat clastes supportés Granoclassement inverse		Débris flow riche en clastes ou pseudo plastique
Gcm	Conglomérat massif, clastes supportés	-	Débris flow pseudo plastique
Gm/Gh	Conglomérat clastes supportés, stratifié	« Horizontal beddings », Imbrication de clastes	Barres longitudinales, dépôts de remaniement
Gp	Conglomérat stratifié	« Planar cross beddings »	Barres de graviers
Gt	Conglomérat stratifié	« Trough cross beddings »	Chenaux mineurs
Sh	Grès fins à grossiers ou conglomératiques	« Horizontal Beddings »	Ecoulement en nappe
SI	Grès fins à grossiers ou conglomératiques	« Low angle cross beddings »	Antidunes, remplissage après érosion
St	Grès fins à grossiers ou conglomératiques	« Trough cross beddings »	Rides sinueuses ou lingoïdes (dunes 3D)
Sp	Grès fins à grossiers ou conglomératiques	« Planar cross beddings »	Dunes transversales lingoïdes (dunes 2D)
Sm	Grès fin à grossier	Massif	Dépôts gravitaires
FI	Grès, silts boue	Laminations fines, rides très petites	Dépôts de débordements en sheet- flows
Fm	Grès très fins, boue, silts	Massif ou massif avec marques de dessiccation	Dépôts de crevasse splay
Fcf	Boue, silts	Massif, fossiles d'eau douce	Dépôts de marécages et lacs
Р	Paléosols	Pédogénèse : marmorisations, racines	Sol mature avec précipitations chimiques

2. Les Eléments architecturaux

Les éléments architecturaux sont définis par association de lithofaciès et par la géométrie générale de l'objet géologique. Il s'agit de corps sédimentaires de plus grande taille, allant du mètre –

comme par exemple l'incision d'un chenal, à la centaine de mètres – tel que les accrétions latérales en « point bar » des rivières méandriformes. La géométrie de l'élément, au travers des surfaces d'érosion le composant, aide à son identification. Ces éléments correspondent à des temps de mise en place et donc d'enregistrement sédimentaire compris entre 1 000 et 10 000 ans (*Miall, 1996*).

Dans notre cas, il s'agit d'objets pluri métriques tels que des barres de graviers et/ou galets, des barres latérales sableuses, des remplissages sableux d'anciens chenaux abandonnés, encore des lentilles ou caillouteuses de débris flows. On en détermine 8 dans la version de 1996, et 9 dans celle de 2014 dans les faciès purement fluviatiles (Figure 14), mais ils sont aussi représentatifs de certains faciès continentaux d'inondations, tels que les dépôts de rupture de levée ou les épandages sablo-silteux deltaïques (Tableau II).

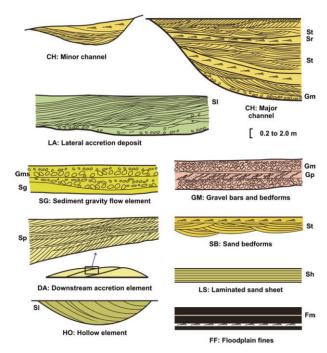


Figure 14 : Les éléments structuraux de Miall dans sa version de 2014 (Miall, 2014).

Tableau II : Les principaux éléments architecturaux des séries de Palassou, leur géométrie et les lithofaciès les composant (modifié de Miall, 1996).

Code	Eléments architecturaux	Assemblage de lithofaciès	Géométrie
СН	Chenaux « Channels »	-	Base érosive concave vers le haut, sommet plan sauf si non érodé, taille et forme hautement variables, surfaces d'érosion de 3 ^{ème} ordre
GB	Barres de Graviers/Galets « Gravel Bars »	Gh, Gp, Gt	Tabulaire ou lenticulaire, présence de l'élément SB
SB	Barres sableuses « Sandy Bedforms »	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss	Tabulaire, lenticulaire, éléments de remplissage de chenaux, barres mineures, « crevasse splay »
DA	Accrétion avale « Downstream-Accretion macroform »	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss	Lentilles présentes au toit des chenaux, surfaces d'érosion internes de 3ème ordre, surfaces limites de 4ème ordre
LA	Accrétion Latérale « Lateral-Accretion macroform »	St, Sp, Sh, Sl, Se, Ss, et moins fréquement Gh, Gt, Gp	Prismatique, tabulaire, surfaces d'accrétion latérales de 3 ^{ème} ordre
SG	Sédimentation par courants gravitaire « Sedimentary Gravity flows »	Gmm, Gmg, Gci, Gcm	Présence de lobes, tabulaire (peu épais), mélangés au GB
FF	Dépôts de plaine d'inondation « Overbank Fines »	Fm, Fl	Couches fines à épaisses, mélangés à SB, remplissant des chenaux.
cs	Rupture de levée « Crevasse Splay »	St, Sr, Fl	Lentilles planes très étendues (10 x 10 km), épaisseur métrique.

3. Les Systèmes fluviatiles

Il existe quatre grandes familles de systèmes fluviatiles : les fleuves méandriformes, anastomosés, en tresses et droits. Ils se différencient les uns des autres par plusieurs paramètres tels que leur sinuosité, la pente générale de la région, le caractère proximal des sources sédimentaires, la charge sédimentaire qu'ils transportent, leur comportement érosif etc... (*Miall, 1996*). Les recherches conduites sur les systèmes fluviatiles responsables de la mise en place des séries de Palassou sont très contradictoires, puisque certains parlent de systèmes en tresses (*Mondou, XXXX*) ou anastomosés (*Plaziat, 1987*), tandis que d'autres évoquent une sédimentation clairement méandriforme (*Christophoul, 2003*). L'utilisation de la classification de Miall permet une nouvelle étude plus détaillée qui n'avait été utilisée que par Mondou et Christophoul. Cette fois, l'étude permettra d'apporter des informations sur le caractère proximal/distal des systèmes. Les principaux types fluviaux identifiés sur le terrain sont présentés plus en détails ci-dessous. La succession de ces types se fait sur un axe piedmont-plaine.

« Gravel-bed braided with sediments gravity flow deposits» : Rivières en tresses à galets/graviers avec écoulements gravitaires (Figure 15).

Ces cours d'eau à très forte énergie sont situés en domaine hyper-proximal et forment souvent la couverture des cônes alluviaux. Les éléments SG sont dus aux déstabilisations du cône suite à des

phénomènes météorologiques ou tectoniques et leur proportion peut être variable mais reste généralement majoritaire. Dans les exemples contemporains, les coulées de débris flows, peu érosives, sont incisées et leur matériel remanié par les chenaux du cône GB. Dans certaines conditions, il est possible de conserver des bancs sableux SB.

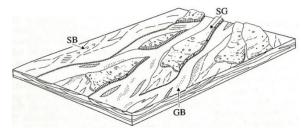


Figure 15 : Gravel-bed braided with sediments gravity flow Rivers (Miall, 1996).

« Shallow, gravel-bed braided rivers »: Rivières en tresses à galets/graviers peu profondes (Figure 16).

Ce type fluvial se met en place dans la périphérie du cône alluvial. On retrouve quelques rares éléments SG et l'ensemble reste majoritairement dominé par une tendance tractive avec des éléments

GB très érosifs les uns sur les autres, témoignant d'une énergie très importante pour des profondeurs d'incisons métriques. On retrouve très rarement les éléments SB se déposant au toit de chenaux abandonnés. La préservation des dépôts de crue peut être rendue possible par de forts taux de subsidence.

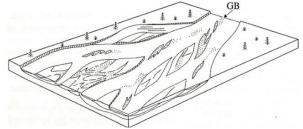


Figure 16: Shallow, gravel-bed braided Rivers (Miall, 1996).

« Deep, gravel-bed braided rivers » : Rivières en tresses à galets/graviers profondes (Figure 17).

Les rivières en tresses profondes sont similaires à celles peu profondes, mais se différencient par une énergie plus faible permettant la préservation de particules plus fines (SB, DA, et quelques fois

FF) tout en restant toujours dominées par les éléments grossiers GB. L'environnement reste proximal mais permet l'accumulation de plusieurs mètres de plaine alluviale. Les incisons sont puissantes pouvant atteindre plusieurs mètres de profondeur. Les tresses de ces cours d'eau peuvent être constamment utilisées par la rivière, occasionnellement lors de crues, semivégétalisées ou enfin complètement végétalisées.

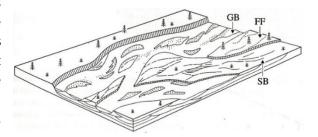


Figure 17 : Deep, gravel-bed braided Rivers (Miall, 1996).

« Gravel-bed wandering rivers »: Rivières en tresses-méandriformes à galets/graviers (Figure 18).

Lorsque l'on s'éloigne encore du piedmont, et que la pente permet une dynamique d'accrétion ale, typique des systèmes méandriformes, les

latérale, typique des systèmes méandriformes, les systèmes de « wandering rivers » se mettent en place. Il s'agit de rivières similaires à celles précédemment décrites mais dont les phénomènes d'accrétion latérale, LA, sont dominants. Généralement composées de quelques bras, elles gardent une sinuosité marquée les différenciant des rivières en tresses.

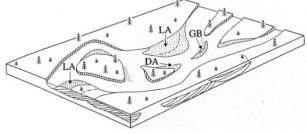


Figure 18: Gravel-bed Wandering Rivers (Miall, 1996).

« Deep, perennial, sand-bed braided rivers »: Rivières pérennes en tresses sableuses (Figure 19).

Ce type de cours, peu énergétique, se met en place en zone distale du piedmont. La sédimentation s'y fait essentiellement par accrétion (LA, DA) sous forme de barres sableuses. La topographie quasi-plane ainsi que les faibles énergies d'écoulement permettent un étalement de la rivière qui peut atteindre des largeurs de plusieurs centaines de mètres pour des profondeurs de l'ordre de quelques mètres.

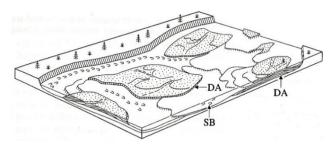


Figure 19 : Deep, perennial, sand-bed braided Rivers (Miall,

« Distal, Sheetflood, sand-bed rivers » : Rivières distales par ruissèlement en nappe (Figure 20).

Dans les parties distales des systèmes fluviatiles en tresses, des systèmes en « sheetflood » ou

ruissèlement en nappe se mettent en place, favorisés par un climat semi-aride. La sédimentation se fait par étalement tabulaire, faiblement érosif, de matériaux sableux (SB) pouvant atteindre le mètre. Au niveau de l'affleurement, on retrouve des lithofaciès variés (Sh, Sp, St) ainsi que des litages de graviers (Gci) constituant des couches tabulaires de puissance métrique.

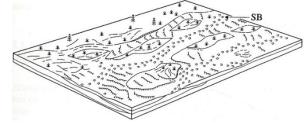


Figure 20 : Distal, Sheetflood, sand-bed rivers (Miall, 1996).

Synthèse proximal/distal

Cette synthèse permet de reprendre les styles fluviatiles énoncés plus tôt sur un transect proximal/distal (Figure 21).

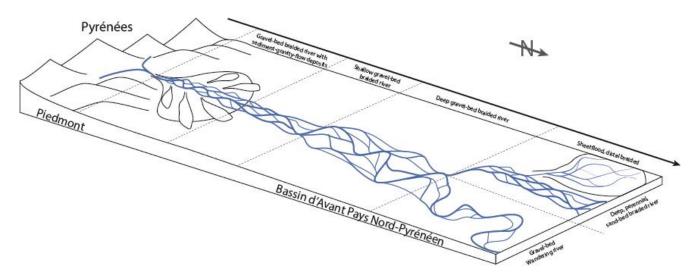


Figure 21 : Modèle d'évolution des systèmes fluviatiles sur un axe Proximal-Distal dans la région de Saint-Martin-des-Puits en se basant sur la classification de Miall.

4. Difficultés & Solutions.

Difficultés bibliographiques

Les difficultés d'application d'une telle méthode sont assez moindres. Cependant, le principal problème que j'ai rencontré réside en la multitude de versions et de corrections de la classification, si bien que trop souvent les rapports scientifiques utilisant cette méthode mélangent les versions et les codes des lithofaciès et éléments architecturaux. Afin de passer outre le problème d'unicité de la classification, je me suis basé sur l'ouvrage de Miall *The Geology of Fluvial Deposits, Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology*, et je l'ai clairement précisé dans le rapport pour qu'un lecteur puisse s'y référer.

Difficultés de connaissances

Les lithofaciès sont très bien décrits par Miall mais trop peu illustrés. Il s'agit là d'un problème lié à l'utilisation directe de la classification de Miall sur le terrain puisqu'il est question de caractériser les affleurements via cette méthode. L'expertise stratigraphique et sédimentologique d'Éric Lasseur m'a été précieuse pour bien comprendre à quoi correspondaient les différents éléments de Miall. Je me suis aussi appuyé sur des cours de stratigraphie et sédimentologie continentale pour améliorer rapidement mes compétences en termes d'identification de ces objets stratigraphiques.

Difficultés de terrain

La caractérisation de faciès se fait essentiellement sur le terrain, du moins pour les lithofaciès. De nombreuses « difficultés de terrain » s'interposent souvent entre l'observateur et la roche : végétalisation des affleurements, présence de lichen et failles calcifiées masquant les poudingues, non

accessibilité de l'affleurement, impossibilité de prendre du recul ... Pour passer outre ces embûches il est possible de suivre certains affleurements latéralement si leur évolution latérale reste négligeable.

Difficultés relatives aux formations continentales

Les formations sédimentaires continentales sont bien plus complexes que les formations marines. Elles sont bien plus hétérogènes et varient, presque toutes, très rapidement latéralement. Il est donc très difficile de suivre des bancs de poudingue car ils ne s'étendent pas dans l'espace, pourtant cela est indispensable afin d'avoir des niveaux repères sur lesquels raccorder les données. Afin de pouvoir corréler les différents logs, dans les gorges de l'Orbieu, un banc a pu être suivi du Sud au Nord et dans la région de Chalabre, je me suis basé sur les observations et corrélations de Crochet en utilisant un banc calcaire.

Difficultés relatives aux corrélations 3D des logs

Au cours de ce projet de recherche, j'ai été amené à corréler plusieurs logs entre eux. Comme il est expliqué dans le paragraphe précédent, les formations continentales sont très hétérogènes et donc, les corrélations ne peuvent s'appuyer seulement sur des similarités de faciès (argile, sable, conglomérat). Pour surmonter cette difficulté, il faut extraire des données, d'autres paramètres beaucoup plus généraux tels que les paramètres de Miall (lithofaciès, éléments architecturaux, modèles de dépôts) ou les tendances progradantes et/ou rétrogradantes. Mon travail consistait donc en la détermination de ces paramètres, puis en la corrélation des séries de Palassou.

C. Granulométrie

1. Objectifs et procédure

Objectifs

L'étude de la granulométrie de plusieurs affleurements sur un transect proximal-distal permet de définir une certaine distance à la source en fonction de la proportion de matériaux plus ou moins grossiers. L'étude granulométrique s'est basée sur la méthode développée par Wittaker (2011) qui a pour objectif de quantifier les notions d'environnement proximal et distal afin de la comparer aux modèles des systèmes fluviatiles définis à partir des affleurements.

Procédure

Sélection des données

Afin de mener une étude granulométrique il faut dans un premier temps sélectionner un banc plus ou moins continu. Puis, choisir des stands ou stations de comptage sur le banc, espacées d'un kilomètre environ. Sur chaque station de comptage, une ou plusieurs surfaces de 1m x 1m ont été sélectionnées dans le niveau le plus énergétique (gros galets). La sélection de la surface doit cependant respecter un certain nombre de critères (accessibilité, netteté, visibilité totale d'un m², puissance...).

Comptage

La phase de comptage consiste en la mesure du plus grand diamètre des clastes (les clastes, généralement de forme patatoïde, possèdent donc un petit diamètre et un grand, c'est le second qui nous intéresse), Wittaker propose de sélectionner ces galets aléatoirement. Il n'est cependant pas statistiquement admissible de réaliser cette sélection aléatoire la taille d'un galet et le « tir aléatoire » sont des variables aléatoires dépendantes l'une de l'autre : plus le galet est gros, plus il a de chances de se faire sélectionner. Afin de passer outre cette subtilité statistique, notre comptage consiste en la mesure du diamètre de l'ensemble des galets identifiables sur la photographie.

<u>Détermination des fractiles</u>

A partir d'un jeu de données contenant les plus grands diamètres des clastes d'un stand granulométrique, on peut déterminer le D50 et le D84 correspondant aux fractiles 50% et 84% identifiables à partir de la courbe cumulative. Pour cela, j'ai programmé un code Scilab permettant l'affichage et le calcul des fractiles.

Elaboration d'un Modèle

L'actuel Orbieu sert de modèle à notre étude. Les relevés granulométriques ont été calés sur le profil topographique et morphologique du cours d'eau. Bien que les paramètres régissant ce modèle diffèrent forcément de ceux des cours d'eaux Eocènes, nous faisons l'hypothèse que ceux-ci autorisent tout de même cette approximation. Le système de l'Orbieu est régi par des paramètres peu éloignés de ceux de l'Eocène :

- La pente et la morphologie du milieu. Dans le contexte actuel, la chaine pyrénéenne possède une altitude moyenne comprise entre 1500 et 2000 m, similaire à celle de l'Eocène atteignant 2000 m (*Crochet*, 1991).
- La longueur des cours d'eaux. L'Orbieu s'étend sur 83 km tandis que ceux de l'Eocène ne dépassaient pas la centaine de kilomètres (*Plaziat*, 1987).

2. Statistiques

Données brutes - Interpolation

Afin de pouvoir mesurer au mieux les fractiles émanant des données brutes, nous avons utilisé une interpolation selon la méthode du spline cubique. Cette méthode s'est faite à partir des fonctions de Scilab.

L'erreur sur les données brutes est considérée étant égale à 15% de la valeur de la donnée si la granulométrie a été mesurée à partir de photographies et de 10% si elle a été mesurée sur l'affleurement (*Wittaker, 2011*). Dans notre cas, nous comptons une incertitude de 15% puisque toutes les mesures se sont faites via des photographies.

Données simulées - Simulations

Adéquation à la loi Normale

Afin de procéder à des simulations, basées sur la loi Normale, il est important de tester si les jeux de données sont régis, d'un point de vue statistique, par la loi Normale. Le test de Lilliefors a été une fois de plus utilisé, car les jeux de données possédaient plus de 50 valeurs. Toutes les données se sont révélées en adéquation avec la loi Normale pour un risque d'échec de 5%. Ce test a été programmé en langage Scilab et fait partie d'un programme comprenant toute l'étude des simulations disponible en annexes de ce rapport.

<u>Utilisation de Simulations</u>

Dans cette étude, nous avons utilisé des simulations statistiques de loi Normale basées sur la méthode de Bow-Muller. Les simulations permettent de s'affranchir de plusieurs erreurs des données et possèdent ainsi les nombreux avantages suivants :

- Marginalisation de l'erreur liée à la mesure des galets.
- Minimisation de la surreprésentation de gros galets imputable au choix non aléatoire de la parcelle à étudier.
- Lissage de la courbe de données brutes afin de passer de données discrètes (résolution de 1 cm) à des données continues.
- Possibilité de travailler sur des grandes séries à partir de peu de données, réduisant les erreurs imputables au comptage et permettant un gain de temps.

Les simulations sont basées sur la méthode de Bow-Muller permettant la génération d'une variable aléatoire X suivant une loi Normale de paramètres μ et σ (moyenne et écart type) calculés à partir des données brutes : $X \sim N(\mu, \sigma)$. Un jeu de données X_i ainsi généré, se comporte comme s'il avait été obtenu sur un affleurement, mais dénué des données entachées d'erreurs sélectionnées par la main de l'homme.

Dans notre étude, nous nous basons sur la simulation de 500 jeux de données, chacun comprenant autant de données que l'échantillon original. Le choix du nombre de simulations s'est fait en considérant, d'une part, les temps de calculs et, d'autre part, la minimisation de l'erreur (Tableau III). Les 500 simulations sont ensuite moyennées pour obtenir une tendance globale. Les incertitudes de la moyenne des 500 simulations sont calculées à partir de l'écart type global de toutes les simulations. Le résultat final est assez différent des données brutes. Les principaux paramètres étant à l'origine de cette disparité sont :

- La surreprésentation des gros clastes lors de la sélection des zones à étudier et lors du comptage (prise en compte des contre-empreintes).
- Le choix d'une modélisation par la loi Normale est justifié avec une erreur de 5%, mais n'est pas parfaitement représentative des tendances mises en valeur par les données brutes.
- Le faible nombre de mesures sur certains jeux de données, ne pouvant pas être amélioré en raison de mauvaises conditions d'affleurement et météorologiques dégradant la qualité des photographies.
- La génération de données négatives « aberrantes » par la loi Normale. Nous avons choisi de garder ces données afin de ne pas modifier le comportement de la simulation. En effet, si on impose une génération de données positives, on force l'augmentation de la moyenne et on fausse donc la simulation.

Tableau III : Variations du temps de calcul et de l'incertitude sur les fractiles en fonction du nombre de simulations générées. Données à partir de l'échantillon F11.

Nombre de simulations	Temps de calcul (s)	Valeur des Fractiles (cm)		
Nombre de simulations		D50	D84	
100	3	8.6 ± 1.1	12 ± 1.5	
200	6	8.6 ± 0.96	12 ± 1.2	
500	18	8.7 ± 0.77	12 ± 1.1	
1000	61	8.6 ± 0.75	12 ± 1.0	

3. Programmation

Un script Scilab a été programmé permettant le traitement des 41 jeux de données granulométriques, pour un total de 3946 galets mesurés (Annexe I). Ce script permet l'affichage graphique des données (Figure 22)

Présentation du Programme

Un script Scilab a été élaboré afin de traiter les données, le logigramme présente l'enchainement de ces opérations (Figure 23). L'utilisateur doit dans un premier temps générer un fichier contennant l'ensemble des données. En lançant le script, il doit renseigner le nom du fichier texte et le nombre de simulations (déjà paramétré à 500). Le programme génère après un test d'adéquation à la Loi Normale les simulations à partir des données brutes, les interpolations sur les données brutes et enfin affiche le graphique et l'exporte au format PDF.

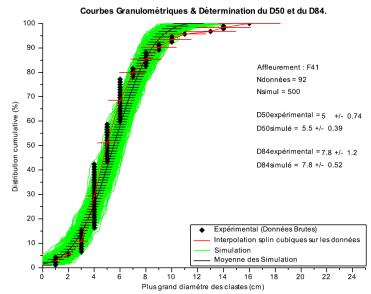


Figure 22 : Affichage graphique réalisé par le script Scilab. Exemple du stand

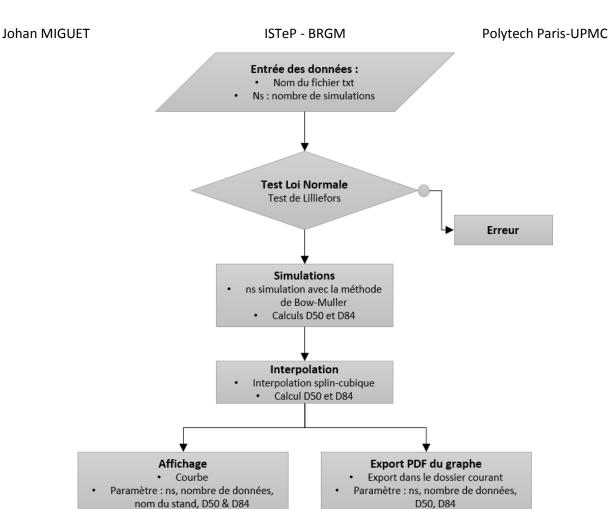


Figure 23 : Logigramme du script scilab de traitement des données granulométriques.

4. Difficultés & Solutions

Difficultés de Terrain

Une interprétation n'est valable que quand le traitement des données l'est et le traitement n'est valable que quand la donnée brute est bien mesurée. La donnée est donc la base de tout travail, et c'est sur le terrain que s'acquière ces données. Plusieurs difficultés de terrain se sont révélées dans les Corbières et vers Chalabre, en particulier la difficulté de suivre les bancs, mais aussi, trouver ces bancs dans le paysage sans se tromper et échantillonner les bancs supérieurs ou inférieurs. Ces contraintes sont relatives aux formations continentales très hétérogènes et variant très rapidement. Pour pallier à ces difficultés, j'ai procédé, en amont à un repérage des bancs sur cartes géologiques, topographiques et orthophotographiques, puis en aval à l'utilisation des trois types de données sur GPS. Les bancs étaient d'abord repérés, puis les stands de comptage étaient géolocalisés théoriquement (affleurements visibles en orthophotographie, mais dont l'accessibilité n'était pas garantie) et enfin les stands étaient effectivement géolocalisés lorsque l'affleurement avait été échantillonné.

Difficultés de comptage

L'étape de comptage permet de définir les jeux de données desquels sont extraits les fractiles. La qualité et le respect de la réalité de ces jeux de données sont essentiels. Cependant, comme il a été précisé plus tôt, les comptages se font sur photographie et la résolution est centimétrique : les galets

inférieurs au centimètre ne sont donc pas pris en compte. D'autre part, les photographies n'étant pas perpendiculaires à la surface, pour des raisons de faisabilité compte tenu du terrain, l'image du cadre de 1 m² est déformée, de même que l'échelle, rendant plus difficile le comptage. Pour remédier aux problèmes de résolution et de respect de la validité des données nous avons dans un premier temps utilisé des tests statistiques et des simulations afin de définir nos fractiles, puis préféré utiliser le D84 pour nos interprétations avec le modèle de l'Orbieu.

Statistiques et Simulations

Les données « oubliées », inférieures au centimètre, n'ont pas étés prises en compte lors du comptage. Il est néanmoins possible de quantifier les oublis en modélisant la répartition expérimentale à partir d'un modèle théorique, ici la Loi Normale. Après avoir vérifié la bonne adéquation à la Loi Normale, j'ai procédé au calcul de simulations de données afin de faire apparaître les galets oubliés, en supposant que leur répartition suivait bien la Loi Normale.

Utilisation préférentielle du D84 : Problématique

Chaque stand d'étude permet de déterminer de façon expérimentale le D50 et le D84 via un comptage sur photographie, mais entachée d'erreur en raison des données « oubliées ». Il se trouve que ces erreurs sont plus faibles pour un grand fractile que pour un petit car celui-ci est d'autant plus influencé qu'il est petit puisque proche des données « oubliées ». Utiliser le D84 permet donc de moins subir l'influence de la perte de données par manque de résolution.

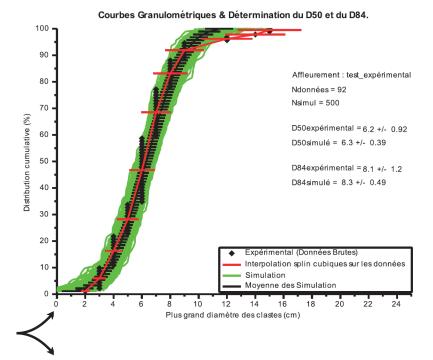
Utilisation préférentielle du D84 : Démonstration théorique

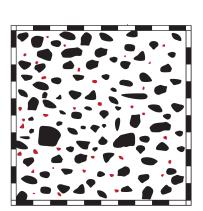
Afin de quantifier les écarts que peuvent produire de tels « oublis », considérons un affleurement fictif de 1mx1m (Figure 24) sur lequel les galets noirs sont pris en compte par le compteur tandis que les rouges sont oubliés. Si l'on compare les courbes expérimentales (gauche) et théoriques (droite), on remarque qu'elles sont relativement similaires pour des diamètres importants tandis qu'elles diffèrent pour les faibles diamètres à cause des « oublis ». Cette tendance s'observe via les écarts entre les D50 et D84 des deux échantillons (Tableau IV). Les différences sur l'estimation du D84 sont en moyenne de 0.6 cm tandis que celles du D50 sont près de deux fois plus importantes : 1.1 cm. L'utilisation du D84 par rapport celle du D50, permet donc de minimiser les erreurs de comptage.

Tableau IV : Différences entre l'étude expérimentale (omission des petits galets) et l'étude théorique (prise en compte de tous les petits galets) présentées dans la figure 24.

	Obtenu à partir des données	Obtenu via simulation	Moyenne
ΔD50	1.0	1.2	1.1
ΔD84	0.4	0.8	0.6

Résultats Expérimentaux (omission des petits galets rouges)





Résultats Théoriques (prise en comptes des petits galets rouges)

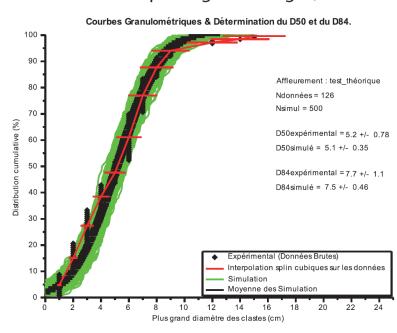


Figure 24 : Exemple théorique permettant de mettre en valeur l'importance des petits galets (diamètre inférieur au centimètre) et l'impact sur les mesures théoriques.

III. RÉSULTATS

A. Résultats de l'Etude

Cette partie s'inscrit dans la continuité de la partie II, et présente donc les résultats des études stratigraphiques et granulométriques. Cependant, je ne souhaite pas présenter tous mes résultats afin de ne pas noyer le lecteur sous trop d'informations. C'est pourquoi cette partie se concentre sur les gorges de l'Orbieu, les questions relatives à la région Chalabraise ne seront ni évoquées ni présentées.

1. Caractérisation des faciès

Localisation des logs

Le log des séries de Palassou (Figure 26) dans les gorges de l'Orbieu résulte de la corrélation de plusieurs segments de logs numérotés de A à I (Figure 25).

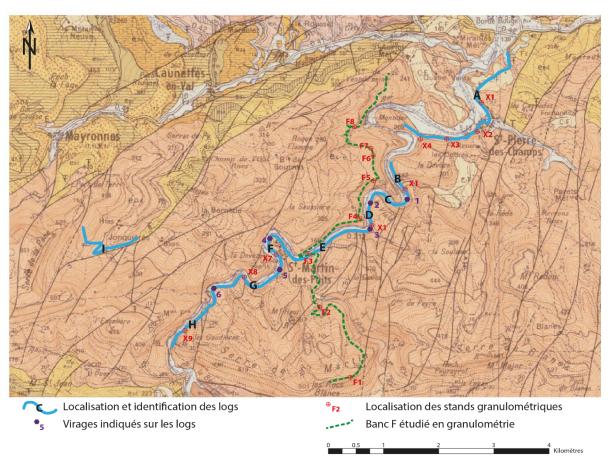


Figure 25: Localisation des logs et des stands granulométriques géolocalisés sur carte géologique. A : Région de l'Orbieu (carte géologique de Capendu). Légende : Rose-saumon : e_{4-6} : Cuisien-Lutétien-Bartonien, molasse de Carcassonne ; Jaune clair : $e_{3b} - e_{3c} - e_{3d}$: Ilerdien inf. — moy. — sup., calcaire, marnes et grès marins ; Orange : e_{3a} : Sparnacien inférieur, calcaires lacustres ; Mauve : $e_{2a} - e_{2b}$: Thanétien, calcaires et limons.

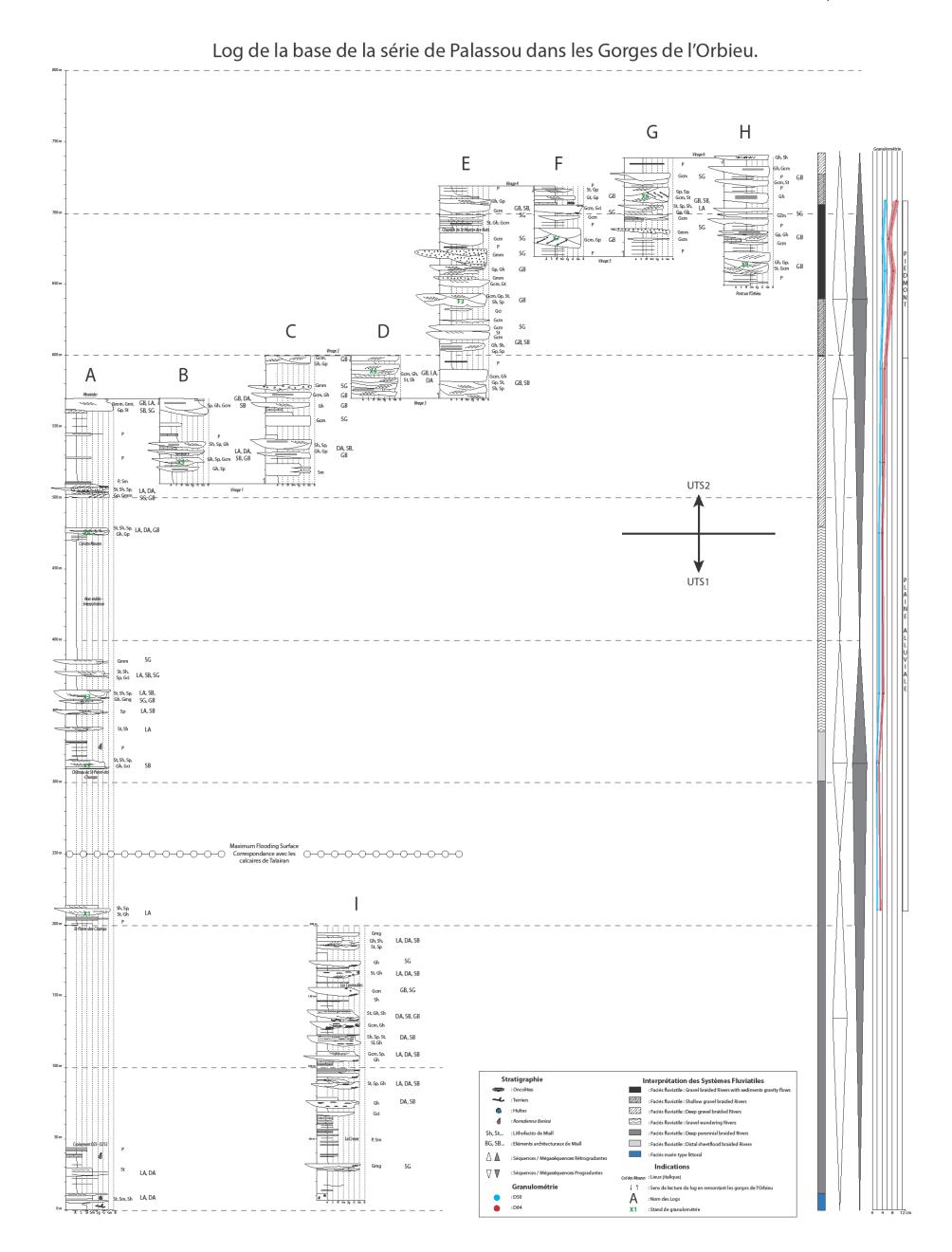


Figure 26: Log des séries de Palassou dans les gorges de l'Orbieu. A: Argile; S = Silt; Sf: Sable fin; Sm: Sable moyen; Sg: Sable Grossier; G: Graviers; Ga: Galets; B: Blocs. Les logs sont numérotés de A à I selon leur localisation (cf. Figure 25).

Description et tendances générales : log synthétique (Figure 27)

On remarque dans un premier temps une tendance globale progradante sur près de 700 m, suivie d'un début de rétrogradation. Ces deux mégaséquences se manifestent via l'évolution distale/proximale des différents systèmes fluviatiles identifiés suivant la classification de Miall, de la reconnaissance de coulées gravitaires de type debris-flows de plus en plus nombreuses et de la géométrie de type cône alluvial que l'on peut remarquer autour du banc F.

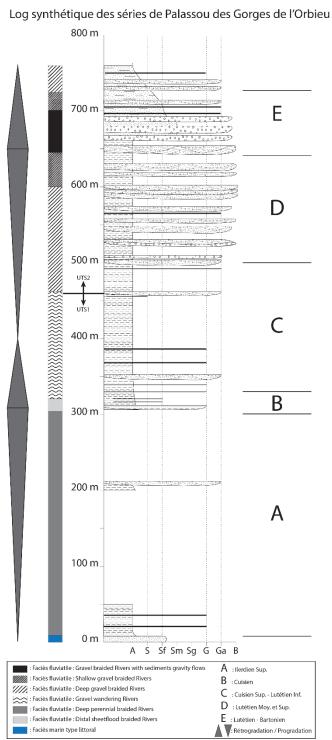


Figure 27 : Log synthétiques des gorges de l'Orbieu, obtenu à partir du log de la Figure 26. Les phases A, B, C, D et E correspondes aux interprétations paléoenvironnementale de la Figure 30.

Rapport de TFE 2014-2015

Description détaillée

La description qui suit fait référence aux figures 26 et 27.

0 – 10 m - Faciès marin type littoral

Les 10 premiers mètres de la série se situent clairement dans l'environnement marin e_{3d} (carte géologique de Capendu) de type littoral composé de grès marneux et de marnes, tous deux de couleur grise, typique des environnements marins llerdiens (*Crochet, 1991*). Quelques fossiles permettent la confirmation du milieu marin, identifiés comme *Exogyra Aversa*, *Limotpsis Altera* et *Tympanotonus Corbaricus* en s'appuyant sur des données biostratigraphiques (*Plaziat, 1984 & Tambareau, 1972*). Le milieu de dépôt de ces sédiments est clairement littoral : prélittoral pour les faciès gréseux ou sablovaseux, infralittoral et circalittoral dans lesquels on retrouve des nummulites et mollusques.

A la base du segment A se mettent en place progressivement des intercalations conglomératiques fluviatiles à faible centile entre les grès à huîtres marneux marins dans lesquels on retrouve quelques fragments de coquilles.

Des relevés biostratigraphiques de foraminifères ont été appliqués à la série e_{3d} (*Plaziat, 1984*). La présence d'*Alveolina Corbarica* entre Coustouge et Jonquières indique le niveau SBZ8, correspondant à l'Ilerdien supérieur (*Miguet, 2014*), et au début du Cuisien (*Ellenberger, feuille de Capendu*).

<u>10 – 300 m - Faciès Deep perenial braided rivers</u>

Succède aux assises marines un faciès clairement fluviatile de type tresses distales, composé majoritairement de sables et graviers (les galets sont rares sur le segment A et plus fréquents sur le segment I, mais ne dépassent pas 5 cm de diamètre). Les plaines alluviales marneuses représentent près de 93 % de la série.

On retrouve des mégarides aux assemblages de lithofaciès fins Sh, Sp, St, Sl, Gh et la base des chenaux reste caillouteuse, surtout sur le segment I : Gmg, Gci, Gcm. L'assemblage des lithofaciès donne des éléments architecturaux témoins d'une dynamique peu énergétique et distale : LA, DA, SB, et on retrouve, de temps en temps, à la base de chenaux les éléments GB et SG.

Le Maximum Flood Surface (MFS) a été déterminé à 250m à partir de données paléogéographiques (*Plaziat, 1984*). Dans la région de Talairan, plus à l'Est on retrouve des calcaires lacustres témoins d'un grand système lacustre que nous apparentons à la MFS. Bien que Crochet place ces calcaires dans l'UTS2, nous considérons que le début de leur mise en place commence dans l'UTS1 pour les raisons suivantes : (1) un système lacustre existait déjà au Cuisien, puis s'est développé au Lutétien (*Plaziat, 1981*) ; (2) au Bartonien la région était dominée par des conglomérats de plus en plus massifs (*Plaziat, 1984*) ; ils correspondent à MFS repéré au Nord de Saint-Pierre-des-Champs.

300 – 340 m - Faciès Distal sheetflood braided rivers

A la sortie de village de Saint-Pierre-des-Champs la falaise située sous le château constitue la majorité de ce facies. Les horizons sont très plats, peu érosifs, de pendage quasi nul et l'épaisseur de ces couches semble constante. De grandes mégarides planes et obliques sont observables entre plusieurs bancs graveleux avec des granoclassements inverses.

L'assemblage des lithofaciès St, Sh, Sp, Gh et Gci tend vers une dynamique de LA. La structure très plane des sédiments, les granoclassements inverses ainsi que l'architecture en LA font penser à des épandages massifs distaux dans lesquels quelques mégarides peuvent se former et favorisant les granoclassements inverses. Cet objet géologique est donc interprété comme un cône alluvial de petite

taille situé à la sortie d'un canyon (dynamique érosive) dans une plaine (dynamique de dépôts et d'épandage).

<u>340 – 480 m Faciès Gravel wandering rivers</u>

Entre Saint-Pierre-des-Champs et le Col des Maures, plusieurs affleurements montrent une dynamique fluviale plus énergétique. Les galets sont de plus en plus fréquents et les incisions sont de plus en plus importantes. Des dynamiques divergentes sont clairement visibles à 360 et 480 m. Au niveau du Col de Maures, les affleurements présentent clairement des caractéristiques divergentes et des géométries d'accrétion latérale. Les plaines alluviales marneuses sont toujours majoritaires, représentant 87% de la série.

On retrouve des lithofaciès sableux mais de moins en moins nombreux laissant progressivement la place aux lithofaciès graveleux ou à galets : St, Sh, Sp, Gh, Gp et rarement et très localisés : Gmg, Gci, Gmm. L'assemblage structural donne des dynamiques plus proximales et avec une énergie capable de mettre en place des barres de galets et quelques debris-flows : SB, LA, DA, GB, SG. Les dynamiques divergentes ainsi que les éléments architecturaux permettent de conclure sur un environnement de type « gravel wandering river ».

480 – 600 m - Faciès Deep gravel braided rivers

A partir du Col des Maures la dynamique s'accentue, les matériaux détritiques sont de plus en plus grossiers. Les diamètres de certains galets dépassent 10 cm et des imbrications sont identifiables et permettent de mesurer des paléocourants. En se rapprochant de la source, les bancs sont de plus en plus puissants (segment D) et les plaines alluviales de moins en moins importantes représentant environ 40 % de la série.

Les lithofaciès sont composés presque essentiellement de galets et les particules plus fines occupent le toit de chenaux abandonnés. Prédominent les faciès : Gh et Gp ; puis viennent : Gmg, Gmi, Gmm et enfin Sh, Sp, St, Sm. Par assemblage les éléments architecturaux s'organisent principalement en barres de graviers : GB, SG, LA, DA, SB.

600 – 650 m - Faciès Shallow gravel braided rivers

Un milieu de dépôts super énergétique s'en suit. Caractérisé par des incisions de plusieurs mètres très bien observables au niveau de la confluence du Libre et de l'Orbieu (falaise F sur le segment E). L'apogée de la progradation des cônes alluviaux se situe au niveau de cette falaise. Ce banc est interprété comme le chenal distributaire du cône alluvial : extrêmement érosif, passant latéralement au debris-flow et succédé par des ensembles de coulées gravitaires. Les galets prédominent évidemment sur tous les autres clastes et sont agencés en barres. Les marnes de plaines d'inondation représentent moins de 40 % de la série.

Les lithofaciès majoritaires sont GP, Gh, Gcm, Gmm, et Gci, cependant on retrouve quelques bancs sableux intercalés : Sh et St témoignant de grandes vitesses d'écoulement.

<u>650 – 710 m - Faciès Gravel braided rivers with sediments gravity flows</u>

Les affleurements succédant le banc F sont hyper proximaux car situés dans le cône. Ils se raccordent en termes de bancs aux falaises de la Côte Fougasse observables depuis Montidier à l'Ouest de Saint-Pierre-des-Champs et présentant des structures en lobe typique des cônes alluviaux. Des paléosols bien construits remplacent les plaines alluviales marneuses mais ne représentent que 30 % de la série.

Les lithofaciès sont majoritairement imputables aux debris-flows : Gcm, Gmm, mais on retrouve des faciès remaniés par les cours d'eaux traversant le cône : Gp, Gt, Gh, Sh, Sp, St. Les faciès fluviatiles Gt et St témoignent de très grandes vitesses de mise en place.

710 – 730 m - Faciès Shallow gravel braided rivers

Suite à l'évènement hyper proximal, des faciès plus calmes se mettent en place, témoins de la rétrogradation. Les plaines alluviales sont de plus en plus fréquentes atteignant plus de 66 %.

Les lithofaciès s'organisent en Gt, Gp, Gh, Gcm pour la partie grossière et en Sh, Sp, St, P pour les parties les plus fines. Leur assemblage donne majoritairement : GB et SG avec quelques SB et LA au toit des formations.

730 – 740+ m - Faciès Deep gravel braided rivers

Les derniers mètres sont de plus en plus marneux (75 %) et les barres de graviers (GB) dominent les faciès non marneux représentés par les lithofaciès Gh, Gcm et Sh. La série affleure très mal après le pont, c'est pourquoi le toit du log se limite au pont sur l'Orbieu.

2. Granulométrie

Le Modèle de l'Orbieu

L'actuel Orbieu a été pris comme modèle permettant, en considérant que les paramètres régissant les systèmes Eocène et actuel sont les mêmes (subsidence, pente, taux d'érosion, dimensions des cours d'eau ...), de caler les données des autres transects. Ce cours d'eau prend sa source à Fourtou dans la partie Sud du Mouthoumet, puis traverse ce massif primaire en creusant de profondes gorges se terminant à Ribaute après être passé par les séries tertiaires. A la sortie des gorges, l'Orbieu continue son cours dans sa plaine alluviale et rejoint l'Aude à l'Est de Lézignan-Corbières.

Les données topographiques permettent de définir trois domaines (Figure 27) :

- Le domaine montagneux caractérisé par de fortes pentes (5%). Le cours d'eau a une dynamique érosive, creusant la vallée. Ce domaine n'est pas atteint par notre étude mais les valeurs du D50 et du D84 doivent dépasser respectivement 10 et 18 cm.
- Le domaine du piedmont caractérisé par des pentes plus faibles (>1%). Le cours d'eau creuse dans les collines du piedmont surélevé des gorges profondes. Dans ce domaine, le D50 est compris entre 4 et 10 et le D84 entre 6 et 18 cm.
- Le domaine de la plaine alluviale est caractérisé par des pentes très faibles (0.1%). La rivière dépose les sédiments charriés en formant des terrasses alluviales. Ce domaine n'est presque pas atteint par notre étude, cependant, les valeurs du D50 et du D84 doivent être inférieures à respectivement 4 et 6 cm.

Les données granulométriques décroissent rapidement en s'éloignant de la source. On constate une remontée soudaine des deux fractiles à 30 km. Le stand granulométrique concerné se situe en amont de la retenue de Saint-Pierre-des-Champs. Les galets déposés ici sont donc sous influence du barrage, lorsque celui-ci déborde l'énergie de transport est supérieure à celle attendue car elle bénéficie d'une pente bien plus importante, d'où les valeurs élevées des fractiles.

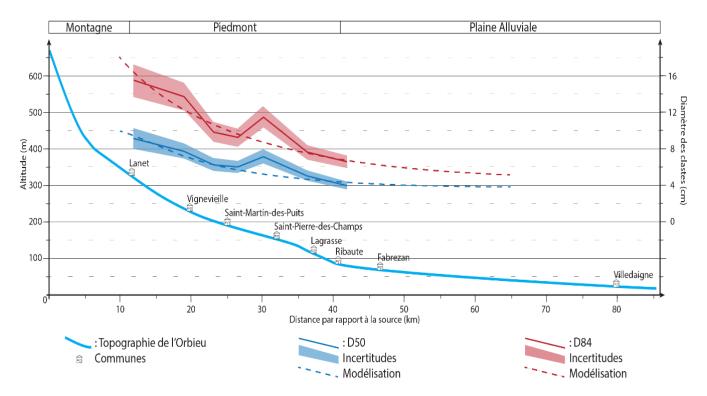


Figure 28 : Evolution topographique, granulométrique et morphologique de l'Orbieu actuel.

Utilisation du modèle pour définir les environnements de dépôts

Utilisation du modèle

Le modèle a permis de définir les environnements de dépôts des séries du log des gorges de l'Orbieu grâce à des relevés de mesure sur le log (Figure 25). La détermination du couple D84 et D50 sur un affleurement du log permet, en utilisant le modèle (Figure 28), de déterminer une distance à la source ainsi qu'un milieu de dépôt : montagne, piedmont ou plaine alluviale. Une modélisation a donc été menée et est présentée sur la Figure 26.

Interprétation

L'interprétation des données granulométriques de 9 affleurements entre Saint-Pierre-des-Champs et le Pont sur l'Orbieu après Saint-Martin-des-Puits (Figure 25, stands X1 à X9) donne deux morphologies de dépôts : la plaine alluviale et le piedmont :

- 0 600 m : Morphologie de Plaine alluviale. Les fractiles sont généralement compris entre 2 et 4 cm pour le D50 et entre 3 et 5 cm pour le D84.
- 600 750 m : Morphologie de Piedmont. Les fractiles sont bien plus importants témoignant d'une plus grande proximité de la chaîne et de pentes plus raides. Le D50 est compris entre 6 et 8 cm tandis que le D84 se situe entre 6 et 10 cm.

Ces résultats mettent en avant l'avancée de la déformation et donc de la proximalisation de la chaîne pyrénéenne. On retrouve la même dynamique que celle mise en exergue par les études stratigraphiques de l'avancée des cônes alluviaux.

Utilisation du modèle pour l'étude d'un transect Sud-Nord

Résultats

L'évolution granulométrique sur le banc F sur un transect orienté Sud-Nord (N005) a été obtenu entre la Serre de Saint Martin au Sud de Saint-Martin-des-Puits et la Côte Fougasse à l'Ouest de Saint-Pierre-des-Champs (Figure 25). Au total, 8 stations de comptages ont été mises en place numérotées de F1 à F8 sur ce transect de 4 km. En suivant le banc, on trouve en plus des faciès typiques des « Shallow gravel braided rivers », des coulées gravitaires caractérisées par des lithofaciès Gmm et Gci comme il a été expliqué précédemment. Deux tendances peuvent être mises en valeur par la répartition des fractiles en fonction de la distance par rapport au point le plus proximal (Figure 29):

- de 0 à 3500 m : décroissance du D50 et du D84. Cette décroissance est liée à l'éloignement progressif par rapport à la source. Les 5 premiers stands correspondent à une morphologie de type piedmont et les distances à la source calculées à partir du modèle de l'Orbieu se répartissent de 25 (premier stand) à 42 km (5ème stand). Il est important de remarquer que l'évolution distale interprétée entre le premier stand et le 5ème est de l'ordre de 20 km tandis que la distance exacte est de 3 km. Ces variations sont dues au modèle de l'Orbieu et à nos hypothèses de similarité, particulièrement aux hypothèses de pentes et de subsidences similaires.
- de 3500 m : signal bruité. Les affleurements sélectionnés se situaient latéralement proches de coulées gravitaires ou de lithofaciès Gcm pouvant s'apparenter à des conglomérats de fond de chenaux ou à des debris-flows. Ces données sont non conformes au cadre de cette étude puisque leur dépôt se fait par des mécanismes différents des dépôts fluviatiles, qu'ils aient été apportés directement par des debrisflows ou qu'ils aient été remaniés par des cours d'eau.

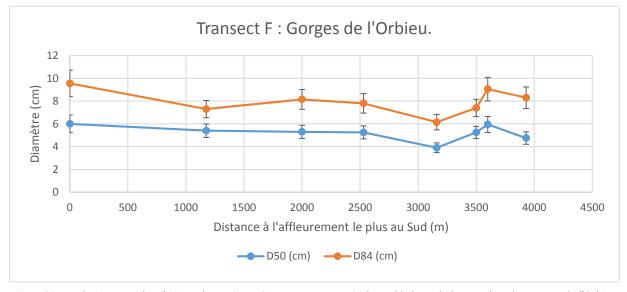


Figure 29 : Evolution granulométrique des D50 et D84 sur un transect Sud-Nord le long du banc F dans les gorges de l'Orbieu. Données obtenues en moyennant les données brutes et simulées.

Interprétation

Seules les 5 premières stations permettent une interprétation morphologique du milieu puisque les autres sont perturbées par les coulées gravitaires avoisinantes. D'un point de vue morphologique, les 5 premiers stands se situent dans le piedmont car le D50 est compris entre 4 et 6 cm et le D84 entre 10 et 6 cm. Cependant, le cinquième stand se situe à l'interface entre le piedmont

et la plaine alluviale (D50 = 4 cm ; D84 = 6 cm). La présence des debris-flows peut indiquer la présence d'un autre cône alluvial dans la région arrivant dans la plaine alluviale et apportant du matériel.

B. <u>Interprétations Scientifiques</u>

L'interprétation géologique croise les données des Corbières et de la région de Chalabre pour définir des tendances régionales de progradation et rétrogradation.

1. Phases de Progradation à l'échelle du bassin

Au cours de l'UTS1

Dans les Corbières, une première avancée peut être repérée dans l'UTS1 par le cône alluvial de sortie de canyon repéré sous le château de Saint-Pierre-des-Champs. Cette dynamique reste cependant à confirmer par manque de données à l'affleurement dans ce secteur.

En région Chalabraise, nos données et celles d'autres études (*Mondou, XXXX*) dans l'UTS1 sont assez peu précises à cause des « faciès muets » rencontrés. Cependant une avancée de cônes semble aussi se produire.

Cette dynamique progradante peut être reliée à la l'exhumation des massifs de Saint Barthélemy (entre le Crétacé Sup. et le Lutétien Sup.) et des Trois Seigneurs (entre le Crétacé Sup. et le Priabonien Moy.) pour la région de Chalabre (*Withchurch, 2011 in Villard, 2013*) et à celui du Mouthoumet dans les Corbières.

Au cours de l'Ilerdien se produit une perturbation climatique globale : le Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM). Il s'agit d'un évènement climatique de 200 000 ans correspondant à la déstabilisation d'hydrates de méthanes (clathrates) et donc à une augmentation des températures entre 5 et 8 °C il y a environ 55 Ma (*Huygue*, 2010). Cette augmentation soudaine des températures pourrait être favorable à la mise en place de climats plus arides, et aux modes de transports de types flash-floods ou d'oueds mis en évidence par les debris-flows des cônes et évoqués dans la littérature (*Plaziat*, 1984 & Crochet, 1991).

Au cours de l'UTS2

Dans les Corbières, l'ensemble des données stratigraphiques met en exergue une nette avancée des cônes alluviaux vers le Nord entre le Lutétien Sup. et le Bartonien (UTS2) autour de 650 m. Cette avancée se remarque par l'augmentation et la fréquence et de la puissance des coulées gravitaire et la disparition progressive des particules les plus fines dans les séries. Le banc F, est considéré comme le chenal distributaire principal du cône alluvial pour les raisons suivantes : (1) les dépôts sont quasi inexistants et les incisions sont massives : profondes de plusieurs mètres et s'étendent latéralement sur plusieurs dizaines de mètres ; (2) en latéral le banc évolue souvent en debris-flows et on peut repérer des structures en lobes au niveau de la Côte Fougasse, (3) ce banc est suivi par une couverture de debris-flows assez locale interprétée comme les lobes du cône alluvial. Notre interprétation diffère de celle de Plaziat (1987) qui parle de cours d'eaux anastomosés en se basant sur la faible divergence des incisions, mais sans considérer la classification de Miall. L'exploitation de données granulométriques permet aussi d'identifier cette progradation via le changement radical de la morphologie du milieu de dépôt passant de la plaine alluviale au piedmont à partir de 600 m.

La région de Chalabre présente aussi les mêmes observations dans l'UTS2. Les faciès fluviatiles de Miall atteignent rapidement des faciès hyper-proximaux dominés par les coulées gravitaires. La même interprétation d'avancée des cônes s'applique à la région chalabraise, mais dans un contexte tectonique différent car dominé par la déformation en flexure permettant de stocker plus de plaine alluviale que dans les Corbières dont la déformation se propage via des chevauchements.

Dans les deux secteurs, le début de l'UTS2 est marqué par une avancée des cônes alluviaux qui se produit en même temps – entre 150 et 200 m après le début de l'UTS2 – si l'on considère un taux de sédimentation similaire. La datation thermochronologique par traces de fission sur zircon et apatite met en évidence l'exhumation du massif de l'Aston entre le Lutétien Moy. et le Priabonien Sup (Withchurch, 2011 in Villard, 2013). Apparaissent d'ailleurs massivement les clastes hercyniens (granitoïdes et schistes) dans les poudingues de la seconde unité au cours du Lutétien Moy. (23.3%), Sup (39.7%) et du Bartonien Inf. (52.2%) (Villard, 2013). Cet apport témoigne de l'érosion du socle rendu possible par la tectonique d'exhumation de l'Aston, en concordance avec la progradation des cônes alluviaux.

Le début de l'UTS2 est aussi caractérisé par un changement climatique brutal : le Middle Eocene Climatic Optimum (MECO), évènement climatique de 500 000 ans correspondant aussi à la déstabilisation d'hydrates de méthanes augmentant les températures de l'ordre de 4 à 6 °C il y a environ 40 Ma (*Huygue*, 2010). Cette augmentation soudaine des températures pourrait être favorable à la mise en place de climats plus arides, et aux modes de transports de types flash-floods ou d'oueds mis en évidence par les debris-flows des cônes et évoqués dans la littérature (*Plaziat*, 1984 & Crochet, 1991).

Caractère cyclique

Nos conclusions quant aux deux phases de progradation/rétrogradation dans l'UTS1 et l'UTS2 laissent à penser qu'un cycle se met en place correspondant d'une part aux différentes étapes de l'exhumation des massif pyrénéens, mais aussi aux épisodes climatiques favorisant les modes d'écoulements gravitaires. Les cycles sédimentaires sont caractérisés par : (1) un milieu de plaine alluviale marneux et lacustre calme; (2) une arrivée progressive des debris-flows très énergétiques et une augmentation des fractiles ; (3) l'arrêt des coulées gravitaires et le retour des fractions fines. Ils correspondent à des cycles tectoniques de : (1) épaississement de la chaîne favorisant la subsidence et le piégeage des sédiments les plus fins ; (2) épaississement conduisant à la dénudation de la chaîne et aux apports détritiques plus importants ; (3) arrêt de l'épaississement et ralentissement de la dénudation et des apports détritiques légèrement déphasé comme en témoigne les forts fractiles du log des gorges de l'Orbieu.

2. Méthodes & Hypothèses

Bien qu'ayant fait de nombreuses hypothèses quant à l'utilisation d'un modèle actuel dont les paramètres diffèrent des conditions éocènes, la mise en évidence d'une proximalisation de type piedmont par les données granulométriques correspond relativement bien à l'interprétation stratigraphique indiquant une avancée des cônes. Certaines des hypothèses sont donc relativement acceptables (la pente moyenne même avec les perturbations des déformations en piggy-back dans les Corbières, la taille des cours d'eaux et la conservation des lignes de partage des eaux ...). Cependant n'ont pas étés considérés les paramètres de subsidence, de débit d'eau et d'apports sédimentaires. Pour les prendre en compte, il faudrait dans un premier temps procéder à une datation plus précise des séries de Palassou par magnétostratigraphie, car la datation actuelle basée sur les horizons repères

de Crochet ne permet pas un découpage temporel suffisamment précis. Dans cet objectif, le BRGM lancera une thèse en 2016 pour palier à ces lacunes.

3. Implications paléogéographiques dans les Corbières

Ilerdien Sup.

Suite à la régression marine, une sédimentation continentale se met en place à l'Ilerdien. Dans un premier temps, le régime continental est dominé par des plaines alluviales dans lesquelles se stockent des particules fines, puis un réseau en tresses distales se met en place assez transversalement que l'on retrouve sous le Plateau de Lacamp, au Nord de Saint-Pierre-des-Champs et aux Blanes Métairies situées au Nord de Villerouge-Termenès. Le système ne devait pas être complètement chenalisé et assez divergent en raison de la naissance du relief (Figure 30 A). La datation d'Ilerdien Sup. se base sur les dernières séries de marines qui précèdent cette phase continentale.

Cuisien

Les systèmes lacustres se développent au niveau de Talairan. La subsidence permet de stocker toujours plus de particules fines bien que les cours d'eau charrient des graviers centimétriques. Au niveau de Saint-Pierre-des-Champs s'installe un cône d'épandage de sortie d'un petit canyon résultant de deux dynamiques : le début de l'exhumation du Mouthoumet par piggy-back et la régression marine rapide (Figure 30 B). Cette datation s'appuie sur les corrélations de ces niveaux avec les calcaires lacustres de Talairan mais aussi avec les épaisseurs sédimentaires déposées.

Cuisien – Lutétien Inf.

Le réseau hydrique évolue en se proximalisant, pour devenir plus méandrissant. Les rivières de type « gravel wandering rivers » comptent de plus en plus d'accrétions latérales, tandis que les systèmes lacustres de Talairan disparaissent peu à peu en raison d'apports détritiques de plus en plus importants apportés par des cours d'eau fonctionnant toujours par accrétion latérale de type « deep perennial braided rivers » ou « wandering rivers ». La partie la plus au Sud ne permet aucune interprétation par manque de données (Figure 30 C). L'âge donné à ces formations tient compte de la limite UTS1/UTS2 au toit de la formation et des considérations d'épaisseur de sédiments.

Lutétien Moy. et Sup.

Le système est de plus en plus proximal et énergétique, on retrouve de plus en plus de coulées gravitaires et les cours d'eau sont dominés par des barres de graviers. Les plaines alluviales sont de moins en moins présentes et les systèmes lacustres ont totalement disparu probablement remplis par les matériaux en provenance de cônes plus au Sud. La surrection du piedmont s'installe au Sud-Est interprété à partir des données gravimétriques du banc F (Figure 30 D). La datation prend en compte d'une part la limité UTS1/UTS2 et d'autre part les érosions de plus en plus importantes laissant des épaisseurs assez faibles de sédiments.

Lutétien Sup - Bartonien

L'état le plus proximal est atteint. Un cône alluvial s'installe repérable par les cours d'eau aux faciès hyper proximaux : « shallow gravel braided rivers » et « gravel braided rivers with sediment gravity flows ». Le cours d'eau distributaire du cône est identifié à la confluence de l'Orbieu et du Libre :

le banc F. La structure du cône est constamment déstabilisée et les coulées gravitaires deviennent majoritaires en remontant la série (Figure 30 E). Après cette progradation, une rétrogradation s'amorce mais ne permet pas de définir un environnement en raison d'un manque de données. La datation se base sur les épaisseurs sédimentaires assez faibles en raison d'incisions massives.

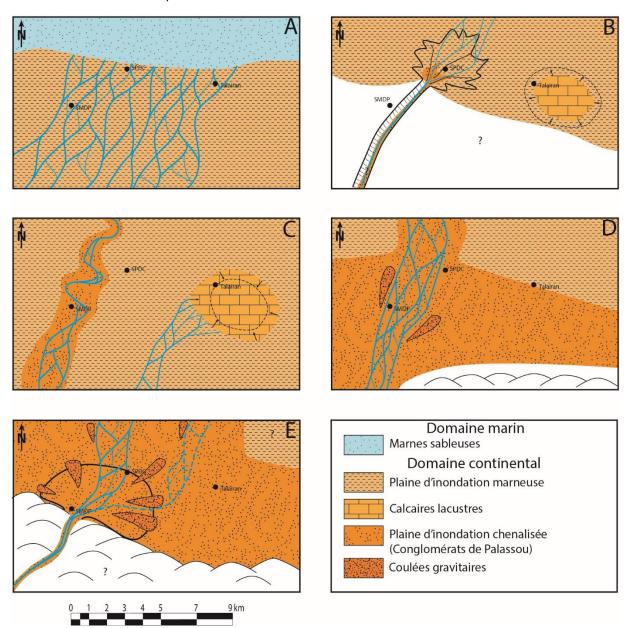


Figure 30 : Implications paléogéographiques de l'étude dans la région de l'Orbieu. A : Ilerdien Sup., au cours de la régression marine. B : Cuisien, formation des environnements lacustes de Talairan. C : Cuisien-Lutétien Inf., régression des systèmes lacustres de Talairan. D : Lutétien Moy.ou Sup., proximalisation du système fluviatile. E : Lutétien-Bartonien : Phase proximale maximale atteinte, le cône de déjection est installé au nivceau de Saint-Martin-des-Puits. SMDP : Saint-Martin-des-Puits ; SPDC : Saint-Pierre-des-Champs.

C. Apports Pédagogiques et Méthodologiques

1. La recherche scientifique

Le sujet que j'ai eu l'occasion de traiter s'inscrit dans le cadre du projet de recherche RGF du BRGM. Il m'a donc permis d'aborder les questions essentielles de la recherche mais aussi de la gestion de projet.

Un sujet de recherche

Etude d'un nouveau genre

D'un point de vue technique, cette étude se concentre sur des formations peu étudiées pour des raisons de complexité liées à la datation des formations continentales. Il s'agit là d'une nouvelle étude permettant via la stratigraphie du bassin d'avant pays, de retracer les phases d'avancée de la chaine pyrénéenne. D'autres études récentes, dans le cadre d'un stage de M2, se sont intéressées au Poudingue de Palassou en particulier à l'origine des clastes (*Villard, 2013*) ou aux environnements de dépôts (*Mondou, XXXX*). Cependant ces projets de recherche ne permettent pas de croiser autant de techniques que cette étude. En effet, le couplage des trois techniques, à savoir les paléocourants, l'étude stratigraphique rigoureuse et la granulométrie, permet de fournir un ensemble de données cohérentes via une interprétation croisée permettant ainsi une vérification sur leur validité.

Méthodologie de recherche

La recherche scientifique s'appuie sur une méthodologie propre à elle-même, permettant à toute personne d'apprécier le sujet et la façon dont il a été mené, mais aussi et surtout sur la notion de reproductibilité des mesures par un autre opérateur. Dans cet objectif, toutes les données ainsi que leur localisation ont été jointes en annexes du rapport scientifique. Ce rapport présente l'étude mettant en avant le contexte de l'étude, les méthodes utilisées avec leurs résultats associés et enfin les interprétations discutées en s'appuyant sur les travaux d'autres auteurs. J'ai décidé de développer au maximum les parties explicatives, afin de permettre aux personnes non expertes en géologie de pouvoir comprendre et appréhender les principales problématiques et les résultats. Cette phase de vulgarisation était importante à mes yeux, car j'ai eu beaucoup de mal à intégrer l'ensemble des notions au début de mon travail.

Interprétations

Les interprétations proposées sont parfois en accord avec les études précédentes. La recherche est justement rythmée par la validation ou l'invalidation d'interprétations et/ou de modèles. Dans notre cas, l'angle d'étude par utilisation de la classification de Miall n'avait été que ponctuellement utilisé dans les Corbières et se révèle très performant tout en invalidant les propositions de cours d'eau anastomosés (*Plaziat, 1987*) ou méandriformes (*Christophoul, 2003*). En revanche, les données de paléocourants disponibles dans la littérature sont tout à fait en accord avec mes relevés de mesure.

Apports personnels à l'étude

J'ai mentionné plus tôt dans ce rapport des contributions lies à mes compétences d'ingénieur à cette étude. J'ai proposé à mes encadrants d'utiliser des outils statistiques (tests de normalité, simulations et interpolations) programmés en langage Scilab. Ces approches permettent d'aborder les données brutes et de mieux les « faire parler » puisqu'il a été possible, via des simulations, de comptabiliser des données non mesurées.

Les limites du sujet

Ce sujet de recherche est malheureusement borné par des limites à la fois imposées par la nature et d'ordre scientifique.

Limites imposées par la nature

Les sciences naturelles, telles que la géologie, sont contraintes par l'environnement dans lesquelles elles sont pratiquées. Dans notre cas les limites de ce sujet résident dans les faibles qualités et quantités d'affleurement, si l'on compare les Poudingues de Palassou à leurs homologues espagnols du bassin Sud-Pyrénéen. Ces contraintes sont propres à la géologie et il est tout de même possible d'établir des transects, logs et coupes mais avec plus de difficultés. Dans le cas de la région de Chalabre, le climat plus humide que dans les Corbières rend presque impossible une étude des formations en raison d'une végétalisation omniprésente. Les non vus sont hectométriques et autant de données importantes ne sont pas accessibles. L'utilisation de géophysique ne permettrait pas d'identifier des lithofaciès car la résolution nécessaire est centimétrique voir millimétrique.

<u>Limites Scientifiques</u>

D'un point de vue scientifique et bibliographique, cette zone est très peu étudiée. Seuls deux auteurs ont largement étudié la zone : Crochet et Plaziat. Je me suis basé sur leurs travaux mais, n'étant pas récents (années 80 et début des années 90), ils ne tiennent pas compte des concepts actuels quant à l'évolution de la chaîne pyrénéenne. Il a donc été nécessaire de revoir les informations de ces auteurs de même que celles des cartes géologiques dont ils sont les auteurs. Il s'agit là des objectifs du RGF de même que le développement de nouvelles méthodes telles que le couplage des études stratigraphique et granulométrique.

2. Le projet

L'étude des formations de Palassou consiste en un projet global caractérisé principalement par la transversalité. Je souhaite dès à présent expliquer mon organisation ainsi que la gestion de ce projet, et enfin présenter ses limites.

Un projet scientifique transversal

Plusieurs techniques au service de la sédimentologie

Les études sédimentologiques regroupent l'étude des paléocourants, des lithofaciès et donc de la définition des styles fluviatiles et enfin l'étude granulométrique. Chaque étude permet de définir des caractéristiques propres des systèmes fluviatiles. Ici, les paléocourants permettent de définir des directions d'écoulements, les lithofaciès, des systèmes fluviatiles et la granulométrie, la morphologie de l'environnement de dépôt. Manier ces trois paramètres et les corréler peut vite être complexe, mais mes encadrants m'ont apporté leur expertise, leurs méthodes, et des pistes de réflexion.

Plusieurs lieux d'étude

Après avoir sélectionné les lieux de l'étude lors de la première sortie de terrain (Mars), deux grandes zones ont étés sélectionnées : une dans la région de l'Orbieu, mais remontant au Nord jusqu'à Tourouzelle (Nord de Lézignan-Corbières) et une dans la région de Chalabre. Ces deux transects permettent de vérifier si les évolutions à l'Est ou à l'Ouest sont corrélables et donc si elles mettent en jeu des phénomènes globaux ou locaux. Le travail sur les deux fronts nécessite plus de déplacements et donc de plus longues périodes sur le terrain, mais surtout une grande organisation sur le terrain.

Plusieurs compétences mises en jeu

Les compétences mises en jeu ne se limitent pas à seulement de la sédimentologie mais aussi au panel offert pas les statistiques et la programmation. Ce stage m'a permis de confronter mes connaissances et ma maitrise de Scilab pour réaliser un programme en toute autonomie : recherche des méthodes statistiques à appliquer, adaptations aux problèmes, programmation et mise en forme graphique.

Gestions

J'ai géré les parties scientifiques de ce projet (Figure 31) tandis que mes tuteurs s'occupaient des parties administratives (organisation des missions incluant les réservations de véhicules et de logements). Il s'agit là de plusieurs gestions dépendant essentiellement des tâches à accomplir.

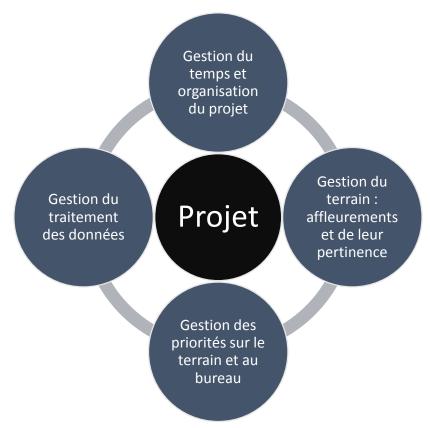


Figure 31 : Parties du projet entièrement gérées par le stagiaire.

Limites du Projet

Ce projet a rencontré deux principales limites :

- Limites temporelles: Le manque de temps est souvent une des limites principales d'un projet. Dans le cadre de notre étude, nous avions prévu de réaliser une datation par magnétostratigraphie des séries de Palassou dans les gorges de l'Orbieu mais aussi de nous intéresser aux classifications des cônes alluviaux. Ces deux angles d'étude n'ont pas vu le jour.
- Limites Matérielles: Le budget est, en général, la première des limites de la recherche. Dans le cadre de mon projet, ce budget avait été prévu pour un stage de 5 mois, mon travail durant 6 mois, il a presque failli se révéler insuffisant pour couvrir la dernière mission.

3. Perspectives

Intégration de mon projet au RGF

<u>Intégration</u>

La finalité du projet repose sur la rédaction d'un rapport scientifique de mes recherches et conclusions relatives aux formations continentales. Les données, et particulièrement les logs et études granulométriques, seront par la suite intégrées aux bases de données du RGF. Pour cela le rapport scientifique présente le plus clairement possible ces résultats et l'interprétation, permettant une intégration plus simple à la base de données.

Utilisation dans d'autre projets RGF

Ce mémoire servira de base à d'autres études, et particulièrement des études développées au sein de la dynamique RGF. Un projet de thèse est déjà en cours de préparation qu'Éric Lasseur coencadrera au BRGM.

Continuité du projet

Encadrement de nouvelles recherches

Ce projet est un préambule à une étude plus en détails des molasses Nord-Pyrénéennes. Le BRGM est actuellement en train de monter un projet de thèse sur ces formations continentales en partenariat avec TOTAL. Les objectifs principaux sont de :

- Dater précisément les séries par magnétostratigraphie
- Revoir l'ensemble des données des cartes géologiques et les actualiser en fonction des apports de la magnétostratigraphie
- Définir une nouvelle cartographie des formations continentales
- Valider les modèles déjà existants

Impacts économiques

Ces études sont nécessaires pour améliorer la compréhension de ces formations continentales jouant un rôle important dans les projets de stockage de gaz. En effet, les formations de Palassou constituent en certains endroits la couverture de réservoirs susceptibles de stocker du gaz naturel. Mieux comprendre la géométrie des couvertures des réservoirs permet en particulier :

- De mieux quantifier les coûts du projet de stockage
- D'anticiper des éventuelles fuites
- De mettre en place des solutions d'imperméabilisation (injection de fluides, création de flux ...)
- De mieux piloter le monitoring de réservoir

D'un point de vue hydrogéologique, de nombreux aquifères sont captés dans les molasses du bassin Nord-Pyrénéen et leurs caractéristiques dépendent directement de celles de la roche les constituant. Améliorer les connaissances à des fins de modélisation de réservoir permettrait une meilleure prévision ainsi qu'une meilleure gestion des politiques d'exploitation des ressources en eau.

Enfin la publication des données via la plateforme du RGF pourra bénéficier à l'ensemble de la population française, y compris pour planifier les politiques d'aménagement du territoire via l'intégration des paramètres du sous-sol dans le RGF.

CONCLUSION

Les formations continentales questionnent toujours autant les géologues. Le poudingue de Palassou en est un bel exemple, puisque premièrement étudié par l'abbé Palassou entre la fin du XVIII^e et le début du XIX^e, aujourd'hui, il garde encore des mystères et notamment l'attribution d'âges aux différentes séquences. Cependant, notre étude permet de lever le voile sur différents paramètres et de les relier à des évènements plus globaux de la chaîne Pyrénéenne.

A partir d'indications lithologiques centimétriques, relevées sur plusieurs logs, j'ai découvert une phase progradante au cours de l'Eocène dans le secteur de l'Orbieu, mais aussi corrélable avec mes observations à Chalabre. Cette phase majeure est caractérisée par l'arrivée de cônes alluviaux que l'on remarque aussi via l'étude granulométrique. Cette progradation majeure au cours de l'UTS2 peut être reliée à deux phénomènes principaux : (1) le début de l'exhumation de nouveaux massifs tel que celui de l'Aston, entre le Lutétien Moy. et le Priabonien Sup., dans la région chalabraise et (2) une crise climatique majeure favorisant les écoulements gravitaires de type debris-flows tels que la MECO, il y a environ 40 Ma. La corrélation avec ces deux évènements ne se base pas sur une datation rigoureuse, qui permettrait une meilleure identification des processus responsables de l'avancée des cônes alluviaux. Mon étude permet en outre de dresser une évolution paléoenvironnementale de la région des gorges de l'Orbieu tout au long de l'Eocène grâce au couplage stratigraphique/granulométrique.

Cette étude permet de préciser les environnements et modes de dépôts responsables des formations de Palassou. D'autres auteurs s'étaient penchés sur les molasses Eocènes des Corbières sans justifier clairement les environnements de dépôts et sans utiliser une classification qui a déjà fait ses preuves. Les apports de cette étude seront par la suite intégrés au projet RGF du BRGM, en particulier les logs, les données granulométriques et de paléocourants. Ce corpus de données et d'interprétations permettra par la suite de servir de base de lancement d'une thèse à l'automne 2016 par le BRGM dans l'objectif de caractériser sous d'autres angles les poudingues de Palassou.

Enfin cette expérience de six mois m'a beaucoup apporté sur plusieurs plans. Ce TFE clôture tous mes stages en géologie, et m'a permis d'approfondir, comme je l'entendais, un autre secteur des géologies, en m'apportant des compétences de pointe en stratigraphie et sédimentologie continentale. De plus j'ai pu mettre à profit mes connaissances d'ingénieur polyvalent en proposant des angles d'approche via la programmation d'outils statistiques et de traitement de données. Enfin, j'ai eu l'occasion de travailler plus d'un mois sur le terrain et ce fut une expérience très formatrice d'un point de vue organisationnel.

Bibliographie

Ouvrages scientifiques consultés

Agence d'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur (2012, 2013). Vague D : campagne d'évaluation 2012 - 2013 Unité de recherche : UMR 7193 iSTeP 2.1. Projet scientifique de l'unité. Document inédit.

Beaumont, C., J. A. Muñoz, J. Hamilton, and P. Fullsack (2000). Factors controlling the Alpine evolution of the central Pyrenees inferred from a comparison of observations and geodynamical models, J. Geophys. Res., 105(B4), 8121–8145, doi: 10.1029/1999JB900390.

Bureau des Recherches Géologiques et Minières, 2015. Rapport d'Activité 2014.

Bureau des Recherches Géologiques et Minières Juin 2013. *Référentiel Géologique de la France. Géorama, le magazine d'Information du BRGM* n°28.

Christophoul, F., et al., (2003). Time, place and mode of propagation off foreland basin systems as recorded by sedimentary fill: examples of the Late Cretaceous and Eocene retro-foreland basins of the north-eastern Pyrenees. *Geological Society, London, Special Publications* 2003, v.208; 229-252.

Crochet, B. (1991). Molasses syn-tectoniques du versant nord DES Pyrénées: la série de Palassou. Thèse d'Etat. 387p

Ellenberger, F., et al., Feuille de Capendu, Carte géologique de la France à 1/50 000, n°1060, BRGM.

Huygue D. (2010). Changements climatiques globaux et fonçage tectonique au Paléogène : Exemples du bassin de Paris et des Pyrénées. Thèse doctorale. 358p.

Lacombe O., Mouthereau F., (1999). Qu'est-ce que le front des orogènes ? L'exemple de l'orogène pyrénéen. Académie des Sciences / Earth and Planetary Sciences. 329.889.896

Miall A.D., (1996). The Geology of Fluvial Deposits. Sedimentary Faci7s, Basin Analysis, and Petroleum Geology. Springer-Verlag, Berlin. 582p.

Miall, A. D. (2014). Fluvial depositional systems. Springer-Verlag, Berlin 316 p.

Miguet, J. (2015). Rapport de Bureau d'Etude : Le remplissage Rétroforeland Nord Pyrénéen. Mémoire d'études non publié. 27p. Non publié.

Mondou M., (date non précisée). Environnements de dépôts et provenance des sédiments du Poudingue de Palassou. Mémoire de M2.

Plaziat, J-C. (1981). Late Cretaceous to late Eocene paleogeographic evolution of southwest Europe. J. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology n°36: 263-320.

Plaziat, J-C. (1984). Stratigraphie et évolution paléogéographique du domaine pyrénéen, de la fin du Crétacé (Phase Maastrichtienne) à la fin de l'Eocène (Phase Pyrénéenne). Thèse d'Etat. 1362p.

Plaziat, J-C., Freytet P. et Marec P. (1987). Sédimentation Molassique et Paléopédogénèse en Languedoc. Association des Sédimentologistes Français. 127p.

Tambareau Y., (1972). Thanétien Supérieur et llerdien Inférieur des petites Pyrénées, du Plantaurel et des Chainons Audois. Thèse doctorale, 377 p.

Vacherat, A. (2014). Inversion d'une marge hyper-amincie, Contexte thermo-cinématique et interactions tectoniques-érosion au Nord des Pyrénées. Thèse doctorale. 545p.

Villard S., (2013). Provenance sédimentaire des conglomérats cénozoïques du Nord-Est des Pyrénées. Relation avec l'exhumation des Pyrénées. Mémoire de M2

Whittaker A., et al (2011). Decoding downstream trends in stratigraphic grain size as a function of tectonic subsidence and sediment supply. *Geological Society of America*, Vol: 123, Pages: 1363-1382, ISSN: 0016-7606

Sites Web consultés

Bureau des Recherches Géologiques et Minières [en ligne]. Consulté en Juillet 2015, disponible sur : http://www.brgm.fr/

Institut des Sciences de la Terre de Paris [en ligne]. Consulté en Juillet 2015, disponible sur : http://www.istep.upmc.fr/fr/index.html

ANNEXES

Annexe I : Programme de traitement Granulométrique

1. Programme principal

```
// ETUDE GRANULOMETRIQUE
//Ce script permet d'afficher les courbes granulométriques (théoriques et par simulation statistiques) à partir d'un set de données au format
//Deux éléments sont à renseigner :
//-->le nom du fichier txt dans la partie 2 (sans l'extension .txt)
//-->le nombre de simulations dans la partie 3
//Le graphe est automatiquement exporté dans le répertoire courant au format PDF avec le même nom que le fichier txt.
//Le programme permet à l'utilisateur de placer la légende à l'endroit qu'il souhaite en cliquant sur le graphe (rectangle).
// --- CHARGEMENT DES FONCTIONS
exec('fonctions_granulo.sce',-1)
// --- CHARGEMENT DES DONNEES & TEST STATISTIQUE
//Nom des données à renseigner
nom_des_donnees='G42'
// données de granulométrie chargées dans le tableau D
D=fscanfMat(strcat([nom_des_donnees,'.txt']))
// Test d'adéquation à la loi normale
lilliefors(D)
// ---3--- SIMULATION
//nombre de simulations
nsimul=500
//simulations statistiques basées sur la loi normale stockées dans l'hypermatrice DM
DM=multisimul(D,nsimul,size(D,1))
//Fractiles D50 et D84
fractiles=calcul_D50_D84(DM,nsimul,1)
// ---4--- MISE EN FORME DE D
//La mise en forme d'un tableau de données permet d'en extraire la courbe cumulative dans la troisième colonne.
d=mise_en_forme(D)
// ---5--- INTERPOLATION
//x données (taille)
xd(:)=d(:,1)
//y données (valeur cumulée de chaque x)
yd(:)=d(:,3)
//interpolation splin cubique sur 101 valeurs
x = linspace(0,100,101)
[y,don]=lsq_splin(xd,yd,x)
f_interpolation=interp(xd,x,y,don)
//Fractiles D50 et D84
dfrac(:,1)=xd(:)
dfrac(:,3)=f_interpolation
fractilesexp=calcul D50 D84(dfrac,0,0)
fractilesexp(1,2)=0.15*fractilesexp(1,1)
fractilesexp(2,2)=0.15*fractilesexp(2,1)
// --- AFFICHAGE DES DONNEES
<u>scf(1)</u>
       ----> Simulation
for i=1:nsimul
  plot2d(DM(:,1,i),DM(:,3,i),3,rect=[0,0,20,100])
          ----> Moyenne des simulations
plot2d(DM(:,1,nsimul+1),DM(:,3,nsimul+1),1,rect=[0,0,20,100])\\
//----> Barres d'erreurs sur la simul
for i=1:size(DM,1)
  scf(1)
  ax=DM(i,1,nsimul+1)-DM(i,1,nsimul+2)
```

```
bx=DM(i,1,nsimul+1)+DM(i,1,nsimul+2)
  y=DM(i,3,nsimul+1)
  xpoly((ax,bx),[y,y],"lines",1)
  p=get("hdl");
  p.thickness=1;
end
       ----> Données hrutes
plot2d(d(:,1),d(:,3),-4,rect=[0,0,25,100])
//----> Interpolation
plot2d(xd,f_interpolation,5,rect=[0,0,25,100])
//----> Barres d'erreurs sur l'interpolation
for i=1:size(xd,1)
  scf(1)
  ax=xd(i)-0.15*xd(i)//borne inférieure de l'incertitude -15%
  bx=xd(i)+0.15*xd(i)//borne supérieure de l'incertitude +15%
  y=f_interpolation(i)
  xpoly([ax,bx],[y,y],"lines",5)
  p=get("hdl");
  p.thickness=1;
  p.foreground=5;
end
       -----> Titre
xtitle(",'Plus grand diamètre des clastes (cm)','Distribution cumulative (%)');
title('Courbes Granulométriques & Détermination du D50 et du D84.', 'fontsize', 2, 'fontname', 8);
//----> Légende
m=[-4,5,3,1]
legends(["Expérimental (Données Brutes)";"Interpolation splin cubique sur les données";"Simulation";"Moyenne des simulations";],m)
//----> Affichage des D50
xstring(16.5,55, ["D50simulé = "])//texte
xnumb(20,55,[fractiles(1,1)])//valeur
xstring(21,55, ["+/-"])//texte
xnumb(22,55,[fractiles(1,2)])//valeur
xstring(16.5,60, ["D50expérimental = "])//texte
xnumb(21.5,60,[fractilesexp(1,1)])//valeur
xstring(22.5,60, ["+/-"])//texte
xnumb(23.5,60,[fractilesexp(1,2)])//valeur
//----> Affichage des D84
xstring(16.5,40, ["D84simulé = "])//texte
xnumb(20,40,[fractiles(2,1)])//valeur
xstring(21,40, ["+/-"])//texte
xnumb(22,40,[fractiles(2,2)])//valeur
xstring(16.5,45, ["D84expérimental = "])//texte
xnumb(21.5,45,[fractilesexp(2,1)])//valeur
xstring(22.5,45, ["+/-"])//texte
xnumb(23.5,45,[fractilesexp(2,2)])//valeur
//----> Affichage du nom de l'affleurement
xstring(16.5,80,strcat(["Affleurement:",nom_des_donnees]))//texte
          -----> Affichage du nombre de données
xstring(16.5,75,strcat(["Ndonnées = ",string(size(D,1))]))//texte
           ---> Affichage du nombre de simulations
xstring(16.5,70,strcat(["Nsimul = ",string(nsimul)]))//texte
// Export du graphe en PDF:
xs2pdf(1,nom_des_donnees)
```

2. Fonctions Appelées dans le programme

```
// Fonctions permettant l'étude granulométrique
// ---1--- FONCTION MISE EN FORME
//Déclaration de la Fonction mise en forme qui à partir d'un tableau de données renvoi un tableau mis en forme avec dans la première
colonne les données, dans la seconde le poids de chaque donnée correspondant à 1/nombre_de_données, dans la troisième le poids cumulé
pour l'affichage
function [T]=mise_en_forme(D)
  //D tableau de données d'une seule colonne
  donnees=gsort(D,"r","i")//tri
  n=size(donnees,1)
  //Création de la seconde colonne du tableau correspondant au poids de chaque donnée calculée à partir du poids total.
  for i=1:size(donnees,1)
    donnees(i,2)=1/n
  //Création de la troisième colonne du tableau correspondant au poids cumulé.
  donnees(1,3)=donnees(1,2)
  for i=2:size(donnees,1)
    donnees(i,3)=donnees(i,2)+donnees(i-1,3)
  // Mise sous forme de pourcents
  donnees(:,3)=100*donnees(:,3)
  //sortie
  T=donnees
endfunction
// --- FONCTION SIMULATION
// Déclaration de la fonction permettant de calculer une simulation de N données de loi Normale à partir d'un jeu de données obéissant à une
loi normale d'après la méthode de Bow-Muller.
function [S]=simulation(D, N)
  //Calcul de l'écart type et de la moyenne des données
  m=mean(D); // moyenne des données
  sigma=stdev(D); // écart-type des données
  for i=1:N // Boucle de création de N données simulées
                                                                //Instruction pour contraindre les valeurs à êtres > 0
                                         //Non utilisées car non représentatives de la réalité du comptage
                                         //z1=-1
                                         // z2=-1
                                         //while ((z1<0)|(z2<0));
      z1=m+sigma*sqrt(-2*log2(rand()))*cos(2*%pi*rand())//première variable aléatoire
      z2=m+sigma*sqrt(-2*log2(rand()))*sin(2*%pi*rand())//seconde variable aléatoire
                                         // if ((z1>0)|(z2>0)) then
         simul(i,1)=(z1+z2)/2 //Simulation
                                          //end
                                         //end
  S=mise_en_forme(simul)
endfunction
// --- 3--- FONCTION MULTI SIMULATIONS
// Déclaration de la fonction multisimul permettant de simuler un nombre nsimul de simulation de ndonnées stockées dans une matrice 3D.
Cette fonction permet aussi de générer la moyenne et l'écart type des multi simulations.
function [MS]=multisimul(D, nsimul, ndonnees)
  //Simulation
  for i=1:nsimul
    MS(:,:,i)=simulation(D,ndonnees)
  end
```

```
//moyenne des simulations stockée dans le plan matriciel (i,j,nsimul+1)
     \textbf{MS}(i,1, \textbf{nsimul}+1) = \underline{mean}(\textbf{MS}(i,1,:))
  MS(:,:,nsimul+1) = \underline{mise\_en\_forme}(MS(:,1,nsimul+1))
  //ecart type des simulations stocké dans le plan matriciel (i,j,nsimul+2)
  for i=1:ndonnees
    MS(i,1,nsimul+2)=stdev(MS(i,1,:))
  end
endfunction
// ---4--- FONCTION Lilliefors
// Déclaration de la fonction Lilliefors qui permet de faire un test statistique d'adéquation à la loi normale
function []=lilliefors(x)
  a30=fscanfMat('lilliefors.txt')
  n=size(x,1)//nombre de données
  //-- 1 tri du tableau : xt
  xt=gsort(x,'r','i')
  //-- 2 Calcul de ma moyenne (moy) et de l'écart-type (s)
  moy = \underline{mean}(x)
  s=stdev(x)
  //-- 3 Calcul de données centrées réduites : z
  z(:)=(xt(:)-moy)/s
  //--4 Calcul des fréquences théoriques : F
  //ll faut noter que F est la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite, qui s'exprime en fonction de la fonction d'erreur.
    F(i)=1/2+1/2*erf(z(i)/sqrt(2))
  end
  //--5 Calcul des statistiques Dm et Dp
  for i=1:n
    Dm(i)=F(i)-(i-1)/n
    Dp(i)=i/n-F(i)
  //--6 Calcul du max de Dm (DM) et du max de Dp (DP)
  DM=max(Dm(:))
  DP=max(Dp(:))
  //--7 Calcul de la statistique D
  D=max(DM,DP)
  disp('D:');disp(D)
  //--8 Test de Normalité.
  if (n>30) then
    if (D>0.886/sqrt(n)) then
       disp('approximation normale justifiée')
       disp('approximation normale NON justifiée')
     end
     if (n>4) then
       if (D>a30(n-4)) then
         disp('approximation normale justifiée')
         disp('approximation normale NON justifiée')
       \quad \text{end} \quad
     else
       disp('Nombre de données inférieur à 4 : test innutile')
```

end

end endfunction

```
// ---5--- FONCTION CALCUL D50 D84
```

// Déclaration de la fonction qui calcule le D50 et le D84 à partir de la moyenne des simulations de données via une approximation linéaire entre les deux valeurs encadrant le D50 et le D84.

function [t]=calcul_D50_D84(D, nsimul, incertitude)

//D la matrice de données dont il faut extraire le deux fractiles (mise en forme avec la fonction mise_en_forme) //nsimul le nombre de simulations réalisées

//incertitude si=1 on fait le calcul d'incertitudes sinon on ne le fait pas

//---1--- Récupération des valeurs encadrant les D50 et D84 pour faire une approximation linéaire et trouver les valeurs de D50 et D84. Dans les deux cas, le point inférieur est nommé A et le point supérieur est nommé B

```
for i=1:size(\mathbf{D},1)
    if (D(i,3,nsimul+1)<50) then
       A50(1)=D(i,1,nsimul+1)//dernière données inférieure à 50 : valeur du diamètre (coordonnée en x)
       A50(2)=D(i,3,nsimul+1)//dernière données inférieure à 50 : valeur de la fonction cumulative (coordonnée en y)
       B50(1)=D(i+1,1,nsimul+1)//première donnée supérieure à 50 : valeur du diamètre (coordonnée en x)
       B50(2)=D(i+1,3,nsimul+1)//première donnée supérieure à 50 : valeur de la fonction cumulative (coordonnée en y)
     end
     if (D(i,3,nsimul+1)<84) then
       A84(1)=D(i,1,nsimul+1)//dernière données inférieure à 84 : valeur du diamètre (coordonnée en x)
       A84(2)=D(i,3,nsimul+1)//dernière données inférieure à 84 : valeur de la fonction cumulative (coordonnée en y)
       B84(1)=D(i+1,1,nsimul+1)//première donnée supérieure à 84 : valeur du diamètre (coordonnée en x)
       B84(2)=D(i+1,3,nsimul+1)//première donnée supérieure à 84 : valeur de la fonction cumulative (coordonnée en y)
       k84=i
     end
  end
  //---2--- calcul de D50 et D84 par linéarisation
  // D50 : la fonction est définie comme y=f(x)=a*x+b avec y la valeur de la fonction cumulative, y=50 et x la valeur du centile (du D50). il faut
ensuite inverser la fonction pour avoir x en fonction de y.
  a=(A50(2)-B50(2))/(A50(1)-B50(1))
  b=A50(2)-A50(1)*((A50(2)-B50(2))/(A50(1)-B50(1)))
  t(1,1)=50/a-b/a
  // D84 : la fonction est définie comme y=f(x)=a*x+b avec y la valeur de la fonction cumulative, y=84 et x la valeur du centile (du D84). il faut
ensuite inverser la fonction pour avoir x en fonction de y.
  a=(A84(2)-B84(2))/(A84(1)-B84(1))
  b=A84(2)-A84(1)*((A84(2)-B84(2))/(A84(1)-B84(1)))
  t(2,1)=84/a-b/a
  //---3--- calcul des incertitudes sur D50 et D84 par approximation linéaire
if incertitude==1 then
  //incertitude linéarisée sur D50
  aa=(D(k50,1,nsimul+2)-D(k50+1,1,nsimul+2))/(D(k50,3,nsimul+1)-D(k50+1,3,nsimul+1))
  bb = \hspace{-0.1cm} \textbf{D}(k50,\hspace{-0.1cm}1,\hspace{-0.1cm} \textbf{nsimul} + \hspace{-0.1cm}1) - aa * \hspace{-0.1cm} \textbf{D}(k50,\hspace{-0.1cm}3,\hspace{-0.1cm} \textbf{nsimul} + \hspace{-0.1cm}1)
  t(1,2)=aa*50+bb
  //incertitude linéarisée sur D84
  aa = (D(k84,1, \\ nsimul + 2) - D(k84+1,1, \\ nsimul + 2))/(D(k84,3, \\ nsimul + 1) - D(k84+1,3, \\ nsimul + 1))
  bb=D(k84,1,nsimul+2)-aa*D(k84,3,nsimul+1)
  t(2,2)=aa*84+bb
end
```

endfunction

RÉSUMÉ

La formation d'un ingénieur en Sciences de la Terre se termine toujours par une expérience en entreprise lors de laquelle l'élève ingénieur peut mettre à profit et approfondir dans la pratique, ses acquis théoriques. Mon stage de fin d'études s'est déroulé entre le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) et l'ISTeP (Institut des Sciences de la Terre de Paris) autour d'un projet de recherche scientifique. Ce projet géologique met en application la sédimentologie et la stratigraphie afin d'étudier les formations continentales Eocènes du bassin d'avant pays Nord-Pyrénéen.

Après une description du projet dans son contexte : les parties prenantes, le projet dans lequel il s'inscrit, son objectif même, ce rapport aborde le sujet scientifique. Deux principales études stratigraphiques ont été menées. La principale s'intéresse à la caractérisation des séries continentales via la méthode de Miall (1996), tandis que la seconde apporte des précisions sur l'évolution granulométrique des séries (Wittaker 2011). La combinaison de ces deux méthodes permet d'identifier deux phénomènes de progradation des cônes alluviaux que nous datons du cuisien pour la première de faible ampleur et entre le Lutétien sup. et le Bartonien pour la seconde majeure à l'échelle de la chaîne. Ces résultats font enfin l'objet d'une interprétation paléogéographique.

ABSTRACT

The Earth Sciences engineering formation always ends by a final six month internship. This work experience enable the engineering student to apply, in a professional way, what he learned during his engineering training at school. My internship took place between the BRGM (*Bureau de Recherches Géologiques et Minières*: the French Geological and Mining Survey) and the ISTeP (*Institut des Sciences de la Terre de Paris*: Earth Sciences Institute of Paris). This scientific research project deals with geology and more precisely the alliance between sedimentology and stratigraphy to study Eocene continental formation of the North-Pyrenean retro-foreland basin.

This report introduces the context of the project: the stakeholders of my internship, the major project in which mine in included in, and finally my project. Two mains stratigraphic studies have been done. The first one, concerning the characterisation of the continental Palassou series, relies on the Miall classification and method (1996), whereas the second one, about the grain-size evolution, is based on the Wittaker method (2011). The combination of both methods allows us to interpret two mains alluvial fans progradation: a low intensity one, during the Cuisian, and another one with a high strength between the upper Lutetian and the Baronian. Thanks to these results, we present a second paleogeographic interpretation of the Corbières during the Eocene.