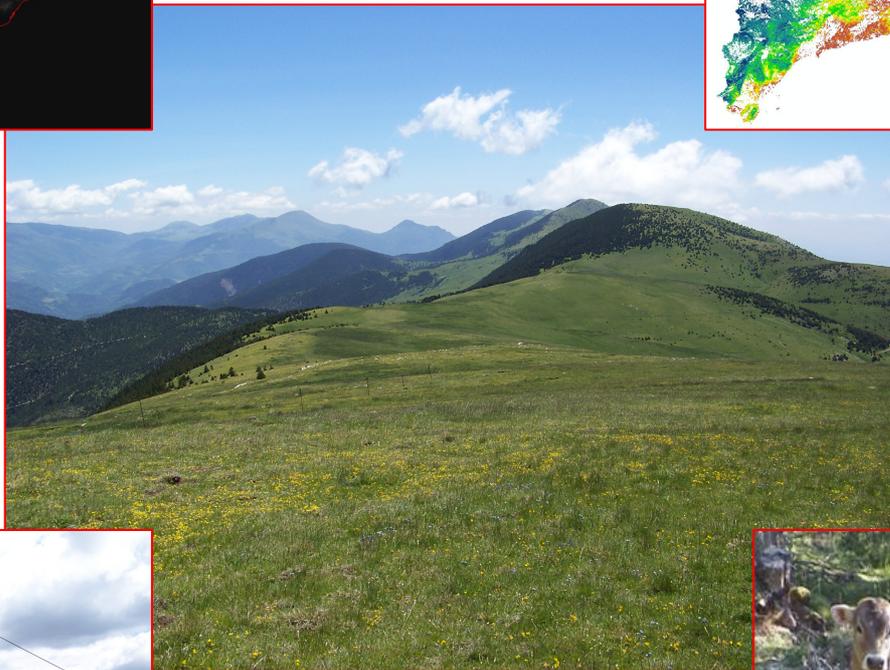
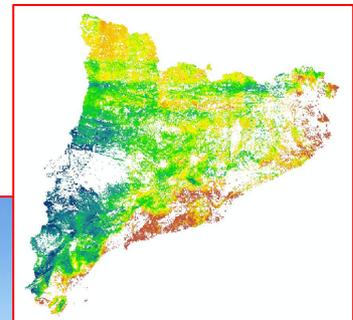
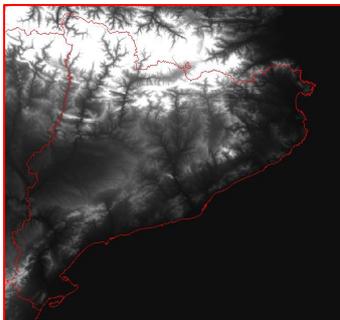


Spatialisation des stocks de carbone organique dans le sol des prairies des Pyrénées catalanes

Mémoire de stage - Septembre 2010
Master 2 Aménagement du Territoire et Télédétection

Effectué au Centre Technologique Forestier de Catalogne (Solsona, Espagne)



Étudiant : **SANCHEZ Jonathan**
Maître de stage : **SEBASTIÀ Maria Teresa**
Tuteur pédagogique : **CESCHIA Éric**

Table des matières

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Présentation du CTFC (Centre Technologique Forestier de Catalogne).....	1
1.2 Contexte.....	2
1.3 Objectifs de travail.....	3
1.4 Hypothèse de travail	3
CHAPITRE 2 : SPATIALISATION DU CARBONE ORGANIQUE DANS LE SOL DES PRAIRIES A PARTIR D'UN MODELE EMPIRIQUE	4
2.1 Séquestration du carbone et changement climatique : enjeux et mécanismes	4
2.1.1 Intérêt de la séquestration du carbone dans le sol des prairies	4
2.1.2 Paramètres et mécanismes influençant la séquestration du carbone	4
2.1.3 Pourquoi estimer et spatialiser les stocks de carbone organique du sol ?.....	5
2.2 Méthodologie.....	6
2.2.1 Matériel et système de projection utilisés.....	6
2.2.2 Données nécessaire à la modélisation : la base de données PASTUS	7
2.2.3 Extraction des occupations du sol en prairies.....	10
2.2.4 Description du modèle empirique d'estimation des SOCS	10
2.2.5 Variables topographiques.....	11
2.2.6 Variables climatiques	14
2.2.7 Spatialisation des SOCS	14
2.3 Résultats	15
2.4 Discussion.....	19
CHAPITRE 3 : CREATION D'UN FORMULAIRE POUR LA BASE DE DONNEES PASTUS.....	20
3.1 Objectifs	21
3.2 Structure et mise en place.....	21
3.3 Elaboration des formulaires, remarques et particularités des champs.....	23
3.4 Fonctionnement	25
3.5 Améliorations possibles et avenir du formulaire.....	25
CHAPITRE 4 : TRAVAIL DE COLLABORATION SUR LE PROJET FLUXPYR .	27
4.1 Contexte et objectif du projet FLUXPYR	27
4.2 Recherche de parcelles spécifiques pour l'installation d'une station micro météorologique Eddy Covariance	28
4.2.1 Objectif	28
4.2.2 Méthodologie	29
4.2.3 Résultats et discussion	29

4.3 Recherche des scènes communes LandSat et suivi temporel	31
4.3.1 Contexte et objectif	31
4.3.2 Superposition des scènes LandSat	31
4.3.3 Couloir commun des senseurs ETM+ et TM du satellite LandSat 7	33
4.3.4 Résultat	33
CHAPITRE 5 : DISCUSSION GENERALE	35
5.1 Conclusion	35
5.2 Impressions personnelles sur le stage	36
BIBLIOGRAPHIE ET SITES CONSULTES	37

Liste des tables et figures

Fig. 1 : Logo et photographie du CTFC	1
Fig. 2 : Position géographique des points échantillonnés de la base de données PASTUS.....	8
Tableau 1 : Paramètres composant le modèle empirique d'estimation des SOCS	10
Fig. 3 : Classification des valeurs de TPI en classes topographiques	12
Tableau 2 : Correspondance de la reclassification des classes topographiques.....	12
Fig.4 : Comparaison entre la réalité et la classification topographique au niveau du Cadí-Moxeiro	13
Tableau 3 : Calculs sur la distribution des SOCS en Catalogne et pour les prairies de haute altitude	15
Fig. 5 : Distribution des stocks de carbone organique dans le sol des Pyrénées catalanes	16
Fig. 6 : Distribution des stocks de carbone organique dans le sol (SOCS) des prairies de Catalogne.....	17
Tableau 4 : Comparaison entre les valeurs prédites de SOCS par le modèle et les valeurs observées.....	18
Tableau 5 : Comparaison entre valeurs prédites et valeurs observées de SOCS au niveau de Los Ports ...	18
Fig. 7 : Modèle Conceptuel de Données de la base de données PASTUS	23
Fig. 8 : Exemple de règle d'entrée du type de données obligatoire	24
Fig. 9 : Exemple de préconisation sur le type d'unité à entrer	24
Fig. 10 : Exemple de menus déroulant	24
Fig. 11 : Vue globale des zones discriminées aux alentours du CTFC.....	30
Fig. 12 : Scènes Landsat 5 et 7 recouvrant l'ensemble des Pyrénées.	32
Fig. 13 : Zones ayant une résolution temporelle de huit jours sur la chaîne des Pyrénées.	34

Annexes

Annexe 1 : Localisation du CTFC en Catalogne	I
Annexe 2 : Classifications topographiques selon l'échelle de l'opération de voisinage	II
Annexe 3 : Protocole utilisé pour la spatialisation des SOCS	III
Annexe 4 : Présentation du menu et de la table TLocation du formulaire.....	IV
Annexe 5 : Présentation des tables thématiques du formulaire	V
Annexe 6 : Présentation de la table TGenerated du formulaire	VI
Annexe 7 : Logo du projet FLUXPYR.....	VII
Annexe 8 : Principaux partenaires du projet FLUXPYR	VIII
Annexe 9 : Détail des groupes de travail au sein du projet FLUXPYR.....	IX
Annexe 10 : Tour de mesure de flux Eddy Covariance et description des appareils.....	X
Annexe 11 : Sites visités après sélection	XI
Annexe 12 : Protocole de discriminations des zones potentielles	XII
Annexe 13 : Exemple d'une erreur d'occupation du sol	XIII
Annexe 14 : Cadre conceptuel du projet FLUXPYR	XIV
Annexe 15 : Répartition du temps de travail	XV

Glossaire et abréviations

BDD : Base De Données

CO₂ : dioxyde de carbone

Comarca : traduit en comarque. Equivalent d'un comté, d'une communauté de commune ou d'un pays.

Communauté Autonome (*Comunidad Autónoma*) : équivalent d'une Région en France.

CTFC : Centre Technologique Forestier de Catalogne

ECOFUN : laboratoire d'Écologie Fonctionnelle et de Changement Global

ED50 : système géodésique européen de 1950 (*European Datum*)

Generalitat (ou *Generalitat* en Catalan) : fait référence au gouvernement autonome de la Catalogne (idem pour l'Aragon et la Communauté Valencienne)

GES : Gaz à effet de serre

GRS55 : système Géodésique de Référence de 1955 (*Geodetic Reference System*)

MAT : Température Annuelle Moyenne (*Mean Annual Temperature*)

MSP : Précipitation Estivale Moyenne (*Mean Summer Precipitation*)

MST : Température Estivale Moyenne (*Mean Summer Temperature*)

MCD : Modèle Conceptuel de Données

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NDVI : Indice de Différence Normalisée de Végétation (*Normalize Difference Vegetation Index*)

Province (*Provincia*) : équivalent d'un département en France. Possède un chef-lieu.

SIG : Système d'Information Géographique.

SOCS : Stock du Carbone Organique dans le Sol (*Soil Organic Carbon Stock*)

TPI : Indice de Position Topographique (*Topographic Position Index*)

UTM : Projection Universelle Transverse de Mercator (*Universal Transverse Mercator*)

WGS 84 : Système Géodésique Mondial de 1984 (*World Geodetic System*)

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Maria Teresa SEBASTIÀ de m'avoir donné une opportunité d'effectuer un stage au sein du CTFC et ainsi acquérir une expérience professionnelle à l'étranger.

Je remercie aussi Fabrice GOURIVEAU (CTFC, Solsona) et Agustín LOBO (CSIC, Barcelone) de m'avoir permis de participer au projet FLUXPYR et d'avoir partagé leurs connaissances et expériences

Sara SANTOS, Àngela RIBAS et Ignacio LOPEZ VICENS (CTFC, Solsona), Ignacio SANTA REGINA (Université de Salamanque), Josefina PLAIXATS (Université de Lérida) et enfin Carlos CAMINO GONZÁLEZ de m'avoir apporté leur aide dans mon travail ; Rosa LLURBA et Daniel VENTURA (CTFC, Solsona) pour leur accueil au sein du laboratoire, bien que n'ayant pas participé directement à mon projet.

Enfin, je tiens à remercier spécialement mes parents et ma famille pour leur soutien financier et moral, sans lequel il ne m'aurait pas été possible d'effectuer ce stage dans de bonnes conditions, ainsi que le Conseil Régional de Midi-Pyrénées de m'avoir accordé un financement boursier.

Chapitre 1 : Introduction

1.1 Présentation du CTFC (Centre Technologique Forestier de Catalogne)

Le travail présenté ici a été effectué au Centre Technologique Forestier de Catalogne (CTFC) qui est un centre de recherche appliquée (Fig. 1), de formation et de transfert de technologies situé dans le piémont pyrénéen près la petite ville de Solsona, capitale de la communauté de pays (*Comarca*) du Solsonés (Province de Lérida dans la Communauté Autonome de Catalogne, Espagne) (Annexe 1). Il a été créé en 1996 à l'initiative d'un consortium d'entités publiques incluant : la Communauté Autonome de Catalogne, la Province de Lérida, l'Université de Lérida, la Fondation Catalane pour la Science et l'Innovation, le Centre de Développement Rural Catalan (CEDRICAT) et les communes du Solsonés. Il emploie une centaine de personnes.



Fig. 1 : Logo et photographie du CTFC (photo prise le 13/08/2010)

La mission du centre est de contribuer à la modernisation et à la compétitivité du secteur forestier, ainsi qu'au développement durable du milieu naturel dans un contexte géographique méditerranéen, grâce à la recherche, la formation, et au transfert de technologies vers la société (CTFC, 2010a et 2010b).

Les quatre programmes de travail du centre sont :

- la gestion forestière ;
- la valorisation des produits et services forestiers ;
- la politique forestière et de développement rural ;
- la protection des ressources naturelles.

L'objectif est aussi de maintenir l'emploi des populations sur le territoire notamment en développant l'économie locale dans le domaine rural. Il s'agit de valoriser, tant du point de vue socio-économique qu'environnemental, le secteur forestier actuellement en difficulté et sujet à l'abandon. Ses financements proviennent de la participation à des appels d'offres, des contrats avec les secteurs publics ou privés et des bourses publiques (*Generalitat de Catalunya*). Le CTFC

propose aussi des formations dans tous les domaines, de la formation de base aux cours et séminaires techniques. Il participe aussi à des projets d'envergure internationale dans de nombreux pays (notamment en Afrique, en Asie et en Amérique du Sud) et des projets Européens (par exemple FLUXPYR).

J'ai été rattaché au cours de mon stage au Laboratoire d'Écologie Fonctionnelle et de Changement Global (ECOFUN) du département d'Écologie Végétale et Botanique Forestière. ECOFUN mène à bien des projets de recherche, tant fondamentale qu'appliquée, et étudie en particulier les aspects fonctionnels et de gestion des systèmes agro-silvo-pastoraux (ECOFUN, 2010). Les lignes de travail principales sont les suivantes :

- évaluation de l'accumulation du carbone (sujet de mon stage) et les cycles géochimiques ;
- étude des relations entre biodiversité, productivité, changement climatique et mode de gestion ;
- coopération internationale.

1.2 Contexte

L'avènement de l'ère industrielle à partir du XIX siècle contribue aujourd'hui au changement climatique (Pachaury *et al.*, 2007), provoqué par la combustion de matériaux fossiles, une déforestation accrue et un usage intensif des sols pour l'agriculture, responsables du dégagement de gaz à effet de serre. Les conséquences de ce changement, sont d'une part environnementales avec une modification de l'hydrologie, de la température et des flux de nombreux éléments qui influencent la structure et le fonctionnement des écosystèmes, et d'autre part, socio-économiques dans le sens où une modification de l'aménagement du territoire et de la gestion des ressources découle d'une modification des écosystèmes.

Parmi les gaz mis en cause, le dioxyde de carbone (CO₂) fait l'objet d'une importante attention. En effet le protocole de Kyoto entré en vigueur en 2005, qu'ont ratifié entre autre les membres de l'Union Européenne, prévoit une atténuation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et parmi d'autres le CO₂ par une séquestration dans les sols (UNFCCC, 2010). En outre, un stock important de matière organique carbonée dans le sol peut présenter des bénéfices environnementaux et économiques par un accroissement de la fertilité du sol. Il est possible de simplifier la manière dont se comportent les flux de carbone entre l'atmosphère et le sol en disant que la photosynthèse des végétaux supérieurs permet la fixation du carbone atmosphérique sous forme organique et le relargage dans l'atmosphère de CO₂ par la respiration hétérotrophe des microorganismes (Arrouays *et al.*, 2002). Le potentiel de stockage du carbone organique dans le sol et son temps de résidence dépend de l'utilisation de la matière organique (par exemple une exportation signifie une perte potentielle de carbone dans le sol), la gestion du sol (le travail simplifié réduit les pertes en carbone) et de facteurs non contrôlables (climat, texture du sol, etc.). De nombreux experts se sont penchés sur la question et il en ressort que l'un des plus grand puits de stockage du carbone correspond aux occupations du sol de type prairies (Robert, 2002). De part l'hétérogénéité de ce que l'on peut appeler « prairies » (prairies *stricto sensu*, friches, jachères) et de leur usage et gestion (fauchage, pâturage, etc.), il est difficile de généraliser la manière dont varient les stocks du carbone du sol. En effet, bien que les variables les plus influentes sur les flux de carbone pour ces écosystèmes sont abiotiques (variables climatique, type de sol) à grande échelle, localement les principales variations sont issues du mode de gestion (Wang *et al.*, 2010). Afin d'estimer la quantité de carbone stockable dans les prairies, il est nécessaire d'effectuer une estimation des stocks actuels.

1.3 Objectifs de travail

Le travail présenté ici développe trois tâches dont les objectifs sont les suivants :

1. Créer une méthodologie appliquée à l'estimation des stocks de carbone organique du sol (SOCS) au niveau des prairies de la Communauté Autonome de Catalogne en Espagne. Cette estimation sera effectuée par le biais d'un modèle empirique développé à partir d'un échantillonnage réalisé sur des prairies en majorité situées dans le massif des Pyrénées et à haute altitude. L'estimation prendra la forme d'une distribution spatiale des SOCS sous la forme d'une carte. Elle s'appuiera sur l'utilisation de nouvelles technologies, dont un SIG, pour l'extraction des variables et l'application du modèle. Une analyse des données entre valeurs réelle et valeurs prédites par le modèle sera effectuée afin d'observer la solidité du modèle ;
2. Mettre en place un formulaire afin de mieux gérer la base de données PASTUS du laboratoire contenant les informations inhérentes aux échantillonnages effectués sur le terrain. Le formulaire devra être convivial et facile d'accès afin de garantir une bonne saisie des données et une meilleure gestion ;
3. Assister par l'utilisation de l'outil SIG à la recherche de parcelles en prairies dans le but d'installer une tour micro météorologique à partir de critères très précis ainsi que la recherche des zones dans les Pyrénées ayant la meilleure résolution temporelle par superpositions d'images Landsat dans le cadre du projet européen FLUXPYR.

1.4 Hypothèse de travail

Des hypothèses peuvent être formulées concernant la spatialisation des SOCS. Il faut s'attendre à une distribution hétérogène des stocks de carbone, liée d'une part à la grande diversité de microclimats des milieux de montagne, et d'autre part à l'hétérogénéité de la topographie et des modes de gestion. Le modèle utilisé a été créé à partir de données collectées en montagne, et il est donc possible que les valeurs prédites, en plaine par exemple, s'éloignent des valeurs de stocks réelles. Ainsi le modèle pourrait avoir une échelle d'application relativement restreinte.

1.5 Structure du mémoire

Ce rapport présente trois travaux principaux effectués au cours du stage, qui constituent le contenu des chapitres 2, 3 et 4. Le premier concerne la spatialisation des stocks de carbone organique dans le sol des prairies de Catalogne à l'aide d'un modèle empirique basé principalement sur des variables climatiques. La seconde tâche consiste à améliorer la base de données du laboratoire sous forme de formulaire afin d'assurer une meilleure gestion des données et une plus grande facilité de saisie des données. Pour terminer, la troisième activité développée en relation avec le projet FLUXPYR, a consisté à aider à la recherche de parcelles avec des critères précis de sélection afin d'y installer des tours micrométéorologiques, mais aussi rechercher les zones dans les Pyrénées possédant la meilleure résolution temporelle en terme d'images satellites, et ceci à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG).

Chapitre 2 : Spatialisation du carbone organique dans le sol des prairies à partir d'un modèle empirique

2.1 Séquestration du carbone et changement climatique : enjeux et mécanismes

2.1.1 Intérêt de la séquestration du carbone dans le sol des prairies

Avec l'avènement de l'ère industrielle et la combustion de matériaux fossiles, la concentration de gaz à effet de serre (GES) s'est accrue depuis près de deux siècles et l'émission en particulier du CO₂ s'est accélérée d'environ 80 % depuis les années 70 (Pachaury *et al.*, 2007). Tout en restant prudent quand aux conséquences des possibles changements climatiques imputés aux GES, il convient de rechercher des mesures d'atténuation de leur concentration dans l'atmosphère.

Parmi les GES remis en cause, le CO₂ fait parti des plus important avec le méthane (CH₄). De nombreux groupes d'experts se sont réuni afin de trouver des solutions réalistes pour d'une part limiter les émissions de CO₂ et d'autre part d'atténuer les effets des changements climatiques en diminuant la concentration dans l'atmosphère du CO₂. Le stockage dans le sol sous forme de carbone organique semble être une solution (Robert, 2002). En effet, bien que les processus ne soient pas entièrement connus, le sol, via l'absorption du CO₂ par les végétaux et sa restitution sous forme de carbone organique, peut représenter un important puits pour le carbone atmosphérique.

Bien entendu, les SOCS maximaux varient en fonction de l'occupations du sol. Dans le cas de l'Espagne (et la majorité de l'Europe et du monde), les plus grands SOCS sont situés au niveau des prairies et des zones arbustives (Rodríguez-Murillo, 2001) avec en moyenne 131 tC. ha⁻¹ (en Espagne) et en moyenne de 70 tC.ha⁻¹ en Europe (Arrouays *et al.*, 2002). De plus, le taux de séquestration du carbone atmosphérique dans le sol, si les stocks maximaux ne sont pas atteints, est de 0,51 t C.ha⁻¹ en moyenne pour les prairies d'Europe (Jones *et al.*, 2004). Il est donc clair que les prairies ont un rôle important dans la diminution de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère et l'atténuation des conséquences du changement climatique. Encore faut-il, pour prévoir et appliquer une politique de réduction, un état des lieux des processus qui entrent en jeux dans la séquestration du carbone et des stocks actuellement disponibles au niveau des prairies.

2.1.2 Paramètres et mécanismes influençant la séquestration du carbone

Le mécanisme de fixation du CO₂ sous forme organique est régit principalement par la photosynthèse des végétaux supérieurs (Arrouays *et al.*, 2002) mais il est aussi dépendant de la décomposition du carbone organique par les microorganismes par respiration hétérotrophe majoritairement qui le rejettent sous forme de CO₂. La séquestration est donc dépendante de l'équilibre entre les entrées (biomasse végétale) et les sorties (décomposition) du carbone au niveau du sol. Par contre, le cycle du carbone et en particulier le stockage potentiel du CO₂ dans le sol des prairies sous forme de carbone organique est un ensemble de processus très complexes dans lequel interagissent des paramètres abiotiques et biotiques.

Concernant les paramètres abiotiques, un des principaux facteurs contribuant à d'accroissement du stock de carbone correspond à la proportion d'argile dans le sol (Garcia-Pausas *et al.*, 2007). En effet, l'argile permet de créer des complexes argilo-humiques avec le carbone organique préservant ce dernier de la décomposition (minéralisation) par les microorganismes et contribue à le stabiliser dans le sol (Hassink, 1997). Plus le pourcentage en argile est grand plus la préservation du carbone organique dans le sol est importante. La topographie joue aussi un rôle particulier même si il est indirect sur la séquestration. L'exposition influence la biomasse végétale

dans le sens où : à faible altitude, une exposition au sud peut entraîner un stress hydrique sur la communauté végétale par la hausse de la température et donc une baisse de la biomasse végétale susceptible d'être apportée sous forme de carbone organique dans le sol ; à haute altitude, une exposition au nord augmente la récurrence des épisodes de gel et de froid qui limitent la production primaire et donc la quantité de biomasse limitant un apport en carbone organique dans le sol. Ainsi, l'influence de la topographie (facteur abiotique) sur la végétation (composante biotique) est importante dans le processus de séquestration (Garcia-Pausas *et al.*, 2007). La plus grande quantité de carbone se trouverait alors à faible altitude sur une exposition nord (réduction du stress hydrique) et à haute altitude sur les expositions sud (réduction du manteau neigeux).

Concernant les paramètres climatiques, les SOCS semblent corrélés négativement avec la température annuelle moyenne (MAT) et positivement avec les précipitations annuelles moyennes (MAP) (Wang *et al.*, 2010). Il est possible de lier les paramètres climatiques avec la biodiversité végétale (Sebastià *et al.*, 2010, en préparation). Les contraintes climatiques exercent une pression de sélection sur les espèces végétales en ne sélectionnant que les espèces adaptées. Si à l'échelle régionale se sont les paramètres abiotiques qui régissent la quantité des SOCS, à plus petite échelle, les paramètres biotiques et en particulier la gestion des prairies en terme d'élevage peuvent avoir un impact important. Un pâturage important par le bétail mais ponctuel dans le temps peut avoir un impact positif sur les SOCS (Conant *et al.*, 2003) par rapport à un usage extensif. Car dans le premier cas, comme pour un pâturage moyen mais plus long sur la durée (que ce soit des bovins ou des ovins mais avec des patrons différents), la richesse spécifique augmente (Sebastià *et al.*, 2008). Ceci permet d'éliminer les espèces dominantes et d'assurer une meilleure répartition des ressources et donc un accroissement de la biomasse (production primaire). Si la biomasse augmente, alors la quantité de carbone stockable dans le sol sous forme organique augmente elle aussi potentiellement (Arrouays *et al.*, 2002). D'autres paramètres entrent en jeu, ce qui rend l'étude de la séquestration du carbone atmosphérique dans le sol très complexe.

2.1.3 Pourquoi estimer et spatialiser les stocks de carbone organique du sol ?

Ce travail se concentre avant tout sur l'état du carbone organique du sol au niveau des Pyrénées. En effet, comme toute formation montagneuse, elles sont fragiles face aux changements climatiques avec des conséquences non négligeables sur le renouvellement des ressources, les cycles hydrologiques et biologiques. En effet, les écosystèmes de montagnes possèdent une grande hétérogénéité de milieux dont le schéma le plus symbolique correspond aux étages de végétation, chacun caractérisés par une faune et une flore spécifiques (et avec de nombreuses espèces endémiques) mais aussi des cycles géochimiques propres. Très dépendant des conditions abiotiques (le climat par exemple), la moindre perturbation peut entraîner de brusques changements dans le fonctionnement des écosystèmes. Les changements climatiques peuvent avoir plusieurs conséquences : la réduction de l'épaisseur du manteau neigeux et de sa durée durant l'année (López-Moreno *et al.*, 2009) ; , des difficultés dans la gestion, la disponibilité et l'accès aux ressources en eau à cause d'une réduction des débits des cours d'eau par exemple (López-Moreno *et al.*, 2008) ; dans une moindre mesure, la modification de la composition végétale des écosystèmes notamment par une élévation des limites des étages de végétation (Vittoz *et al.*, 2009). Ces conséquences du changement climatique sur les milieux peuvent engendrer des problèmes pour les activités humaines, qu'ils soient économiques (agriculture, tourisme), sociaux (emplois, patrimoine) ou politiques (gestion des ressources, nouvel aménagement du territoire).

La spatialisation, dont les SOCS feront l'objet, est la transformation de données pluridimensionnelles en des représentations géométriques de plus faibles dimensions, basée sur des méthodes de calculs informatiques. Son but est de permettre d'observer des tendances et relations pour des données complexes à n-dimensions. Selon Skupin (2007) : "*Spatialization is the transformation of high-dimensional data into lower-dimensional, geometric representations on the*

basis of computational methods and spatial metaphors. Its aim is to enable people to discover patterns and relationships within complex n-dimensional data while leveraging existing perceptual and cognitive abilities”.

Actuellement, les nouvelles technologies informatiques telles que les SIG, permettent d'établir de nouvelles approches stratégiques vis-à-vis de l'aménagement et de la gestion des écosystèmes et des paysages qu'il soient anthropisés ou non (Tortora *et al.*, 2006). Le suivi des ressources telles que le carbone organique stocké dans les sols n'échappe pas à cette règle.

Pour ce travail, une approche empirique a été utilisée pour estimer les SOCS dans le sol des prairies. L'approche empirique permet d'évaluer un paramètre à partir de mesures réelles mises en relations avec des mesures de variables explicatives prises elles aussi sur le terrain. Ainsi le degré de cohérence entre les résultats de la modélisation (le paramètre à estimer étant ici les SOCS) et les valeurs réelles (mesures sur le terrain des SOCS) possède une certaine proportion d'incertitude (Ogle *et al.*, 2007) car il existe toujours des variables explicatives et des interactions non mesurées. Il existe deux types de modèles empiriques. Le premier est dit prédictif et il est créé afin d'estimer une variable à partir de paramètres dont les valeurs sont connues. Le but final est de se rapprocher des valeurs réelles qui pourraient être mesurées expérimentalement. Le deuxième modèle est dit explicatif et son but est de décrire la part de chaque variable du modèle pour une valeur du paramètre mesuré. Un modèle explicatif peut être en partie prédictif mais l'estimation y est moins bonne. Dans les deux cas, les deux modèles peuvent se rapprocher des résultats expérimentaux tout en comportant une part d'erreur et d'incertitude qui peut être diminuée dans une certaine mesure.

À partir de cela, il est possible d'organiser un suivi des SOCS dans les prairies et d'observer la distribution des stocks sur l'ensemble du territoire afin d'évaluer les effets des changements climatiques mais aussi, dans l'optique d'une politique d'atténuation des GES par une séquestration dans le sol, d'observer l'efficacité des mesures entreprises. La spatialisation est donc un outil de décision et d'analyse permettant de lier le travail des scientifiques à celui des politiques dont le but commun est de respecter l'accord du protocole de Kyoto.

Ici la méthodologie présentera la spatialisation de la distribution des SOCS pour les prairies de haute altitude en Catalogne et si possible l'extrapoler du modèle à la Communauté Autonome entière à partir d'un modèle empirique explicatif climatique.

2.2 Méthodologie

2.2.1 Matériel et système de projection utilisés

Pour ce travail, le logiciel SIG ArcGis® 9.3 d'ESRI™ a été utilisé. Un autre logiciel de SIG, Miramon® développé par le CREAM (Centre Écologique et d'Applications Forestières), a été utilisé ponctuellement afin de convertir des sources d'informations uniquement disponibles dans son propre format (.mmm ou .mmz).

Le système de projection utilisé couramment en Espagne est le système UTM (Universal Transverse Mercator). Les zones qui la concernent sont la 29, 30 et 31 nord. Le système géodésique utilisé ici est le World Geodetic System 84 ou WGS 84 (demi grand axe $a = 6\,378\,137,0\text{m}$; aplatissement $f = 1/298,257\,222\,101$). D'autres sources espagnoles peuvent être en UTM avec comme système géodésique le GRS55 et ED50 ou encore le système de coordonnées géographique GPS en degré minute (datum WGS 84). Le système UTM a été privilégié dans ce travail avec pour datum le WGS 84.

2.2.2 Données nécessaire à la modélisation : la base de données PASTUS

Le travail effectué sur la spatialisation du carbone s'articule autour de la base de données (BDD) PASTUS (interne au laboratoire ECOFUN) dans laquelle sont regroupés, sous MS[®] Excel, les analyses et relevés de terrain de points d'échantillonnages issus de différents travaux, effectués par le groupe de travail ECOFUN, concernant des prairies. Chaque ligne de données correspond à un point géographique particulier d'un échantillon. Toutefois, lorsqu'un suivi temporel d'échantillonnage est effectué sur une même parcelle (donc un même point géographique), il a été demandé de considérer chaque nouvel échantillonnage comme étant un point indépendant (et donc sur une nouvelle entrée). Il est possible de distinguer deux types de points (Fig. 2) :

- Les points « Pyrénéens » : situés le long de la chaîne des Pyrénées ou en piémont. Ils sont situés en Espagne dans les communautés autonomes de Catalogne, de la Communauté Valencienne, de Navarre et d'Aragon et en France en Languedoc-Roussillon (département de l'Aude) et Aquitaine (Pyrénées Atlantiques) ;
- Les points de Salamanque : situés dans la communauté autonome de Castilla y León au sud de la Province de Salamanque.

Une description succincte des différentes variables composantes est présentée plus bas. Les points proviennent de travaux différents ayant eu lieu entre 2001 et 2008 tels que des thèses, des projets de recherche, etc. La base de données est vouée à évoluer par ajout de nouvelles données. De part l'hétérogénéité des sources et des objectifs d'échantillonnages de chaque projet, toutes les variables de la BDD ne sont pas complétées. Une homogénéisation de la structure de la BDD a dû être réalisée ainsi qu'une normalisation. Une partie du travail a été d'entrer de nouvelles données.

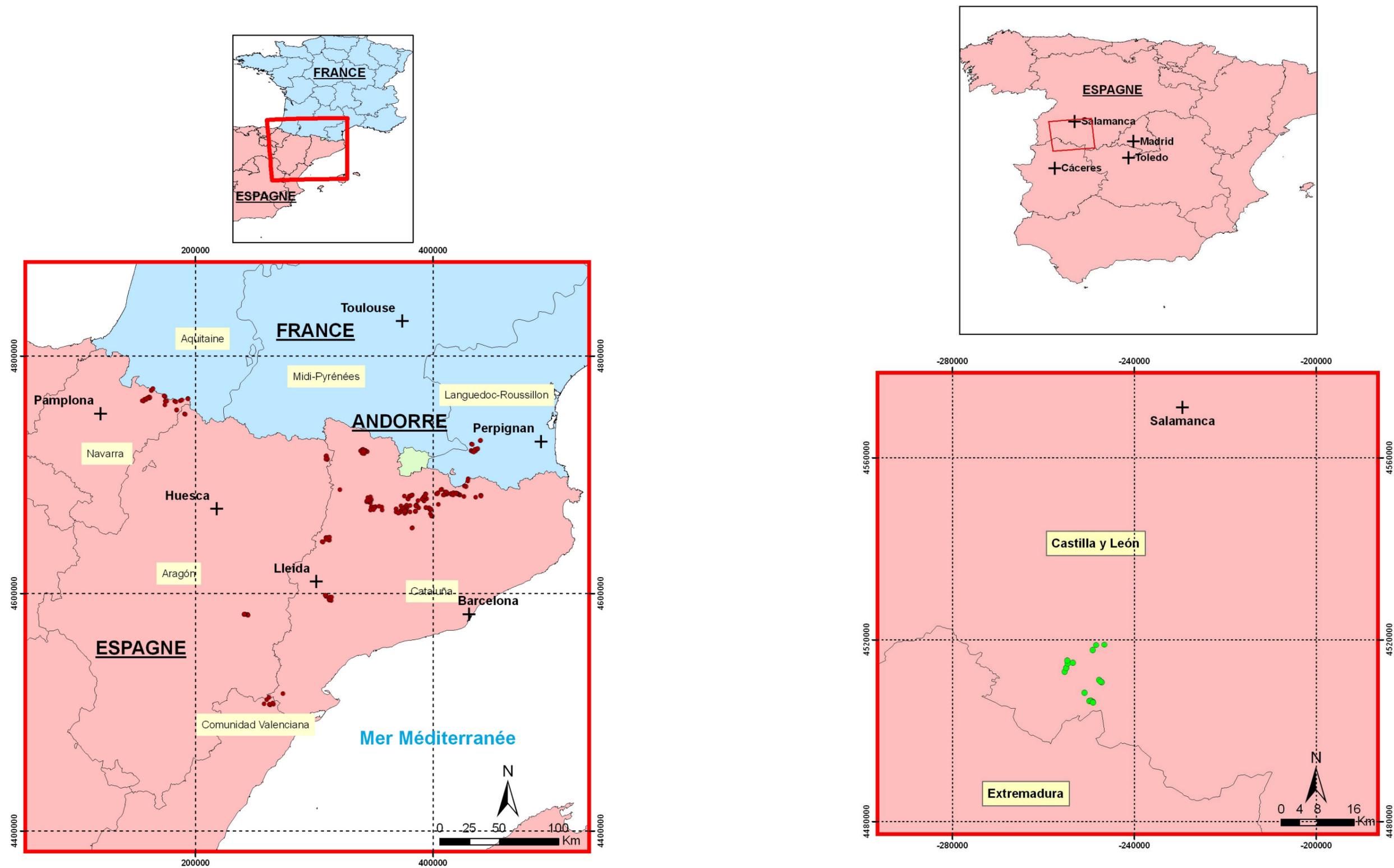


Fig. 2 : Position géographique des points échantillonnés présents dans la base de données PASTUS

La base de données se décline en trois sous-parties :

- PASTUS : qui regroupe les données de terrain et celles issues d'analyses en laboratoire ;
- GENERATED : qui regroupe les données générées par calculs des variables comme par exemple des indices climatiques ;
- GIS : qui regroupe les données extraites depuis un système d'information géographiques et permettant de compléter les informations de terrain si ces dernières sont absentes.

En détail, les grands thèmes abordés dans la base de données PASTUS sont les suivants :

- Données de positionnement (*Location* et *Positioning*). Elles comportent le numéro d'identification du point, son code, ses coordonnées, le projet dont il fait parti et la date d'échantillonnage ;
- Données climatiques, géologiques et topographiques (*Climatic*, *Bedrock* et *Landscape*). Comporte des données relatives aux températures, pluviométrie, géologie et topographie (altitude, exposition, pente, etc.) ;
- Données de gestion (*Land use and Management* ; *Stocking rates*). Elles comportent toutes les informations concernant le type de gestion des prairies, tel que le type de bétail, le nombre de têtes ;
- Données des fèces (*Feces*). Cette partie comporte les variables mesurées pour les fèces d'ovins, de bovins ou d'équidés séparément. Les paramètres mesurés sont : le nombre de fèces, la masse moyenne par unité, leur concentration en carbone et en azote ;
- Données du sol (*Soils 0-10* et *Soils 10-20*). Elles comportent tout ce qui est relatif à l'étude du sol comme la granulométrie, le pH, la quantité de carbonate, de matière organique, la teneur en azote, en carbone, en phosphate et autres éléments minéraux. Ces données font la distinction entre l'horizon des dix premiers cm et celui entre 10 et 20 cm ;
- Données de productivité (*Productivity*). La productivité est représentée par la biomasse végétale par surface. Elle peut se séparer dans la BDD en deux parties : la biomasse globale correspondant à la biomasse aérienne et la biomasse souterraine (de 0 à 10 cm et de 10 à 20 cm de profondeur) ; la biomasse par groupe fonctionnel : arbustes, graminées, graminoides, légumineuses, forbes, cryptogames, autres végétaux (non identifiables) et matière morte ;
- Données de la qualité fourragère (*Quality* et *Root Quality*). Les données de la qualité fourragère des parties aériennes comprennent entre autres des informations sur la teneur en azote, en carbone, en protéines et en fibres. Elles comprennent aussi un indice de digestibilité. Les variables sur la qualité des racines (*Root Quality*) sont : la proportion en protéines en % de matière sèche (MS), en carbone et en azote en pourcentage de matière sèche, MS) ceci pour des profondeurs de 0 à 10 cm et de 10 à 20 cm ;
- Données de diversité (*Diversity*). Il s'agit du nombre d'espèces végétales (de la strate herbacée à arboricole) pour trois tailles de quadrats par site (0,25 m², 4 m² et 100 m²).

Au cours des mois, des données manquantes ont été ajoutées à partir d'atlas climatiques (ACDC, 2010 et ACDPI, 2010), des données SIG à partir d'enquêtes (pour la gestion), d'analyse de laboratoire effectuées (biomasse, fèces). Il s'agissait d'effectuer une maintenance de la base de données dont une partie sera utilisée par la suite pour créer le modèle empirique d'estimation des SOCS.

2.2.3 Extraction des occupations du sol en prairies

Afin de spatialiser le carbone sur les prairies de Catalogne, il a été nécessaire de connaître la localisation de ces dernières. Étant donné l'échelle de travail, le meilleur moyen d'obtenir cette information était de se procurer une image de l'occupation du sol la plus récente possible. La meilleure source a été le serveur du Département de l'Environnement et de l'Habitat de la Generalitat de Catalogne (GENCAT, 2010). L'image d'occupation du sol date de 2002 (données actualisées en 2004) et couvre seulement la Catalogne. Composée de 22 classes d'occupation, elle a une résolution de 30 m. Afin d'extraire les pixels correspondant seulement aux prairies il a fallu :

- sélectionner les classes d'occupations du sol en prairies. Les classes 14 (prairies supraforestales) et 15 (prairies et bosquets) ont été conservés ; les autres classes ont été reclassifiées en valeur de 0 ;
- vectoriser l'image reclassifiée ;
- effectuer une sélection par attributs des zones en prairies (valeurs 14 et 15) afin d'exclure les polygones en 0 ;
- réunir les polygones de prairies en une seule et même entité (fonction *Dissolve*) en ayant au préalable calculé les surface. Dans les options de la fonction *Dissolve*, il a été possible de réaliser une somme de toutes les surfaces afin de connaître la surface total en prairie en Catalogne ;
- retransformer le vecteur en Raster (résolution 100 m pour se superposer au MNT acquis plus tard) afin que l'extraction des valeurs de SOCS provenant du calcul du modèle empirique ne s'effectue que sur les zones (c'est à dire les pixels) en prairies. Les pixels se voient attribuer la valeur de 1.

La surface totale estimée en prairies est de 905 999 ha avec une moyenne de 18 ha par prairie. Celle-ci représente près de 28% du territoire catalan (32 114 km²). Il est utile de souligner que ceci n'est qu'une estimation car issu d'une classification d'images satellites LandSat. De plus, la classe « prairie et bosquet » surestime la surface en prairie car elle contient des surfaces qui ne sont pas en prairies strictes comme des arbres isolés. Ainsi, la spatialisation des prairies est soumise à de nombreuses erreurs. Qui plus est, l'image datant de 2002, des évolutions d'occupation du sol, en particulier de l'urbanisation, ont dû voir le jour depuis.

2.2.4 Description du modèle empirique d'estimation des SOCS

Le modèle utilisé est un modèle empirique prédictif élaboré par Maria-Teresa Sebastià (CTFC) à partir de données issus de la BDD PASTUS (Tableau 1).

Tableau 1 : Paramètres composant le modèle empirique d'estimation des SOCS

Variable	F-Valor	Pr>F	Coefficient
MSTMAT	0.00	0,964	-
MSP	11.43	0,0009	-
Slope	1.47	0,2275	-
Protected	4.77	0,0307	+
MSTMAT*MSP	24.61	<0.0001	+
MSTMAT*Protected	7.62	0.0066	-
MSP*Slope	12.01	0.0007	+

Il s'agit d'un modèle climatique car les composantes principales sont des variables climatiques (**MSTMAT** : différence entre température moyenne estivale {**MST**} et température moyenne annuelle {**MAT**} et **MSP** : précipitation estivale moyenne) mais aussi topographiques (**Slope** : pente ; **Protected** : exposition topographique des prairies). Il calcule le logarithme népérien des SOCS. Une transformation exponentielle permet d'obtenir les valeurs de SOCS en kg.m^{-2} et ceci pour les 20 premiers cms du sol. Le modèle s'appuie sur des données issues de prairies de haute altitude (à partir de 1500 m, étage montagnard). Il n'est donc pas en théorie applicable à l'ensemble des prairies de Catalogne mais à une partie seulement située en altitude. Les variables seront expliquées plus bas.

2.2.5 Variables topographiques

Afin de réaliser des couches de données topographiques, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) au format Raster de l'Espagne a été acquis sur le site de l'Université Polytechnique de Madrid – Ecole Technique Supérieure d'Ingénieur de Montes (UPM, 2010) issus de données du SRTM de résolution 100m. Le MNT était à l'origine en trois parties séparées correspondant aux trois zones UTM dans lesquelles l'Espagne est comprise : zones 29, 30 et 31. Chaque image possédait la projection UTM zone qui lui correspondait avec le datum WGS 84. Pour obtenir un seul MNT pour l'Espagne, un mozaïcage des trois parties a été effectué (fonction *Mozaic to New Raster* ; méthode *Blend*). Comme la majorité des points de la base de données est située en zone UTM 31, il a été décidé de projeter le MNT en UTM 31 (WGS 84) pour plus de commodité. Les valeurs sont comprises entre -141 et 3315m. A noter que les valeurs négatives ont été probablement générées par des erreurs d'interpolation, mais leur nombre étant relativement restreint. Cette couche permet à l'échelle du pixel d'obtenir une valeur d'altitude. Une couche RASTER de valeurs de pente (en degré) qui correspondra à la variable **Slope** a été créée par l'intermédiaire de la fonction *Slope* d'ArcGis®.

La topographie désigne la description et la représentation de la superficie de la Terre. Il est d'usage de la modéliser à petite échelle, par exemple pour un bassin versant (de l'ordre de quelques km), avec un SIG et en utilisant une représentation du réseau hydrologique. Mais ici, l'objectif est de générer, pour la variable **Protected**, une image de la topographie à l'échelle de la Catalogne. Il est certain qu'à cette échelle, les difficultés sont nombreuses et qu'il s'agit d'un travail long et fastidieux si on utilise seulement les réseaux hydrologiques. Encore faut-il que les informations existent à une petite échelle et sur tout le territoire. Aussi, par la présence des Pyrénées et de la côte méditerranéenne, l'altitude varie entre 0 et 3 000 m. Une question permet d'illustrer la difficulté de cette classification topographique du territoire : comment distinguer une vallée d'un sommet qui morphologiquement peuvent être proches (plats, par exemple) et qui sont à la même altitude ? Ponctuellement, il n'y a pas de différence d'un point de vue du SIG car les deux objets sont situés à la même altitude et sont plats. Ce qui permet donc de faire la différence, est la topographie des alentours.

Ainsi, grâce à une barre d'outils particulièrement intéressante *Topography Tools* développé par J. Jenness (Jenness, 2010) et un MNT, il est possible classifier les pixels en différentes classes topographiques en utilisant un indice appelé *Topographic Position Index* (Indice de Position Topographique ou TPI). Cet indice (Weiss, 2001) est calculé pour chaque pixel à partir d'une opération de voisinage de la même manière qu'un filtre. Le TPI permet de classer les pixels selon leur valeur (Fig.3) (Jones *et al.*, 2000). Puisqu'il s'agit d'une opération de voisinage, le choix de l'échelle de travail utilisée dans l'opération revêt donc une importance capitale tant les résultats peuvent être différents selon que le filtre de voisinage est petit ou grand (Annexe 2).

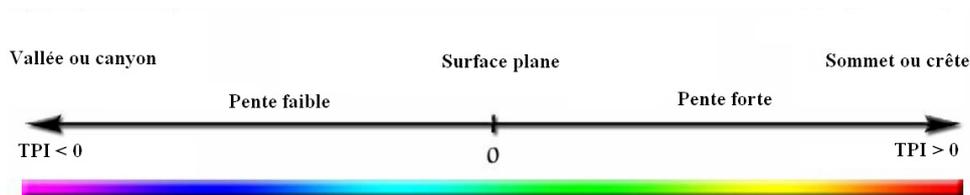


Fig. 3 : Classification des valeurs de TPI en classes topographiques

Pour le projet, il était nécessaire de travailler à la plus petite échelle possible. Compte tenu que la limite réside dans la résolution du MNT (soit 100 m), le travail a été effectué à l'échelle du pixel. L'opération de voisinage a été configurée pour un cercle de rayon d'un pixel (soit 100 m). De plus, comme l'opération est très coûteuse en ressources informatiques, il était nécessaire de réduire l'emprise du MNT au strict nécessaire grâce à des masques correspondant à la Catalogne. À partir de cette image, l'outil *Topographic Position Index* a été utilisé pour générer une image Raster dont les pixels possédaient une valeur de TPI. La nouvelle image a servi par la suite, couplée à nouveau au MNT, à classer ces valeurs en six « classes topographiques », avec l'outil *Slope Position Classification*, selon la classification suivante :

- Valeur 1 correspondant aux vallées ;
- Valeur 2 pour les « bases de la déclivité des pentes » (*toe slope*) ;
- Valeur 3 pour les surfaces planes ;
- Valeur 4 pour les pentes moyennes ;
- Valeur 5 pour les fortes pentes ;
- Valeur 6 pour les crêtes.

La variable de base de la macro topographie utilisé afin de créer la variable **Protected** est composée de quatre catégories :

- Valeur 1 correspondant aux sommets ;
- Valeur 2 pour les pentes orientées au sud ;
- Valeur 3 pour les pentes orientées au nord ;
- Valeur 4 pour les vallées.

Il a donc été nécessaire d'ajouter une information sur orientation de pente. Une image reclassée en deux catégories de l'orientation des pentes issu de la fonction *Aspect* a été créée avec comme critères :

- Valeur de 100 correspondant à l'orientation nord des pixels entre 270° et 90° en passant par le 0° (nord strict) ;
- Valeur de 200 correspondant à l'orientation sud des pixels entre 90° et 270° en passant par le 180° (sud strict).

En additionnant les deux images, une série de classes de valeurs a été obtenue et une interprétation a été nécessaire pour les reclasser (Tableau 2).

Tableau 2 : Correspondance de la reclassification des classes topographiques

Ancienne valeur	1	2	3	4	5	6	101	102	103	104	105	106	201	202	203	204	205	206
Nouvelle valeur	4	0	0	0	0	1	4	3	3	3	3	1	4	2	2	2	2	1

À noter que les valeurs 2, 3, 4 et 5 n'ont pas été reclassées car ces classes n'ont aucun sens et ne peuvent entrer dans aucune des quatre catégories. De plus, leur nombre est négligeable et une très large majorité est située en mer. Lors de la reclassification, la priorité a été donnée aux vallées et sommets (valeurs 101, 106, 201 et 206) car l'orientation n'a aucun sens dans ces cas. Les zones globalement planes (valeurs 103 et 203) ont été classifiées selon leur orientation car il est impossible de choisir entre vallée ou sommet et ceci aurait pu engendrer des classifications douteuses.

Les valeurs sont comprises entre -417 et 345,6. Cette grande amplitude s'explique par le fait que la zone couvre toute la Catalogne et de fait la chaîne des Pyrénées, mais aussi la côte impliquant de ce fait une grande hétérogénéité d'altitudes et de paysages.

Globalement, il semble que les schémas topographiques et la classification soient corrects. En comparant la classification avec une image satellite, il est possible d'observer une corrélation et une similitude avec la situation réelle (Fig.4).

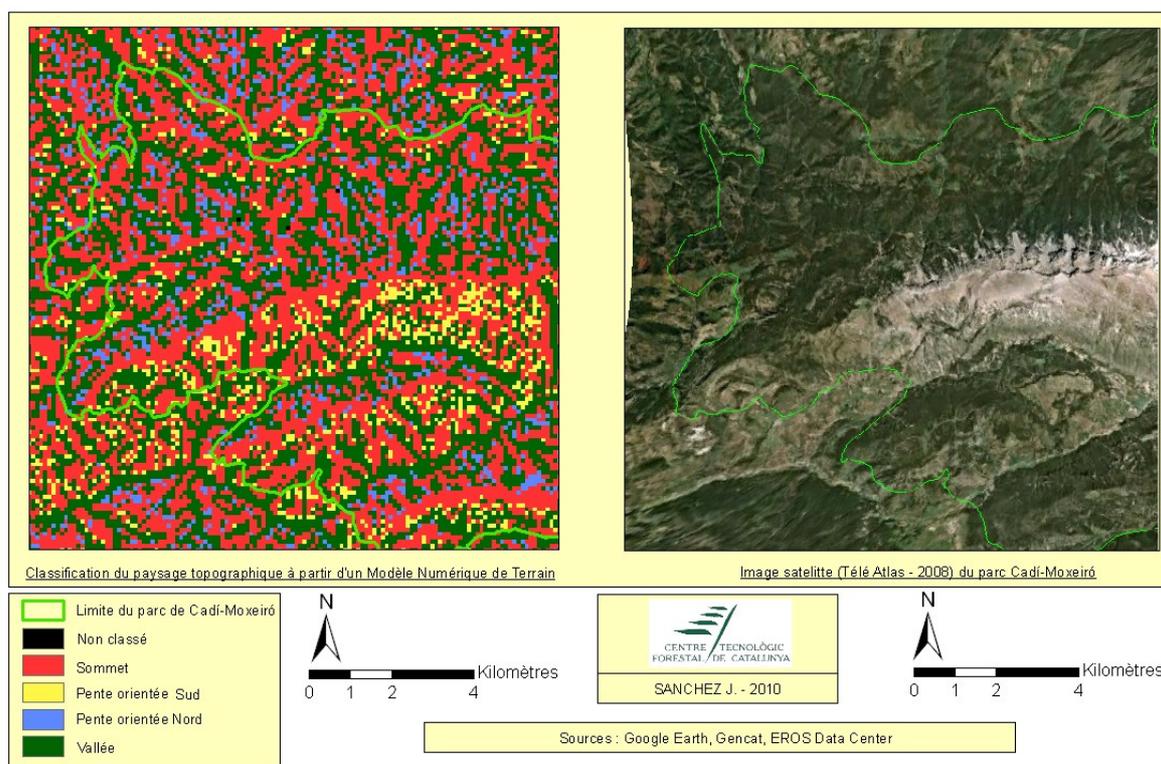


Fig.4 : Comparaison entre la réalité et la classification topographique au niveau du parc du Cadí-Moxeiró

Le modèle de spatialisation des SOCS utilise une variable semi-quantitative simplifiée (**Protected**) de cette classification, en binaire. La variable indique si la prairie a une exposition prolongée à la luminosité (orientation au sud et sommets) ou non (orientation au nord et fond de Vallée) facteurs qui peuvent influencer sur la croissance végétale et donc biomasse végétale. Plus la biomasse végétale est importante, plus la quantité de carbone organique susceptible d'être séquestrée dans le sol est importante, mais il faut garder en vue que la respiration des microorganismes peut elle aussi augmenter. Les pixels sont une nouvelle fois reclassifiés :

- en 1 pour les vallées et les pentes orientées au nord (valeurs 4 et 3) ;
- en 0 pour les sommets et les pentes orientées au sud (valeurs 1 et 2).

D'autres couches de variables topographiques ont été générées (microtopographie, exposition angulaire des pentes, etc.) et extraites pour les points de la base de donnée PASTUS. Il n'est pas utile de détailler la méthodologie car elles n'ont pas été utilisées dans le modèle.

2.2.6 Variables climatiques

Un des référents a préconisé de travailler sur des données climatiques pour une échelle de 0,25° (15° min). Les données les plus pertinentes ont été prises sur des données mondiales (WorldClim, 2010) en format Raster pour environ un tiers de la surface terrestre et pour des valeurs moyennes de 1950 à 2000. Que cela soit les données de précipitation (en mm) ou températures mensuelles, l'échelle est de 0,16° (10° min) avec une résolution au pixel de 3 254 m. Les couches de chaque mois sont disponibles individuellement. Chaque variable est calculée à l'aide la calculatrice Raster (*Raster Calculator*). Pour chaque variable générée, le Raster a été découpé pour obtenir uniquement l'emprise d'un cadre comportant l'Espagne et les Pyrénées françaises. La résolution a été augmentée à 100 m par la fonction *Resample* d'ArcGis® (rééchantillonnage cubique) afin de superposer les données d'occupation du sol et les variables topographiques.

La couche de la variable **MAT** (*Mean Annual Temperature*) a été calculée via la calculatrice raster (*Raster Calculator*). Il s'agit simplement d'effectuer la moyenne des températures pour l'année à partir des températures moyennes mensuelles :

$$\mathbf{MAT} = (1/12) \times (\text{somme des températures moyennes mensuelle des 12 mois de l'année})$$

La couche de la variable **MST** (*Mean Summer Temperature*) a été créée de la même manière mais en prenant seulement les mois de juin, juillet et août.

$$\mathbf{MST} = (1/12) \times (\text{somme des températures moyennes de juin, juillet et août})$$

La variable **MSTMAT** est la différence entre les variables MST et MAT (MST-MAT).

La source des données étant identique à celle des températures, la même méthodologie a été appliquée pour la variable des précipitations moyennes estivales. Ainsi, la **MSP** (*Mean Summer Precipitation*) a été créée. L'unité des valeurs des pixels est le millimètre.

$$\mathbf{MSP} = (1/3) \times (\text{somme des précipitations moyennes de juin, juillet et août})$$

Il est nécessaire de préciser que les sources de données utilisées pour le modèle sont différentes. Les données climatiques de la base données PASTUS proviennent essentiellement de l'Atlas Climatique Digital de Catalogne (ACDC, 2010) mais les couches n'ont pas pu être extraites (problème du serveur probablement).

2.2.7 Spatialisation des SOCS

La calculatrice Raster a été utilisée pour générer une image Raster à partir du modèle (coefficients) et des variables générées précédemment. Les SOCS sont donc disponibles pour toute la Catalogne sans distinction de l'occupation du sol. À la suite de ceci, il a fallu extraire les pixels uniquement en prairie. Ainsi, l'image précédente est multipliée par celle des prairies. Puisque, seuls les pixels en prairies possèdent une valeur (1), tout autre pixel de valeur de SOCS ne se superposant

pas aux prairies sera donc exclu et non représenté. L'image finale représente la distribution des SOCS pour les prairies de Catalogne (Annexe 3).

Comme le modèle est conçu à partir de données de prairies à haute altitude (minimum à 1 597 m), une ségrégation des pixels a été nécessaire. Une sélection des altitudes à partir de 1 500 m (valeur de 1) et excluant les autres (valeur en *NoData*) a été effectuée afin de sélectionner par une multiplication de celle-ci par l'image des SOCS de Catalogne. Ainsi, une image de la distribution des SOCS des prairies en haute altitude est obtenue.

2.3 Résultats

Deux cartes de la distribution du carbone organique dans le sol des prairies ont été créées. La première (Fig. 5) représente la distribution des SOCS au niveau des prairies à plus de 1500 m d'altitude dans les Pyrénées catalanes, la deuxième (Fig. 6) représente la distribution des SOCS pour toute la Catalogne même si en théorie le modèle n'est pas conçu pour le territoire entier. La quantification et divers calculs statistiques ont permis d'analyser la distribution des SOCS (Tableau 3). Les limites administratives ont été prises sur le site de DIVA-GIS (2010).

Tableau 3 : Calculs statistiques sur la distribution des SOCS en Catalogne et pour les prairies de haute altitude

Catalogne		Pyrénées (Alt min : 1500m)	
SOCS (kg.m-2)	Valeur	SOCS (kg.m-2)	Valeur
Min	0,846532	Min	2,03809
Max	21,0951156	Max	11,682382
Moyenne	7,17837	Moyenne	8,057577
Erreur standard	2,308931	Erreur standard	1,212378
Surface (ha)	905999	Surface (ha)	180800
SOCStot (t C)	65035960,42	SOCStot(t C)	14568099,22

La quantité estimée des SOCS pour les 20 premiers cm du sol sur l'ensemble des prairies de Catalogne est d'environ 65 millions de tonnes de carbone pour une surface de 905 999 ha. Si l'on compare les stocks de carbone situés dans les sols des prairies de haute altitude, leurs stocks (plus de 14 millions de tonnes de carbone) représentent environ 22 % des stocks de carbone alors que la surface ne représente que 19 % du total de la surface des prairies de Catalogne (180 800 ha). Il faut aussi remarquer que la moyenne des stocks est plus importante en altitude (8 kg.m⁻²) que pour l'ensemble du territoire (7,2 kg.m⁻²) suggérant une hétérogénéité de la distribution des stocks sur le territoire. Visuellement, il est certain que certaines zones stockent plus de carbone que d'autres. Les zones dont les stocks sont importants sont situées au niveau de la côte à l'est mais aussi au niveau des Pyrénées au nord. La zone dont les stocks sont les plus bas est située au niveau de la plaine des alentours de Lérida (à l'ouest) et plus au sud, cette zone étant très sèche en été. Il est possible que les paramètres climatiques y soient pour beaucoup comme le suggère Sebastià *et al.* (2010, en préparation).

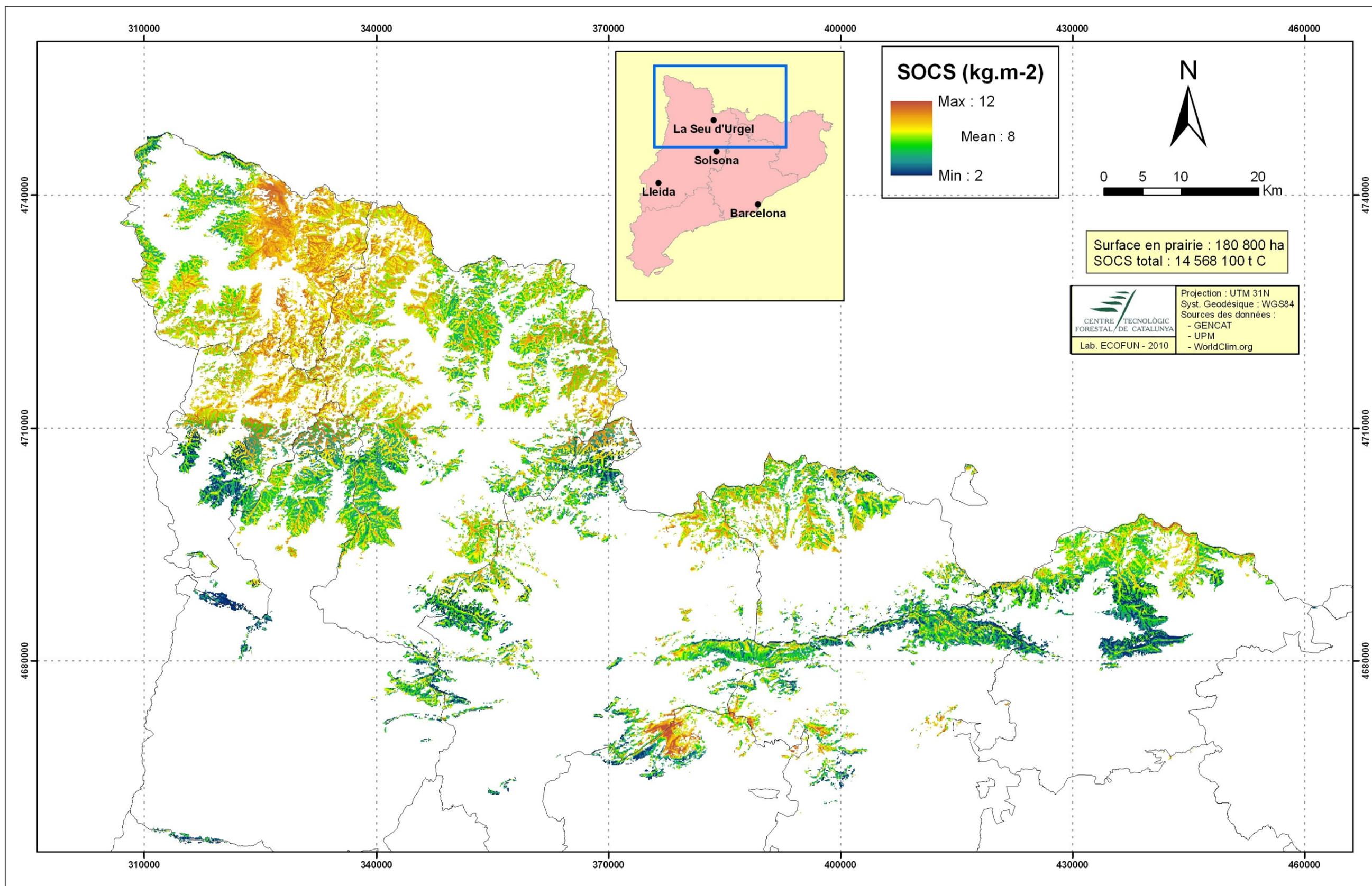


Fig. 5 : Distribution des stocks de carbone organique dans le sol (SOCS) des Pyrénées catalanes à partir de 1500 m

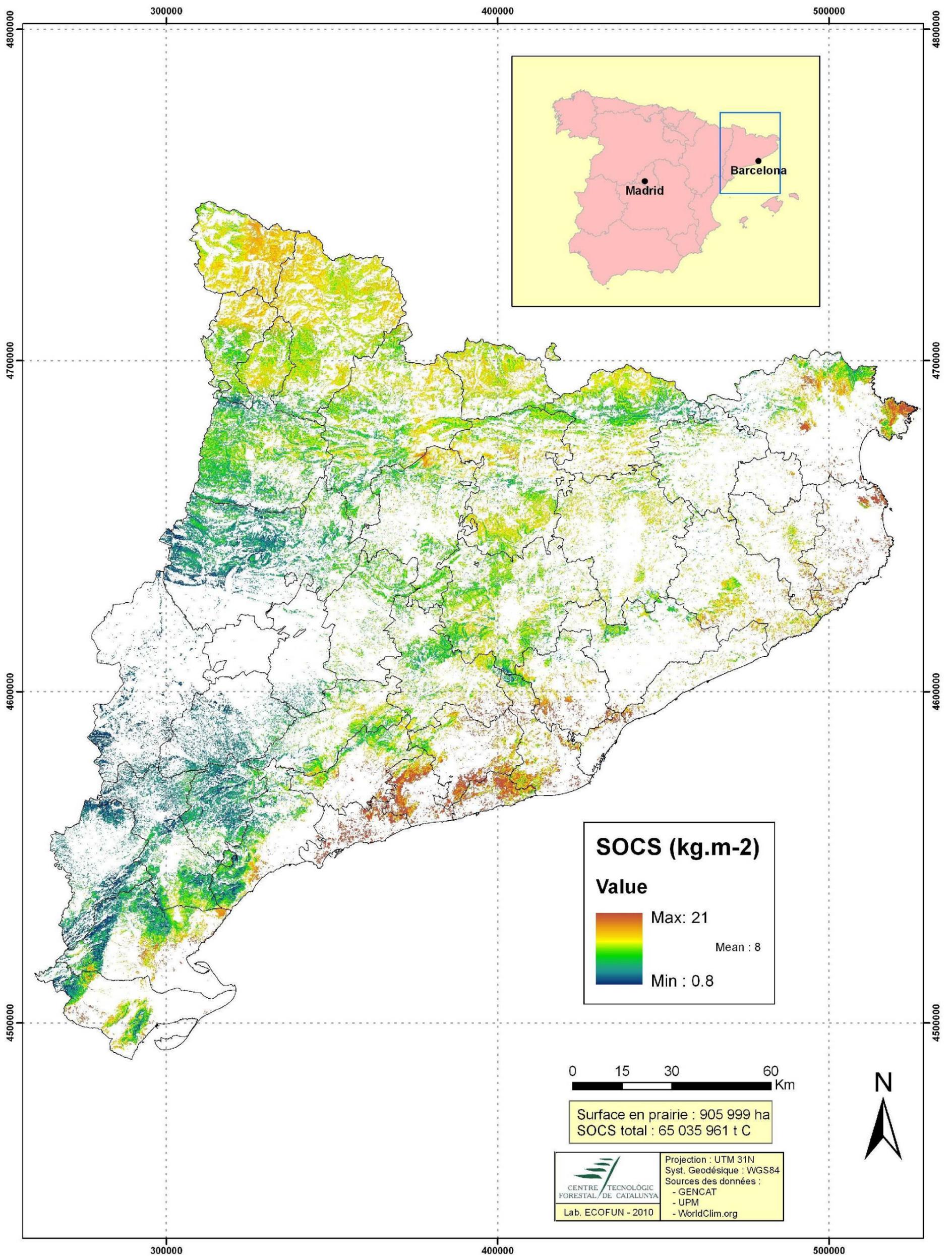


Fig. 6 : Distribution des stocks de carbone organique dans le sol (SOCS) des prairies de Catalogne

Tableau 4 : Comparaison des statistiques entre les valeurs prédites de SOCS par le modèle et les valeurs observées

Valeurs prédites		Valeurs observées (tous les points)		Valeurs observées (points en Catalogne)	
	SOCS(kg.m-2)		SOCS(kg.m-2)		SOCS (kg.m-2)
Min	5,44	Min	1,981862	Min	4,717482
Max	14,07	Max	23,012498	Max	10,387862
Moyenne	7,976175167	Mean	8,098955119	Moyenne	7,912513
Sd	1,491909884	Sd	3,696656799	Sd	1,224243

Si l'on compare, les valeurs prédites pour les points utilisés en prairies de haute altitude (1500 m), et les valeurs observées, il est possible d'observer plusieurs choses (Tableau 4) :

- En comparant les valeurs prédites pour l'ensemble des points utilisés à la création du modèle (provenant de Navarre, de Catalogne et certains de France), il est possible d'affirmer que le modèle prédit mal les SOCS. En effet, les valeurs extrêmes entre prédites (min : 5,44 kg.m⁻² et max : 14,07 kg.m⁻²) et observées (min : 1,98 kg.m⁻² et max : 23,01 kg.m⁻²) sont très différentes ainsi que la déviation standard (1,49 vs 3,69)
- En considérant par contre uniquement les points situés en Catalogne, le modèle se rapproche beaucoup plus de la réalité en termes de prédiction. Les valeurs minimales (5,44 kg.m⁻²), moyennes (7,98 kg.m⁻²) et la déviation standard (1,49) des SOCS prédits sont proches des valeurs réelles (min : 4,72 kg.m⁻² ; moyenne : 7,91 kg.m⁻² ; déviation standard : 1,22).

Il est donc possible que le modèle ne puisse être utilisable efficacement que pour un territoire particulier (donc la Catalogne), puisqu'en éliminant les points hors Catalogne les SOCS prédits se rapprochent fortement des valeurs réelles si l'on considère un ensemble de points. De plus, la majorité des points ayant servi à créer le modèle provient de Catalogne.

Le modèle prédit plutôt bien les valeurs de SOCS au niveau des prairies de haute altitude mais en Catalogne, il est intéressant d'observer comment se comporte le modèle dans d'autres conditions. Des valeurs de SOCS étaient disponibles pour une zone de moyenne montagne homogène à cheval entre la Catalogne et la Communauté Valencienne (appelée Los Ports). Comme un seul point n'était disponible en Catalogne (les autres étant en Communauté Valencienne mais proches de la frontière), un échantillonnage aléatoire de points a été effectué dans la zone la plus proche de ces points mais en Catalogne afin d'extraire des valeurs de SOCS prédites et les comparer avec les valeurs réelles statistiquement (Tableau 5).

Tableau 5 : Comparaison entre valeurs prédites et valeurs observées de SOCS au niveau de Los Ports

Valeurs prédites		Valeurs observées	
	SOCS(kg.m-2)		SOCS(kg.m-2)
Min	1,93631	Min	1,14
Max	6,785491	Max	6,81
Moyenne	4,065883	Moyenne	4,13
Sd	1,29006	Sd	1,82

Si l'on observe l'ensemble des données, d'un point de vue statistique les valeurs prédites et réelles sont plutôt proches. Il est donc possible que finalement, le modèle peut dans certains cas bien prédire les SOCS dans des conditions autres que les prairies de haute altitude.

2.4 Discussion

Le modèle présenté et analysé ici succinctement en raison de la confidentialité des travaux sur la modélisation du carbone, permet dans certaines conditions de prédire de manière assez fiable les SOCS au niveau des occupations du sol de type prairies. Le modèle permet de prédire les SOCS pour les prairies de haute altitude (à partir de 1 500 m) mais uniquement en Catalogne. Il est possible de supposer que ceci provient du fait que la majorité des données utilisées pour créer le modèle provient de Catalogne. Les conditions climatiques entre la Catalogne (influence méditerranéenne) étant différentes de la Navarre (influence atlantique) ces identités climatiques peuvent se faire ressentir probablement en se mêlant au climat montagnard. Par contre, il est étonnant que le modèle prédise aussi bien les SOCS au niveau d'autres milieux (exemple de Los Ports). Toutefois, il serait utile d'effectuer un échantillonnage sur d'autres zones afin de vérifier ce constant et ainsi écarter un simple effet du hasard. Ensuite, il existe bien une hétérogénéité au niveau des SOCS à l'échelle de la Catalogne. L'hétérogénéité climatique (climat méditerranéen, montagnard etc.) mais aussi topographique peuvent expliquer cette observation.

Concernant la méthodologie pour arriver à spatialiser les SOCS à partir d'un modèle empirique, certaines remarques sont à formuler. Premièrement, l'image d'occupation des sols n'était pas très précise et la classification des pixels en elle-même doit être sujette à caution. D'une part le fait qu'il y ait une zone dite en prairie et bosquets suggère que la surface en prairie « pure » est surestimée, d'autre part une observation par superposition des classifications en prairie et les images de Google™Earth ont permis de voir que de nombreuses zones n'étaient pas en prairies mais en culture céréalière. Ensuite, les données climatiques utilisées, bien que ramenées à la résolution de 100 m, n'étaient pas très précises (résolution de l'ordre de 3 km) et non récentes (moyennes entre 1950 et 2000). Ainsi, il faut considérer que des zones de 9 km² aient la même valeur car issu d'images climatiques de faible résolution. L'augmentation de la résolution a servi seulement à obtenir une spatialisation à une résolution de 100 m. Si cela n'avait pas été fait, la spatialisation aurait été faite à la résolution la plus basse, c'est-à-dire à 3 km. De plus, dû à une indisponibilité des données, les données climatiques utilisées pour le modèle (Atlas Climatique Digital de Catalogne : ACDC, 2010) n'ont pu être utilisées pour la spatialisation. Les données pouvaient être extraites directement sur Internet ponctuellement à l'aide des coordonnées mais un problème de serveur (signalé auprès du service mais non résolu au cours du travail et sans aucun retour) a empêché l'extraction des couches Raster climatiques. Il a donc fallu rechercher une autre source de données (celles utilisées dans la méthodologie). Enfin, la classification, de manière arbitraire de la variable topographique **Protected** et la méthodologie utilisée, n'est pas forcément proche de la réalité et juste. Ces remarques permettent d'illustrer les limites et les difficultés rencontrées lors de l'utilisation d'un SIG. Il s'agit d'un compromis entre disponibilité des données, temps et coût imposé à leur acquisition et transformation et l'approche de la réalité.

Toutefois, il s'agit d'une bonne base quand à la spatialisation du carbone organique dans le sol des prairies en Catalogne à partir d'un modèle empirique et d'une première en Catalogne qui devrait être intégré dans le projet de recherche FLUXPYR (décrit au chapitre 4). La méthodologie et le modèle utilisés devront être améliorés afin d'obtenir un modèle plus universel, plus précis et plus robuste. Cette spatialisation permet aussi d'avoir un premier aperçu des SOCS en Catalogne. L'intérêt sera d'effectuer un suivi et si possible intégrer des données à différentes échelles (région, bassin versant, écosystème, parcelle agricole). Cette spatialisation et le suivi régulier des SOCS sont

importants dans la compréhension et l'observation des effets du changement climatique sur les SOCS, leur évolution et l'efficacité des méthodes de séquestration du CO₂ dans le sol sous forme de carbone organique. Pour terminer, la spatialisation sous forme de cartes thématiques est un bon support de diffusion des résultats des recherches auprès de la communauté scientifique mais aussi pour sensibiliser les politiques et le grand public sur l'évolution et les conséquences des changements climatiques sur le milieu naturel.

Chapitre 3 : Création d'un formulaire pour la base de données PASTUS

3.1 Objectifs

La base de données (BDD) PASTUS possède certaines lacunes et défauts issus de sa structure en elle-même et du fait d'être exclusivement sous MS[®] Excel :

- Il n'existe pas d'homogénéisation des données pour un même champ. En effet, suivant les personnes chargées d'entrer de nouvelles données, les unités, et parfois, les types de données (numérique, texte, variable semi-quantitative, etc.), sont différents, ce qui rend la manipulation de ces mêmes données extrêmement délicate. L'exemple explicite est celui des coordonnées des points d'échantillonnage. D'une part, il a été aperçu qu'une confusion entre latitude et longitude a pu se faire (inversion des données), d'autre part les coordonnées n'ont pas été définies dans un système de projection spécifique, ce qui donne pour résultat une hétérogénéité difficile à manipuler (coordonnées UTM ou géographiques ; datum ED50 ou WGS 84, etc.). D'autres champs combinaient aussi des données numériques et textuelles ;
- La grande quantité de champs présents dans la base de données (124 pour la table principale PASTUS et 124 pour la table de calcul *Generated*) peut rendre difficile d'accès l'information recherchée surtout si une personne qui n'a jamais été confrontée à celle-ci doit y entrer des données. Un temps non négligeable d'adaptation est nécessaire afin d'assimiler la structure de la base de données et l'intitulé des champs ainsi que leurs unités ;
- S'agissant d'une base de données en tableur, elle peut être fournie et envoyée facilement à de nombreux collaborateurs. Or ce manque de centralisation d'un même fichier entraîne un grand nombre de copies pour lesquelles l'information n'est pas forcément la même pour l'ensemble de la base de données et donc dispersée entre les partenaires.

Compte tenu de ces principaux défauts qui risquent de s'aggraver et de rendre de plus en plus difficile la manipulation des données dans l'avenir, à l'issue d'une initiative personnelle et d'un consensus avec le tuteur du stage, l'idée de créer un formulaire d'entrée de données a été approuvée. Celui-ci aura pour but de faciliter l'entrée des données en clarifiant les intitulés des champs et leurs unités, et de séparer la base de données en thèmes permettant un accès plus simple aux personnes intéressées par un thème particulier et/ou de leur domaine de compétence. Un point important sera la centralisation de la base de données à partir du formulaire, le but n'étant pas de la copier mais bel et bien de la conserver en une seule et même copie.

3.2 Structure et mise en place

Avant de se lancer dans l'élaboration du formulaire, il a été nécessaire de se concentrer sur la structure à mettre en place et notamment les tables à définir ainsi que le Modèle Conceptuel de Données (MCD). Le nombre de thèmes est de 6 ce qui paraissait être un compromis satisfaisant entre une bonne séparation de la BDD originale et une trop grande dispersion des informations. Les thèmes (correspondant chacun à une table) sont les suivants :

- **TLocation** regroupe les informations généralistes et métadonnées des points. Elle comporte les dates, noms, localisations approximatives (noms de lieux), coordonnées, etc. ;
- **TClima-Topo** incorpore à la fois des données climatiques, telles que les températures, pluviométrie, radiation solaire ainsi que des variables climatiques, et des données de topographie comme l'altitude, la pente, l'exposition, etc. ;
- **TGeol** comporte des informations sur les analyses du sol (texture, concentration en éléments minéraux, etc.) et géologiques (type de roche mère et pH) ;
- **TManagement** décrit le type de gestion sur les prairies (type(s) de bétail(s) et les charges en bétail) ainsi que des données concernant les fèces (quantité, proportion de carbone et d'azote) ;
- **TVegetation** possède des données concernant la végétation des prairies. Il s'agit de la biomasse souterraine et aérienne, de la biomasse par groupe fonctionnel, et des données caractérisant la digestibilité (contenu en protéines, fibres, etc.) et de diversité ;
- **TGenerated** contient des données calculées ou générées après analyse (sous forme de variables semi-quantitatives) à partir des tables précédentes.

Les tables, avant leur entrée sous MS[®] Access, ont été au préalable créées en sélectionnant dans la BDD PASTUS les champs et données correspondants aux thèmes choisis. Chacune se voit attribuer un identifiant différent selon la table qui sera la clé primaire qui n'existait pas à l'origine mais nécessaire ici au bon fonctionnement de la BDD. Dans PASTUS, à l'origine, les points étaient identifiés par un champ appelé *CODE* (correspondant à la succession des numéros d'échantillons dans le temps allant de 1 à 400), ce dernier servira de base pour créer les identifiants selon le codage suivant :

- pour *TLocation* l'identifiant sera *ID Location* codé en L « CODE » où CODE correspond au numéro du point correspondant. Par exemple le point 256 aura pour identifiant dans cette table L256 ;
- pour *TClima-Topo* : *ID Climatopo* codé en C « CODE » ;
- pour *TGeol* : *ID Geol* codé en O « CODE » ;
- pour *TManagement* : *ID Manage* codé en M « CODE » ;
- pour *TVegetation* : *ID Vegetation* codé en V « CODE » ;
- enfin pour *TGenerated* : *ID Generated* codé en G « CODE ».

La BDD et par conséquent le formulaire s'articulera autour de la table *TLocation*. En effet, elle possèdera la clé principale de la BDD. La clé primaire *ID Location* servira de lien entre *TLocation* et les autres tables. Le MCD (Fig. 7) comporte donc 6 tables dont une principale (*TLocation*) et 5 périphériques (*TClima-Topo*, *TGeol*, *TManagement*, *TVegetation* et *TGenerated*). L'intégrité référentielle sera assurée par des liens de un (*TLocation*) à plusieurs (autres tables). Ces liens sont théoriques car en pratique à un objet dans *TLocation* ne correspond qu'un seul objet pour les autres tables car issu de la séparation de la BDD initiale. Cette dernière remarque devra être valable lors de l'ajout de nouveaux objets, où tout nouveau registre dans *TLocation* ne devra être lié qu'à un seul autre registre dans les autres tables.

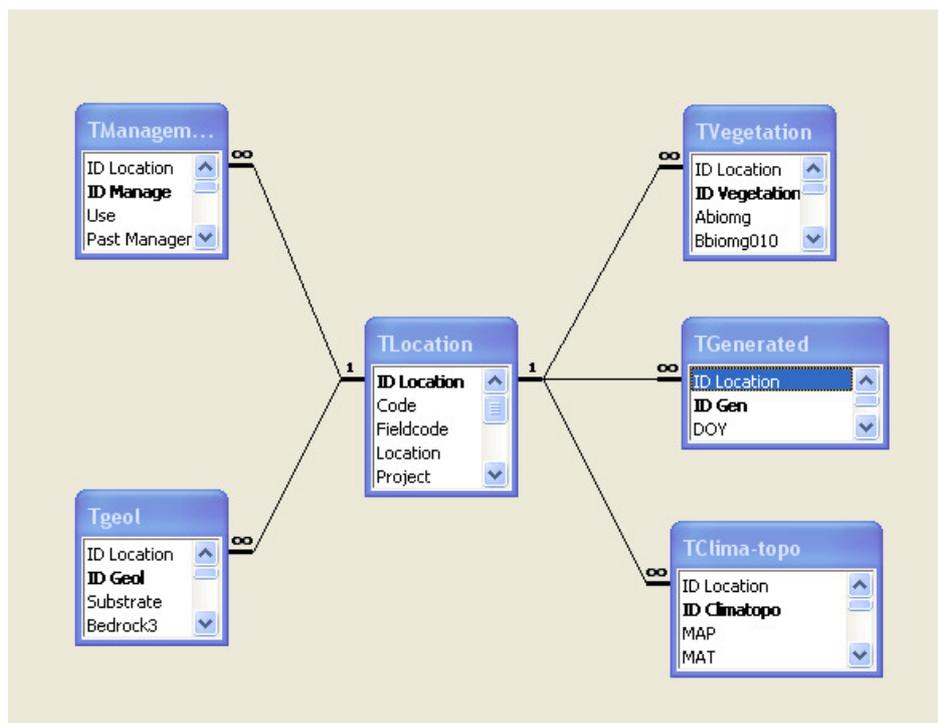


Fig. 7 : Modèle Conceptuel de Données de la base de données PASTUS destiné à la création du formulaire associé

3.3 Elaboration des formulaires, remarques et particularités des champs

Une fois les tables créées, les codages ont été spécifiés au cas par cas pour chaque champ :

- les identifiants sont au format texte avec 5 caractères, ainsi que les champs descriptifs (25 ou 50 caractères) et un format date pour le champ *DATE* de *TLocation*. Par ailleurs un calendrier (*Insertion – Contrôle ActiveX – Contrôle de Calendrier*) sera ajouté afin d’assigner par un simple clic la date voulue tout en conservant le format ;
- le codage en numérique entier est utilisé en général pour les variables semi-quantitatives sauf exceptions (par exemple la diversité spécifiques dans la table *TVegetation*) ;
- le codage en numérique réel est utilisé pour le reste des variables.

Les formulaires contiennent tous les champs issus de leur table, sauf dans le cas de *TGenerated* (particularité qui sera décrite plus bas). *TLocation* se compose d’un formulaire unique tandis que les 5 autres tables fonctionnent sous la forme de sous- formulaires. En effet, cette dernière forme permet, en mettant en en-tête de formulaire les champs *CODE* et *ID Location*, d’une part de savoir exactement quel point est complété, d’autre part de consigner automatiquement lors de l’ajout d’un nouveau registre l’*ID Location* issu de *TLocation* vers l’*ID Location* de la table en cours de remplissage. Ceci assure que le lien entre les registres soit conservé. Il est nécessaire d’ajouter que dans les tables périphériques la clé *ID Location* est bloqué de toute saisie afin d’empêcher toute modification maladroite.

Des contraintes et obligations sous plusieurs formes ont été mises au point afin d’assurer suivant les cas, l’intégrité de la BDD/formulaire et la cohérence des données :

- Des restrictions de formats accompagnent ces codages afin d'assurer la bonne cohérence des données, ainsi par exemple le pH est restreint aux valeurs entre 0 et 14 (Fig. 8) ;

pH010	
Número	
General	Búsqueda
Tamaño del campo	Doble
Formato	
Lugares decimales	Automático
Máscara de entrada	
Título	
Valor predeterminado	
Regla de validación	Entre 0 Y 14
Texto de validación	Valores entre 0 y 14
Requerido	No
Indexado	No
Etiquetas inteligentes	

Fig. 8 : Exemple de règle d'entrée du type de données obligatoire

- Des informations écrites à côté de l'intitulé du champ à remplir spécifient l'unité (Fig. 9) ;

Table TLocation **Coordonnées en UTM obligatoire**
Coordenades : obligatorio en sistema UTM (en metros)
 Longitudo = X Latitude = Y

Table TClima-Topo **Altitude en mètre et pente en degré**
 Altitude (m) Slope (°)

Fig. 9 : Exemple de préconisation sur le type d'unité à entrer pour des champs

- Des listes sont mises à disposition pour choisir la valeur à remplir selon les valeurs déjà présentes dans la BDD afin de conserver par exemple la même orthographe dans le cas de champs contenant du texte (Fig. 10). Toutefois l'option d'entrer manuellement une valeur non disponible dans le menu déroulant est envisageable si nécessaire.

TManagement
 Land Use
 1
 Grassland
 Abandoned/Meadow/Crop
 Sward/Cut meadow
 Forest

TGeol
 Substrate
 limestone
 pizarras
 esquits
 granits
 gresos
 flysch
 margas

Fig. 10 : Exemple de menus déroulant proposant des choix afin de remplir certains champs

Le formulaire de la table *TGenerated* possède un statut particulier. En effet, pour un certain nombre de champs, la manière dont ont été faits les calculs était inconnue. Ainsi n'ont été ajoutés que quelques champs. La plupart des calculs sont issus de variables présentes dans d'autres tables mais quelques unes étaient issues de la table *TGenerated* elle-même sans pouvoir les calculer de quelque manière. Ces dernières ont donc été ajoutées dans le formulaire afin d'être ajoutées

manuellement si nécessaire. Pour le calcul des champs, une requête d'actualisation ainsi qu'un lien sous forme de bouton a été créés pour compléter automatiquement les champs du formulaire et donc la table. Ces calculs présentent deux formes :

- les calculs arithmétiques simples. Par exemple, pour calculer l'indice climatique MI (*Moisture Index*), le calcul revient à entrer : $MAP / (MST - MAT)$; variables issues de la table *TClima-topo* ;
- les calculs dits logiques. Ils font référence en général aux variables semi-quantitatives générées par des expressions logiques. Par exemple, pour déduire si la condition d'une prairie en élevage unique de brebis donc monospécifique traduit par le code 1 (0 signifie que la condition est fautive), l'expression sera la suivante : $SiInm(TGenerated!Sheep=1 \ Y \ TGenerated!Cattle=0 \ Y \ TGenerated!Horses=0 \ Y \ TGenerated!Goat=0;1;0)$ que l'on peut traduire par : Si sur la prairie il y a des brebis ($Sheep = 1$) et pas de bovins ($Cattle = 0$) ni de chevaux ($Horse = 0$), ni de chèvres ($Goat = 0$) ; alors la prairie est en mono élevage (1) ; sinon elle n'est pas en élevage de brebis (0).

Pour terminer, deux requêtes de création de table ont été créées afin d'exporter les tables complètes. La première comprend les données des tables *TLocation*, *TClima-topo*, *TManagement*, *TGeol* et *TVegetation* sans inclure les clés primaires. La requête reconstitue la BDD PASTUS dans son ensemble. La deuxième requête permet d'extraire la table de *TGenerated* tout en remplaçant la clé primaire par le champ *CODE* plus explicite en terme de dénomination des registres.

3.4 Fonctionnement

Le formulaire (Annexe 4, 5 et 6) a été créé dans le but d'être facilement accessible. Pour cette raison une interface simple a dû être mise en place. Un menu, possédant diverses fonctions dont des liens (boutons de navigation) vers les autres formulaires, a donc été créé et appelle une marche à suivre bien spécifique :

- 1- Entrer d'abord dans *TLocation* pour introduire les identifiants indispensables au fonctionnement et la stabilité de la BDD ainsi que les informations générales (date, projet, coordonnées) ;
- 2- Accéder aux tables souhaitées et entrer les données sans omettre d'introduire les clés primaires ;
- 3- Exporter si nécessaire la BDD au format MS[®] Excel en utilisant le bouton activant la requête création de table pour en exportant au format MS[®] Excel cette dernière.

Des liens vers MS[®] Excel et la calculatrice ont été ajoutés en option. De plus, pour chaque formulaire un bouton a été inséré afin de pouvoir aisément revenir au menu. Lors de l'entrée des données, des informations sont inscrites afin de guider l'utilisation sur des points particuliers, tel que l'obligation d'entrer des identifiants pour chaque nouvelle entrée.

3.5 Améliorations possibles et avenir du formulaire

Il est certain que la BDD, et donc le formulaire seront amenés à évoluer dans l'avenir. Plusieurs idées et préconisations sont à mentionner :

- Afin de d'empêcher la dispersion de la BDD, il est nécessaire qu'elle soit centralisée. Il peut s'agir d'un ordinateur fixe mais il est préférable et plus commode (éviter les déplacements) de développer un service Intranet pour le laboratoire sur lequel sera disponible la BDD ;
- Il est préférable de restreindre l'accès au formulaire aux seules personnes autorisées (par mot de passe par exemple ou *login*) afin, d'une part, de conserver la confidentialité des données, et d'autre part d'empêcher toute modification non souhaitable intentionnelle ou non des données par une personne extérieure au projet ;
- Il est nécessaire de former les personnes destinées à travailler sur la BDD sur l'utilisation de ce formulaire afin d'en comprendre le fonctionnement, les subtilités et bien sûr obtenir des avis quand à l'amélioration du produit final. Une réunion a été prévue le 26/08/2010 afin de faire une démonstration pour les personnes habituées à travailler sur cette BDD.
- Compte tenu que le CTFC, et en particulier le laboratoire ECOFUN, collabore avec de nombreux partenaires, y compris à l'étranger, il se peut que la BDD accueille des données « extérieures ». Le cas est déjà avéré car certains points sont issus de plusieurs communautés autonomes espagnoles et de régions françaises qui proviennent de projets internes au CTFC. Il se peut que des projets internationaux, tel que ClimAfrica, viendront se greffer à la BDD. Ceci impliquera un changement et/ou traduction de la langue utilisée, par défaut en castillan, vers d'autres comme le catalan, le français et l'anglais. Le choix se porterait vers l'anglais qui est la langue scientifique commune utilisée en recherche.

En discussion, il est possible de mentionner de nombreuses imperfections. Premièrement, l'absence de connaissance en programmation VBA (Visual Basic for Applications) n'a pas permis d'inclure des fonctionnalités qui auraient pu faciliter l'utilisation du formulaire. En effet, il est nécessaire d'entrer manuellement les identifiants. Il aurait été souhaitable de pouvoir générer automatiquement à chaque nouveau registre le numéro du registre dans le champ *CODE*. Une piste a été trouvée en faisant simplement une requête SQL (*Standard Query Language*) de la valeur maximale du champ *CODE* en ajoutant 1. À partir de là, générer automatiquement les identifiants des autres tables en ajoutant simplement la lettre nécessaire comme expliqué précédemment. Ensuite, le fait que la table TGenerated ne possédait pas toutes les informations nécessaires sur les calculs à effectuer et son aspect un peu confus ont rendu l'élaboration du formulaire incomplète et délicate à manipuler, notamment le fait d'entrer des données de cette même table manuellement alors qu'en théorie elles devraient être calculées. Enfin, ce formulaire a été conçu sur une initiative totalement personnelle et il se peut que certains aspects de celui-ci ne respectent pas entièrement les attentes pour un tel produit. Il s'agit toutefois d'une bonne base pour un formulaire.

Chapitre 4 : Travail de collaboration sur le Projet Fluxpyr

4.1 Contexte et objectif du projet FLUXPYR

Ce stage s'est en partie inscrit dans le cadre du projet FLUXPYR (Interreg IV-A, Poctefa) (Annexe 7) qui est un projet européen de coopération transfrontalière entre l'Espagne, la France et l'Andorre, pour l'étude et la gestion des flux hydriques, de carbone et d'énergie, dans un contexte de changements climatiques, dans les écosystèmes agricoles et pastoraux des Pyrénées.

Il existe des inquiétudes concernant les impacts des changements climatiques sur les écosystèmes montagnards, tant sur le point de vue environnemental (biodiversité, ressources naturelles) qu'économiques (pastoralisme, agriculture, tourisme, etc.). Le projet a pour objectif de mettre en place un réseau international d'instruments et d'experts pluridisciplinaires pour suivre les impacts du changement climatique et changements de l'utilisation du sol dans les Pyrénées, ainsi que pour faciliter les transferts de technologies et la formation d'étudiants, de techniciens et de chercheurs. L'étude est à la fois spatiale et temporelle. Elle intègre des mesures de terrain, la modélisation, la spatialisation et la télédétection, et se concentre en grande partie sur l'étude des cycles de l'eau, d'énergie et du carbone au niveau des prairies et des systèmes agricoles. Le projet se propose également de conseiller les politiques et acteurs locaux sur la gestion durable du territoire et des ressources locales et faire prendre conscience aux citoyens de l'importance capitale de réduire les émissions de gaz à effet de serre, réduire la consommation énergétique et améliorer la gestion durable des ressources (Gouriveau, 2010a ; Gouriveau, 2010b, OCCP, 2010 ;).

Les principales questions scientifiques posées sont les suivantes :

- Comment caractériser et quantifier les dynamiques spatio-temporelles des flux de l'eau, du carbone et d'énergie au niveau des écosystèmes montagnards et quelles sont les paramètres conducteurs de ceux-ci ?
- Quels sont les impacts des changements climatiques sur les disponibilités en ressources et les activités anthropiques dans les Pyrénées ?
- Quelles stratégies et politiques d'atténuations et d'adaptations peuvent être mises en place pour faire face aux changements climatiques, et ceci à toutes les échelles spatiales ?

FLUXPYR regroupe des partenaires (pour la plupart font partie d'organismes publics) d'Andorre, d'Espagne et de France (Annexe 8). La liste des acteurs ci-dessous n'est pas exhaustive (INRA Bordeaux, 2010).

Pour l'Andorre : Centre d'Estudis de la Neu i la Montanya d'Andorra (CENMA)

Pour l'Espagne :

- Centre Tecnològic Forestal de Catalunya (CTFC), coordinateur du projet ;
- Institut Català de Ciències del Clima (IC-3) ;
- Institut de Geomàtica (IG) ;
- Institut Jaime Almera - Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IJA-CSIC) ;
- Universitat Politècnica de Catalunya - Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona (UPC-EUETIB) ;
- Universidad Pública de Navarra - Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria (UPNA) ;
- IPE Instituto Pirenaico de Ecología (Spain).

Pour la France :

- Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO) ;
- Laboratoire d'Aérodynamique (LA) ;
- Universités Toulouse III Paul Sabatier et Toulouse II Le Mirail ;
- Météo-France ;
- Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) ;
- Centre National des Etudes Spatiales (CNES) ;
- Ecole Nationale de Formation Agronomique (ENFA) ;
- Laboratoire Géographie de l'environnement (GEODE) ;
- CEFE Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (France) ;
- Agence Régionale Pour l'Environnement de Midi-Pyrénées (ARPE, France) ;
- Assemblée Pyrénéenne d'Économie Montagnarde (APEM, France).

Une partie de mon travail a été associé au groupe de travail WGb (Annexe 9). Il s'agit du groupe de travail d'étude d'images satellites et aériennes, et de télédétection. Le travail effectué ici s'inscrit dans la réalisation d'un catalogue d'images satellite pour les Pyrénées mais le groupe de travail s'intéresse aussi à l'étude de l'occupation du sol, la dynamique de la couverture neigeuse et de la végétation etc.

4.2 Recherche de parcelles spécifiques pour l'installation d'une station micrométéorologique Eddy Covariance

4.2.1 Objectif

L'objectif est de discriminer, à partir de critères spécifiques et de données géomorphologiques, des zones susceptibles d'accueillir une station d'enregistrement des flux *Eddy Covariance* (Annexe 10) sur une parcelle agricole (en prairie) dans les Pyrénées catalanes. Pour résumer, la technique d'*Eddy Covariance* consiste, à partir d'une station de type météorologique possédant divers instruments spécifiques, à mesurer les flux d'eau, de carbone et d'énergie sur une surface d'occupation du sol homogène (dans le cas du projet il s'agit en général de cultures ou de prairies).

La parcelle destinée à accueillir d'un tel dispositif devait :

- se situer obligatoirement dans les Pyrénées ;
- être à une altitude entre 1 000 et 1 400 m ;
- avoir une pente ne dépassant pas les 3 à 4%. Une pente de moins de 2 % est idéale ;
- être suffisamment grande de manière à bénéficier d'une surface homogène dans un rayon minimum de 100 m autour de la tour soit 3,14 ha autour du dispositif ;
- être en prairie ;
- être sur sol calcaire (pour avoir un sol homogène pour les trois stations installées) ;
- si possible être proche du CTFC afin de faciliter l'accès et réduire le coût de l'entretien, et de la récupération des données.

4.2.2 Méthodologie

Un MNT de la zone UTM 31N correspondant à la Catalogne (résolution de 30m) fournit par le département SIG du CTFC a été utilisé pour, d'une part connaître l'altitude de chaque pixel, d'autre part générer une image de valeurs de pente en pourcentage à l'échelle du pixel (fonction *Slope* d'Arcgis).

Les pixels d'altitude entre 1 000 et 1 400 m ont été discriminés en reclassant les pixels selon la classification suivante :

- 0 attribué aux valeurs entre -141 m (erreur du MNT) et 1 000 m ;
- 100 attribué aux valeurs entre 1 000 m et 1 400 m ;
- 0 attribué aux valeurs 1 400 m et 3 315 m.

Le même système de reclassification a été utilisé pour l'image de valeurs de pentes :

- valeurs entre 0 et 6% = 1, le seuil de 6 % a été choisi après réflexion et essais pour palier une erreur de surévaluation de la pente entre les données SIG et la réalité sur le terrain ;
- autres valeurs = 0.

Il a été prévu d'utiliser une image d'occupation du sol (au format Raster) de 2002 de résolution 30 m avec la reclassification suivante pour s'assurer d'avoir au moins trois critères de discrimination et éviter dans le meilleur des cas les surfaces en cultures :

- prairies « supraforestales » ou alpines (compte numérique initial : 14) en 10 ;
- prairies et bois (compte numérique initial : 15) en 20 ;
- autres occupation du sol en 0.

A l'aide de la calculatrice Raster (*Raster calculator*), les trois images générées à partir des critères de sélection ont été additionnées pour obtenir une image résumant pour un même pixel les trois informations recherchées. Les valeurs de pixels recherchées sont les suivantes :

- compte numérique 111, soit : altitude entre 1 000 et 1 400m, prairies alpines et pente inférieure à 6 % ;
- compte numérique 121, soit : altitude entre 1 000 et 1 400m, prairies et bois et pente inférieure à 6 %.

Les pixels ont été reclassés pour ne sélectionner que les classes d'intérêt en assignant la valeur de 1 aux pixels ayant un compte numérique de 111 ou de 121 ; les autres valeurs ont été reclassées en 0. Cette dernière image a été convertie en vecteur polygone puis au format .kml. Ce dernier a été importé vers Google™Earth afin de vérifier la « réalité terrain » ; en amont, une analyse thématique destinée à ne laisser que les contours des parcelles potentielles visibles a été effectuée pour faciliter l'observation. La couche a été rendue partiellement transparente pour pouvoir, le cas échéant, observer les zones alentours discriminées sur Google™Earth.

4.2.3 Résultats et discussion

De prime abord, très peu de zones ont été discriminées (Fig. 11). De plus, la majorité des zones normalement en prairies se sont révélées être en forêt ou en cultures et une observation minutieuse permet de se rendre compte que la « réalité terrain » peut être différente (différences

d'altitudes entre Google™Earth et le MNT utilisé). Certaines zones ont discriminé une partie des parcelles qui sont pourtant homogènes en termes de pente. La difficulté a donc été de repérer d'une part les zones discriminées et d'autre part d'observer si les alentours directs correspondaient aux critères recherchés sans s'appuyer uniquement sur l'image générée.

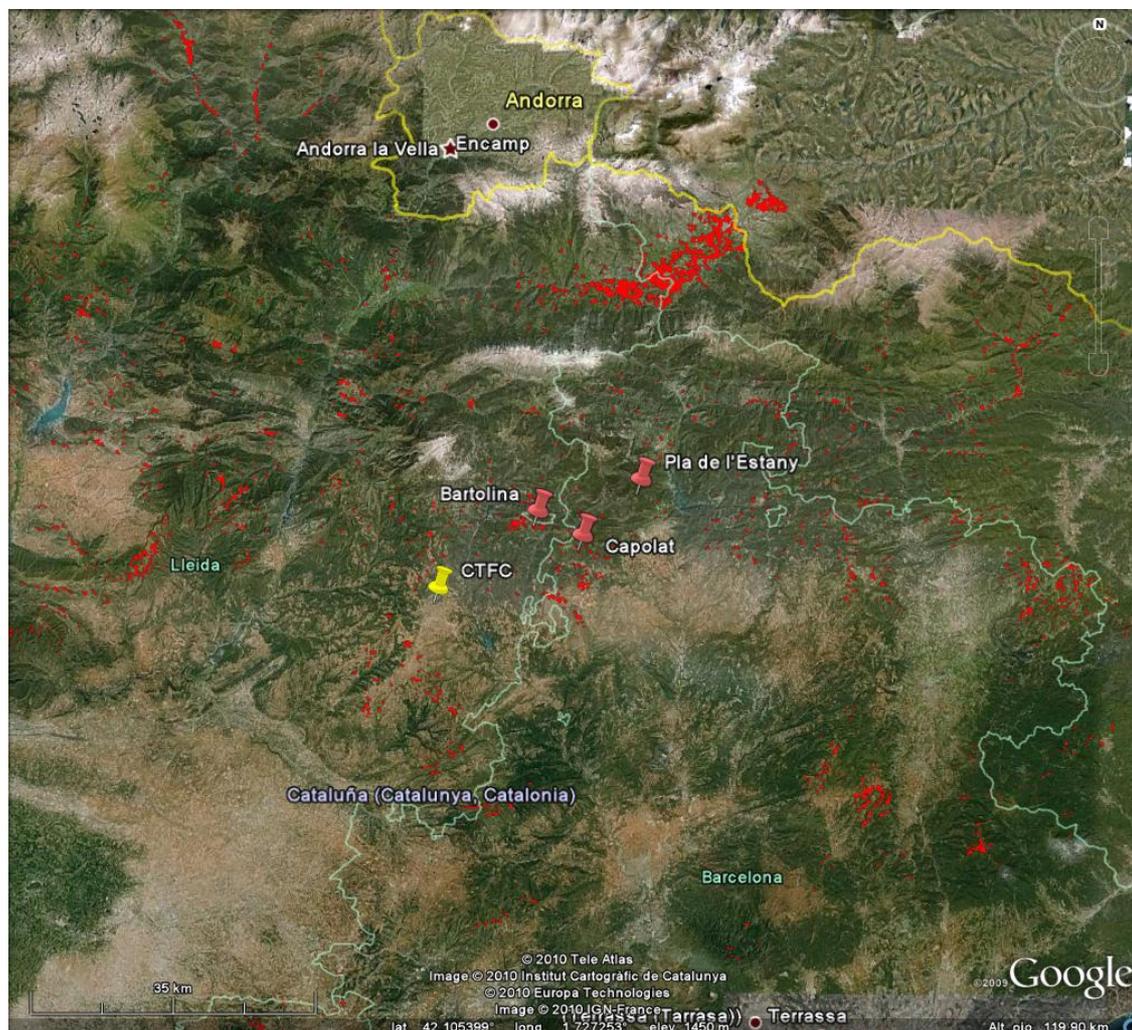


Fig. 11 : Vue globale des zones discriminées (en rouge) aux alentours du CTFC

À la suite de cette recherche, une sélection de parcelles a été validée (Fig. 11) et vérifiée par des déplacements sur le terrain le 17 mai et les 21 et 22 juin 2010. Trois parcelles ont présenté un intérêt : une sur le *Pla de Busa (La Bartolina)* à 1 267 m UTM : 389 348 m E – 4 661 620 m N, une au nord de la ville de *Berga (Pla de l'Estany)* à 1 498 m (qui toutefois n'est visible qu'à partir d'un critère d'altitude allant jusqu'à 1 500 m), UTM : 401 671 m E – 4 665 662 m N, et enfin une à l'ouest de *Capolat* à 1 314 m, UTM : 394 774 m E – 4 658 766 m N. Au final, seule la prairie de *La Bartolina* a présenté un intérêt. Le *Pla de l'Estany* s'est finalement révélé être un étang provisoire suivant la période de l'année et la prairie de *Capolat* possédait une topographie trop accentuée (Annexes 11).

De nombreuses critiques quant à la méthodologie employée (Annexe 12) peuvent être formulées. En effet, la sensibilité des critères tels que l'altitude et les pentes peuvent changer du tout au tout et faire disparaître des parcelles jugées intéressantes comme dans le cas du *Pla de l'Estany*. Force est de constater que ce travail a été réalisé par tâtonnements et qu'à l'origine les critères étaient pour l'altitude entre 800 et 1 200m et pour la pente inférieure à 3 %. De nombreux essais ont été réalisés et ont aboutit à un compromis amenant à la méthodologie décrite plus haut.

Le choix de ne pas mettre les autres essais dans ce rapport a été fait afin de ne pas surcharger d'informations non utilisées et non retenues. Ceci montre néanmoins les failles de l'utilisation du SIG dans les prospections, ces dernières relevant principalement des données sources (MNT) comme des erreurs au niveau de l'occupation du sol (Annexe 13). Mais la méthodologie possède le mérite d'une économie en terme de temps et de coût de déplacements si cette prospection ne se faisait que par du terrain et permet un ciblage des zones d'intérêt. Ceci permet aussi de demander auprès du cercle des relations (éleveurs, propriétaires terriens, élus, chercheur, etc.) si une zone peut représenter vraiment un intérêt.

4.3 Recherche des scènes communes LandSat et suivi temporel

4.3.1 Contexte et objectif

L'un des principaux inconvénients lors d'un suivi d'un territoire par télédétection est la résolution temporelle. En effet l'intervalle d'acquisition d'images à deux dates différentes pour une même scène dépend du satellite utilisé. Dans le cadre du projet FLUXPYR, le suivi de la chaîne de Pyrénées est assuré en grande majorité par des images issues des satellites LandSat 5 et LandSat 7. Tous deux ont une résolution temporelle de 16 jours (SatCat, 2010) qui, pour un suivi de végétation par exemple, se révèle assez faible.

Le but est donc de déterminer les zones pour lesquelles plus de dates sont disponibles en combinant deux observations :

- le recouvrement d'une même zone par deux scènes voisines et d'orbite différentes permet d'obtenir des informations tous les 8 jours ;
- en combinant les images des deux senseurs ETM+ et TM du satellite LandSat 7, il est possible de dégager une zone (couloir) où la résolution temporelle sera de huit jours.

Ceci permettra à terme, par exemple, de pouvoir combiner des données satellites, comme la déduction de la biomasse végétale à partir d'indices tel que le NDVI (Normalized Digital Vegetation Index) indiquant l'intensité de la photosynthèse et déduire la couverture végétale, avec les mesures de flux de carbone sur le terrain par les stations micro-météorologiques. Il s'agira de combiner les données afin d'observer les effets du changement climatiques sur les flux à plusieurs échelles : spatiales (parcelle, écosystème, région) et temporelles (mois, année, décennie). Le suivi pourra se faire sur l'ensemble du territoire à l'aide d'une spatialisation, comme exposé dans le chapitre 1, de modèles d'évolution et de distribution des flux générés à partir des données expérimentales afin de diffuser à la communauté scientifique, aux personnalités politiques mais aussi au grand public les résultats concernant les effets du changement climatique.

4.3.2 Superposition des scènes LandSat

Il est possible d'observer qu'entre deux scènes LandSat d'orbites voisines il existe une zone commune. Deux orbites voisines sont séparées par huit jours ce qui permettra donc pour la zone commune une résolution temporelle de huit jours au lieu des seize habituels si l'on utilise les deux images.

Pour délimiter de telles zones sur le massif Pyrénéen, il a été nécessaire de connaître quelles sont les scènes le recouvrant. A partir d'un fichier de forme (Shape) issu de l'USGS (pour *United States Geological Survey*) délimitant les différentes scènes acquises par le satellite LandSat 7

(identiques pour Landsat 5) avec un système de projection géographique avec datum WGS84 (Landsat USGS, 2010), il a été possible de sélectionner les orbites (*Paths*) 197 à 201 et les lignes (*Raws*) 30 et 31 englobant les Pyrénées (Fig. 12).

Pour extraire les zones communes la marche à suivre a été la suivante :

- union (outil *Union*) des scènes pour les lignes 30 et 31 pour chacune des cinq orbites. Ceci donne cinq fragments des orbites pour les Pyrénées;
- intersection (outil *Intersect*) deux à deux des orbites précédentes permettant de mettre en évidence les zones communes ;
- réunir (outil *Dissolve*) en un seul polygone, pour chacune des quatre zones communes, les polygones issus du traitement précédent ;
- fusionner (outil *Merge*) en un seul fichier de forme les quatre zones communes et attribuer dans la table attributaire quelles sont les orbites à l'est et à l'ouest ;
- rétroprojection depuis le système géographique avec datum WGS84 vers le système géographique avec datum ETRS89 (norme pour les projets européens).

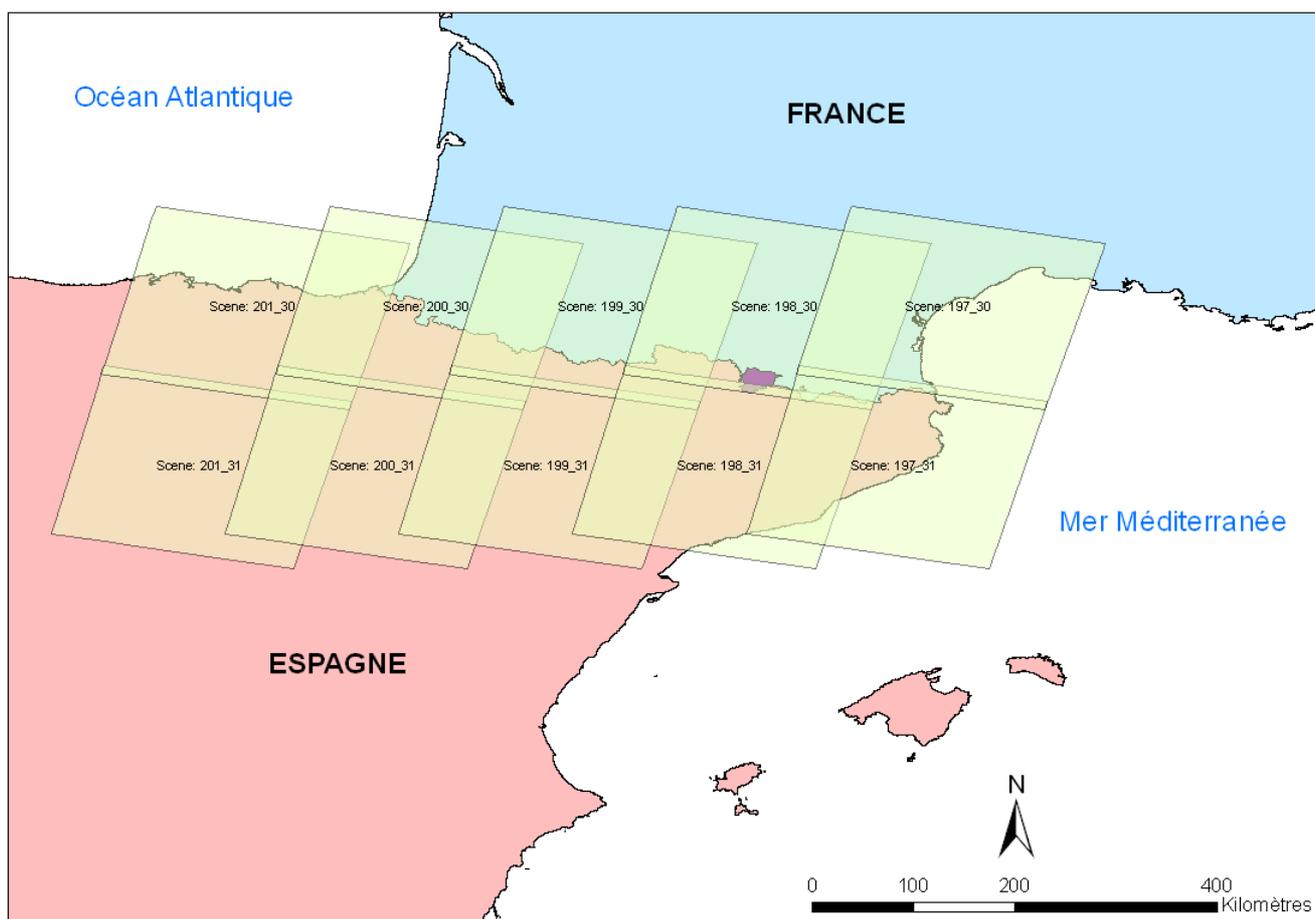


Fig. 12 : Scènes Landsat 5 et 7 recouvrant l'ensemble des Pyrénées.

4.3.3 Couloir commun des senseurs ETM+ et TM du satellite LandSat 7

Il est possible de profiter pour les scènes LandSat 7 d'un couloir central d'orientation nord-sud permettant d'obtenir une résolution temporelle de huit jours en utilisant les senseurs ETM+ et TM. Ce couloir correspond à une zone centrale de chaque scène LandSat d'une largeur de 20 km ; il est possible d'atteindre 40 km de largeur s'il est décidé d'effectuer une interpolation de pixels.

À partir des mêmes scènes LandSat utilisées précédemment, les médiatrices des cinq orbites sont tracées sur un fichier de forme au format polyligne afin de délimiter leur centre. Le mode topologique, l'option d'accrochage des sommets (*Snapping*) et l'outil de digitalisation *Midpoint Tool* sont utilisés pour le tracé. Ensuite, des zones tampon de largeur de $0,089312^\circ$ (soit 10 km) et de $0,1796624^\circ$ (soit 20 km) sont générées de par et d'autre des médiatrices pour créer les dit couloirs de 20 km et 40 km de large respectivement. Les zones tampon sont intersectées (outil *Intersect*) avec les orbites LandSat pour obtenir les deux couloirs finaux de largeur de 20 km ou de 40 km. Les deux fichiers de forme sont rétroprojetés dans un système de coordonnées géographiques avec datum ETRS89. L'information du numéro de l'orbite d'appartenance au couloir est entrée dans la table attributaire.

Il a été demandé d'extraire les coordonnées des sommets des couloirs. Une intersection (outil *Intersect*) entre les zones tampon et les orbites avec en option une sortie du fichier de forme spécifiée en points permet de créer les sommets. L'outil *Add XY coord* ajoute dans la table attributaire les coordonnées de ces points dans la table attributaire.

En marge de ces travaux, un inventaire des dates des images LandSat accessibles sur le serveur *Satcat* (serveur cartographique d'images satellites de Catalogne) de 2002 à 2010 et un inventaire des dates de prises de vue des orbites LandSat dans les Pyrénées (Eurimage, 2010) de 2007 à 2010 ont été effectués. Le but est de croiser les dates afin de savoir quelles images peuvent être facilement récupérées notamment en Catalogne où les images LandSat sont gratuites.

4.3.4 Résultat

Les fichiers sont convertis dans le format .kml afin d'être exploitable aisément par les personnes qui le désirent sur Google™Earth. En regroupant ces deux méthodologies ce sont près de 80% de la surface d'une scène LandSat pouvant être recouverte tout les 8 jours si l'on considère les couloirs de 40 km de large (sinon la couverture descend à 70% avec les couloirs de 20 km). La surface totale recouverte par ces zones est de $24\,060\text{ km}^2$ si l'on considère les couloirs de 20 km de large et de $27\,760\text{ km}^2$ pour les couloirs de 40 km (Fig. 13).

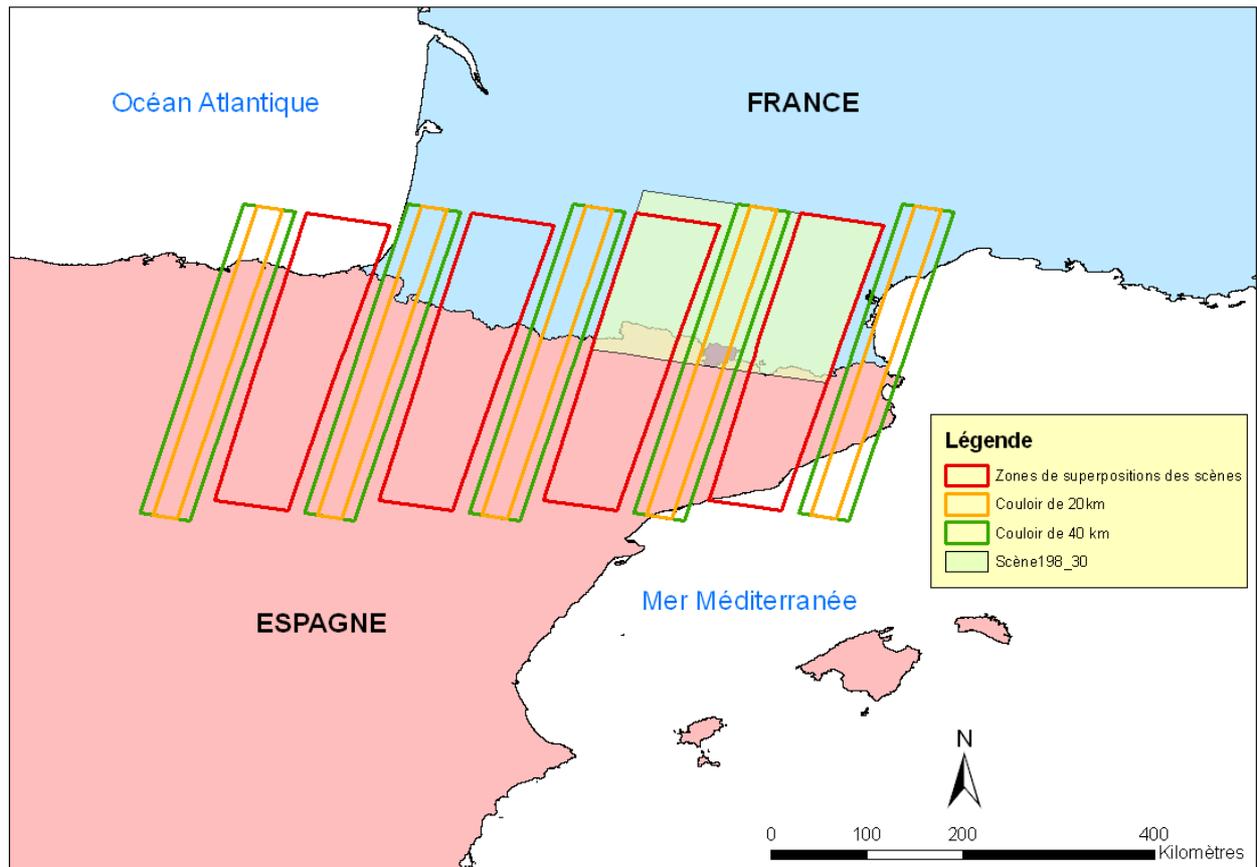


Fig. 13 : Zones ayant une résolution temporelle de huit jours en combinant les images Landsat 5et/ou 7 sur la chaîne des Pyrénées.

Chapitre 5 : Discussion générale

5.1 Conclusion

Trois travaux principaux effectués au cours de ce stage ont été présentés :

- la spatialisation du carbone organique dans le sol des prairies de Catalogne à partir d'un modèle empirique ;
- la création d'un formulaire de saisie de données pour la base de données PASTUS du laboratoire ECOFUN ;
- l'assistance à la recherche de parcelles pour la mise en place d'une station micrométéorologique de mesure des flux (carbone, eau et énergie) et de recherche de zones de meilleure résolution spatiale par superposition d'images LandSat.

Si le formulaire peut être mis à part car issu d'une initiative personnelle, il convient de recadrer et de lier les deux autres thèmes, faisant partie du projet FLUXPYR. Comme il a été dit plusieurs fois précédemment, le but de la séquestration du carbone atmosphérique (CO₂) sous forme organique dans le sol est d'atténuer les effets des changements climatiques et si possible de les réduire. La spatialisation des stocks de carbone via une modélisation empirique permet d'intégrer et combiner de nombreuses sources de données et à différentes échelles (Annexe 14) :

- à l'échelle d'une région des données satellitaires permettent d'analyser par exemple la couverture végétale et l'état de la végétation au cours des saisons et ainsi déduire, via des modèles et indices (NDVI), la biomasse produite. Ceci peut donner une idée du potentiel de carbone organique stockable dans le sol. Les techniques d'imageries (satellitaires et aériennes) ont beaucoup évolué depuis la dernière décennie et permettent d'observer des phénomènes jusque là invisibles (comme l'humidité du sol à partir d'ondes RADAR) à de grandes échelles. Intégrer ces types de données permet d'extrapoler à grande échelle des observations acquises à plus petite échelle tout en diminuant le coût et le temps consacrés à l'acquisition et l'analyse des données ;
- à l'échelle des écosystèmes, des études de terrain permettent d'observer, par des campagnes d'échantillonnages, les effets du changement climatique. Les études peuvent se porter sur la compréhension des processus de fonctionnement, des paramètres structurants et les adaptations des écosystèmes face à des changements climatiques. Elles peuvent intégrer aussi les actions de l'Homme en termes de gestion afin de mettre en avant les pratiques les moins préjudiciables pour l'environnement et la biodiversité, et susceptible d'améliorer la production agricole et la séquestration du carbone ;
- à l'échelle des parcelles, la mise en place de tours micrométéorologiques de mesures des flux de carbone, d'eau et d'énergie permet d'observer les effets des paramètres météorologiques mais aussi des pratiques agricoles. Cela permet de comprendre quelles pratiques permettent la séquestration du carbone dans le sol et lesquelles causent un relargage de CO₂ dans l'atmosphère. Ainsi, en intégrant ces données, il sera possible d'orienter les politiques agricoles afin de promouvoir les pratiques susceptibles de contribuer à la séquestration du carbone dans le sol. Un réseau de tours installé sur une diversité de prairies (alternance culture-prairie, prairie de fauche, pâturage strict) permettra

dans le futur de combler les lacunes sur le potentiel de stockage du carbone dans le sol sur la grande hétérogénéité des prairies dans les Pyrénées.

En conclusion il est nécessaire de comprendre les phénomènes de séquestration du carbone à différentes échelles temporelles et spatiales. L'hypothèse formulée selon laquelle l'Homme est responsable de la dégradation, par ses actions, de son environnement a fait son chemin et est en passe de devenir une préoccupation majeure sinon la plus importante de son Histoire. Une modification trop poussée de notre environnement aura des conséquences désastreuses sur les écosystèmes (extinctions d'espèces, changement rapide du climat) avec des conséquences dramatiques pour l'Homme (accès aux ressources rendu difficile, pénuries entraînant des conséquences socio-politico-économiques graves). Mais l'Humanité commence à mettre en place des moyens scientifiques et techniques afin de répondre au défis actuels, et réparer ses erreurs, notamment en réduisant les effets du changement climatique par une séquestration de l'un des principaux gaz à effet de serre : le CO₂. L'avenir dira si elle a réussi.

5.2 Impressions personnelles sur le stage

Au cours de ces six mois de stages, j'ai été confronté à de nombreuses difficultés. Premièrement, il est naturel qu'au sortir d'un cursus d'études supérieures, les compétences en termes d'utilisation des outils et de méthodologie soient à un niveau plutôt restreint. Le stage permet d'acquérir face aux problématiques, de nouvelles compétences en s'aidant de personnes aux compétences plus poussées ainsi que de forums de discussions. Malheureusement au cours de ce stage, je n'ai pas eu un soutien permanent en termes d'outils. Ceci provient du fait que les personnes attachées à mon étude avaient leur lieu de travail principal à Lérida ou Barcelone, le CTFC étant un consortium d'entités publiques. Ainsi, je me retrouvais souvent en totale autonomie et avec un support parfois sporadique. Il en découle que les objectifs initiaux n'ont pas été clairement définis, et ont dû être revus et adaptés au cours du stage par nombreuses réunions ponctuelles.

Malgré cela, ce stage m'a permis d'accroître mon esprit d'initiative (conséquence du travail sur le projet FLUXPYR et la création du formulaire) et d'obtenir une capacité d'improvisation et de créativité quand à la résolution de problèmes. À ajouter à cela qu'un des objectifs que je m'étais fixé pour mon stage était d'améliorer mes connaissances linguistiques. La principale amélioration fut celle de l'espagnol (castillan) langue qui m'était connue mais dans laquelle je possédais des carences en termes d'expression orale et de rédaction. En outre, j'ai été confronté à l'anglais (conférences, réunions, littérature) et au catalan (langue officielle de la Catalogne), même si pour cette dernière l'apport a été moindre car je n'ai pas suivi de cours théorique et je n'ai donc pu m'en imprégner. Enfin, une amélioration des compétences en termes d'outils (SIG, BDD) non négligeable est à noter, ainsi qu'une meilleure capacité de travail.

Bibliographie et sites consultés

ACDC, 2010. Atlas Climatique Digital de Catalogne.

<http://www.opengis.uab.es/wms/iberia/index.htm> - Section *Cartografia Obtenida* (dernière consultation le 16 août 2010)

ACDPI, 2010. Atlas Climatique Digital de la Péninsule Ibérique.

http://www.opengis.uab.cat/acdc/es_index.htm - Lien *Servidor de Maps* (dernière consultation le 16 août 2010)

Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Payet P.A., Soussana J.F., Stengel P., 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre : Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? *Rapport d'expertise de l'INRA ISBN: 2-7380-1054-7*.

Conant R.T., Six J., Paustian K., 2003. Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States. I. Management-intensive versus extensive grazing. *Bio Fertil Soils* 38: 386-392.

CTFC, 2010a. Ancien site officiel du CTFC (disponible en anglais, catalan, espagnol et français). <http://www.ctfc.cat> (dernière consultation le 26 août 2010).

CTFC, 2010b. Nouveau site officiel du CTFC (disponible en anglais, catalan et espagnol). <http://2009.ctfc.cat/> (dernière consultation le 26 août 2010).

DIVA-GIS, 2010. Couches vectorielles des limites administratives par pays.

<http://www.diva-gis.org/gdata> (dernière consultation le 15 avril 2010).

GENCAT, 2010. Serveur de données SIG du Département de l'environnement et de l'Habitat de la Generalitat de Catalunya

http://mediambient.gencat.cat/cat/el_departament/cartografia/fitxes/inici.jsp?ComponentID=7150&SourcePageID=134357#1 (dernière consultation le 26 août 2010).

ECOFUN, 2010. Site du laboratoire ECOFUN.

<http://ecofun.ctfc.cat/> (dernière consultation le 26 août 2010).

Eurimage, 2010. Calendrier des passages Landsat.

<http://www.eurimage.com/products/landsat.html> (consulté le 8 juin 2010).

Garcia-Pausas J., Casals P., Camarero L., Huguet C., Sebastià M-T., Thompson R., Romanyà J., 2007. Soil organic carbon storage in mountain grasslands of the Pyrenees : effects of climate and topography. *Biogeochemistry*, 82 : 279-289.

Gouriveau F., 2010a. site officiel du projet FLUXPYR.

www.fluxpyr.eu (dernière consultation le 26 août 2010).

Gouriveau F., 2010b, FLUXPYR : Global change in the Pyrenees 2009-2012. *Présentation du projet FLUXPYR*.

<http://www.fluxpyr.eu/eng/presentations.htm>, (consulté le 20 mai 2010).

Hassink J., 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and soil*, 191: 77-87.

INRA Bordeaux, 2010. Article : Projet FLUXPYR : projet européen dans les Pyrénées sur les flux d'énergie.

http://www.bordeaux-aquitaine.inra.fr/ephyse_eng/accueil/actualites/projet_fluxpyr (consulté le 22 mars 2010).

Jenness J., 2010. Outils SIG pour ArcGis dont *Topography Toolbox*.

<http://arcscrippts.esri.com/details.asp?dbid=15996> – Téléchargement de l'outil.

http://www.jennessent.com/downloads/TPI_Documentation_online.pdf - Documentation sur l'outil (consultés le 6 juin 2010).

Jones K.B., Heggen D.T., Wade T.G., Neale A.C., Ebert D.W., Nash M.S., Mehaffey M.H., Hermann K.A., Selle A.R., Augustine S., Goodman I.A., Pedersen J., Bolgrien D., Viger J.M., Chiang D., Lin C.J., Zhong Y., Baker J., Van Remortel R.D., 2000. Assessing Landscape Conditions Relative to Water Resources in the Western United States: A Strategic Approach. *Environmental Monitoring and Assessment* 64: 227 – 245.

Jones M.B., Donnelly A., 2004. Carbon sequestration in temperate grassland ecosystems and the influence of management, climate and elevated CO₂. *New phytologist*, vol. 163 3: 423-439.

Landsat USGS, 2010. Couche vectorielles représentant les scènes LandSat dans le monde.

http://landsat7.usgs.gov/worldwide_reference_system_WRS.php (consulté le 8 juin 2010).

López-Moreno J.L., Beniston M., García-Ruiz J.M., 2008. Environmental change and water management in the Pyrenees : Facts and future perspectives for Mediterranean mountains. *Global and Planetary Change* 61: 300-312.

López-Moreno J.L., Goyette S., Beniston M., 2009. Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees : Horizontal spatial variability and vertical gradients. *Journal of Hydrobiology* 374: 384-396.

OCCP, 2010. Site de l'Observatoire du changement climatique dans les Pyrénées.

<http://climat.sig-pyrenees.net/> (consulté le 22 mars).

Ogle S.M., Jay Breidt F., Easter M., Williams S., Paustian K., 2007. An empirically based approach for estimating uncertainty associated with modelling carbon sequestration in soils. *Biological Modeling* 205: 453-463.

Pachaury R.K., Reisinger A., 2007. Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse. *Publication du Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC)*.

Robert M., 2002. La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres. *Rapport FAO ISBN : 92-5-204690-9*.

Rodríguez-Murillo J. C., 2001. Organic carbon content under different types of land and soil in Peninsular Spain. *Bio Fertil Soils*, 33: 53-61.

SatCat, 2010. Ajuda del servidor d'imatges de satèl lit (SatCat). Document d'informació sur les imatges Landat 5 et 7 et le serveur d'images SatCat. Generalitat de Catalunya : Departement de Medi Ambient i Habitatge
http://mediambient.gencat.net/cat/el_departament/cdma/satcat.jsp - Lien *Manual del SatCat* (consulté le 8 juin 2010).

Sebastià M-T., de Bello F., Puig L., Tauli M., 2008. Grazing as a factor structuring grasslands in the Pyrenees. *Applied Vegetation Science* 11: 215-222.

Sebastià M-T., Canals R-M., de Bello F., Garcia-Pausas J., Ginebra J., en preparation. Positive effects of biodiversity on soil carbon storage depend on climate. *Global Ecology and Biogeography* (article en revision).

Skupin A., 2007. Spatialization. In: *Kemp, K. (Ed.) Encyclopedia of Geographic Information Sciences. Sage Publications.*

Tortora A., Capobianco R. L. & Picuno P., 2006. Historical cartography and GIS for the analysis of carbon balance in rural environment : a study case in Southern Italy. *Agricultural Engineering International : the CIGR Ejournal : BC 06 003. Vol. VIII.*

UNFCCC, 2010, site de la Convention-Cadre sur le changement climatique des Nations Unies (United Nations Framework Convention on Climate Change).
<http://unfccc.int/> - Section Kyoto protocol (consulté le 20 août 2010).

UPM, 2010. Site de l'Université Polytechnique de Madrid – Ecole Technique Supérieure d'Ingénieur de Montes pour l'accès à des couches gratuites (MNT, etc.).
<http://topografia.montes.upm.es/capasymapasaccesolibre.html> (consulté le 14 avril 2010).

Vittoz P., Randin C., Dutoit A., Bonnet F., Hegg O., 2009. Low impact of climate change on subalpine grasslands in the Swiss Northern Alps. *Global Change Biology* 15: 2009-220.

Wang D-D., Shi X-Z., Wang H-J., Weindorf D.C., Yu D-S., Sun W-X., Ren H-Y., Zhao Y-C., 2010. Scale effect of climate and soil texture on soil organic carbon in the uplands of Northeast China. *Pedosphere* 20(4): 525-535.

Weiss, A. 2001. Topographic Position and Landforms Analysis. *Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA.*

WorldClim, 2010. Données climatiques mondiales
<http://www.worldclim.org> - Lien Download- Current condition (dernière consultat le 23 avril 2010).

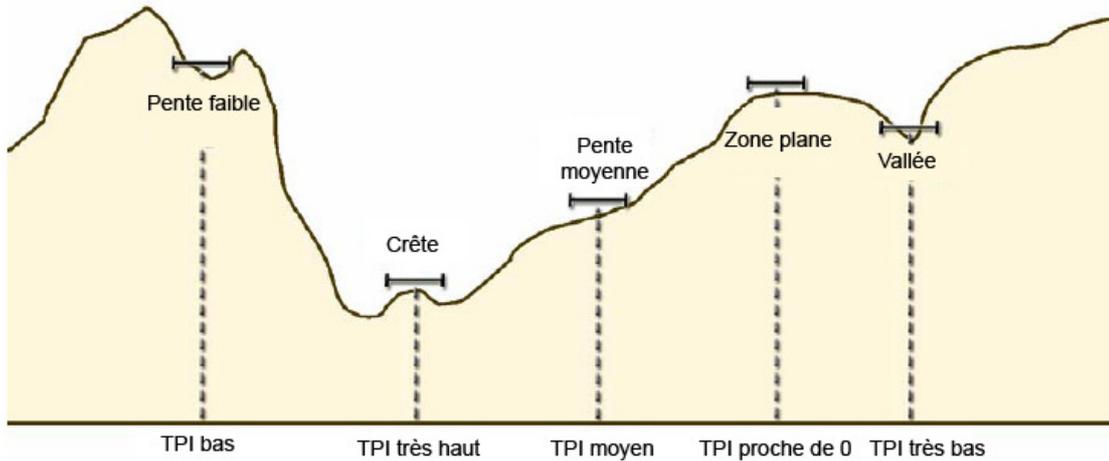
Annexes

Annexe 1 : Localisation du CTFC en Catalogne (source : Google™Earth)

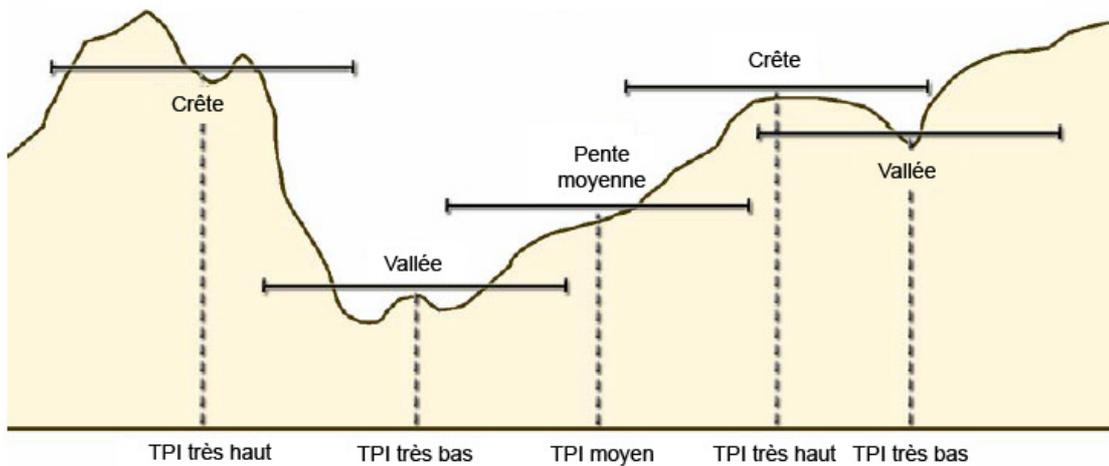


Annexe 2 : Différences de classifications topographiques selon l'échelle de l'opération de voisinage

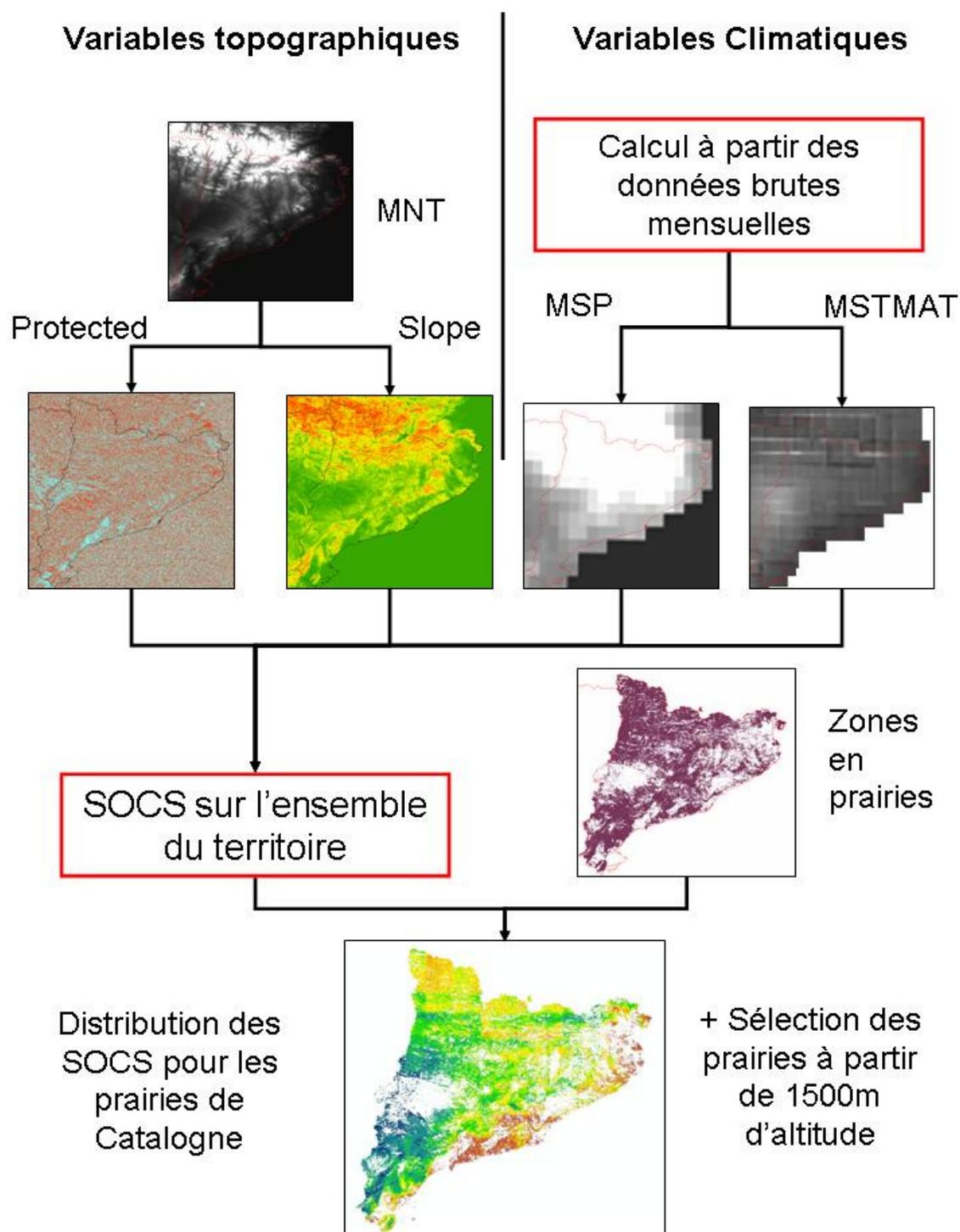
Classification de la position de la pente pour un faible voisinage



Classification de la position de la pente pour un fort voisinage



Annexe 3 : Protocole utilisé pour la spatialisation des SOCS à partir d'un modèle empirique



Annexe 4 : Présentation du menu et de la table TLocation du formulaire

Etape 1 : Accès au Menu

Bienvenido a la Base de Datos PASTUS

1-Por favor, introduzca primero las informaciones generales de los nuevos puntos aquí: **Abrir TLocation**

2-Seguid la introducción de los datos en las 5 tematicas siguientes:

Gestion de los pastos y feces : **Abrir TManagement** Datos climaticos y topograficos : **Abrir TClima+Topo** Geología y datos de suelo : **Abrir TGeol**

Diversidad, biomasa y calidad de la plantas : **Abrir TVegetation** Datos calculados : **Abrir TGenerated**

Para obtener la base de datos completa haz clic al botón, id a "Tablas" (puede convertir Pastus o Generated en .xls con Importar)

Enlaces utiles : **Pastus Completo** **Generated** Calculadora

Vers étapes 3 et 4

Exportation des données sous forme de tables complètes : PASTUS et données générées par calculs (Generated)

Informaciones generales de los puntos : TLocation

Este formulario tiene que ser rellenado con mucho cuidado porque es él que permite la integridad de la base de datos. Los datos obligatorios están cuadrados en rojo.

Code ID Location Formato obligatorio = "L"Code" (ej. Code = 326 --> L326)

Project Sector Comand

Fieldcode Location Sample nº

Fecha del muestreo (no del analisis en el laboratorio)

Year Date

Haz clic en el calendario y después, clic en el cuadro vacío para agregar la fecha.

jul 2003		jul					2003
lun	mar	mié	jue	vie	sáb	dom	
30	1	2	3	4	5	6	
7	8	9	10	11	12	13	
14	15	16	17	18	19	20	
21	22	23	24	25	26	27	
28	29	30	31	1	2	3	
4	5	6	7	8	9	10	

Coordenadas : obligatorio en sistema UTM (en metros)

Longitude = X Latitude = Y

MENÚ

Etape 2 : Entrée des informations principales (projet, localisation, dates) et identifiants obligatoire (en rouge)

Annexe 5 : Présentation des tables thématiques du formulaire

Etape 3 : Remplissage des tables par thème

Datos climáticos y topografía : TClima+Topo

Referencia del punto : ID Location [] Code [1] **MENÚ**

TClima-topo

ID Location [L1] **ID Clima+topo** [C1] Reemplazar L por C

Datos climáticos :

Precipitaciones (mm): MSP [] MSP []

Temperaturas (°C): MAT [] MST []

MTmax [] MTmin []

Radiation (kJ/m2.day micrometers) []

Topografía :

Altitude (m) [] Slope (°) []

Macro3 [] Micro3 []

Aspect Deg []

Geología y datos del suelo : TGeol

Referencia del punto : ID Location [L1] **ID Geol** [O1] Reemplazar L por O (no el zero) **MENÚ**

TGeol

Roca madre (Bedrock): Substrate [] Tipo de pH []

Análisis del suelo : Soil depth []

Suelo entre 0 y 10 cm:

Texture: Fin-coarse [] pH [] Probe area (cm2) []

Finesther (g) [] Stoner [] Sand (%) []

Clay (%) [] Floam (%) [] Clay (%) []

OC1000 CFC [] Carbon tot. (autorizador elemental) [] Dig Mat. (%) Walkley Black Method []

Carbonate (ppm) [] Nitrogen (ppm) [] Magnesium (ppm) []

Phosphat (ppm) [] Calcium (ppm) [] Potassium (ppm) []

Sodium (ppm) [] Cation sum (ppm) []

Suelo entre 10 y 20 cm:

Texture [] pH []

Finesther (g) [] Stoner [] Sand (%) []

Clay (%) [] Floam (%) [] Clay (%) []

OC1000 CFC [] Carbon tot. (autorizador elemental) [] Dig Mat. (%) Walkley Black Method []

Carbonate (ppm) [] Nitrogen (ppm) [] Magnesium (ppm) []

Phosphat (ppm) [] Calcium (ppm) [] Potassium (ppm) []

Sodium (ppm) [] Cation sum (ppm) []

Registro: [14] de 1

Getor: [14] de 403

Gestión de los pastos y análisis de los fetes : TManagement

Referencia del punto : ID Location [L1] **ID Manage** [M1] Reemplazar L por M **MENÚ**

TManagement

Uso y gestión del pasto (Landuse and Management):

Land Use [] Years [] Year of the change before the last 10 years []

Past Management: Present management [] Manage 10 []

Grazier Don/Present []

Cargas (Stocking rates):

Cargas totales: Total UBG []

UBG Cattle [] UBG Horses []

UBG Sheep [] UBG Goat []

Cargas totales por año: Total UBG/year []

UBG Cattle/year [] UBG Horses/year []

UBG Sheep/year [] UBG Goat/year []

Datos de los fetes :

Cantidad (M%): Sheep [] Cattle [] Horse []

Peso (media g/boli): Sheep [] Cattle [] Horse []

Concentración de carbono (%): Sheep [] Cattle [] Horse []

Concentración de nitrógeno (%): Sheep [] Cattle [] Horse []

Registro: [14] de 1

Getor: [14] de 403

Clé primaire à entrer manuellement contrairement à la clé relationnelle (ID Location)

Informaciones sobre la vegetación : TVegetation

Referencia del punto : ID Location [L1] **ID Vegetation** [V1] Reemplazar L por V **MENÚ**

TVegetation

Productivity (g-m-2):

General: Aboveground Biomass []

Belowground Biomass (0-10cm) []

Belowground Biomass (10-20cm) []

Por québón: Mosses [] Sedge []

Legume [] Otherforb []

Grass [] Shrubs []

Otherveg [] Dead []

Herbage Quality:

Digestibility [] CP: Crude Protein [] NDF: Neutral Detergent Fiber []

ADF: Acid Detergent Fiber [] ADL: Acid Detergent Lignin [] N DM (E herbage) []

C DM (E herbage) [] MM (E herbage) []

Root Quality (% de ms):

Protein root 0-10cm [] Carbon root 0-10cm [] Nitrogen root 0-10cm []

Protein root 10-20cm [] Carbon root 10-20cm [] Nitrogen root 10-20cm []

Diversity:

No species /0.25m2 [] No species /4m2 []

No species /100m2 [] No species /100m2 after herbage exp. []

Annexe 6 : Présentation de la table TGenerated du formulaire

Etape 4 : Calcul des variables

Datos y variables calculados : TGenerated

Referencia del punto :

ID Location: Code:

Date:

Para calcular algunos datos se necesita : 1- Crear un identificador (G***); 2- Entrar en los campos cuadrados en naranja, datos necesarios que no están vinculados desde otros formularios para los campos cuadrados en azul

Una vez entrados (y únicamente 1) por lo menos los identificadores, haz clic en el botón para calcular :

a. Entrar los identifiants → Reemplazar L por G

b. Entrar les données non disponibles (encadrés en jaune) pour le calcul à partir des autres tables

c. Lancer la mise à jour et les calculs automatiques

Indices Climaticos (dependen de TClima+Topo) :

Slang: Lang:

Etp Turc: Mi Turc:

ETPH: **Mi Hara**:

Calculos sobre el suelo :

OC10 autelem: **CtoN010**:

OC1020 autelem: **CtoN1020**:

Calculos sobre la vegetación :

Abomkg: **C/N ABio**:

Variables de gestion de los pastos :

Sheep: **Cattle**:

Horse: **Goat**:

Gestion absoluta actual:

Sheep mono: **Cattle mono**:

Mixed only:

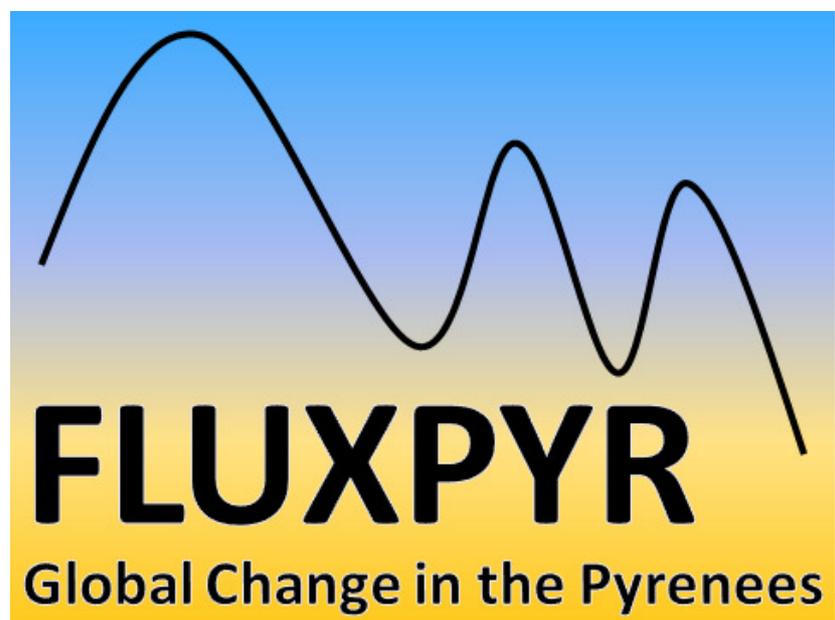
Transición de gestion (dependiente de Past/Present Management de TManagement) :

Sh10aSheep: Sh10aCatt: Sh10aMix:

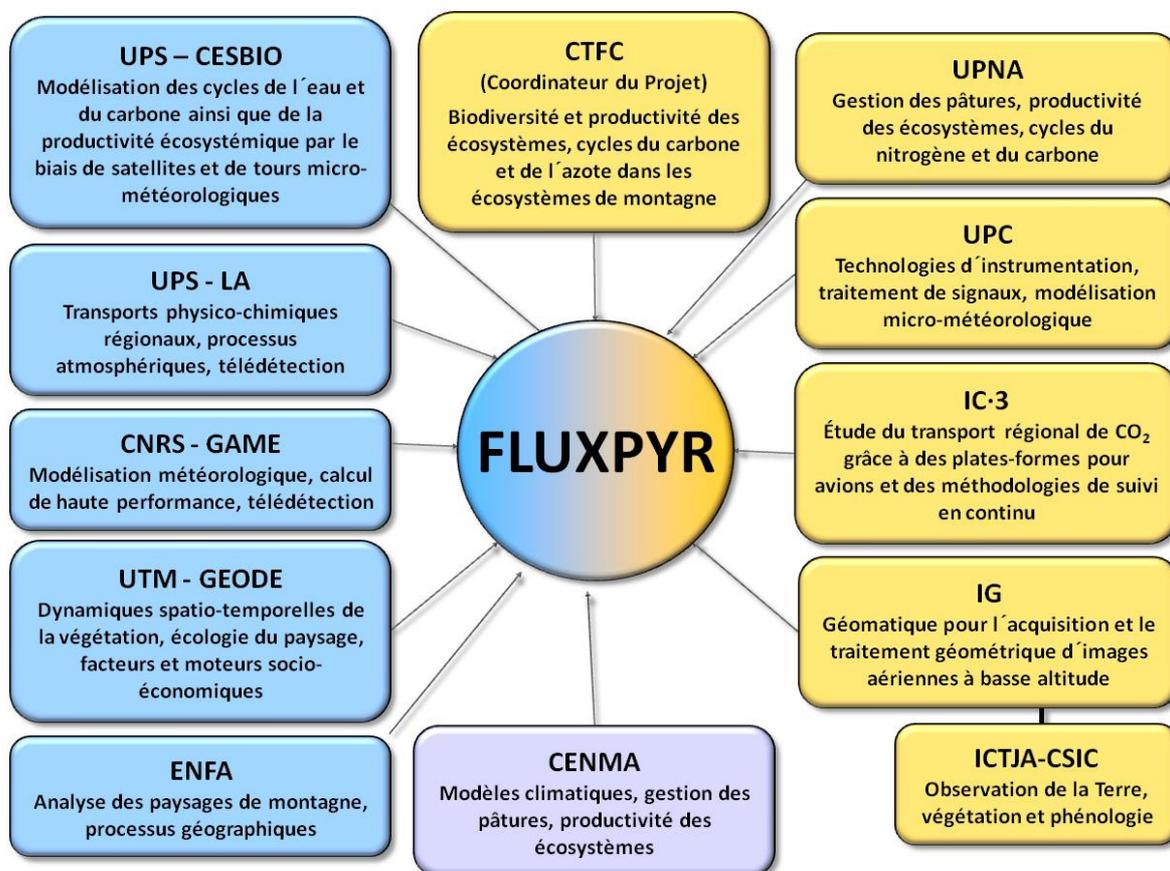
Catt10aSheep: Catt10aCattle: Catt10aMix:

Mix10aSheep: Mix10aCattle: Mix10aMix:

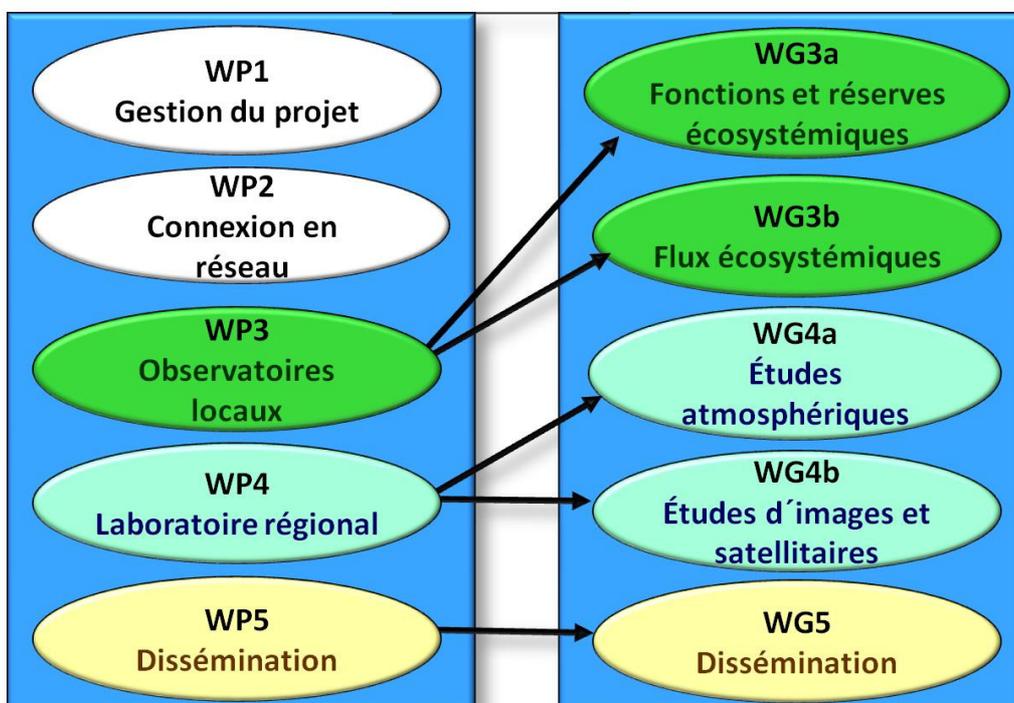
Annexe 7 : Logo du projet FLUXPYR



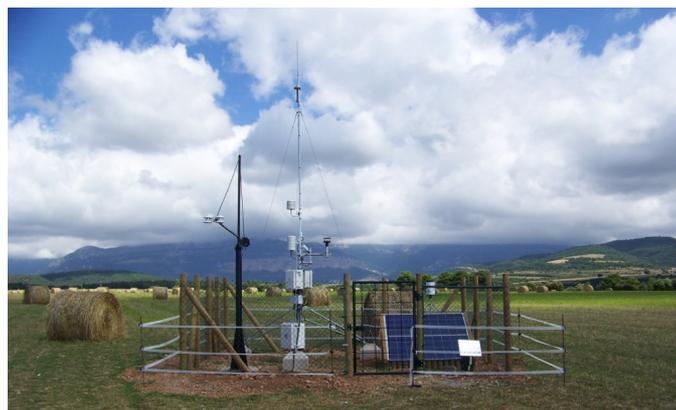
Annexe 8 : Principaux partenaires du projet FLUXPYR



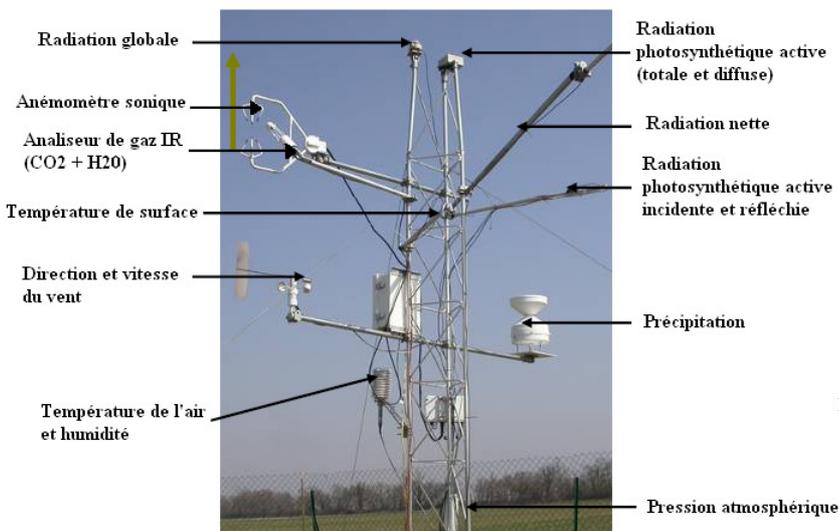
Annexe 9 : Détail des groupes de travail au sein du projet FLUXPYR



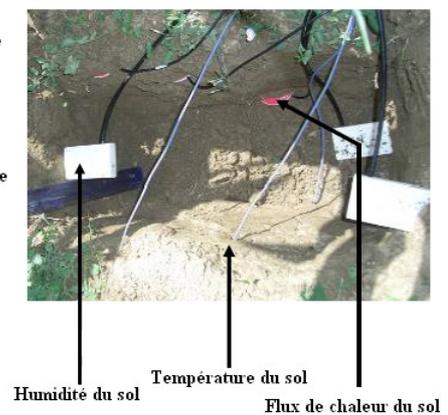
Annexe 10 : Montage d'une tour de mesure de flux Eddy Covariance (Pla de Riart – nord de Solsona) et description des appareils habituels sur ce dispositif (Photos : Gouriveau F.)



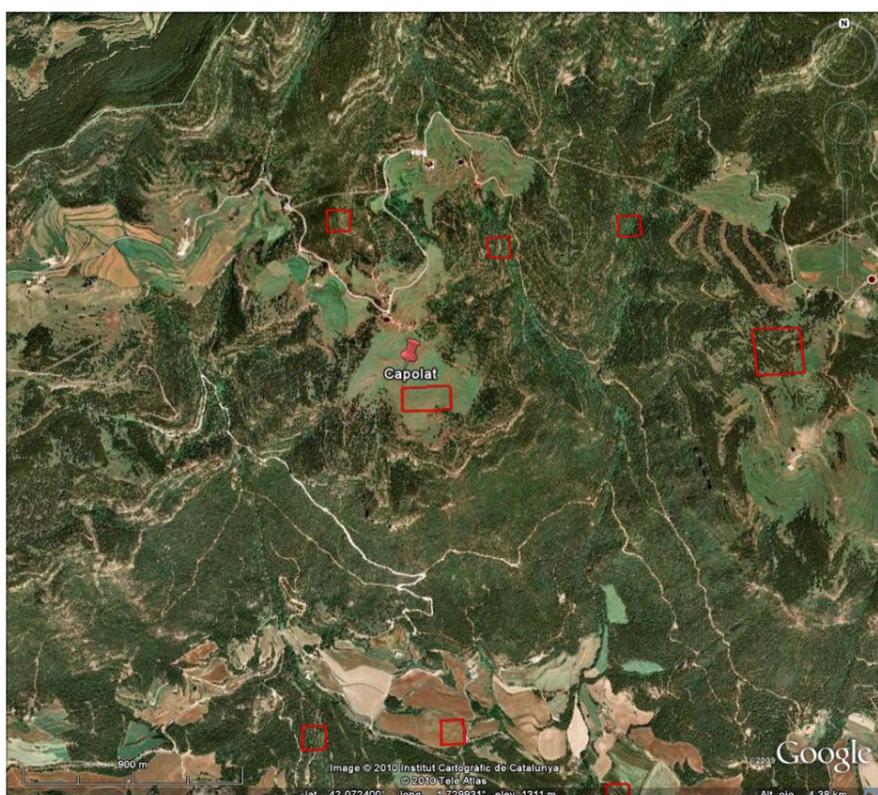
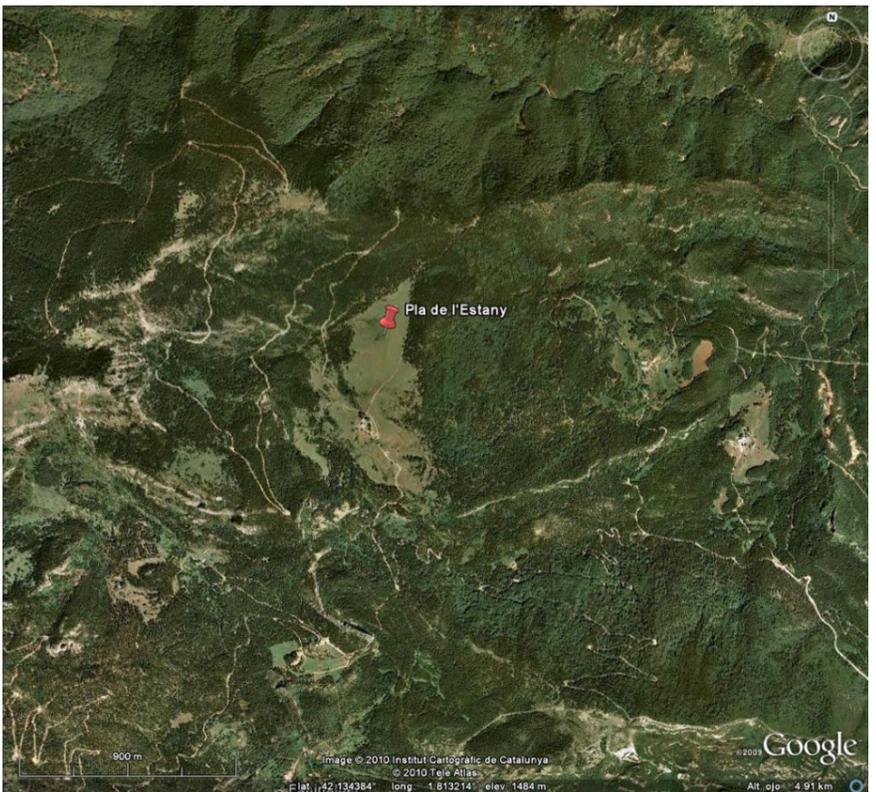
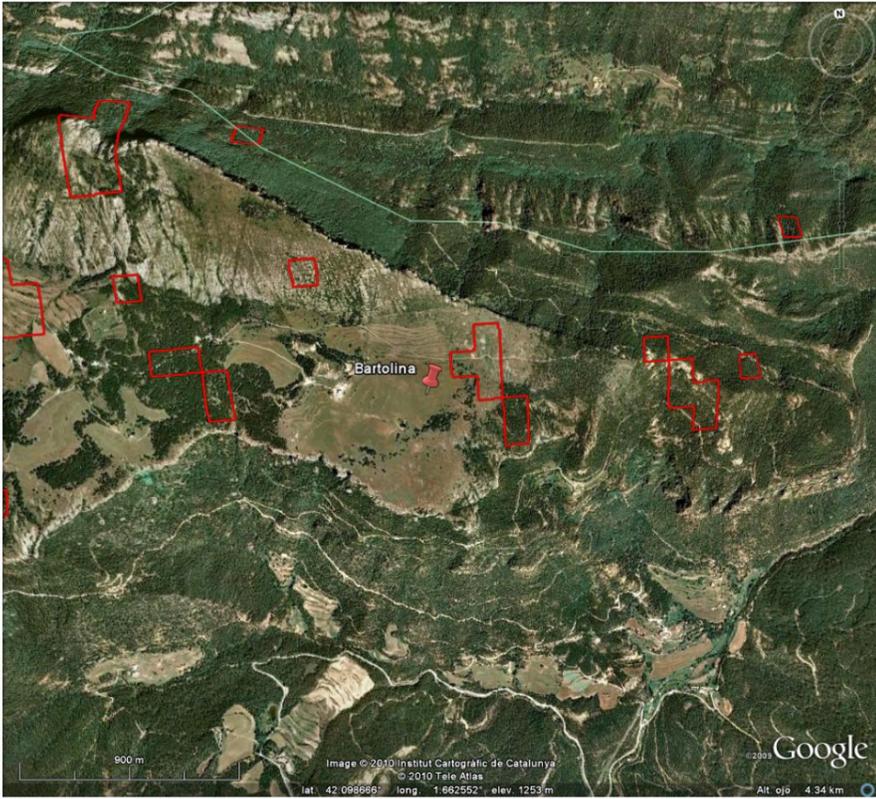
SURFACE



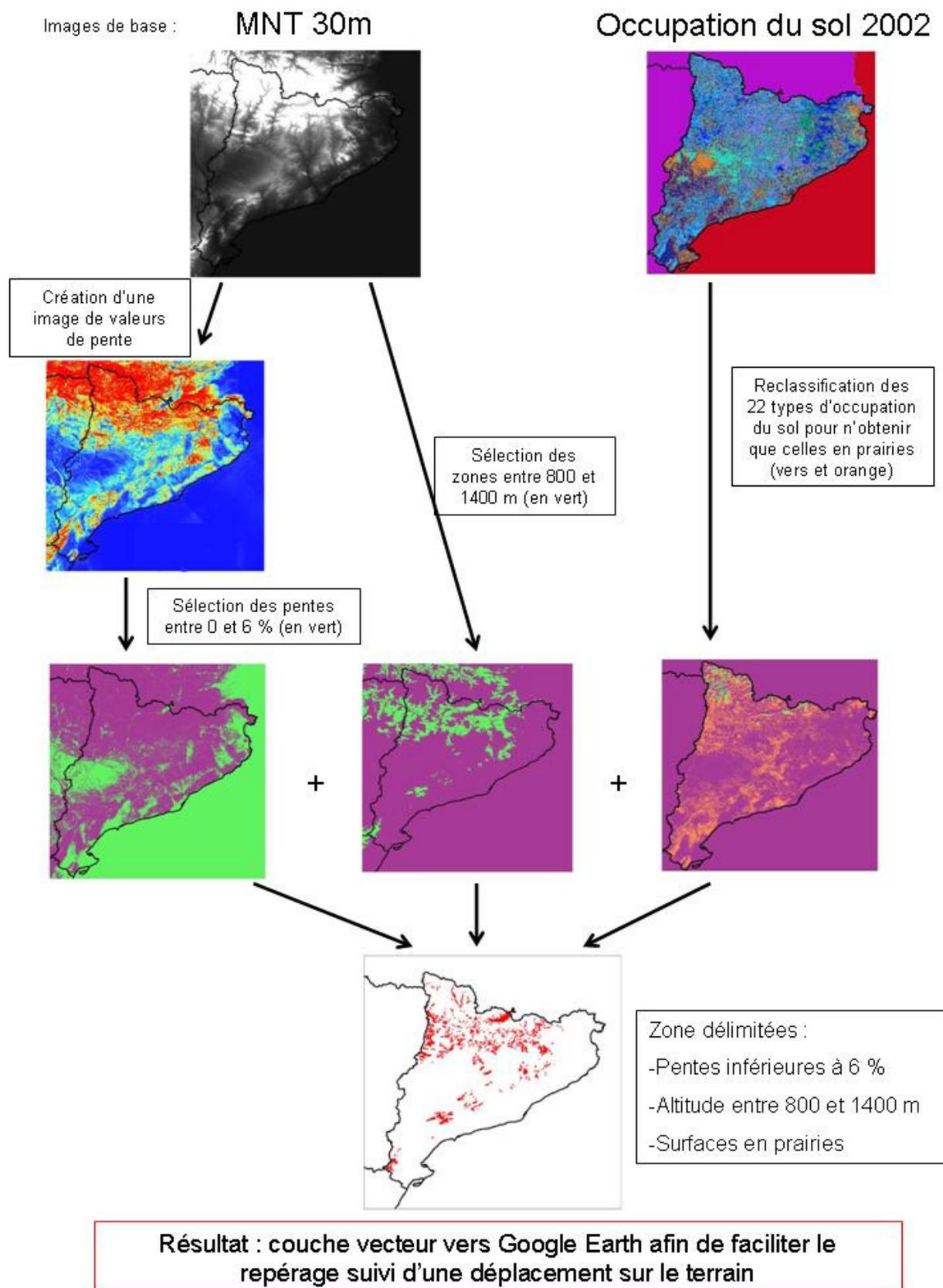
SOUTERRAIN



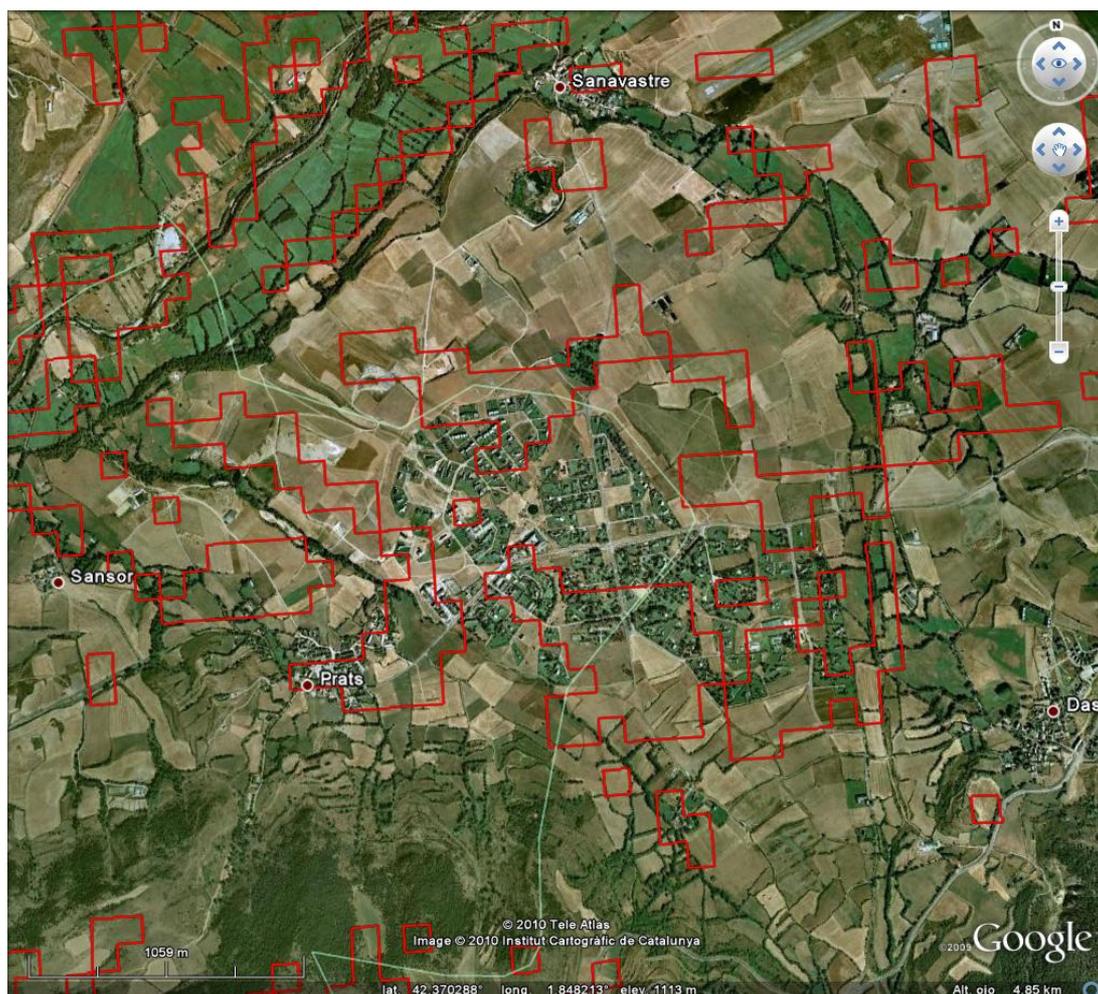
Annexe 11 : Sites visités après sélection (Source : GoogleEarth™ ; Photos : Gouriveau F.)



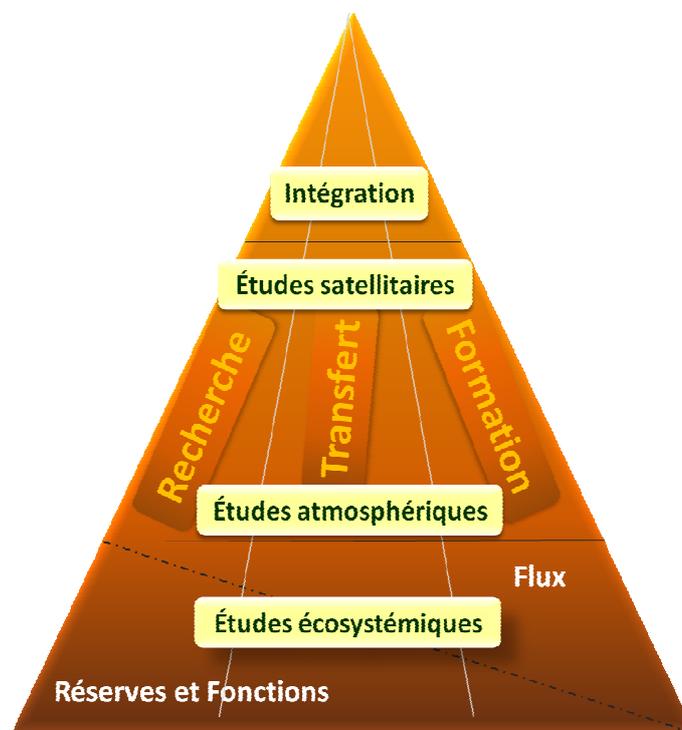
Annexe 12 : Protocole de discriminations des zones potentielles pour la mise en place d'un dispositif de mesure de flux Eddy Covariance



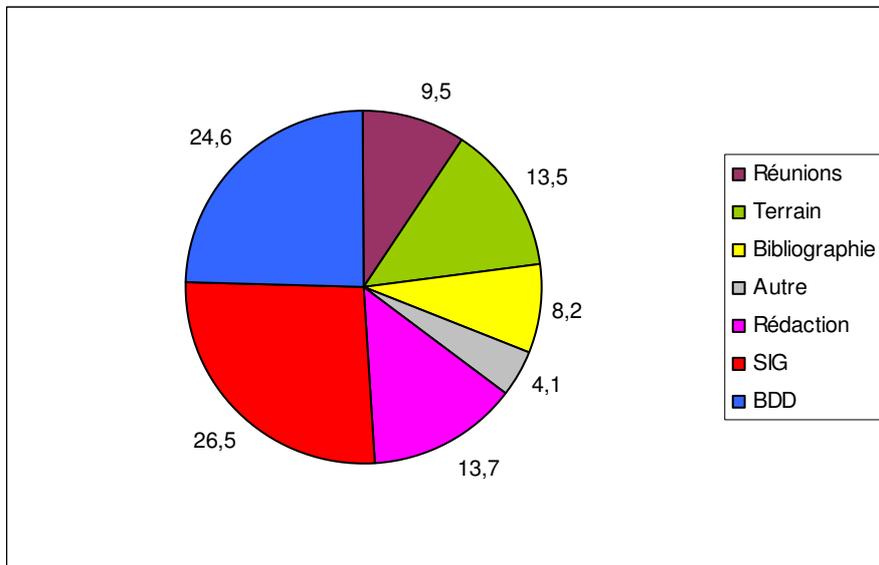
Annexe 13 : Exemple d'une erreur d'occupation du sol. Les zones encadrées en rouge devraient être en prairie



Annexe 14 : Cadre conceptuel du projet FLUXPYR



Annexe 15 : Répartition du temps de travail (en pourcentage)



Résumé

Compte tenu du changement climatique dus aux activités humaines et leur cortège de conséquences environnementales et socio-économiques, il est nécessaire de trouver des moyens d'atténuer ces phénomènes. Nombre d'experts s'accordent à dire que la séquestration du CO₂, principal gaz à effet de serre, dans le sol sous forme organique pourrait être une solution. Dans le cas de l'Europe, les occupations de type prairies ont potentiellement une capacité de stockage importante. Afin d'engager un politique de séquestration du carbone dans le sol des prairies, il convient de comprendre ses mécanismes et l'influence des paramètres environnementaux et de gestion mais aussi de connaître la distribution actuelle de ces stocks.

Cette étude se concentre sur la spatialisation de la distribution des stocks de carbones pour les prairies de Catalogne et en particulier de celles situées dans les Pyrénées. Cette spatialisation s'appuie sur un modèle empirique obtenu à partir de données de terrain. Le modèle est composé de paramètres climatiques et topographiques. L'application du modèle a été réalisée à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) et de données digitales. Il semble que le modèle prédit assez bien les stocks de carbone organique dans le sol des prairies de haute altitude. Bien que le modèle est supposé n'être applicable qu'aux prairies à plus de 1 500 m d'altitude, il prédit de manière correcte les stocks de carbone organique dans le sol des prairies pour l'ensemble de la Catalogne. Toutefois, l'ajout de nouveaux paramètres (gestion) et l'acquisition de meilleures sources de données (meilleure résolution) sont nécessaires à l'amélioration de la prédiction des stocks de carbone dans le sol.

Deux autres travaux ont été effectués. Le premier a consisté à créer un formulaire de la base de données PASTUS afin de faciliter la saisies et la gestion des données expérimentales. Le second a consisté dans un premier temps à rechercher des parcelles en prairies à l'aide d'un SIG et de critères très précis dans le but d'installer une station micrométéorologique de mesure des flux de carbone, eau et énergie. La deuxième étape a été de délimiter dans les Pyrénées les zones pour lesquelles, par superposition de scènes LandSat 5 et 7, il est possible d'obtenir une résolution temporelle de 8 jours.

Ainsi, en intégrant, des données satellitaires, de terrain par échantillonnage et de mesures de flux par des instruments spécifiques, il sera possible de modéliser et de suivre l'évolution des stocks de carbone organique dans le sol des prairies dans un contexte de changements climatiques. Ceci permettra de juger l'efficacité des mesures de séquestration du carbone atmosphérique dans le sol et donc de respecter les conditions du protocole de Kyoto.

Mots clés : Carbone organique, Changement climatique, Prairie, Séquestration, Spatialisation.