



## **PROGRAMME “Gestion et Impacts du Changement Climatique” (GICC)**

Convention Medias-UPS 6/00

Rapport Final

**Seconde Edition**

1/07/2001 au 30/11/2003

**Bilans de carbone et d'eau de la région Sud-Ouest :  
Historique récent, états actuels et scénarios du futur ;  
Comparaison des pressions climatiques et anthropiques**

Coordinateur :

Dedieu Gérard

Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère (UMR 5126 CNES-CNRS-UPS-IRD)

18 Avenue Edouard Belin

31401 Toulouse Cedex 9

Tél. : 05.61.55.85.26/01 - Fax : 05.61.55.85.00 -

mél : gerard.dedieu@cesbio.cnes.fr

Partenaires :

Centre National de Recherche Météorologique, Toulouse

INRA-SAD, Toulouse

INRA, Unité de Bioclimatologie, Bordeaux

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (CEA, CNRS), Gif/Yvette

## SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>RESUME</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>MATERIEL ET METHODES</b> .....	<b>7</b>
3.1	ZONE D'ETUDE .....	7
3.1.1	Site <i>PIRRENE</i> du <i>Fauga</i> .....	7
3.1.2	Bassin versant d' <i>Auradé</i> .....	8
3.1.3	Site de <i>Lamasquère</i> .....	9
3.2	DONNEES METEOROLOGIQUES .....	9
3.3	DONNEES SATELLITALES .....	10
3.4	CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DU SOL.....	11
3.5	CARBONE .....	11
3.5.1	<i>Carbone des sols</i> .....	11
3.5.2	<i>Prototype de modélisation des transferts verticaux dans SEVE</i> .....	13
3.5.3	<i>Détermination de la photosynthèse brute à l'échelle régionale</i> .....	13
3.6	EAU.....	14
3.6.1	<i>Méthode FAO</i> .....	14
3.6.2	<i>Le modèle ISBA</i> .....	17
3.6.3	<i>Modélisation hydrologique distribuée</i> .....	18
<b>4</b>	<b>RESULTATS</b> .....	<b>20</b>
4.1	OCCUPATION DES TERRES ET SON EVOLUTION .....	20
4.1.1	<i>Etats actuels de l'occupation du sol : 2002, 2003, 2004 et variations interannuelles</i> .....	20
4.1.2	<i>Répartition de l'Occupation du Sol dans le territoire</i> .....	21
4.1.3	<i>Variabilité interannuelle des systèmes cultivés : assolement et successions culturales</i> .....	23
4.1.4	<i>Evolution à long terme (décennie)</i> .....	24
4.2	CARBONE .....	25
4.2.1	<i>Carbone des sols</i> .....	25
4.2.1.1	Stocks de carbone et respiration .....	25
4.2.1.2	Evolution de l'occupation des terres.....	28
4.2.1.3	Variation des stocks de carbone liés au changement d'occupation des terres.....	31
4.2.2	<i>Flux d'eau et de carbone</i> .....	33
4.2.3	<i>Modèle SEVE-VEG</i> .....	35
4.2.4	<i>Détermination de la photosynthèse brute à l'échelle régionale</i> .....	38
4.3	EAU.....	39
4.3.1	<i>Méthode FAO : Besoins en eau des cultures</i> .....	39
4.3.1.1	Application aux données SPOT 20 m : Résultats .....	39
4.3.1.2	Application aux données VEGETATION 1 km : Résultats.....	43
4.3.2	<i>Modélisation ISBA : Résultats</i> .....	45
4.3.3	<i>Modélisation hydrologique distribuée</i> .....	48
4.3.3.1	Simulation de l'hydrologie du bassin versant d' <i>Auradé</i> .....	48
4.3.3.2	Influence de l'occupation des sols sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Hyse 49	
<b>5</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>PUBLICATIONS DU PROJET</b> .....	<b>53</b>
6.1	PUBLICATIONS .....	53
6.2	RAPPORTS DE STAGES, RAPPORTS TECHNIQUES INTERNES .....	54
<b>7</b>	<b>DISPONIBILITES DES DONNEES</b> .....	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>VALORISATION DES RESULTATS SUR LE SITE GICC</b> .....	<b>55</b>
<b>9</b>	<b>LISTE DES ILLUSTRATIONS</b> .....	<b>56</b>

## Synthèse des principales révisions introduites dans la seconde édition du rapport

- Remaniement total de la section décrivant les résultats en matière d'occupation des terres (§4.1)
- Ajout : Prototype de modélisation des transferts verticaux dans SEVE ; simulation et validation des flux de H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> sur plusieurs sites (Méthode : §3.5.2, résultats : §4.2.3)
- Ajout : Premiers résultats des mesures expérimentales de flux de H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> sur colza et triticales (§4.2.2)
- Ajout : Calcul d'évapotranspiration réelle : FAO et ISBA (Méthodes : §3.6.1, 3.6.2, résultats : §4.3.14.3.2)
- Ajout : Comparaison des estimations des besoins en eau à partir de données haute et basse résolutions (§ 4.3.1.2)
- Ajout : Estimation des variations du stock de carbone des sols résultant des changements d'occupation des terres entre 1991 et 2002 (§4.2.1.3)

# 1 Résumé

Le projet a pour objectifs le développement et l'évaluation d'un ensemble d'outils et de méthodes à caractère générique permettant d'estimer et de simuler les flux et bilans d'eau et de carbone à l'échelle d'une région pilote de 50x50 km<sup>2</sup> environ, située en Région Midi-Pyrénées et constituée d'un ensemble hétérogène d'écosystèmes (cultures, forêt et friches). Les approches développées visent à évaluer à l'échelle régionale les bilans actuels et à simuler des scénarios d'évolution de ces bilans en réponse à des facteurs climatiques ou anthropiques.

Le projet fait partie d'un programme à long terme visant à comprendre le fonctionnement des surfaces continentales aux échelles du paysage et de la région, et à développer une modélisation intégrée de ce fonctionnement à des fins scientifiques mais également de gestion, de simulation de scénarios et d'aide à la décision.

Ce rapport présente les méthodologies et les résultats obtenus dans le cadre du projet soutenu par le GICC. Des soutiens complémentaires, mais déphasés dans le temps, ont été obtenus pour des activités proches auprès du Ministère de la Recherche (Réseau Terre et Espace), du Conseil Régional Midi-Pyrénées et du CNES.

Méthodologies et résultats sont présentés en trois grandes rubriques : occupation des terres, eau et carbone. Ce découpage correspond aux principales composantes qu'il importe de développer pour atteindre notre objectif de compréhension et de modélisation intégrée du fonctionnement des surfaces. Les principaux résultats obtenus peuvent être classés en cinq grandes catégories :

- Système d'information : les données produites par le projet ou acquises auprès de divers fournisseurs (IGN , BRGM, ...) sont intégrées dans un système d'information géographique et les bases de données associées. Ces données sont des cartes topographiques et thématiques, des données satellitales et météorologiques, des mesures expérimentales. (Collaborations : CNRM, INRA-Toulouse).
- Méthodologies : des méthodes exploitant la télédétection pour cartographier l'occupation des terres (Collaborations : INRA-Toulouse), évaluer le bilan hydrique et estimer la productivité primaire brute (collaboration : CNRM, LSCE) ont été développées et exploitées sur l'ensemble de la zone pilote. Pour la première fois, l'intérêt de disposer de séries de données de télédétection à haute résolution spatiale et temporelle a été évalué, en particulier pour apprécier l'impact de la sécheresse de 2003.
- Processus, mesures in-situ : un nombre élevé d'échantillons de sols a été prélevé et analysé pour étudier le stock de carbone des sols d'un bassin versant agricole, en relation avec l'évolution passée de l'occupation des terres (collab. : INRA-Orléans). Un dispositif de mesure de flux d'eau et de dioxyde de carbone utilisant la méthode des fluctuations a été installé sur deux sites agricoles (collab. : INRA-Bordeaux).
- Thématique :
  - la distribution spatiale et temporelle des besoins en eau des cultures, irriguées ou non, et de plusieurs termes du bilan hydrique (évapotranspiration réelle, humidité des sols) a été évaluée sur l'ensemble de la zone pilote. Une évaluation de l'impact des conditions météorologiques de l'année 2003 a été réalisée.

- L'impact sur les stocks de carbone des changements d'occupation des terres intervenus entre 1991 et 2002 sur une partie des départements de la Haute Garonne et du Gers a été évalué.
  - L'impact de modifications de l'occupation des terres sur l'hydrologie d'un bassin versant a été étudié par modélisation. Ce travail suggère qu'une augmentation de la superficie des forêts et prairies de l'ordre de 30% à l'échelle du bassin pourrait avoir un impact important sur le débit des cours d'eau (Collab. : Agence Régionale pour l'Environnement, Chambre Départementale d'Agriculture de la Haute Garonne).
- Valorisation : la carte d'occupation des terres pour l'année 2002 a été diffusée à plusieurs équipes de recherche pour leurs besoins propres. Les résultats concernant l'estimation des besoins en eau des cultures et la modélisation hydrologique ont été présentés à plusieurs acteurs de la gestion du territoire (collectivités locales, Agence de l'Eau, DIREN, Chambre d'Agriculture).

## 2 Introduction

Le projet a pour objectifs le développement et l'évaluation d'un ensemble d'outils et de méthodes à caractère générique permettant d'estimer et de simuler les flux et bilans d'eau et de carbone à l'échelle d'une région pilote de 50x50 km<sup>2</sup> environ constituée d'un ensemble hétérogène d'écosystèmes (cultures, forêts et friches).

Le projet met l'accent d'une part sur les méthodologies de passage de l'écosystème au paysage et à la région, et d'autre part sur la question scientifique des effets relatifs du climat et des activités humaines sur les bilans d'eau et de carbone.

Le terme de "région" utilisé dans ce rapport correspond à la définition donnée par le GICC dans son appel d'offres de septembre 2003 : *"La scène régionale est définie ici comme le territoire au sein duquel se dégage une unité fonctionnelle rendant possible l'intégration des divers phénomènes. Cet espace aménagé (territoire) d'échelle régionale correspond à une unité fonctionnelle du milieu bio-physique (bassin-versant, massif montagneux, littoral, massif forestier, zone humide,...), et/ou à une unité d'organisation de la société (région administrative, grande métropole régionale – ou transfrontalière, ..)"*

Les approches développées visent à évaluer à l'échelle régionale les bilans actuels et à simuler des scénarios d'évolution de ces bilans en réponse à des facteurs climatiques ou anthropiques.

Le projet fait partie d'un programme de recherches à long terme visant à comprendre le fonctionnement des surfaces continentales aux échelles du paysage et de la région, et à développer une modélisation intégrée de ce fonctionnement à des fins scientifiques mais également de gestion, de simulation de scénarios et d'aide à la décision.

Ces thématiques s'insèrent dans la programmation scientifique de nombreux organismes, dont le CNRS (zones atelier, programmes ECCO PNBC et PNRH de l'INSU/SIC) et l'INRA. La région et les thèmes étudiés sont parties intégrantes de la Zone Atelier Adour-Garonne.

Ce rapport présente les méthodologies et les résultats obtenus dans le cadre du projet soutenu par le GICC. Des soutiens complémentaires, mais déphasés dans le temps, ont été obtenus pour des activités proches ou complémentaires auprès du Ministère de la Recherche (Réseau Terre et Espace), du Conseil Régional Midi-Pyrénées et du CNES.

Méthodologies et résultats sont présentés en trois grandes rubriques : occupation des terres, eau et carbone. Ce découpage correspond aux principales composantes qu'il importe de développer pour atteindre notre objectif de compréhension et de modélisation intégrée du fonctionnement des surfaces. Au stade actuel d'avancement des travaux, l'intégration n'est que partielle. Le projet n'inclut pas d'aspects socio-économiques. Les méthodes développées et la base d'informations accumulées constituent cependant les fondations nécessaires pour réaliser progressivement cette intégration et l'élargissement du projet à d'autres disciplines. Les liens qui ont été établis avec des décideurs et gestionnaires institutionnels régionaux (collectivités territoriales, DDAF, DIREN, Agence de bassin, chambres d'agriculture) devront également être approfondis.

### 3 Matériel et méthodes

#### 3.1 Zone d'étude

La zone d'étude (Figure 1) dans son ensemble couvre environ 2500 km<sup>2</sup> dans la région des vallées et coteaux de Gascogne au Sud Ouest de Toulouse. C'est une zone de polyculture très fragmentée couverte d'exploitations d'assez faible taille. On y trouve des cultures céréalières (maïs, majoritairement irrigué, blé), des oléoprotéagineux (tournesol), des prairies d'élevage bovin et des forêts paysannes de petite superficie. La biodiversité animale et végétale résulte de cette fragmentation et des pratiques culturales.



Figure 1 : zone d'étude (carré bleu) et localisation des sites-expérimentaux. A : Bassin d'Auradé ; L : Ferme de l'ESAP (Lamasquère) et F : Site du Fauga.

Cette zone, proche du pôle universitaire toulousain, a bénéficié d'importantes études écologiques dès avant la dernière guerre ; elles fournissent un fond documentaire, remarquablement conservé, de l'évolution de son état environnemental.

A l'intérieur de cette zone, des informations et des mesures sont acquises sur trois sites expérimentaux.

##### 3.1.1 Site PIRRENE du Fauga

Dans le cadre d'une convention associant également le CNRM, l'ONERA met à notre disposition son site PIRRENE qui constitue une partie de son établissement de Fauga-Mauzac, à proximité de la ville de Muret. Les expérimentations conduites sur une dizaine d'hectares s'inscrivent principalement dans le cadre des études préparatoires à la mission spatiale SMOS. Les mesures réalisées simultanément sur une prairie et une parcelle de sol nu ont pour but principal de contribuer au développement des techniques d'assimilation des données dans des modèles couplés de fonctionnement de la végétation et de flux thermo-hydriques.

Les mesures recueillies depuis l'automne 2001 sur la prairie et le sol nu incluent les variables météorologiques, les profils d'humidité et de température dans le sol, les flux d'énergie et d'eau, la biomasse, les mesures radiométriques multispectrales. Un dispositif de mesure des flux d'eau par la méthode des fluctuations a été installé durant l'été 2003. Un photomètre, intégré dans le réseau international AERONET, permet de mesurer les propriétés optiques des aérosols et le contenu en

vapeur d'eau de la colonne d'atmosphère. Ces données sont utilisées pour corriger les mesures satellitales des effets atmosphériques.

### 3.1.2 Bassin versant d'Auradé

Ce bassin versant occupe 328 ha (3 km x 1.6 km environ), culmine à 268 m et est entièrement inscrit dans la commune d'Auradé (département du Gers). Il est découpé en 5 sous-bassins dont 4 principaux. La moitié de la surface de drainage a des pentes inférieures à 12.5%, 26% du territoire des pentes 12.5-17.5%, le reste 23% correspondant à de fortes pentes >17.5%. Le bassin versant est drainé par le Montoussé à écoulement permanent. Le bassin ne comporte pas de nappe profonde. Le bassin versant est taillé dans la molasse oligo-miocène, matériau de base des coteaux de Gascogne générant des sols typiques argilo-calcaires, les Terreforts. La position toposéquentielle et la pente jouent un rôle dans la distribution et la nature des sols (profondeur, hydromorphie, texture...).

L'occupation des terres est majoritairement agricole (94% du BV), fondée sur la rotation céréales-oléoprotéagineux (Blé/Tournesol). Le reste du territoire est occupé par des bois résiduels (3% du BV).

Représentatif des coteaux molassiques du Sud-Ouest de la France, tant sur le plan physiographique qu'agronomique, le BV est devenu au cours de ces quinze dernières années un site expérimental reconnu en relation avec des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement. L'Association des Agriculteurs d'Auradé, avec l'aide de l'entreprise productrice d'engrais SAGP (S.A. Grande Paroisse de Toulouse), a entrepris une démarche d'agriculture raisonnée afin de limiter les risques environnementaux. Des mesures de débits, météorologiques et d'évapotranspiration sont disponibles durant quelques années de la décennie 1990-2000.

La parcelle expérimentale d'Auradé est située sur le domaine privé de Bordeneuve (Figure 2). Elle se situe en zone de coteaux, en limite du bassin versant, sur la commune d'Auradé. Cette parcelle appartient à un particulier, son accès a fait l'objet d'une convention, elle mesure 14 ha et a été choisie pour ses caractéristiques favorables aux mesures de flux (taille, relative platitude). Une station météorologique très complète (données météo standard, mesures de rayonnement, température, humidité dans le sol...) est installée ainsi qu'un système de mesures des flux d'eau et de carbone par fluctuations turbulentes. Les mesures y ont débuté en Mars 2004 et une rotation blé-tournesol-blé-colza est en place. Cette parcelle est fertilisée (engrais minéral) mais jamais irriguée.



Figure 2 : Parcelle expérimentale et bassin versant d'Auradé (43° 32' 58" N, 01° 06' 28" E), surface 14 ha, mesures commencées en Mars 2004. Rotation blé-tournesol-blé-colza.

### 3.1.3 Site de Lamasquère

Ce site de 270 ha est situé sur la ferme de l'Ecole Supérieure d'Agriculture de Purpan (ESAP), sur la commune de Lamasquère. Outre les informations relatives à l'assolement et aux pratiques culturales, les collaborations établies avec l'ESAP nous donnent accès à des mesures d'indice foliaire, de rendements et de texture des sols.

La rotation habituelle des cultures est maïs-blé-maïs-tournesol. La parcelle est fertilisée (engrais minéral + organique) et irriguée lorsqu'elle est en maïs.

Un dispositif similaire à celui d'Auradé est installé (station météorologique et mesures des flux par fluctuation turbulentes). La taille et l'absence totale de relief font de cette parcelle de culture intensive un site de mesure idéal pour les flux turbulents. Ces données sont complétées par des informations détaillées concernant l'état des couverts (phénologie, biomasse, LAI...), des sols, l'itinéraire et les pratiques culturales. La parcelle a été cultivée sur la majeure partie de sa surface depuis les années 40 et le parcellaire a été considérablement simplifié depuis cette période.

Les mesures météo ont débuté en Juin 2004 et des mesures continues de flux d'eau et de carbone par fluctuations turbulentes sont assurées depuis Mars 2005.



Figure 3 : Site de Lamasquère ( $43^{\circ} 29' 36''$  N,  $01^{\circ} 14' 14''$  E), surface = 37 ha, en 2002, mesures commencées en Juin 2004 sur maïs irrigué. Rotation, maïs-blé(ou triticale)-maïs-tournesol

## 3.2 Données météorologiques

Outre les données météorologiques mesurées au Fauga, à Lamasquère et à Auradé, nous avons utilisé les données SAFRAN fournies par le CNRM. Il s'agit de champs de variables météorologiques obtenues par interpolation optimale des données des réseaux synoptique et secondaire. Ces données sont fournies au pas de temps horaire sur une grille couvrant la zone d'étude à la résolution de 8km.

Les données fournies sont :

- La température de l'air  $T_a$  [K] ;
- La vitesse du vent à 10m  $u_a$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] ;
- Le rayonnement solaire courtes longueurs d'onde  $R_s$  [ $W \cdot m^{-2}$ ] ;

- Le rayonnement atmosphérique descendant grandes longueurs d'onde  $R_{atm\downarrow}$  [ $W.m^{-2}$ ] ;
- L'humidité spécifique  $q_a$  ;
- La pression atmosphérique  $P$  ;

Le rayonnement net et l'humidité relative ont été déduits de ces variables.

### 3.3 Données satellitales

Des séries approximativement mensuelles d'images SPOT multispectrales sont acquises depuis 2002 entre mars et novembre (cf. Tableau 1 et Figure 4), à 20 mètres de résolution. Ces données sont corrigées géométriquement avec prise en compte du relief (niveau 3 orthophotographique de Spot-Image). Nous avons réalisé l'étalonnage radiométrique (coefficients fournis par le CNES QTIS/GC) et la correction des effets atmosphériques (mesures de photomètre solaire sur le site du Fauga).

Des données à la résolution de 1km issues de l'instrument VEGETATION embarqué sur SPOT-4 et 5 sont acquises depuis 1999. Ces données sont des synthèses temporelles, décadaires, étalonnées et corrigées des effets atmosphériques.

	1991	1994	2001	2002	2003	2004	2005
Janvier					14-janv.		10-janv.
Février						8-févr.	2-févr.
Mars	11-mars	24-mars		21-mars	10-mars	16-mars	2-mars
Avril				23-avr.	5-avr.	21-avr.	
Mai	22-mai	6-mai		15-mai	23-mai	16-mai	
Juin				14-juin	14-juin	10-juin	2-juin
Juillet		3-juil.		20-juil.	10-juil.	17-juil.	12-juil.
Août	3-août			14-août	4-août	11-août	5-août
Septembre	24-sept.			14-sept.	3-sept.	17-sept.	15-sept.
					25-sept.		
Octobre		6-oct.	2-oct.	6-oct.		23-oct.	7-oct.
				27-oct.			
Novembre				22-nov.	7-nov.		11-nov.
Décembre			26-déc.		5-déc.	13-déc.	

Tableau 1:liste des acquisitions SPOT

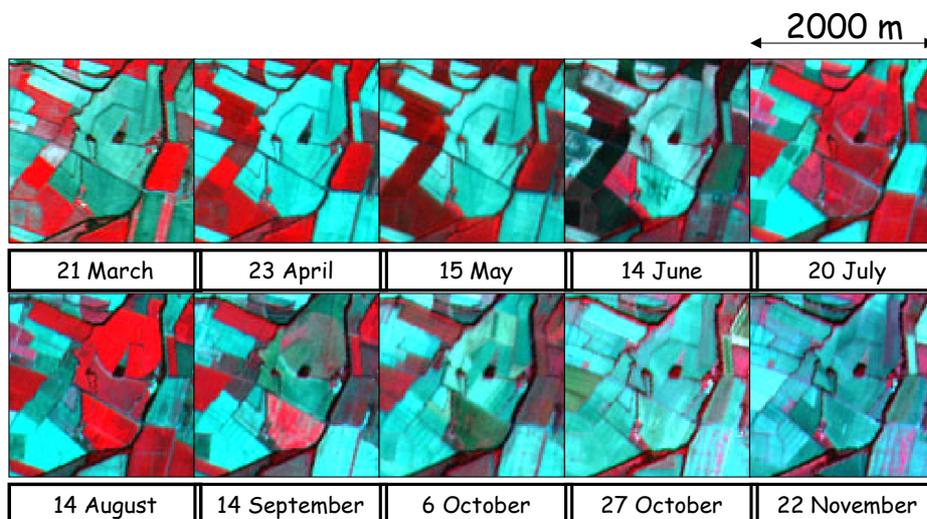


Figure 4 : Exemple sur un extrait du suivi de la végétation (en rouge) à l'aide d'une série de 10 images SPOT multispectrales entre mars et novembre 2002

### 3.4 Cartographie de l'occupation du sol

La réalisation de cartes d'occupation des sols répond à deux objectifs. Il s'agit tout d'abord de disposer pour chaque année étudiée des entrées nécessaires au fonctionnement des modèles de processus. Il s'agit ensuite, dans une perspective de plus long terme, de diagnostiquer des évolutions majeures de l'occupation des terres, comme la mise en culture de prairies.

Les cartes réalisées par ce projet reposent sur l'utilisation de la télédétection et d'enquêtes de terrain. Les statistiques disponibles auprès des services de l'Etat sont également utilisées pour étudier les évolutions.

La méthode choisie est une classification dirigée (de type maximum de vraisemblance) à partir de vérités de terrain. La procédure comprend 4 phases : pré-traitements, apprentissage, classification et post-traitement. L'ensemble des logiciels a été développé au Cesbio.

Les classifications sont réalisées soit à partir des données brutes, non corrigées radiométriquement, soit à partir de mesures étalonnées et corrigées des perturbations atmosphériques. L'absence de correction radiométrique n'affecte pas la procédure de classification utilisée.

L'apprentissage est automatique et réalisé à partir d'une base de données de terrain et d'une segmentation d'images. Cette démarche permet le positionnement automatique des points-référence, obtenus après les enquêtes d'occupation des sols, sur l'image des contours issue d'une segmentation. Ainsi le fichier d'échantillonnage pour la classification est créé automatiquement.

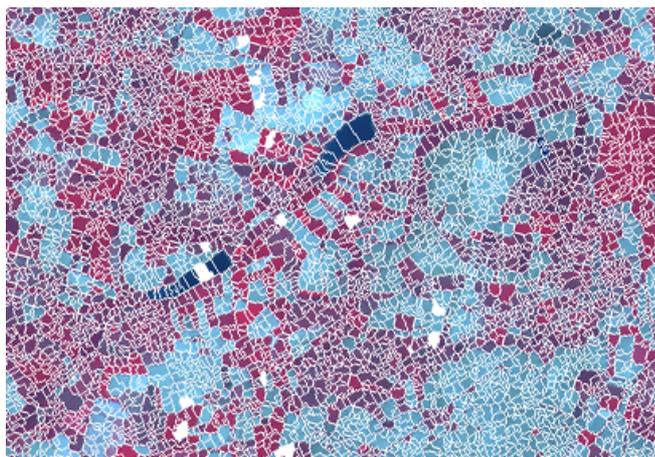


Figure 5 : Résultats de l'échantillonnage automatique (en blanc les échantillons)

Deux matrices de confusion des classes sont calculées : une a priori sur les échantillons d'estimation, l'autre a posteriori sur les échantillons de vérification. La classe attribuée à un point d'un échantillon peut être différente de la vérité-terrain. La matrice de confusion permet de mesurer la qualité d'une classification et la séparabilité des classes. Les résultats sont significatifs si les échantillons sont représentatifs des classes.

### 3.5 Carbone

#### 3.5.1 Carbone des sols

Le premier objectif est de fournir une estimation du stock de carbone immobilisé dans la matière organique du sol, à l'échelle d'un bassin versant. Afin d'estimer ce stock, il est prévu de modéliser la

distribution spatiale des stocks de carbone dans le sol en tout point du bassin versant expérimental d'Auradé, en fonction, notamment, de paramètres tels que la position du point sur une toposéquence, de la profondeur du sol, de la texture du sol, de l'histoire de la parcelle incluant le point.

Afin de construire le modèle statistique de distribution spatiale du carbone dans le sol, 4 transects ont été sélectionnés, correspondant à des toposéquences situées dans chacun des sous-bassins principaux, généralement de crête à crête en passant par le thalweg. Le long des toposéquences, des prélèvements de sol ont été réalisés, approximativement tous les 20 m. Pour chaque point, trois répétitions ont été échantillonnées à la tarière pédologique, à raison de cinq profondeurs par répétition, entre 0 et 110 cm. De plus, des transects ont été effectués dans des situations particulières permettant d'établir plus précisément l'influence de l'occupation du sol : comparaison bande enherbée/culture et comparaison bois/ culture après déboisement. Ainsi, à ce jour, plus de 1000 échantillons ont été prélevés pour l'élaboration du modèle. Enfin, d'autres échantillons, destinés à la validation du modèle ont également été prélevés à différents endroits du bassins versant expérimental représentatifs de la diversité de situations agro-écologiques du site. Les échantillons font l'objet d'un séchage à l'air, d'un tamisage à 2 mm et d'une décarbonatation qui permet de s'affranchir de la fraction de carbone minéral contenue dans les carbonates de ces sols argilo-calcaires. Les analyses, non totalement terminées, sont effectuées sur un analyseur élémentaire de type CHN, pour mesurer la teneur en carbone organique.

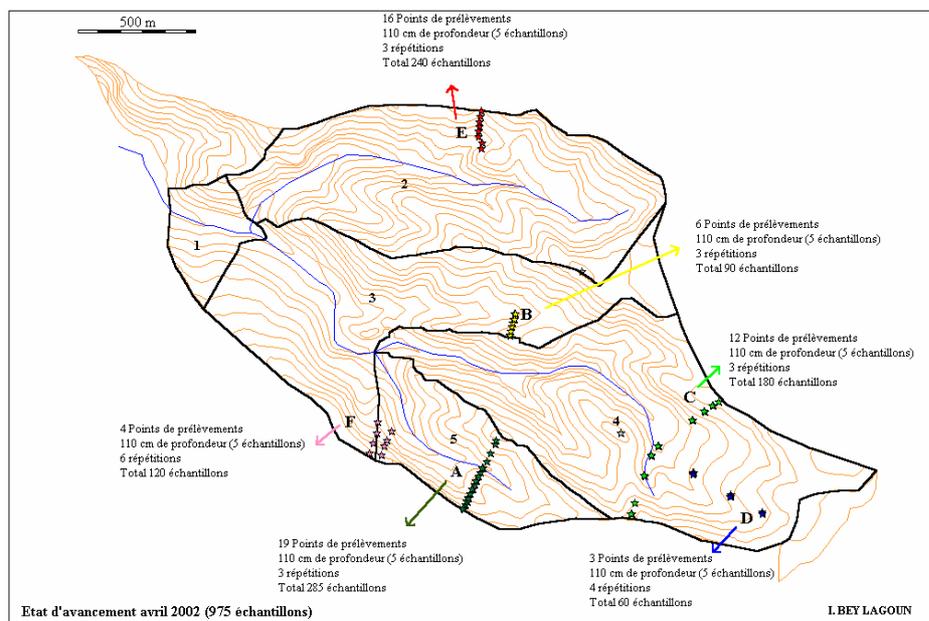


Figure 6 : Bassin versant d'Auradé et localisation des transects d'échantillonnage du sol

Parallèlement, un second objectif consiste à fournir des estimations des flux de carbone entre les différents compartiments. En premier lieu, les flux entre le sol et l'atmosphère (respiration du sol) sont mesurés. Les mesures ont été effectuées sur un transect occupé par une parcelle de blé (culture d'hiver) et sur un transect occupé par une parcelle de tournesol (culture d'été). Le système de mesure est constitué par une chambre de respiration de sol reliée à un analyseur de gaz par infra-rouge (Ciras-1, PP-Systems), connecté également à une sonde mesurant la température du sol. En outre l'humidité du sol est mesurée sur les mêmes placettes ainsi que la vitesse du vent. Ces mesures sont réalisées à une fréquence bi-mensuelle environ sur chacune des parcelles. Une centrale d'acquisition de données munie de capteurs d'humidité du sol et de température du sol permet d'enregistrer en continu le « climat » édaphique sur le bassin versant, à proximité du transect tournesol.

### 3.5.2 *Prototype de modélisation des transferts verticaux dans SEVE*

L'unité de base choisie pour modéliser le fonctionnement des agro-écosystèmes est la parcelle agricole ou forestière, homogène en composition spécifique. Une première étape dans le développement d'un modèle simulant l'évolution du fonctionnement des paysages consiste à coupler la simulation des différents flux (eau, carbone, énergie) et la dynamique des différents objets (sol et végétation) à l'échelle de la parcelle. Ce couplage est ensuite évalué par confrontation aux données mesurées, telles que les mesures de flux par la méthode des corrélations ou les estimations de production.

En couplant les modèles CASTANEA (Dufrêne et al., 2005 ; Davi et al., 2005), ICARE et STICS 4.0 (Brisson et al., 1998), nous avons développé un modèle générique du fonctionnement de la surface continentale végétalisée. Le modèle CASTANEA simule la photosynthèse (De Pury & Farquhar 1997), la respiration autotrophe (Ryan, 1991 ; Penning de Vries, 1974) et la respiration hétérotrophe des microbes du sol (Parton et al., 1987). La conductance stomatique est couplée au flux de carbone par le modèle de Ball et al. (1987). Le modèle simule la phénologie et la dynamique de l'allocation du carbone (Davi 2004), ce qui correspond aux équations d'évolution de l'objet végétation du type arbre. Le modèle ICARE développé au CESBIO est un modèle de type SVAT (Soil Vegetation Atmosphere Transfer) avec 2 sources (sol et végétation) ce qui le distingue de ISBA. Il permet la simulation des flux de chaleur sensible, latent, et dans le sol (H, LE, G) et le calcul des températures de surface (végétation et sol). Dans le couplage réalisé, le transfert radiatif courtes longueurs d'onde est réalisé par le modèle SAIL (Verhoef 1984). L'évolution de l'eau dans le sol est simulée selon le modèle diffusif implémenté dans ISBA (Boone et al., 2000). Enfin la dynamique de l'indice foliaire et les règles d'allocation du carbone pour les plantes cultivées sont calculées suivant le modèle STICS développé à l'INRA (Brisson et al., 1998). La production de graines et de matière organique (autre que les feuilles) est contrainte par la quantité de carbone disponible simulée par les modules de photosynthèse et de respiration. En résumé le modèle couplé simule (1) **les flux verticaux** de carbone, d'eau et d'énergie, (2) **les flux verticaux d'eau dans le sol**, (3) l'évolution de **l'objet végétation** (tous types arbre et culture), (4) l'évolution **de l'objet sol**. A ce jour, il ne simule ni les transferts latéraux d'eau et de carbone, ni l'effet de la topographie.

Le modèle est programmé dans son ensemble en Fortran 90. Les pas de temps sont semi-horaire pour la simulation des flux verticaux et de l'évolution de l'objet sol et journalier pour l'évolution de l'objet végétation.

Le modèle a été évalué sur 4 sites où les mesures de flux par la méthode des fluctuations turbulentes étaient disponibles : un peuplement de hêtre en 2003 (Hesse), une plantation d'olivier au Maroc en 2003 (Agdal), une culture de Colza dans le sud ouest en 2005 (Auradé) et une culture de Blé dans le sud Ouest en 2005 (Lamasquère).

### 3.5.3 *Détermination de la photosynthèse brute à l'échelle régionale*

Parallèlement aux études sur sites et à l'aide de capteurs à haute résolution, nous développons des approches se situant d'emblée à l'échelle régionale et exploitant des instruments satellitaires à résolution kilométrique.

Les mesures de l'instrument VEGETATION à bord de SPOT4 ont été utilisées pour piloter le modèle TURC (Ruimy et al., 1996) et estimer la Productivité Primaire Brute (PPB, photosynthèse brute) d'une région de 100x100 km située au Sud-Ouest de Toulouse.

La photosynthèse brute, GPP, est estimée à l'aide d'une approche par efficacité :

$$GPP = e' f c S \quad (1)$$

où  $e'$  est l'efficacité de conversion pour la GPP,  $S$  est le rayonnement solaire global incident (300-4000 nm),  $c$  est la fraction de ce rayonnement utilisable par la photosynthèse ( $cS$  est le rayonnement photosynthétiquement actif, PAR),  $f$  est la fraction de PAR absorbée par la végétation.  $f$  est estimée à l'aide d'indices de végétation (NDVI) dérivés des mesures de télédétection (SPOT-4 VEGETATION ici).

La valeur de l'efficacité de conversion,  $e'$ , a été estimée par Ruimy et al. (1995) à partir de la compilation de plus d'une centaine de mesures permettant de relier le flux de  $CO_2$  au dessus de la canopée au rayonnement solaire incident.

## 3.6 Eau

### 3.6.1 Méthode FAO

L'objectif est de ici mettre au point des méthodes d'estimation du besoin en eau des cultures, de l'évapotranspiration réelle et de l'humidité du sol. Dans un premier temps, il s'agit de dresser un état des lieux à l'aide de méthodes simples exploitant les données de télédétection. Outre le diagnostic de la situation actuelle, ces méthodes permettent d'évaluer l'impact des fluctuations interannuelles du climat.

L'échelle temporelle visée est typiquement hebdomadaire. L'échelle spatiale accessible est liée à la résolution des données utilisées en entrée. L'échelle visée correspond aux unités des gestions des utilisateurs et correspond typiquement à des bassins versants, des tronçons hydrographiques ou des limites administratives (communes, cantons, ...). Bien que les données SPOT permettent de résoudre le niveau parcellaire, notre objectif n'est pas le pilotage de l'irrigation à la parcelle.

Le **besoin en eau**, appelé également évapotranspiration potentielle de la culture,  $ET_c$ , est calculé quotidiennement à l'aide de la relation suivante :

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

$ET_c$  : Evapotranspiration potentielle pour un type de culture [ $mm.jour^{-1}$ ] ; elle correspond à la quantité d'eau évaporée par une culture non stressée, pour un stade donné de son développement.

$ET_0$  : Evapotranspiration potentielle de référence dépendante des conditions climatiques [ $mm.jour^{-1}$ ] ; cette référence correspond à un couvert herbacé normalisé.

$K_c$  : coefficient cultural dépendant des cultures et de leurs caractéristiques.

Les deux grandeurs d'entrée sont donc l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  et le coefficient cultural  $K_c$ . L'évapotranspiration potentielle  $ET_0$  est calculée par l'approche de Penman-Monteith simplifiée (Allen et al, 1998). Les données d'entrées nécessaires sur une échelle journalière sont les températures maximales et minimales  $T_{max}$  et  $T_{min}$ , les humidités relatives maximales et minimales  $RH_{min}$  et  $RH_{max}$ , la vitesse du vent  $u$ , le flux net  $R_n$  et l'altitude du lieu  $z$ . Les variables météorologiques sont issues ou dérivées des données SAFRAN.

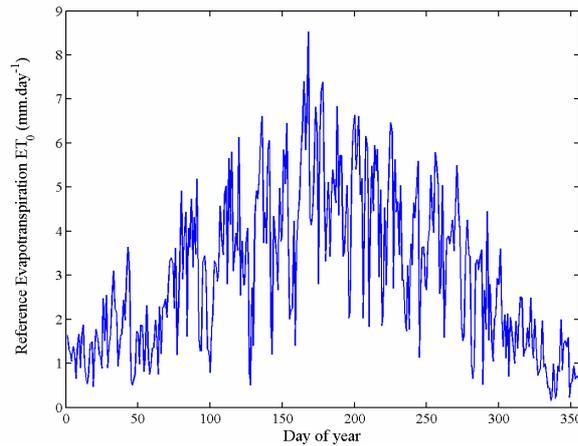


Figure 7 : Evapotranspiration de référence, année 2002, mm.jour<sup>-1</sup>

Le coefficient cultural,  $K_c$ , dépend de la culture, de ses caractéristiques (résistance aérodynamique et stomatique) et de sa phénologie (hauteur, LAI). Ces coefficients sont tabulés par la FAO pour plusieurs types de cultures parmi les plus courantes. Nous avons retenu pour l'instant les coefficients du blé, du tournesol, du maïs, et du soja qui occupent les superficies les plus importantes dans notre zone d'étude (89%, hors prairies et jachères).

Pour une culture donnée, le coefficient cultural  $K_c$  dépend du stade de développement. Son évolution au cours du temps est définie par sept coefficients :

- $K_{c_{ini}}$ ,  $K_{c_{mid}}$ ,  $K_{c_{end}}$ , valeur des paliers liés au développement de la culture ;
- $L_{ini}$ ,  $L_{dev}$ ,  $L_{mid}$ ,  $L_{late}$ , durée en jour de chaque cycle cultural.

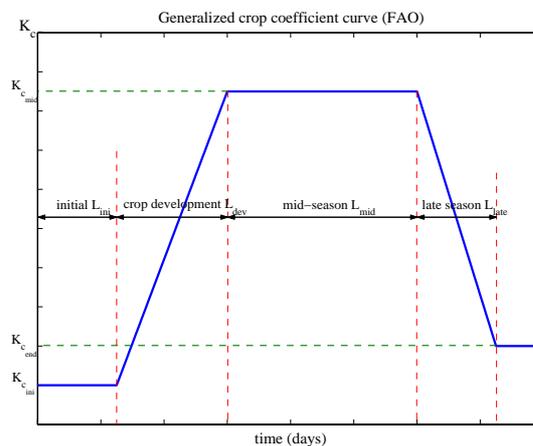


Figure 8 : Exemple de courbe de coefficient cultural dans le cadre de la méthode FAO.

La culture présente étant identifiée à l'aide de la carte d'occupation des sols, au moins trois possibilités existent pour définir la valeur du coefficient cultural :

V1 : application des tables de la FAO, qui fournissent une phénologie « standard » par région climatique. Dans ce cas, la télédétection n'est utilisée que pour obtenir l'occupation des terres.

V2 : Recalage de la phénologie en utilisant les séries temporelles de données satellitales. Cela revient à déterminer les paramètres temporels  $L_{ini}$ ,  $L_{dev}$ ,  $L_{mid}$ , et  $L_{late}$ . Les valeurs du coefficient cultural restent celles fournies par la FAO.

V3 : Estimation de l'évolution temporelle du coefficient cultural en modulant en phase et en amplitude les valeurs de la FAO en fonction de l'indice de végétation NDVI estimé par télédétection. Il est en effet possible de montrer que le NDVI est relié au coefficient cultural par une relation du type :

$$K_c = K_{cmax} - (K_{cmax} - K_{cmin}) \cdot \left[ \frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^A \quad (3)$$

Afin de tenir compte d'un défaut de croissance de la culture,  $NDVI_{max}$  n'est pas estimé sur les données mais est fixé à la valeur de 0.8, calculée à l'aide d'un modèle de transfert radiatif.

En appliquant la relation précédente, les cartes d'évapotranspiration potentielle sont obtenues à l'aide des cartes de coefficient cultural et d'évapotranspiration de référence.

A l'échelle d'une scène SPOT/HRVIR, les valeurs des coefficients culturaux  $K_{cmin}$  et  $K_{cmax}$  sont issues de tabulations proposées par Allen et al. (1998). Grâce à la cartographie d'occupation des terres il est donc possible d'affecter un couple  $K_{cmin}$  et  $K_{cmax}$  à chacun des pixels haute résolution. Selon l'équation (3), ces 2 valeurs constituent les bornes entre lesquelles évolue  $K_c$  au cours d'une saison.

A une plus grande échelle, l'occupation des terres n'est plus renseignée en détail, ce qui rend les approches V1 et V2 inapplicables. En revanche, l'approche V3 peut être adaptée en considérant un couple unique de coefficients ( $K_{cmin}$ ,  $K_{cmax}$ ) dont les valeurs sont issues de moyennes toutes classes confondues des valeurs tabulées vues dans l'approche précédente. Cette approximation est justifiée par la faible variabilité interclasse dans la tabulation FAO.

**L'évapotranspiration réelle**,  $ET_r$ , est estimée à partir d'un modèle simple de bilan hydrique également proposé par Allen et al. 1998 :

$$ET_r = K_s \cdot ET_c(t) = K_s \cdot K_c(t, crop) \cdot ET_0(t) \quad (4)$$

Où  $K_s$  est un facteur de stress hydrique. :

$$K_s = \frac{\theta_s - \theta_{wp}}{(1 - p)(\theta_{Fc} - \theta_{wp})} \quad (5)$$

Avec :

$\theta_s$  : humidité du sol ( $m^3/m^3$ ) dans la zone racinaire. La profondeur de la zone racinaire est pilotée en fonction du temps à l'aide de l'indice de végétation NDVI, de manière analogue au coefficient cultural  $K_c$ .

$\theta_{wp}$  : humidité du sol au point de flétrissement ( $m^3/m^3$ )

$\theta_{Fc}$  : humidité du sol à la capacité au champ ( $m^3/m^3$ )

$p$  : fraction moyenne de l'humidité du sol disponible pour les plantes  $[(\theta_{Fc} - \theta_{wp})]$  qui peut être prélevée avant apparition du stress hydrique [0 - 1].

En l'absence de stress hydrique,  $K_s = 1$

A chaque pas de temps, le bilan hydrique est calculé, avec en entrée les précipitations et les apports éventuels par irrigation. Nous négligeons les remontées capillaires ainsi que les pertes par percolation profonde et ruissellement.

Le volume **d'irrigation** permettant de satisfaire les besoins de la plante peut également être estimé en fonction du déficit hydrique maximum autorisé. Dans nos simulations, le déficit maximum est fixé de manière à prévenir le stress hydrique [irrigation dès que  $\theta_s < (1-p)(\theta_{fc} - \theta_{wp})$  ].

### 3.6.2 Le modèle ISBA

Le but de cette étude est d'évaluer l'impact i) du niveau de détail pris en compte pour décrire l'occupation du sol, ii) de l'évolution temporelle de la végétation et iii) de l'irrigation, sur les flux de surface et le bilan hydrique régional. La zone géographique considérée correspond à l'empreinte des images SPOT au Sud-Ouest de Toulouse (~ 50x50 km)

Le schéma de surface ISBA (Interaction Sol, Biosphère, Atmosphère, Noilhan et Planton 1989, Noilhan et Mahfouf 1996) simule les échanges d'eau et d'énergie à la surface du continuum sol-végétation, à un pas de temps très fin (5 minutes), lui permettant de résoudre de façon très détaillée le cycle diurne. ISBA est utilisé dans les modèles atmosphériques de recherche (Mésio-NH), de climat (Arpège-Climat) et de prévision (Arpège et Aladin) de Météo-France.

Le sol est divisé en 3 couches : une couche de surface interagissant rapidement avec l'atmosphère, une couche racinaire dans laquelle la végétation peut extraire de l'eau pour sa transpiration, et une couche profonde. Pour chaque couche, ISBA calcule le contenu en eau liquide, ainsi que la température et la fraction d'eau gelée. L'évolution du manteau neigeux est simulée par un modèle de neige à 3 couches (Boone et al., 2001) prenant en compte les effets de gel et dégel de l'eau liquide dans la neige.

Le modèle ISBA a été utilisé dans sa version nominale fournie par le CNRM.

La simulation de référence est basée sur le schéma opérationnel utilisé par Météo France. L'occupation du sol et les paramètres de surface sont issus du jeu de données ECOCLIMAP (Masson et al., 2003). L'occupation du sol est décrite à la résolution de 1 km. L'indice foliaire, LAI, est dérivé d'indices de végétation NDVI satellitaire à la même résolution spatiale. Le LAI a été déterminé au pas de temps mensuel entre avril 1992 et mars 1993 (Loveland et al., 2000). Le jeu de données ECOCLIMAP et a fortiori la simulation de référence ne tiennent pas compte de l'irrigation des cultures. Les paramètres du sol sont dérivés de la base de données des sols produite par l'INRA à la résolution de 1 km (King et al. 1995). Le forçage météorologique est fourni par les données SAFRAN (LeMoigne 2002).

La simulation a ensuite été conduite à l'aide d'un jeu de données alternatif dont les différences avec le jeu de données de la simulation de référence concernent :

- l'occupation du sol : elle est dérivée à la résolution de 20 m à partir des séries temporelles de données SPOT pour chacune des années 2002 et 2003.
- L'indice foliaire mensuel : il est également dérivé des données SPOT à 20 m pour chacune des années 2002 et 2003.

Les autres paramètres et le forçage météorologique restent identiques à la simulation de référence.

Dans chaque cellule de 1km, le modèle ISBA simule les flux pour chaque classe d'occupation des terres en tenant compte de l'évolution du LAI local propre à chaque type de couvert. Les résultats sont ensuite moyennés à la résolution de 1 km à proportion de la superficie occupée par chacune des classes.

Les simulations alternatives ont été réalisées avec et sans prise en compte de l'irrigation. L'irrigation du maïs est simulée pour les mois de mai à août. Le maïs occupe respectivement 7% et 10% de la superficie en 2002 et 2003. L'algorithme d'estimation de l'irrigation (Voiron-Morel, 2003) est différent de celui présenté dans le cadre de la méthode FAO.

L'irrigation n'est déclenchée que si l'indice d'humidité du sol, SWI, est inférieur à 0.70 durant le premier mois, puis 0.55, 0.40 et 0.25 respectivement pour les mois suivants. L'indice SWI est défini par :

$$SWI = \frac{\theta_s - \theta_{wp}}{(\theta_{Fc} - \theta_{wp})} \quad (6)$$

L'irrigation est déclenchée au cours d'un maximum de trois pas de temps de 5 minutes par jour, entre 12h00 et 18h00. Le taux d'irrigation est de 24 l m<sup>-2</sup> heure<sup>-1</sup>, soit un maximum de 6 l m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup> (6 mm). Une irrigation maximale de 90 l m<sup>-2</sup> mois<sup>-1</sup> est imposée.

Il n'y a pas irrigation si les précipitations cumulées de 0h à 12h00 sont supérieures à 5 l m<sup>-2</sup>. En présence d'un événement pluvieux important, il n'y a pas d'irrigation pendant Pt/6 jours, où Pt est la quantité de pluie de la journée en l m<sup>-2</sup>.

### 3.6.3 Modélisation hydrologique distribuée

La topographie joue un rôle important dans le fonctionnement des surfaces continentales et doit être prise en compte dans le cadre de l'approche intégrée qui est la perspective de ce projet. Au stade actuel, nous nous sommes plus particulièrement concentrés sur la modélisation des transferts latéraux d'eau et à l'influence de l'occupation des terres sur ces transferts.

Deux modèles hydrologiques distribués ont été mis en oeuvre.

Le premier modèle résulte du couplage du modèle hydrologique TOPMODEL avec le schéma de surface ISBA. ISBA décrit à chaque pas de temps les flux d'énergie et de matière entre la surface et l'atmosphère, les transferts radiatifs au sein du couvert végétal, les transferts hydriques entre le sol, la végétation et l'atmosphère et des processus physiologiques comme le fonctionnement stomatique. TOPMODEL (TOPography based hydrological MODEL) a été originellement conçu par Beven et Kirby en 1979, pour décrire l'hydrologie de petits bassins versants écossais. TOPMODEL se propose de décrire des phénomènes hydrologiques ciblés, à partir de 3 paramètres seulement (aire drainée, pente locale, conductivité hydraulique à saturation), moyennant le respect des hypothèses simplificatrices suivantes :

- le régime hydrique est à l'équilibre pendant le pas de temps ;
- la pluie est considérée comme uniforme sur le bassin versant (recharge uniforme), du moins dans la version utilisée ;
- le gradient hydraulique est parallèle à la pente locale ;
- la conductivité hydraulique à saturation suit une décroissance exponentielle avec la profondeur.

ISBA, modèle vertical (version 2 couches de sol), et TOPMODEL, modèle de transferts latéraux, ont donc été couplés pour représenter la dynamique d'un bassin versant. Chacun a sa spécificité et représente de façon partielle une réalité du cycle hydrologique sur un bassin. L'intérêt du couplage est de représenter le contenu en eau du sol grâce à ISBA en particulier au moment où débutent les épisodes pluvieux et de gérer le ruissellement et l'infiltration sur le bassin grâce à TOPMODEL. Le couplage ISBA/TOPMODEL a été réalisé par J. Pellenq au cours de sa thèse et compte 32 paramètres à renseigner.

Le second modèle hydrologique utilisé est SWAT (Soil Water Assessment Tool, Arnold et al., 1994). SWAT permet de prédire les effets de changements d'occupation et d'usage des sols sur l'eau, les sédiments et les composés chimiques. C'est un modèle à base physique, semi-distribué car tous les processus sont calculés à l'échelle d'une unité hydrologique de référence (HRU) définie comme une portion de sous bassin ayant une combinaison sol-couverture-gestion unique. Pour déterminer les sorties de chaque sous bassin, les calculs réalisés sur chacune des HRU sont sommés ou pondérés (les HRU sont indépendantes : elles n'interagissent pas entre elles). SWAT intègre des modules simples décrivant l'évapotranspiration, la croissance de la végétation, et les transferts de matière.

## 4 Résultats

### 4.1 Occupation des terres et son évolution

La connaissance détaillée du mode de couverture des terres sur la totalité du territoire constitue le support à l'établissement des bilans de matière à l'échelle régionale. Il s'agit de connaître pour chaque point du territoire non seulement l'occupation du sol actuelle mais aussi celle du passé afin d'étayer des scénarios d'évolution de l'occupation des terres acceptables. La télédétection en a été l'outil approprié, permettant de dresser divers états annuels de l'occupation du sol et en donnant une vision cartographique.

Les thèmes (ou classes) caractérisés constituent des systèmes écologiques à fonctionnement connu par voie de modélisation. Leur sélection a été guidée par leur représentativité dans la région débouchant ainsi sur une diversification plus large des thèmes au niveau agricole (82 %<sup>1</sup> de la zone d'étude de 3200km<sup>2</sup>) que pour les autres domaines (territoires artificialisés (7.7%), Forêts et milieux naturels (9.6%) et surfaces en eau (0.3%).

#### 4.1.1 Etats actuels de l'occupation du sol : 2002, 2003, 2004 et variations interannuelles

Il s'agit de connaître l'état actuel de l'occupation du sol -OS- et sa variabilité interannuelle perceptible principalement au niveau des assolements successifs des terres agricoles dans la région.

**Moyens :** Scènes satellitales SPOT 2 ou 4 acquises mensuellement par programmation sur la zone d'étude (mars à novembre 2002 ; mars à décembre en 2003 ; avril à décembre en 2004).

**Méthodologie :** Traitement d'images avec des procédures de classifications supervisées et non supervisées appliquées aux scènes SPOT réunies dans une image commune multitemporelle.

##### **Résultats :**

**Etats d'occupation du sol annuelle** correspondant pour les thèmes agricoles aux assolements pour l'année agricole démarrant à l'automne de l'année précédente et se terminant à la fin de l'été de l'année suivante, retenue pour la datation. Trois états sont étudiés : 2002 portant l'assolement agricole 2001-2002, 2003 avec l'assolement 2002-2003 et 2004 avec l'assolement 2003-2004.

Le nombre de **thèmes** a fluctué sous l'effet des contraintes de procédures et d'éléments extérieurs : 16 classes en 2002, 18 classes en 2003 (distinction jachère/fiche et lac/gravière), 20 classes en 2004 (deux classes de Bâti supplémentaires et distinction de la classe Peuplier dans la classe des feuillus, regroupement Jachères et de Friches comme en 2002). Certaines classes ont une très grande variabilité et sont très proches spectralement. Suivant leur développement végétatif et la date des prises de vues des images, on peut ou non les distinguer.

Au total les états annuels comportent **quatre classes forestières** de nature différente : Feuillus (arbres spontanés à feuilles caduques, chênes majoritairement), Résineux (arbres à feuillage persistant issus de reboisements), Eucalyptus (arbres feuillus à feuillage persistant issus de reboisements), Peupliers (arbres à feuilles caduques le plus souvent en plantations régulières aux bords des eaux) ; **neuf classes de cultures** dont huit sont des cultures annuelles (cultures d'hiver : Blé, Orge, Colza ; cultures de printemps : Pois et les cultures d'été : Maïs, Tournesol, Soja et Sorgho) et la classe de cultures permanentes avec la Prairie ; **une classe** que l'on peut rattacher aux **milieux naturels** : Jachères/Friches ; **trois classes** de

---

<sup>1</sup> Source : IFEN, Corine Land Cover 2000 dans la zone d'étude 2004.

**surfaces en eau** : cours d'eau linéaire, Lac, Gravière et **trois classes** appartenant aux **territoires artificialisés** : Bâti dense, Bâti lâche, Bâti industriel, classes englobant également des surfaces minérales.

**Précision** : La précision des classifications est calculée grâce à un échantillonnage de référence (vérité terrain) à l'aide d'une matrice de confusion (Tableau 1). La précision est obtenue pour chacune des classes sous la forme du Pourcentage des Pixels Correctement Classés – PCC – et du Kappa et pour l'ensemble de la classification par la moyenne des PCC notée MPCC et le Kappa.

Précision des classifications	Etat 2002	Etat 2003	Etat 2004
MPCC	87.4%	81.2%	95.2%
Kappa	88.7	86.2	93.5

*Tableau 2 : estimateurs de qualité des classifications (états annuels)*

L'évolution de la chaîne de la classification depuis 2002 a conduit à une amélioration de la précision des classifications assez nettement visible en 2004. En revanche l'image classée de 2003 présente une précision moindre attribuée aux effets climatiques exceptionnels de cette année. En effet cette année, la périodicité d'acquisition de la série d'images a été trop longue (mois) pour permettre un suivi significatif des cultures et autre formation végétale par télédétection. Celles-ci sous l'impact des conditions climatiques exceptionnelles, ont montré une phénologie décalée par rapport à la norme avec une croissance plus rapide et un cycle végétatif raccourci, voire abrégé, occasionnant de nombreuses confusions entre classes habituellement discriminables.

#### **4.1.2 Répartition de l'Occupation du Sol dans le territoire**

Les proportions du territoire (Tableau 2) occupées par les différentes classes montrent quelques différences pour les trois années. Celles observées en 2003 sont la conséquence de la climatologie exceptionnelle de 2003 qui pour des raisons invoquées ci-dessus a suscité de nombreuses confusions significatives au niveau de tous les thèmes limitant la caractérisation nette des surfaces aussi bien minérales que biologiques ; par exemple le déficit de surfaces minérales observé au niveau de la classe «Bâti» est dû principalement à la difficulté de discrimination avec la classe «Tourne-sol» qui a présenté cette année 2003 un suivi spectral temporel particulier (cycle végétatif écourté, dates d'acquisition mal calées) montrant des ressemblances avec celui des surfaces minérales.

Les améliorations méthodologiques apportées permettent d'accréditer les résultats de 2004 (MPCC 95.2%) ; en outre des données externes viennent étayer ce résultat, par exemple les données CLC<sup>1</sup> affichant pour le même territoire un taux de forêts de 9.6 % proche des 9.3% de la classe Bois 2004. En outre, la fluctuation des taux des diverses cultures traduit une répartition différente des soles qui restent soumises à la conjoncture économique.



## OCCUPATION DU SOL 2002 Sud-Ouest Toulousain

Carte réalisée à partir d'une série d'images SPOT  
(mars, avril, mai, juin, juillet, août 2002)

	Non classé
	Feuillus
	Résineux
	Eucalyptus
	Blé
	Colza
	Orge
	Maïs
	Tournesol
	Sorgho
	Soja
	Pois
	Jachère
	Prairies
	Eau
	Lac
	Bâti

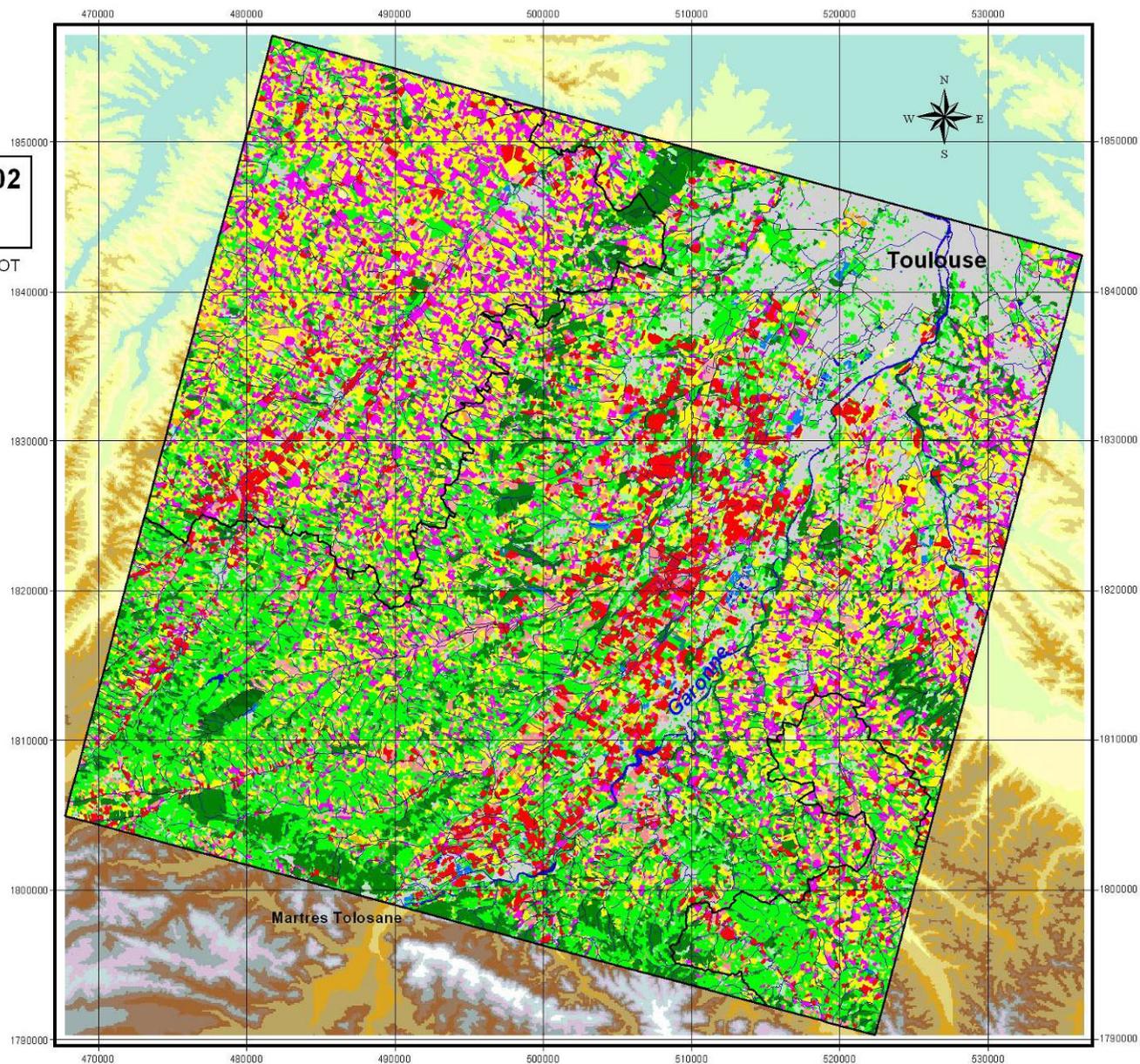
Projection Lambert II étendu  
0 2 4 6 8 10 Kilometers

Réalisation: D. Ducrot, P. Gouaux, B. Mora  
(juin 2003)

Contact : [Pierrette.Gouaux@cesbio.cnes.fr](mailto:Pierrette.Gouaux@cesbio.cnes.fr)

*Carte réalisée dans le cadre de projets  
soutenus par le Conseil Régional  
Midi-Pyrénées, le Centre National  
d'Etudes Spatiales, et les Ministères  
en charge de la Recherche et  
de l'Environnement*

Source des limites administratives : BD-Carthage (IGN)



	2002	2003	2004
Bois	6.5%	10.4%	9.3%
Cultures d'hiver	24.5%	19.0%	24.6%
Cultures d'été	27.6%	28.7%	22.2%
Cultures de printemps	0.0%	0.0%	0.5%
Jachère	10.1%	15.1%	8.3%
Friche			
Prairie	21.5%	19.5%	24.3%
Eau	0.9%	0.9%	0.8%
Bâti	8.8%	6.3%	10.0%
SAU (cultures et prairies)	73.6%	67.2%	71.5%

**Tableau 3 : Taux d'occupation du sol comparés des trois années pour la zone « Sud Ouest » (cadre commun 2900 km<sup>2</sup>)**

#### **4.1.3 Variabilité interannuelle des systèmes cultivés : assolement et successions culturales**

Les images classées mettent en lumière l'assolement pratiqué au niveau de la région d'étude : assemblage des soles des neuf cultures caractérisées par télédétection : Blé, Colza, Orge, Maïs, Tournesol, Sorgho, Soja, Pois, Prairie. La comparaison des états d'occupation du sol permet de visualiser et d'exprimer quantitativement les successions culturales pratiquées dans la région.

L'analyse porte sur les thèmes cultureux regroupés en types fonctionnels : cultures d'hiver (blé, colza, orge), cultures d'été irriguées (maïs, sorgho et soja), cultures d'été en sec (tournesol), cultures de printemps (pois), cultures principalement permanentes (prairies).

Les résultats indiquent que 30 % environ des cultures restent en place deux années consécutives, les deux classes les plus stables étant les prairies pour la moitié de leur surface et les cultures irriguées pour 40 à 50% de leur superficie. La première, considérée comme culture permanente, entre dans un système de rotation et libère par année une proportion de sole pour des cultures céréalières (alternance cultures hiver-prairies, 8 à 9%) et pour les oléagineux (alternance cultures d'été en sec – prairies, 8 à 11%) voués principalement à l'élevage. La deuxième, utilise sa capacité d'irrigation au maximum, en pratiquant de façon moindre la rotation des cultures (6 à 7% avec les cultures d'hiver, 3 à 4 % avec les cultures d'été en sec et 2 % avec les prairies).

L'alternance la plus fréquente entre cultures est la succession cultures d'hiver - cultures d'été en sec, plus de 20%. La mise en gel des terres, rendue obligatoire par la PAC 1992, est pratiquée dans la région sur une superficie couvrant environ 9 % des cultures. L'analyse fait ressortir l'alternance jachères-prairies pour une superficie non négligeable (7 à 11%). Toutefois il faut intégrer de l'erreur de classification, surtout dans ces deux classes parfois proches spectralement. Les résultats sont très ressemblants d'une année sur l'autre.

Cette analyse mérite d'être affinée et poursuivie en 2005 avec pour objectif la définition de types de successions culturales pouvant être utilisés pour la modélisation des écosystèmes cultureux.

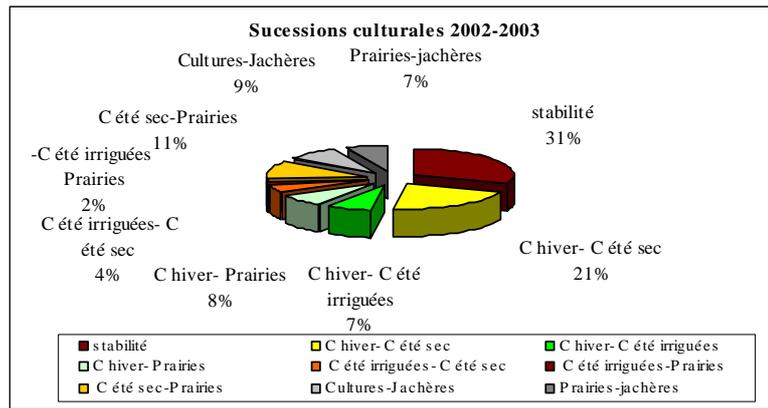


Figure 9: Répartition des successions culturales pratiquées (2002-2003) dans la zone d'étude

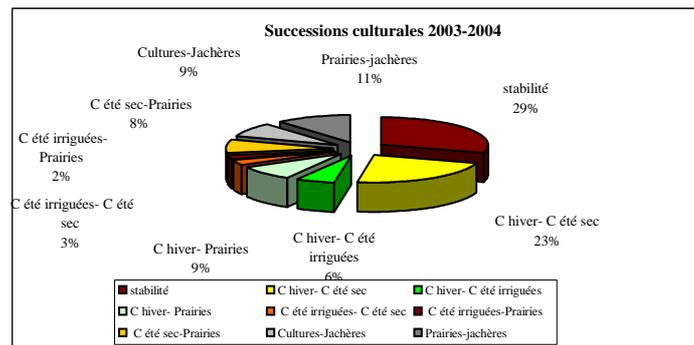


Figure 10 : Répartition des successions culturales pratiquées (2003-2004) dans la zone d'étude

#### 4.1.4 Evolution à long terme (décennie)

L'état d'occupation du sol de 1991 a été réalisé par une méthode de classification non supervisée assortie de la reconnaissance automatique des classes à partir d'un catalogue de valeurs radiométriques des classes calculées avec des vérités terrain de l'année 2002. La précision thématique est moins grande en 1991 que pour les états d'occupation du sol actuels car le nombre de scènes SPOT disponibles en 1991 est limité à trois dates (mai, août, septembre). Les thèmes détectés regroupent les principaux types fonctionnels : Bois de Feuillus et Résineux, Cultures d'hiver, cultures d'été irriguées, cultures d'été en sec, Prairies/Jachères, Eau, Urbain et surfaces minérales.

La comparaison des états 1991-2002 indique que 80% du territoire conservent leur affectation au cours de cette décennie, tandis que 20% subissent des changements dénotant une évolution de l'utilisation des terres dans la zone d'étude (Tableau 4).

	1991	Bois	culture	eau	bâti	1991
e	Bois	8.2%	9.6%	0.0%	0.4%	18.2%
	cultur	3.2%	71.1%	0.2%	3.5%	78.2%
	eau	0.0%	0.0%	0.4%	0.0%	0.4%
	bâti	0.1%	2.4%	0.0%	0.7%	3.3%
					stable	80.3%
2002		11.7%	83.1%	0.6%	4.6%	

Tableau 4 : Matrice des changements 1991- 2002 des grandes catégories d'utilisation des terres

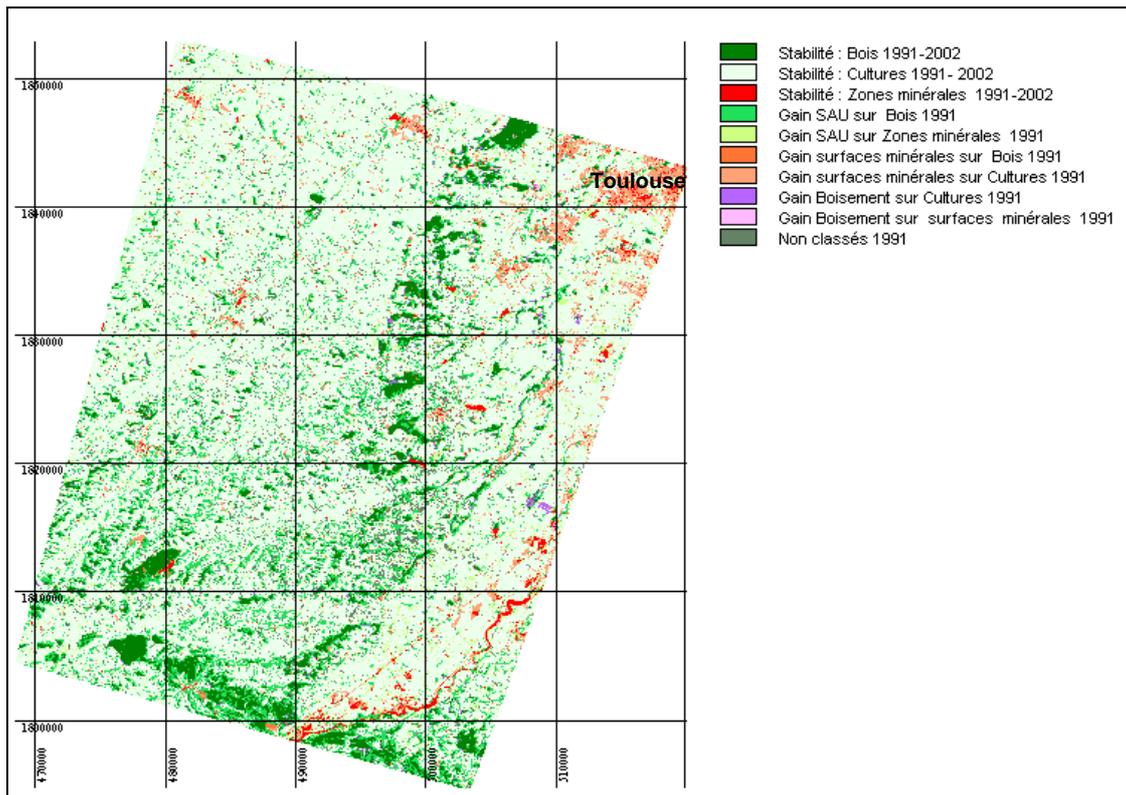


Figure 11 : Carte des changements d'occupation des terres entre 1991 et 2002, Sud-Ouest de Toulouse.

Données Utilisées : SPOT

Cette évolution est caractérisée par plusieurs faits contrastés : une déprise agricole (3.2% du territoire) qui par le jeu d'une dynamique naturelle voit des cultures se transformer en zones boisées, un déboisement sur des zones à forte pression anthropique cédant la place à des mises en culture (9.6%) et à l'urbanisation (0.4%), la mise en eau de surfaces dédiées à l'agriculture (0.2%) devenant des réservoirs pour l'irrigation et enfin la croissance de l'urbanisation au détriment de la forêt et surtout des zones cultivées (3.5%). L'analyse porte aussi sur l'évolution des assolements et sur l'organisation foncière (augmentation de la taille et de la régularité de forme des parcelles).

## 4.2 Carbone

### 4.2.1 Carbone des sols

#### 4.2.1.1 Stocks de carbone et respiration

L'analyse des échantillons de sol prélevés sur le bassin versant d'Auradé, suivant des transects, est maintenant bien avancée. Les premiers résultats permettent de dégager quelques tendances. En surface (couche de terre arable), la teneur moyenne du sol en carbone organique est de l'ordre de 15 g de carbone par kg de sol. Les teneurs en carbone du sol sont plus faibles en haut de pente qu'en bas de pente (Figure 12). Dans la majorité des cas, les teneurs en carbone du sol décroissent avec la profondeur. Les bois situés à proximité des champs cultivés apportent de la litière, enrichissent le sol en carbone organique, mais en même temps augmentent la variabilité spatiale de sa distribution.

La mise en culture d'un bois fait chuter fortement la teneur en matière organique du sol correspondant dans les horizons de surface.

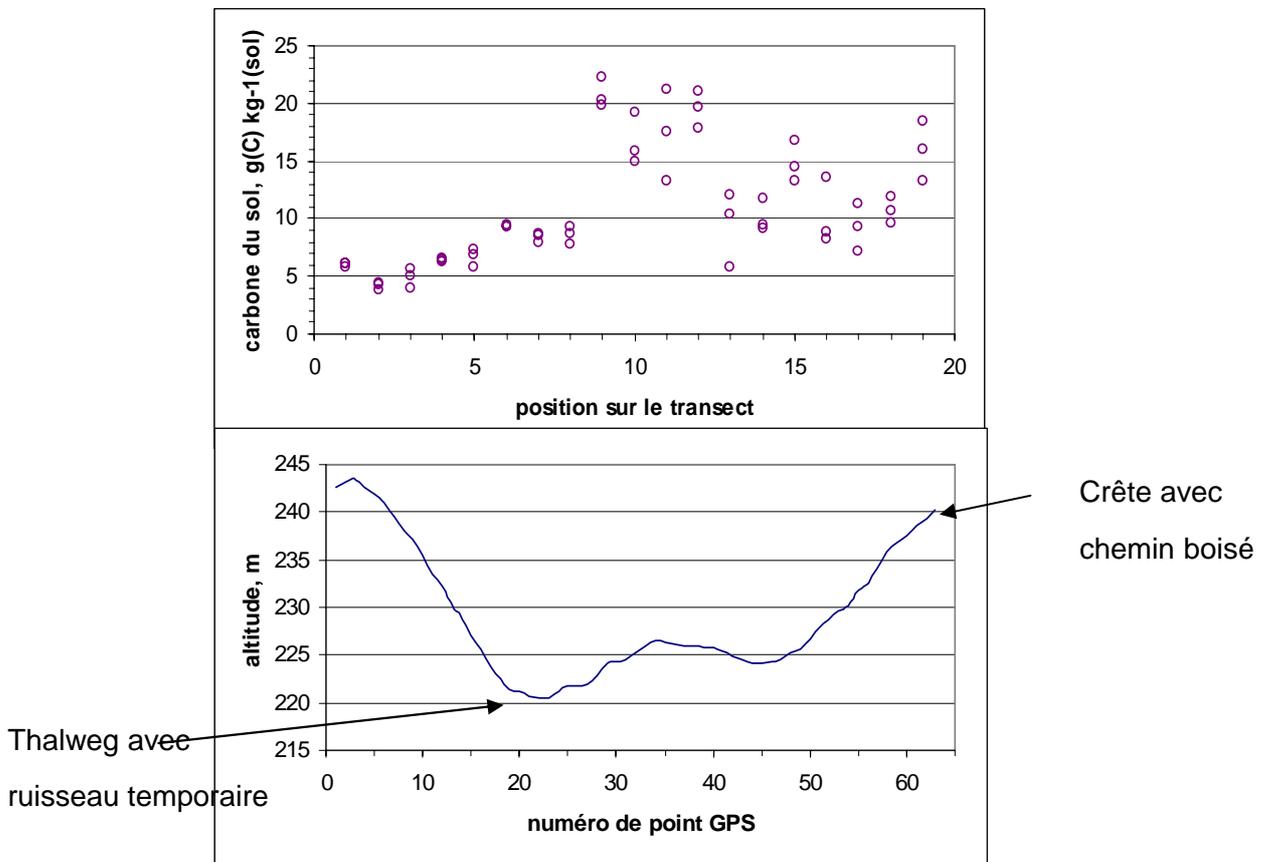


Figure 12 : Variations de la teneur en carbone du sol sur le transect A (sous-bassin 5) pour l'horizon 0-30 cm

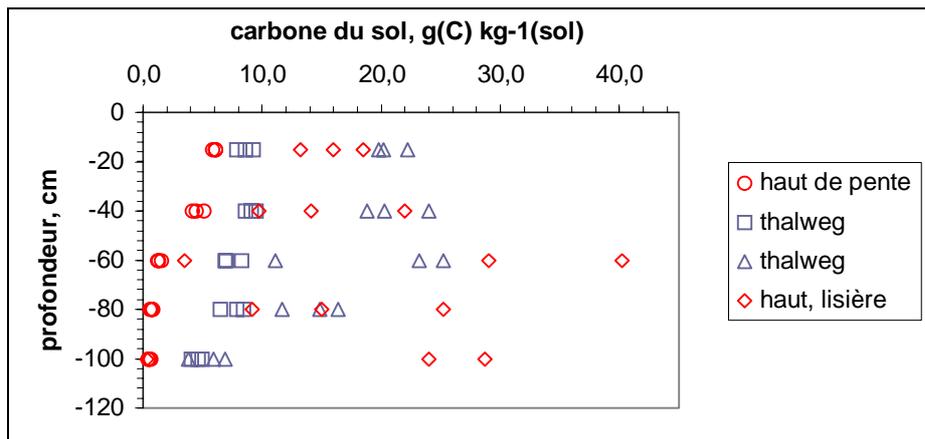


Figure 13 : Variations de la teneur en carbone du sol sur le transect A (sous-bassin 5) pour les différents horizons du sol

Les mesures de respiration du sol (émissions de CO<sub>2</sub>) effectuées sur un transect occupé par une parcelle de blé (culture d'hiver) et sur un transect occupé par une parcelle de tournesol (culture d'été) indiquent que la respiration augmente avec la température du sol, suivant une relation de type

exponentielle (Figure 14). C'est un point fondamental à confirmer avec les mesures suivantes qui fait encore l'objet de controverses dans la littérature et qui détermine fortement le rôle de puits ou source de carbone que pourront jouer les sols agricoles dans les décennies à venir. La respiration du sol augmente progressivement de la sortie de l'hiver au printemps (Figure 15). Cette augmentation est à mettre en relation avec l'augmentation de température, mais également avec la croissance du couvert végétal, notamment de ses racines.

Au printemps, la respiration dans la parcelle de blé est plus forte que dans la parcelle de tournesol, en raison probablement de la présence des racines de la culture qui contribue largement au dégagement de dioxyde de carbone du sol vers l'atmosphère (Figure 16). La variabilité spatiale de la respiration du sol au sein d'une toposéquence est assez importante (Figure 17). La relation entre la respiration du sol et la teneur en eau du sol ne se dégage pas très bien au vu des données disponibles. La variabilité journalière n'est pas négligeable (Figure 17), mais ne s'analyse pas simplement.

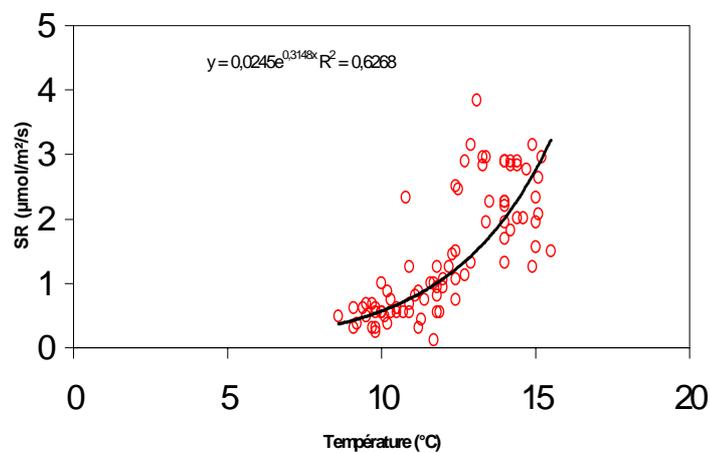


Figure 14 : Variations de la respiration du sol en fonction de la température du sol le long d'une toposéquence en blé (premiers transects de chaque journée de mesure)

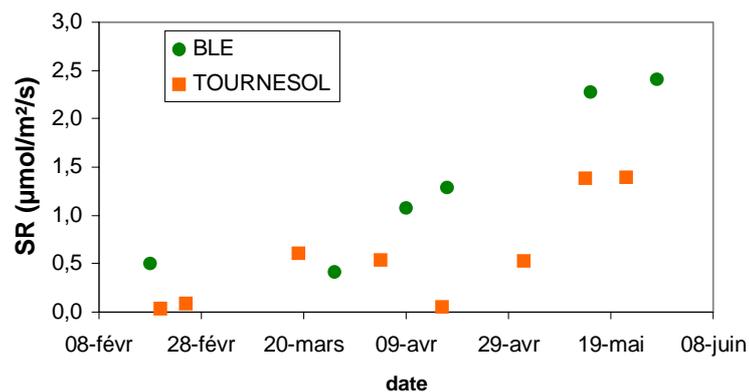


Figure 15 : Variations saisonnières de la respiration du sol pour deux types de culture sur le bassin versant d'Auradé (Gers)

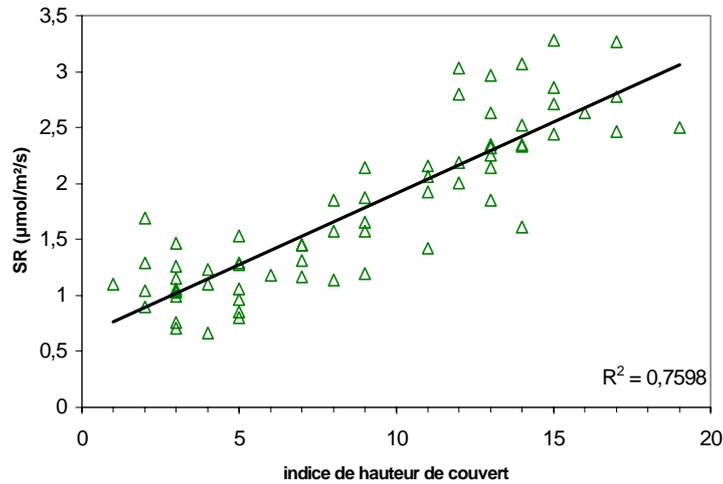


Figure 16 : Variations de la respiration du sol en fonction de la hauteur du couvert sur une culture de blé

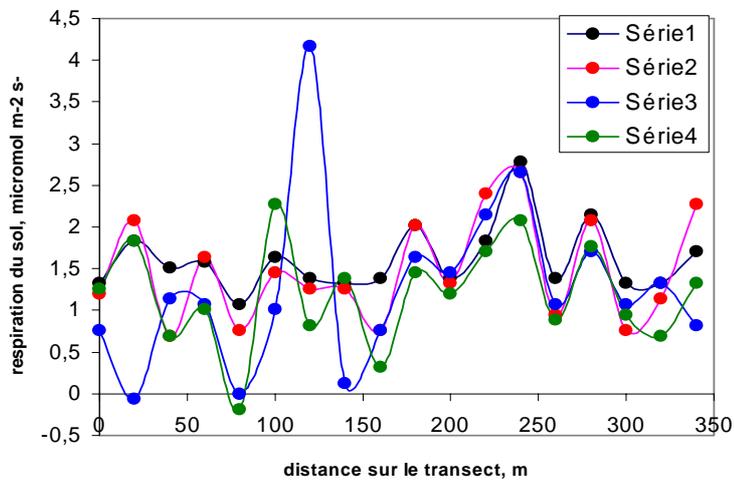


Figure 17 : Variations journalières de la respiration du sol le long d'une toposéquence en tournesol le 04 mai 2003

#### 4.2.1.2 Evolution de l'occupation des terres

L'évolution historique de l'occupation du sol d'une parcelle est un facteur explicatif majeur de son contenu en carbone. Toute modélisation de l'évolution du stock de carbone doit prendre en compte ce facteur. Afin de caractériser l'évolution de l'occupation des terres sur le bassin versant d'Auradé, nous avons tout d'abord analysé les données statistiques disponibles auprès de la DDAF du Gers et du SCEES. Ces données indiquent une augmentation de la SAU de l'ordre de 30% entre 1955 et 1998 et une augmentation des terres labourables aux dépens des cultures permanentes. Les cultures fourragères qui occupaient 16% des terres labourables en 1955 n'occupaient plus que 1 % en 1988. Les assolements se sont simplifiés pour concerner principalement les céréales (blé essentiellement) et les cultures industrielles dont les oléagineux. Le tournesol occupait 10% des terres labourables en 1970, et 25 % en 1988.

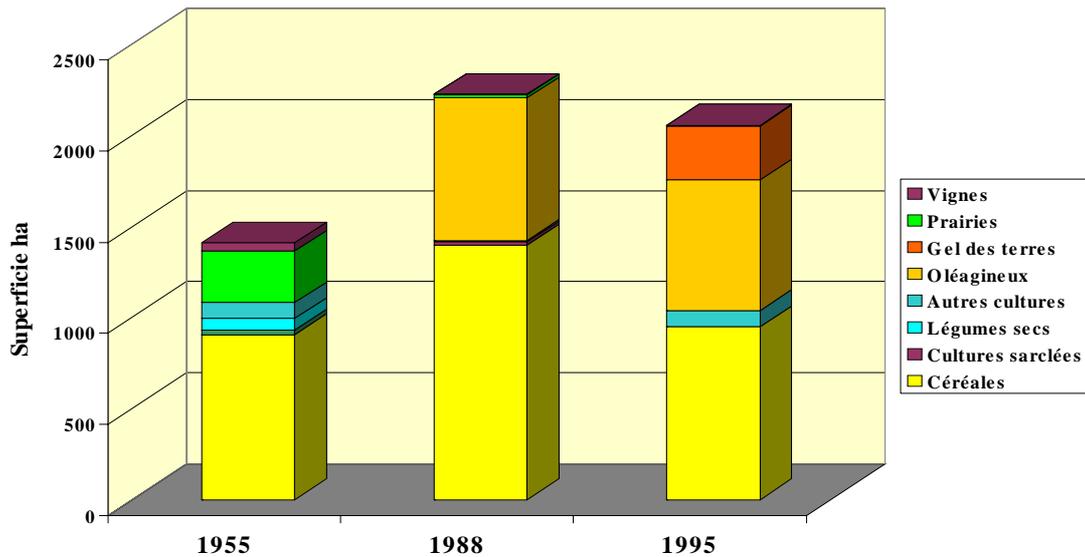


Figure 18 : Evolution de l'occupation des terres sur la commune d'Auradé (Source des données : SCEES et DDAF)

Les données de la DDAF et du SCEES ont été complétées lors d'une étude qui a permis de décrire l'évolution du bassin versant depuis 150 ans, tout en fournissant une description cartographique. Cette étude a exploité les registres cadastraux et des photos aériennes acquises en 1954, 1970 et 1993. En outre, l'assolement est recensé depuis les années 1980 par l'association des agriculteurs d'Auradé.

Les principaux résultats de cette étude (Figure 19 et Figure 20) sont les suivants :

- Passage d'un système de polyculture familiale à un système de culture de type intensif ;
- Démantèlement du réseau de haies ;
- Recul des cultures pérennes.

Ces évolutions, typiques de la région, vont dans le sens d'une diminution du stock de carbone des sols et d'un accroissement de l'érosion. Introduites depuis un dizaine d'années, de nouvelles pratiques culturales (bandes enherbées, réduction des intrants, labours superficiels) devraient avoir un impact positif sur la matière organique du sol et l'érosion, mais cet impact reste à quantifier.

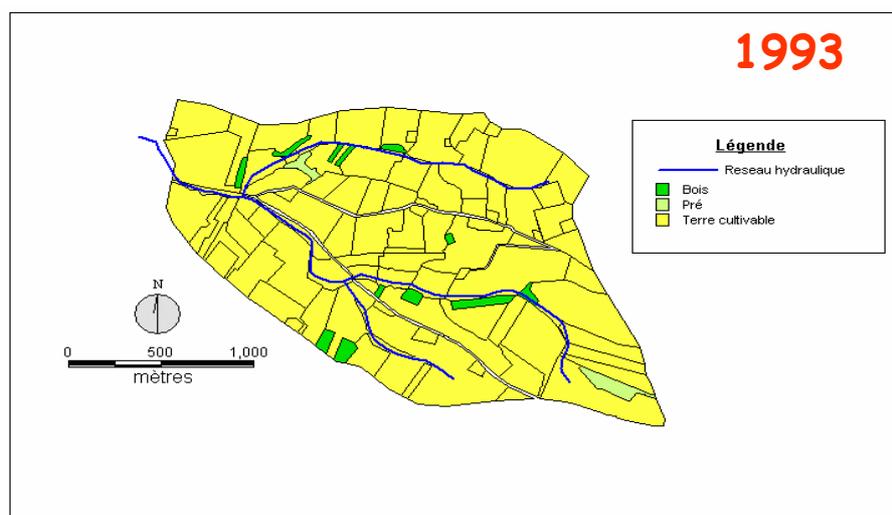
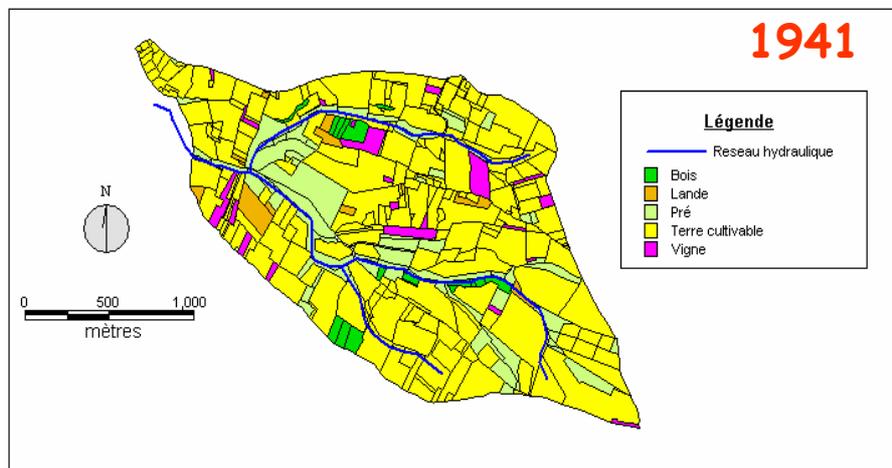
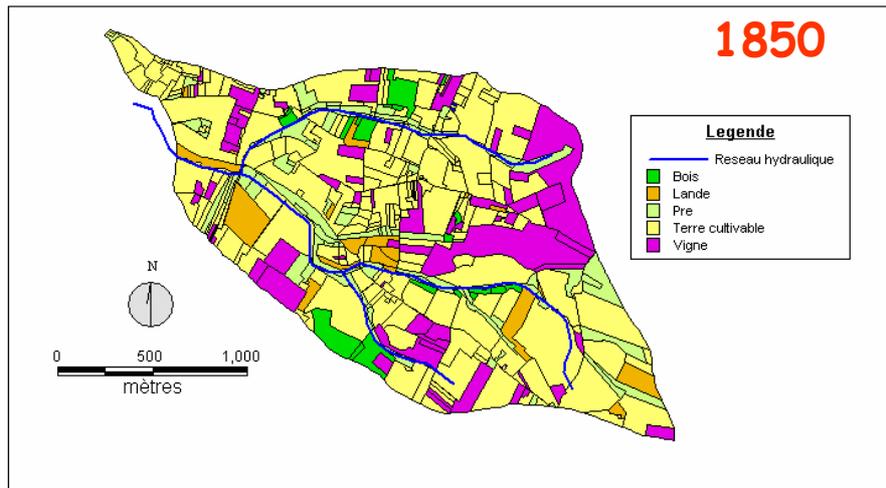


Figure 19 : Evolution historique de l'occupation des terres du bassin versant d'Auradé

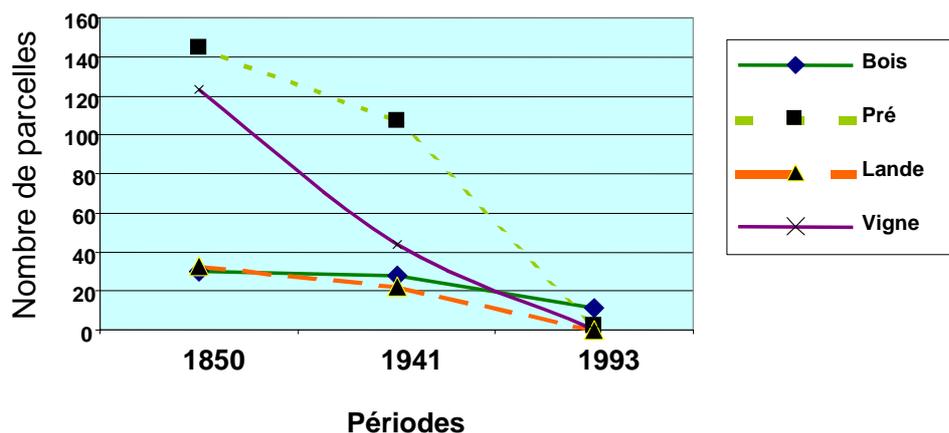


Figure 20 : Evolution du nombre de parcelles en cultures pérennes entre 1850 et 1993

#### 4.2.1.3 Variation des stocks de carbone liés au changement d'occupation des terres

Les cartes d'occupation des terres réalisées avec SPOT pour l'année 1991 d'une part et le début des années 2000 d'autre part (Figure 11) ont permis de mettre en évidence que 80% du territoire conservent leur affectation au cours de cette décennie, tandis que 20% subissent des changements. La traduction de ces changements en terme de variation des stocks de carbone a fait l'objet d'une première évaluation.

Les bases des calculs que nous avons effectués sont issues du rapport d'expertise produit par l'INRA<sup>2</sup> en 2002.

Estimer les stocks de carbone et leur variation est une entreprise difficile et complexe en raison de la variabilité des stocks et de la faiblesse des données, ponctuelles et relativement peu nombreuses. La variabilité spatiale des stocks est très importante et dépend d'un nombre élevé de facteurs en interaction comme la nature des sols, la topographie, l'historique de la parcelle, les pratiques agricoles (cf. le rapport INRA pour un exposé de la question). Les chiffres que nous utiliserons ici sont des valeurs moyennes, et il ne faudra retenir des résultats que les ordres de grandeur.

Les stocks de carbone à l'équilibre dans le sol sous forêt sont supposés égaux à 70 tonnes de carbone par hectare ( $tC \cdot ha^{-1}$ ), et à 40 ( $tC \cdot ha^{-1}$ ) pour le sol de parcelles en culture intensive, ce qui est le cas dans la région étudiée. Ces valeurs correspondent à la couche de sol entre 0 et 30 cm. Arrouays et al. (note 2) estiment qu'il faut multiplier cette valeur par 1.2 pour prendre en compte la totalité du sol. Le carbone considéré comme carbone du sol est le carbone organique dans ou posé sur le sol (mulch, litières forestières) à l'exclusion des parties aériennes vivantes ou sur pied de la végétation et des racines des arbres.

La variation des stocks de carbone est calculée à l'aide d'une formulation empirique établie sur des jeux de données expérimentaux. De manière générale, le flux de stockage ou de déstockage du carbone entre deux équilibres associés à des pratiques (y compris des occupation du sol) caractérisés par des stock de carbone C1 et C2 s'écrit :

---

<sup>2</sup> Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J.C., Jayet, P.A., Soussana, J.F., Stengel, P. (Editeurs scientifiques), 2002 : Contribuer à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise Scientifique Collective, Rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Octobre 2002, 334p.  
<http://www.inra.fr/actualites/rapport-carbone.html>

$$F = \Delta * (1 - e^{-kT})$$

Où :

$\Delta$  est la différence de stock à l'équilibre,  $\Delta = C2 - C1$ ,

T est la durée du scénario choisi

K est une constante de vitesse de stockage/déstockage

Les valeurs utilisées sont indiquées dans le tableau ci-dessous. On notera que le stock de carbone diminue plus rapidement qu'il ne se reconstitue.

	<b>Boisement de terres cultivées</b>	<b>Mise en culture de surfaces boisées</b>
Constante de vitesse k	0,0175	0,035
Stock initial (tC.ha <sup>-1</sup> )	40	70
Stock final (tC.ha <sup>-1</sup> )	70	40
Différence de stock à l'équilibre $\Delta$	+30	-30

Nous ferons l'hypothèse que le stock de carbone n'a pas varié pour les parcelles qui n'ont pas connu de changement d'occupation des sols. Seuls sont donc à prendre en compte les changements identifiés par la carte de changement de l'occupation des terres entre 1991 et 2002. Cette information n'est pas suffisante pour connaître la chronologie exacte des changements qui serait nécessaire pour calculer les flux. Nous avons effectué deux estimations. La première, appelée hypothèse 1, considère que tous les changements ont eu lieu à la fin de 1991, et que les sols ont donc pu accumuler ou perdre du carbone de manière continue pendant 10 ans. La seconde estimation, appelée hypothèse 2, suppose que les changements ont affecté la même superficie chaque année durant 10 ans (soit 1/10 par an de la variation totale). Le total des changements de superficie est identique pour les deux estimations.

La superficie totale de la zone considérée est de 1868 km<sup>2</sup> (186807 ha). Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus.

<b>Nature du changement</b>	<b>Pourcentage de la superficie concernée (%)</b>	<b>Superficie (hectares)</b>	<b>Variation du stock hypothèse 1 (tC)</b>	<b>Variation du stock hypothèse 2 (tC)</b>	<b>Ecart Hypothèse 2 moins hypothèse 1 (%)</b>
<b>Boisement de terres cultivées</b>	3,2	5 978	28 694	16 250	43,37%
<b>Mise en culture de surfaces boisées</b>	9,6	17 933	-159 608	-91 962	42,38%
<b>Variation totale du stock de carbone en tonnes de carbone</b>			-130 914	-75 711	42,17%

Les changements d'occupation du sol entre 1991 et 2002 conduisent donc à une perte de carbone du sol estimée à environ 100 000 tonnes en 10 ans (~530 kg ha<sup>-1</sup> en moyenne sur les 1868 km<sup>2</sup>), les écarts

entre les deux hypothèses de calcul fournissant une idée de la précision toute approximative de ces résultats dont il convient de ne considérer que les ordres de grandeur.

Ces résultats ne prennent pas en compte d'autres changements, comme la mise en irrigation des terres ou les modifications des pratiques culturales comme les labours superficiels. L'irrigation des terres ne semble pas avoir d'impact important sur les stocks de carbone. Les superficies concernées par les labours superficiels ne semblent croître significativement que depuis quelques années.

La carte des changements fait apparaître également une croissance du bâti au détriment des cultures de 3.5% et la mise en eau de 0.2% du territoire. Faute de données, et en raison de la faible superficie concernée, nous négligerons les changements liés aux mises en eau. Concernant l'urbain, peu de mesures ont été publiées. Les estimations vont de 0 à 20 tC ha<sup>-1</sup> environ. Se pose également la question de la définition de l'urbain (présence de zone artificielles mais aussi de sol nu et de végétation), en particulier lorsque la cartographie est effectuée à la résolution de 20m. Pour estimer un ordre de grandeur, nous ferons l'hypothèse d'un stock à l'équilibre de 20 tC ha<sup>-1</sup>. Dans l'hypothèse où la cinétique de perte de carbone lors d'une artificialisation de culture est identique à celle d'un passage de forêt en culture, l'artificialisation de 3.5% du territoire correspond alors à une perte de 22 000 tC, perte qui passe à 40 000 tC si la cinétique est double.

On peut donc estimer à 120000 tonnes (à  $\pm 50\%$  ?) de carbone les émissions résultant d'un changement d'occupation des terres entre 1991 et 2002. A seule fin d'illustration, l'estimation d'une perte de 120000 tonnes de carbone résultant d'un changement d'occupation des terres entre 1991 et 2002 correspond aux émissions pendant un an d'environ 110 000 véhicules parcourant 20 000 km par an, à raison de 8 litres d'essence consommés par 100 km (0.7 kg de carbone/litre).

Le chiffre de 120000 tonnes ne tient pas compte des variations de biomasse sur pied lors de la coupe des forêts et des gains de reforestation. Le bilan net s'établit à une perte 12700 ha de forêts, ce qui correspond à environ 250 000 tC pour une hypothèse faible de 20 tC par hectare de forêt. Malgré les nombreuses incertitudes sur les différentes valeurs, le point important est que les pertes de carbone provenant de la coupe des arbres sont du même ordre de grandeur que les pertes de carbone du sol et ne peuvent être négligées.

Des pratiques comme le labour superficiel ou la mise en place de cultures intercalaires, c'est-à-dire une deuxième culture dans l'année (en général en hiver, avant une culture de printemps) qui est détruite sans être récoltée peuvent permettre de reconstituer le stock de carbone du sol, à raison d'environ 4 tonnes de carbone par hectare en 20 ans pour les labours superficiels et 3 tC ha<sup>-1</sup> pour les cultures intercalaires. Reconstituer les stocks au niveau de 1991 nécessiterait de fixer 120 000 tC et donc d'appliquer les labours superficiels sur 30 000 ha, soit 16% de la région étudiée, ou encore un peu plus de 60% des cultures d'été.

#### **4.2.2 Flux d'eau et de carbone**

Les flux de CO<sub>2</sub>, d'eau (chaleur latente) et de chaleur sensible sont mesurés en continu sur deux parcelles des sites de Lamasquère et d'Auradé. Les méthodes de mesure, de calcul des flux, de l'empreinte (« footprint »), de filtrage et d'interpolations des données manquantes suivent des protocoles établis dans le cadre du programme international Carboeurope IP et sur la base de programmes anciens comme Euroflux ou Greengrass. Les sites ateliers bénéficiant d'une instrumentation et d'une caractérisation très complètes sont intégrés au projet CarboEurope IP dans le cadre des volet WP1 (Mesures de flux sur parcelles) et WP3 du projet CarboEurope IP (Volet régional).

Les données enregistrées en continu permettent de suivre l'évolution des échanges net de CO<sub>2</sub> entre la parcelle et l'atmosphère en lien avec la phénologie (Figure 21). La

Figure 22 représentant les échanges d'énergie à l'interface couvert-atmosphère illustre bien l'augmentation du flux de chaleur sensible au détriment du flux de chaleur latente lorsque la plante débute sa phase de sénescence. Les analyses d'empreinte des flux déjà effectuées indiquent que dans plus de 90% des cas de mesure, plus de 80% des flux proviennent de l'intérieur même des parcelles. Ceci confirme la bonne configuration et le choix de nos sites de mesure. L'étude de la fermeture du bilan d'énergie (

Figure 23) indique que les flux mesurés sont sous estimés de près de 30%. La prise en compte du stockage de chaleur dans les premiers 10 cm de sol ainsi que la mise en place de corrections spectrales lors du traitement des données de flux devraient permettre d'améliorer ce résultat.

A partir des données de flux, les différentes composantes du bilan carboné des écosystèmes seront calculées (photosynthèse et productivité primaire brute, respiration). L'efficacité d'utilisation de l'eau des différentes cultures ainsi que l'évolution de différents paramètres écophysologiques déterminant les flux seront étudiés. Enfin, ces données permettent la validation des modèles de fonctionnement des cultures (cf infra 4.2.3).

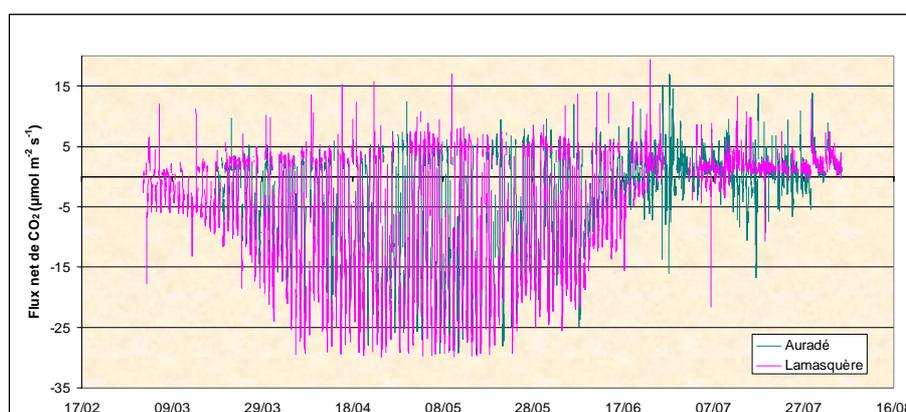


Figure 21 : Evolution des flux nets de CO<sub>2</sub> sur les sites d'Auradé et de Lamasquère entre Mars et Août 2005

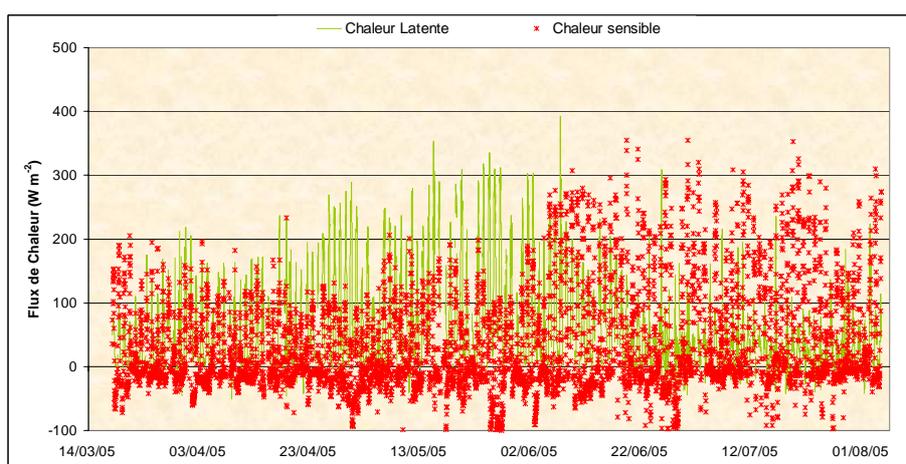


Figure 22 : Evolution des flux de chaleur Latente (LE) et Sensible (H) à Auradé entre Mars et Août 2005. A partir du 02/06 la sénescence des plants de Colza en provoqué une chute importante des flux de chaleur latente au bénéfice du flux de chaleur sensible.

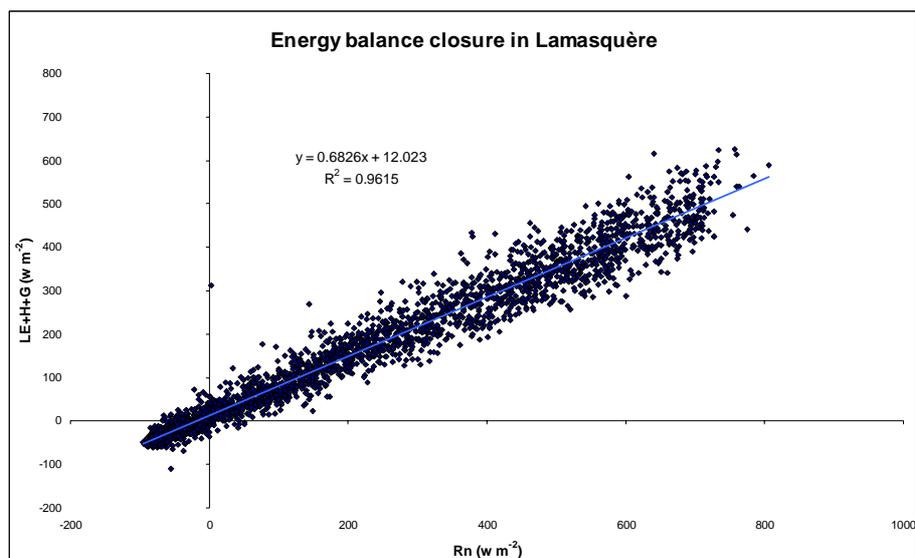


Figure 23 : Etude de la fermeture du bilan d'énergie à Lamasquère entre Mars et Août 2005

#### 4.2.3 Modèle SEVE-VEG

Dans le modèle CASTANEA, l'évapotranspiration était simulée selon Penman (1948). Dans le cas de la hêtraie de Hesse (site expérimental coordonné par A. Granier, INRA de Nancy), l'implémentation de ICARE a permis d'améliorer la simulation de l'évaporation de l'eau notamment lors des jours de pluie (Figure 24, Tableau 5), mais change peu la transpiration. Peu de différences ont aussi été trouvées selon l'utilisation de différents algorithmes pour simuler la conductance stomatique (Jarvis, Monteith, ou Ball & Berry). Ceci indique que la simulation de la transpiration (mesurée par flux de sève) ne requiert pas forcément l'utilisation d'un modèle SVAT deux sources et qu'il peut ne pas être couplé au module de photosynthèse.

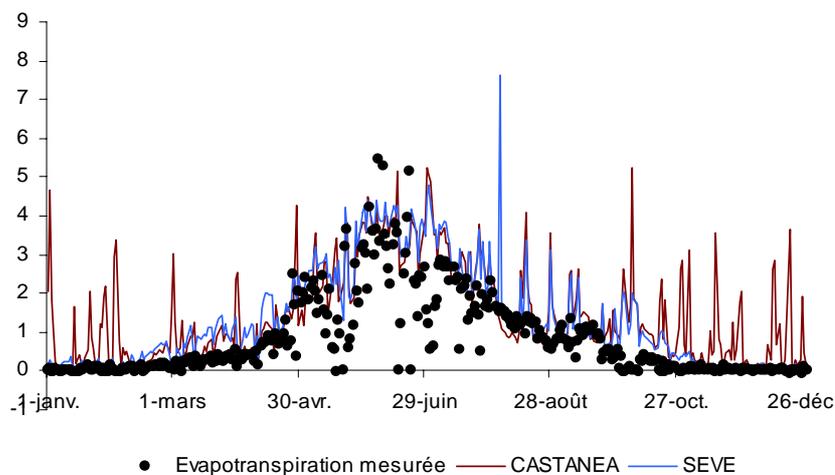


Figure 24 : Mesures par eddy corrélation (EC) et simulation de l'évapotranspiration journalière sur une jeune hêtraie en 2003. Mesures obtenues sur le site atelier de la forêt de Hesse par les équipes coordonnées par A. Granier, INRA-Nancy.

	TR (flux de sève)	ETR (EC)
CASTANEA	R <sup>2</sup> 0.94 Rmse= 0.24	R <sup>2</sup> 0.42 Rmse= 0.80
ICARE	R <sup>2</sup> 0.83 Rmse= 0.39	R <sup>2</sup> 0.70 Rmse= 0.57
Modèle couplé	R <sup>2</sup> 0.91 Rmse= 0.27	R <sup>2</sup> 0.71 Rmse= 0.56

Tableau 5 : Comparaison entre les mesures et les simulations de transpiration et d'évapotranspiration (somme de la transpiration, de l'évaporation du couvert et de l'évaporation du sol) journalière pour une jeune bêtraie en 2003.

Dans le cas de l'olivier en milieu aride (Marrakech, Maroc) le modèle couplé reproduit bien la dynamique d'évapotranspiration et notamment les dynamiques post irrigation (Figure 25). Par contre le modèle reproduit mal les variations instantanées du flux net de carbone. Il surestime la fermeture stomatique et sous estime la photosynthèse lors de conditions défavorables (stress hydrique de l'atmosphère important). Ceci indique que les adaptations à la sécheresse de l'olivier ne sont pas encore correctement prises en compte par les algorithmes actuels (Figure 26).

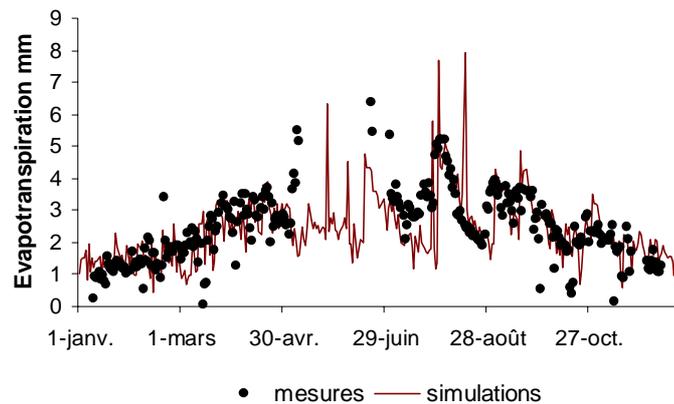


Figure 25 : Mesure par la méthode des corrélations et simulation de l'évapotranspiration journalière en 2003 sur une oliveraie marocaine.

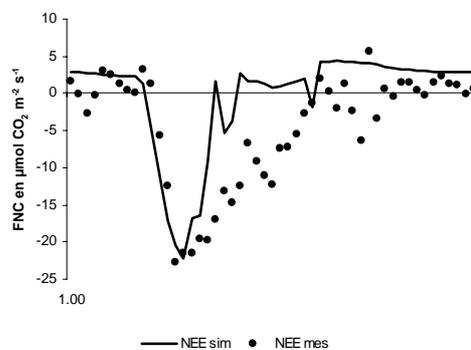
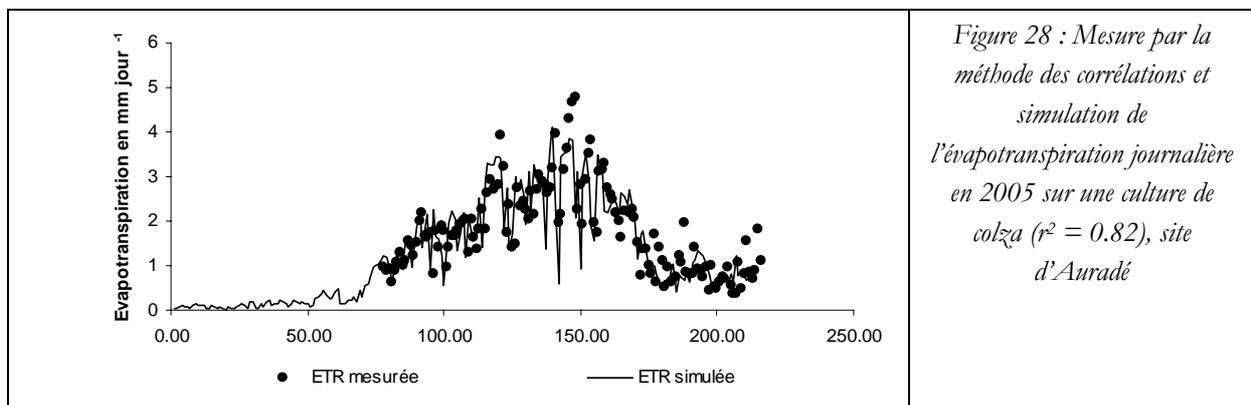
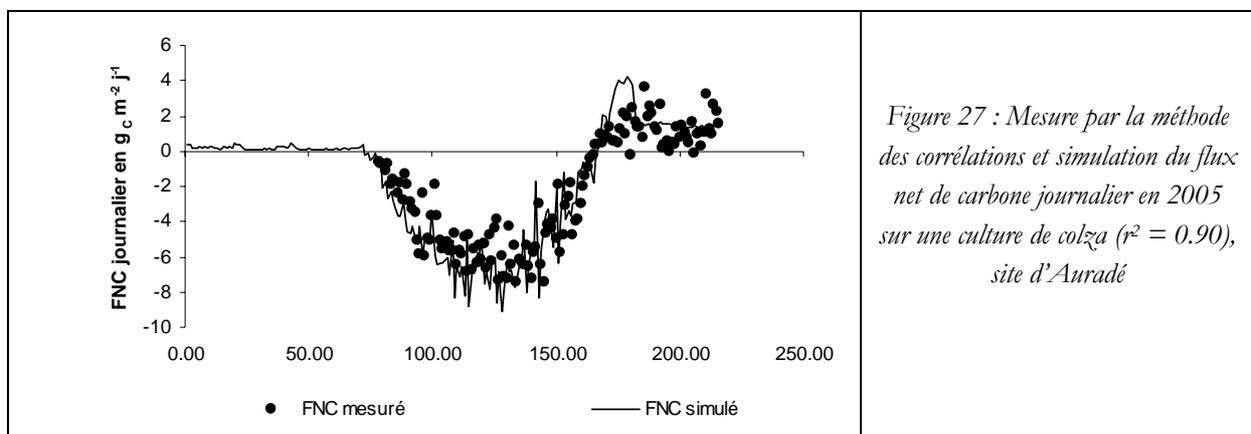


Figure 26 : Mesure par la méthode des corrélations et simulation du flux net de carbone semi-horaire en 2002 sur une oliveraie marocaine.

Enfin, pour les cultures de la région de Toulouse (site d'Auradé), le couplage avec le modèle STICS a permis de simuler très correctement tant les flux de carbone (Figure 27), que les flux d'eau (Figure 28). Les paramètres propres à la phénologie du colza sont directement issus des fichiers paramètres donnés par l'INRA. Seuls la date de début de sénescence et le paramètre de croissance foliaire ont été re-calibrés à partir des mesures issues du suivi terrain (indépendants des mesures de validation). Les paramètres conditionnant la conductance stomatique et la photosynthèse ont été calibrés à partir de données de la littérature concernant la photosynthèse du colza (Ashraf 2001). Des travaux restent à entreprendre concernant le remplissage des graines et le couplage des besoins simulés par STICS au carbone disponible simulé par les modules de photosynthèse et de respiration. L'évaluation du modèle a été aussi entreprise en comparant aux diverses mesures la simulation des températures du sol en surface ( $r^2=0.95$ ) et en profondeur ( $r^2=0.94$ ), la simulation du rayonnement net ( $r^2=0.85$ ), du flux de chaleur sensible ( $r^2=0.55$ ) et du flux de chaleur dans le sol ( $r^2=0.45$ ). Pour les deux derniers flux, l'effet de la récolte est encore mal pris en compte, ce qui explique les faibles coefficients de corrélation. Des comparaisons des simulations avec des mesures de la production de biomasse, de rendement et d'eau du sol sont en cours.



#### 4.2.4 Détermination de la photosynthèse brute à l'échelle régionale

Parallèlement aux études sur sites, nous développons des approches se situant d'emblée à l'échelle régionale et exploitant des instruments satellitaires à résolution kilométrique.

Les mesures de l'instrument VEGETATION à bord de SPOT4 ont été utilisées pour piloter le modèle TURC (Ruimy et al., 1996) et estimer la Productivité Primaire Brute (PPB, photosynthèse brute) d'une région de 100x100 km située au Sud-Ouest de Toulouse. La Figure 29 (à gauche) présente la carte de photosynthèse annuelle estimée sur la région en 1998. La variabilité spatiale est en partie par expliquée la nature du couvert végétal et le relief (fig. au centre). L'analyse de la variabilité sur deux années (fig. de droite) fait apparaître des structures plus complexes dont l'origine, en cours d'analyse, fait intervenir les conditions météorologiques, les aires de répartition spécifique des cultures d'hiver et des cultures d'été et les pratiques agricoles comme l'irrigation. Cette interaction complexe des facteurs naturels et humains est un élément essentiel à prendre en compte pour modéliser les bilans de carbone et prévoir l'impact des fluctuations et du changement du climat.

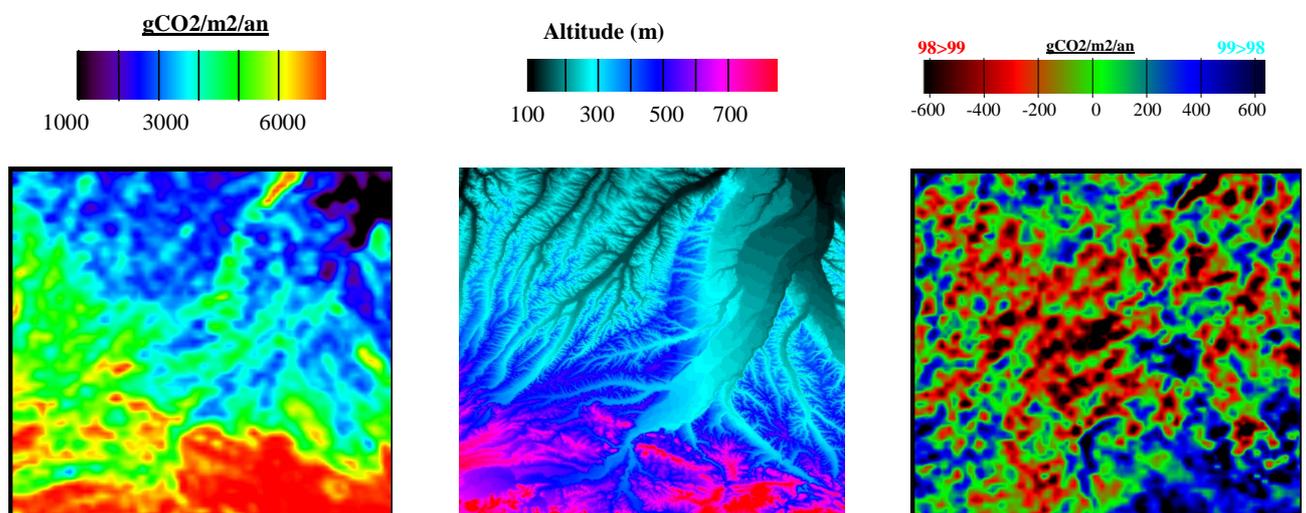


Figure 29 : à gauche, photosynthèse brute en 1998. Au centre, altitudes de la zone (MNT IGN, BD-Carthage). A droite, différence des photosynthèses brutes estimées en 1998 et 1999 (1999-1998).

## 4.3 Eau

### 4.3.1 Méthode FAO : Besoins en eau des cultures

#### 4.3.1.1 Application aux données SPOT 20 m : Résultats

La méthode d'estimation des besoins en eau des cultures basée sur les coefficients culturaux a été appliquée dans deux de ses variantes, à savoir celle basée uniquement sur la carte d'occupation des sols (V1), et celle pour laquelle le coefficient cultural est modulé par l'indice de végétation (V3). Nous présentons seulement les résultats de cette dernière variante, appliquée aux données Spot en 2002 et 2003. L'été 2002 a été assez humide, et surtout relativement nuageux. L'année 2003 a par contre été exceptionnellement sèche et chaude (Figure 30).

Ces situations climatiques contrastées ont conduit à un développement des cultures très différent, observable sur les courbes d'évolutions comparées des indices de végétation dérivés des mesures de SPOT. La Figure 31 présente l'évolution temporelle de l'indice de végétation moyen de l'ensemble des parcelles de blé et de maïs en 2002 et 2003. Le principal effet de la sécheresse et des températures élevées de 2003 visible sur cette figure est le raccourcissement du cycle végétatif, la sénescence (et les récoltes) intervenant avec environ quatre semaines d'avance en 2003 par rapport à 2002.

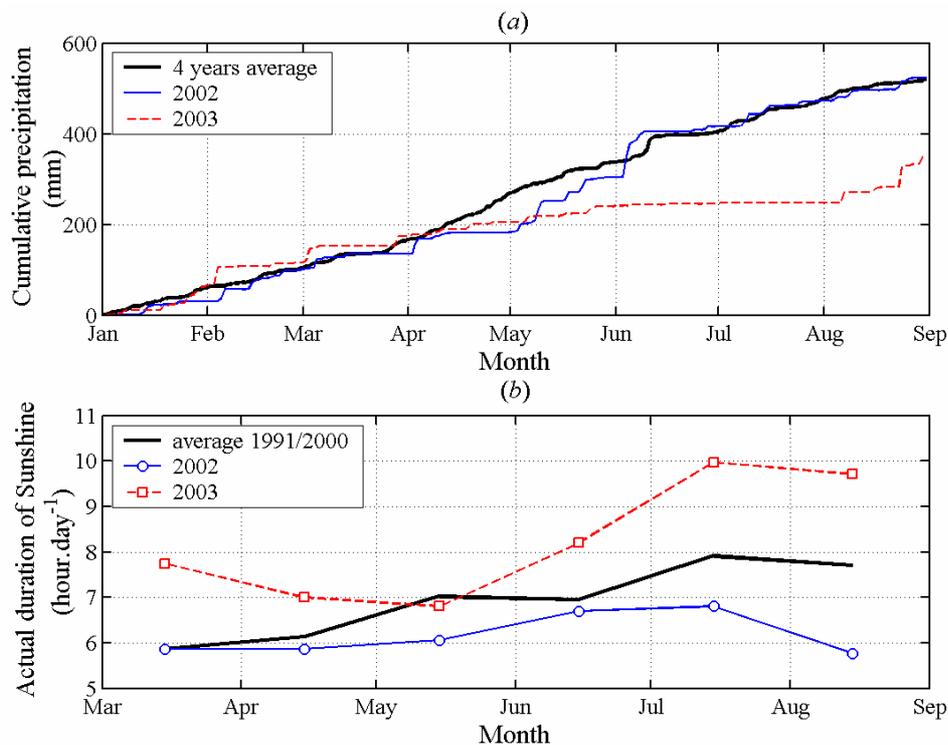


Figure 30. (a) Précipitations cumulées en 2002 et 2003, de janvier à août. (b) Durée d'insolation journalière, moyennée mensuellement, en heures. (Source : Météo-France).

La Figure 32 présente les cartographies mensuelles des besoins en eau des cultures dominantes de la région (blé, maïs, tournesol, soja), de mai à septembre 2002 et à la résolution du pixel SPOT (20 m). Au mois de mai, les besoins hydriques sont plus élevés pour le blé que pour les cultures d'été (maïs, tournesol, soja), encore peu développées. Pour ces dernières, les besoins sont maximaux en juillet. En raison d'un cycle végétatif plus long, les besoins du maïs sont encore relativement importants au mois de septembre. De manière générale, seuls le maïs et le soja sont irrigués dans la région.

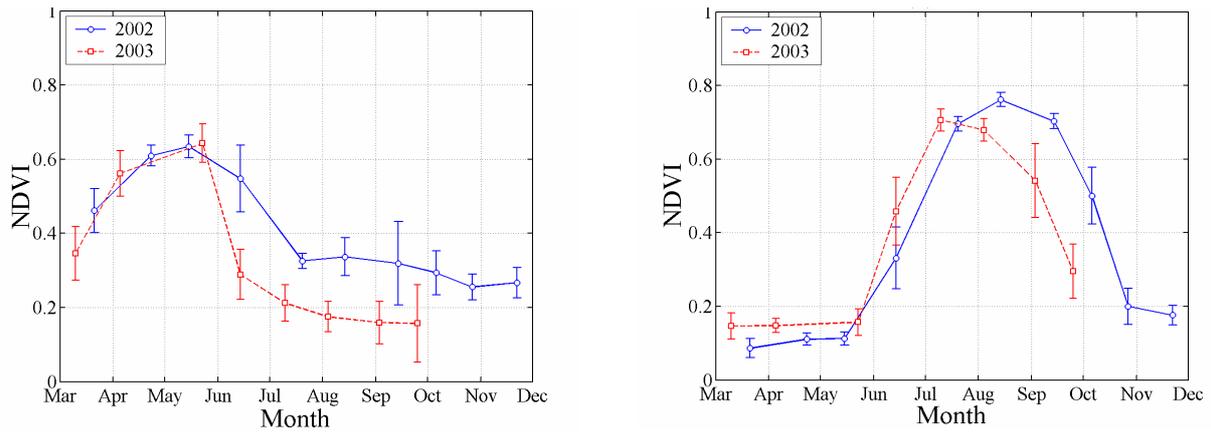


Figure 31. Indices de végétation SPOT en 2002 (bleu) et 2003 (rouge) pour le blé (à gauche) et le maïs (à droite). Valeurs moyennes et écarts types sur l'ensemble de la zone pour le maïs, pour une dizaine de parcelles pour le blé.

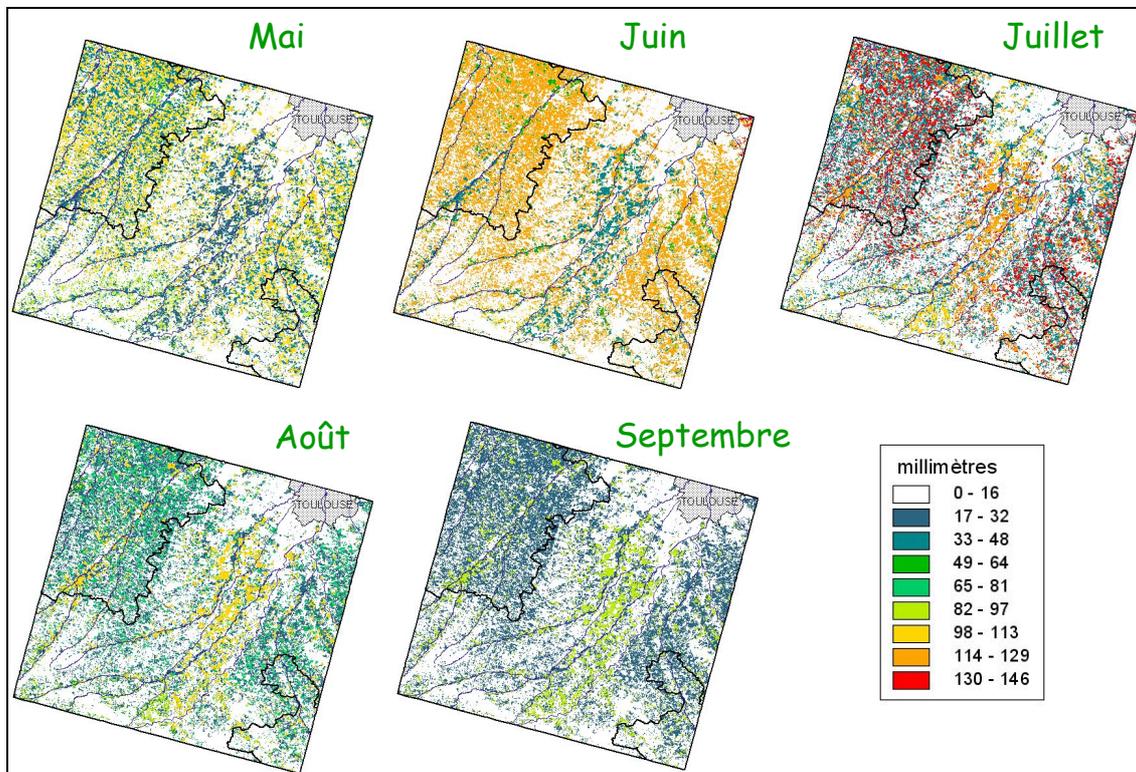


Figure 32 : Besoins en eau 2002, cumuls mensuels en mm – Blé, Maïs, Tournesol, Soja. Projection Lambert II étendu, résolution 20m.

Les résultats sont intégrés dans un système d'information géographique, ce qui autorise diverses analyses spatiales. A titre d'exemple, la Figure 33 présente les besoins en eau du maïs cumulés de juin à août 2002 par zone hydrographique.

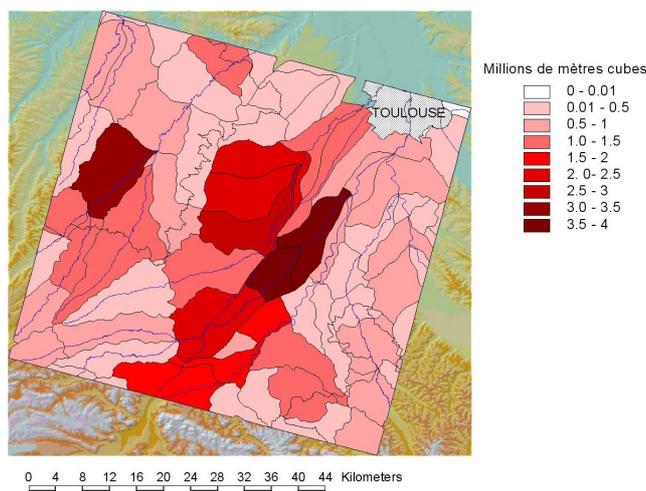


Figure 33: Besoins en eau du maïs en millions de  $m^3$  par zone hydrographique, cumulés de juin août 2002

Les résultats préliminaires indiquent que pour le maïs les besoins en eau se sont situés au environ de 4000 à 4500  $m^3$  par hectare en 2003, contre environ 2500  $m^3 \cdot ha^{-1}$  en 2002. Ceci correspond par exemple, pour les mois de juin à août, à un besoin cumulé évalué à 15 millions de  $m^3$  pour le canton de Muret, contre moins de  $9 \cdot 10^6 m^3$  en 2002. Ces estimations sont provisoires et doivent être consolidées.

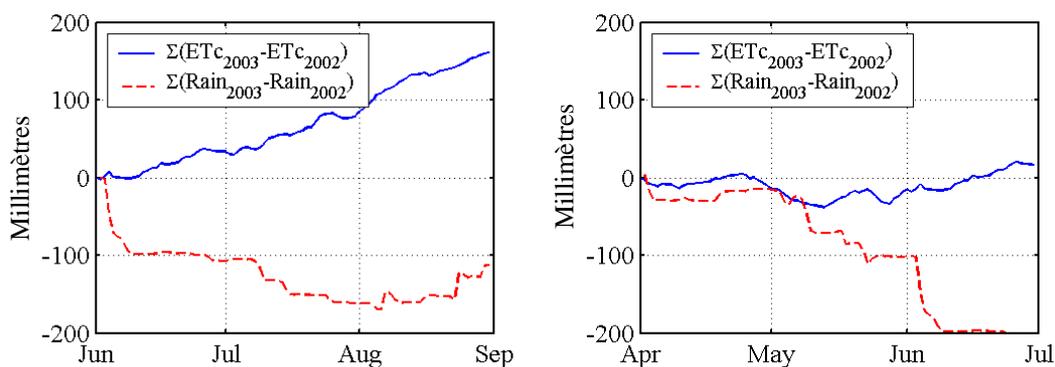


Figure 34. Déficit de précipitations et excès des besoins en eau des cultures en 2003 relativement à 2002. En bleu : cumul des différences des besoins 2003-2002 ("ETc"). En rouge, cumul des différences de précipitations 2003-2002 ("Rain"). Cas du maïs (à gauche) et du blé (à droite).

La procédure d'estimation de l'évapotranspiration réelle de l'ensemble des cultures et les besoins en irrigation du maïs a également été appliquée aux données des années 2002 et 2003. La Figure 35 illustre le processus consistant à apporter des doses d'irrigation pour éviter le stress hydrique.

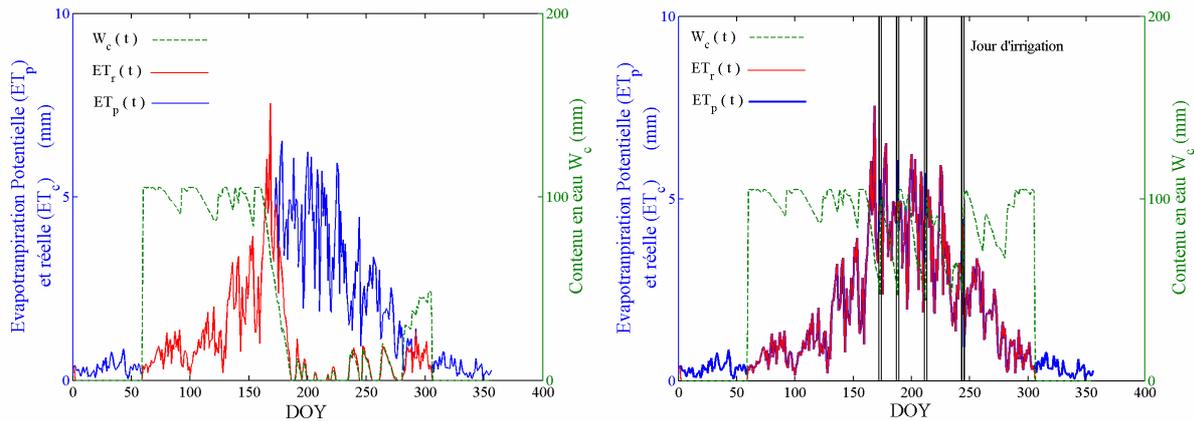


Figure 35 : simulation des besoins en eau ( $ET_p$ ), de l'humidité du sol ( $W_c$ ) et de l'évapotranspiration réelle ( $ET_r$ ) d'une parcelle de maïs non irriguée (à gauche) et irriguée pour prévenir le stress hydrique. Année 2002. Le volume total d'irrigation nécessaire est estimé à 235 mm, en excellent accord avec l'apport réalisé par l'agriculteur (230 mm).

L'évapotranspiration réelle et les besoins d'irrigation ont été calculés en pilotant la méthode FAO avec des données SPOT afin d'obtenir des estimations spatialisées (Figure 36 et Figure 37). Le suivi de la campagne 2003 par télédétection a permis de constater une croissance quasi-normale du maïs en début de campagne (Figure 31), ce qui compte tenu de la sécheresse ne peut s'expliquer que par un apport d'eau par irrigation. En outre, la méthode utilisée, dans laquelle la valeur des coefficients culturaux est pilotée par télédétection, permet une modulation fine de l'estimation des besoins en eau qui tient compte du développement réel de la culture, ce qui n'est pas le cas avec la méthode FAO originelle.

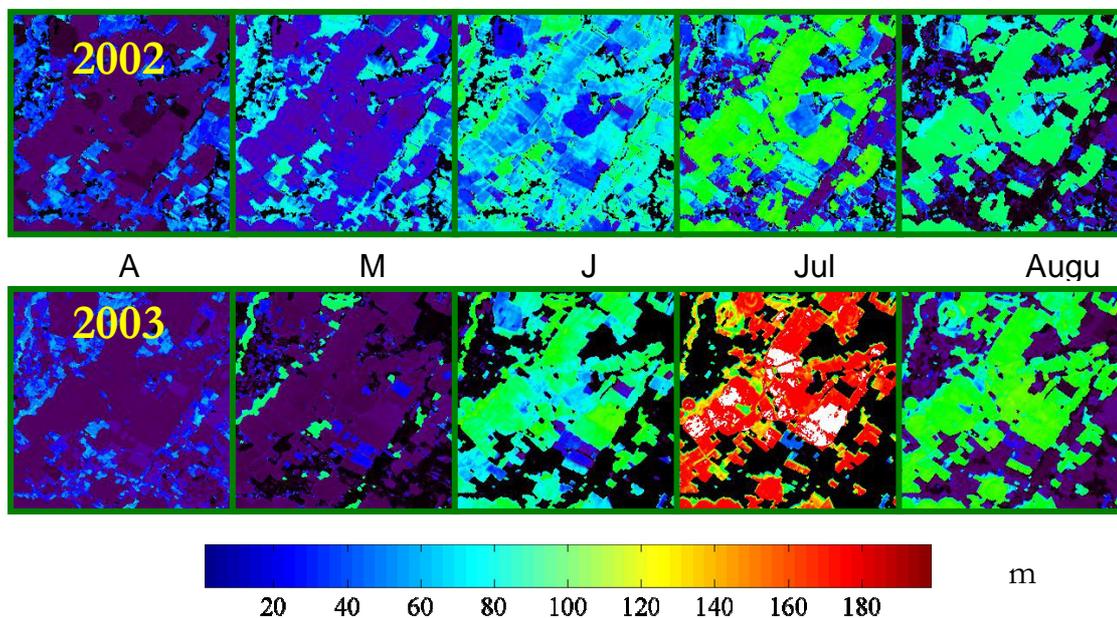


Figure 36 : Evapotranspiration réelle estimée en 2002 et 2003, pour une zone de 5x5 km. Méthode FAO pilotée par des données SPOT. Les valeurs d'ETR durant l'été correspondent à des parcelles de maïs irriguées.

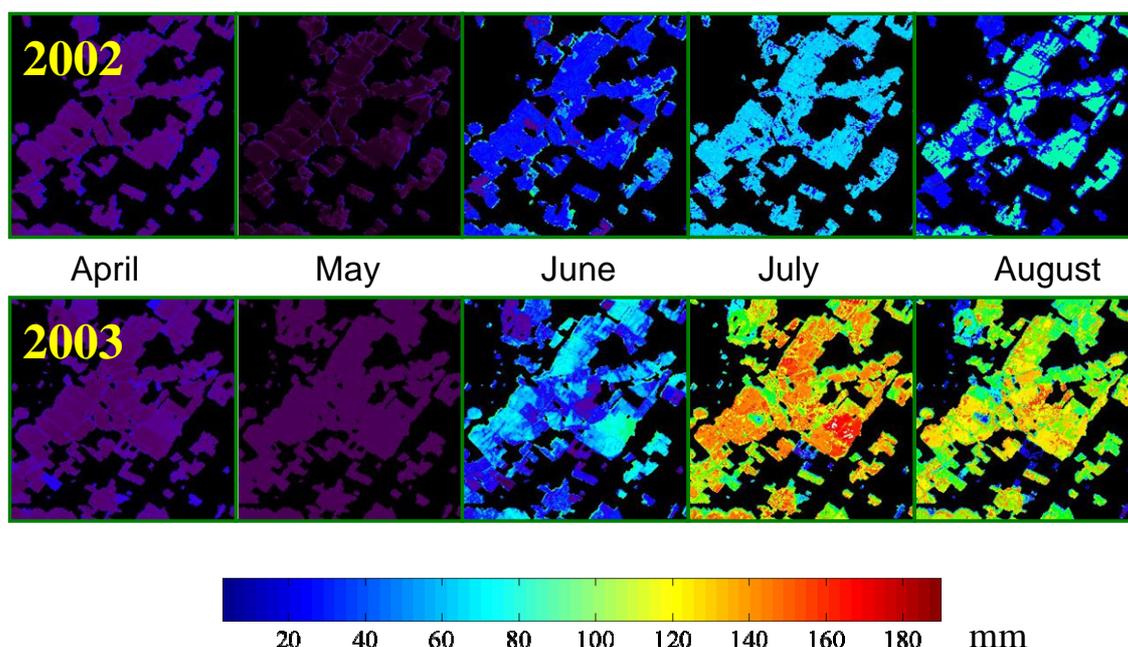


Figure 37 : Irrigation du maïs estimée en 2002 et 2003, pour une zone de 5x5 km. Méthode FAO pilotée par des données SPOT

#### 4.3.1.2 Application aux données VEGETATION 1 km : Résultats

Les besoins en eau,  $ET_c$ , à l'échelle régionale ont été estimés en utilisant la variante V3 de l'approche décrite dans la section 3.6.1. L'évapotranspiration potentielle est toujours calculée à partir des données météorologiques SAFRAN. Les coefficients "cultureux"  $K_{cmin}$  et  $K_{cmax}$ , peu variables, sont des valeurs moyennes pour les cultures présentes dans la région. Le coefficient cultural est modulé dans le temps en fonction de l'indice de végétation NDVI dérivé tous les 10 jours des mesures de l'instrument SPOT4-VEGETATION, à la résolution de 1 km. L'indice de végétation utilisé est corrigé des effets atmosphériques et directionnels de surface. Les besoins en eau sont estimés au pas de temps journalier, de 1999 à 2002.

La Figure 38 présente les résultats obtenus pour les années 2001 et 2002, sur une région d'environ 200x250 km<sup>2</sup> qui inclut la région étudiée avec les données SPOT haute résolution. La Figure 39 présente les différences interannuelles des besoins. On notera tout d'abord que les structures spatiales des différences interannuelles ne sont pas stables. Afin de mettre en évidence le rôle respectif de la variabilité du climat et de la végétation, nous avons calculé les besoins en eau à indice de végétation NDVI constant et climat « réel » d'une part (Figure 40-a) et à climat constant et NDVI réel d'autre part (Figure 40-b). Ces résultats montrent que de manière générale la variabilité interannuelle du climat induit des structures de plus grande échelle que celles dues à la variabilité de la surface, avec des amplitudes de variations similaires. La variation interannuelle du NDVI est certes fortement influencée par le climat, mais elle est également modulée par le type et le cycle de la végétation, par les pratiques culturales (irrigation, dates de semis) et par les superficies des différentes cultures.

L'intérêt de ces travaux à l'échelle régionale est définir des méthodologies applicables sur de grandes superficies, ce qui ne peut-être réalisé actuellement avec SPOT.

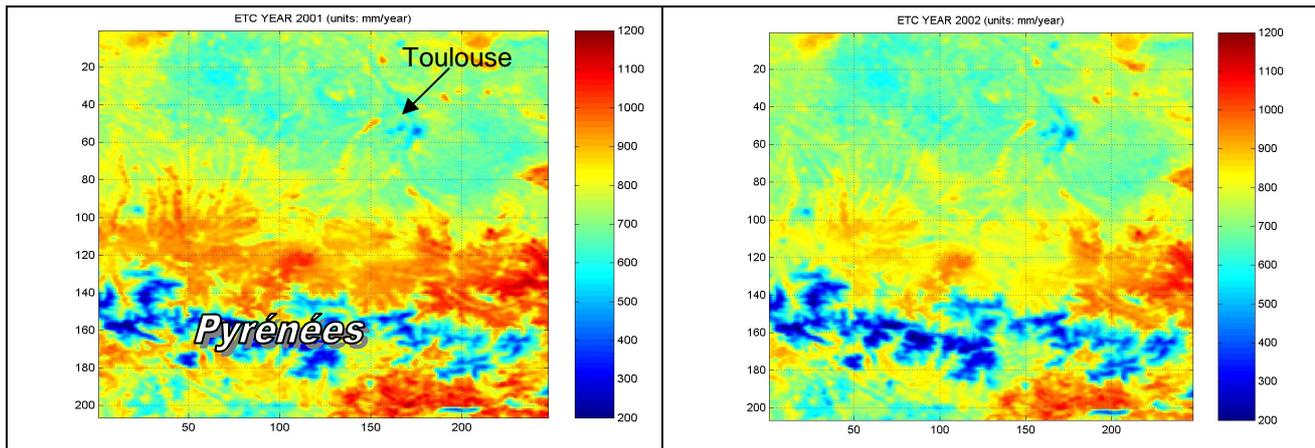


Figure 38 : Besoins en eau cumulés sur l'année, en mm, pour 2001 (à gauche) et 2002 (à droite). Estimations par la méthode FAO combinée aux données SPOT4-VEGETATION

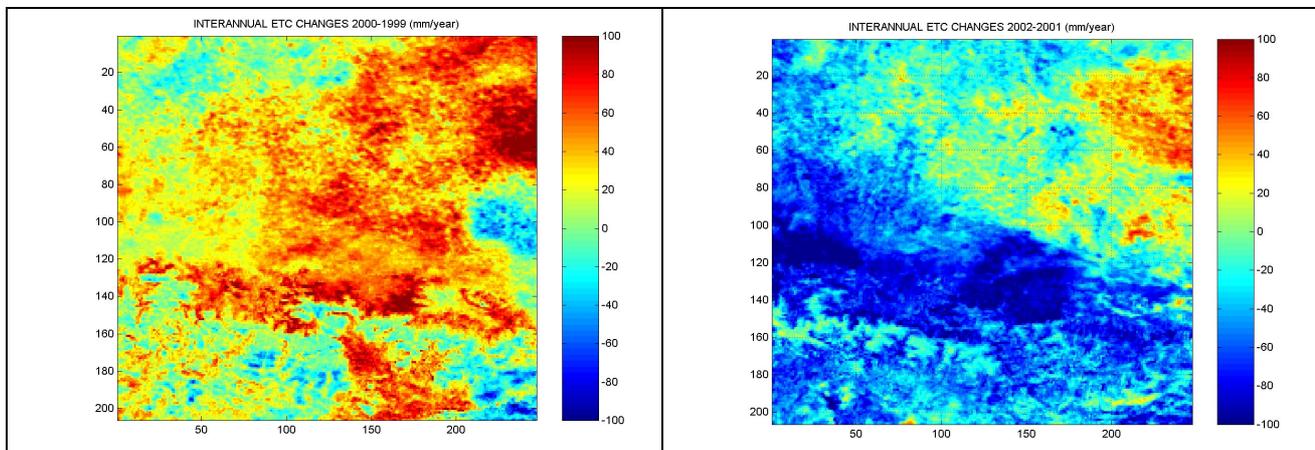


Figure 39 : Différence des besoins en eau cumulés sur l'année, en mm : année 2000 moins 1999 (à gauche) et 2002 moins 2001 (à droite). Estimations par la méthode FAO combinée aux données SPOT4-VEGETATION

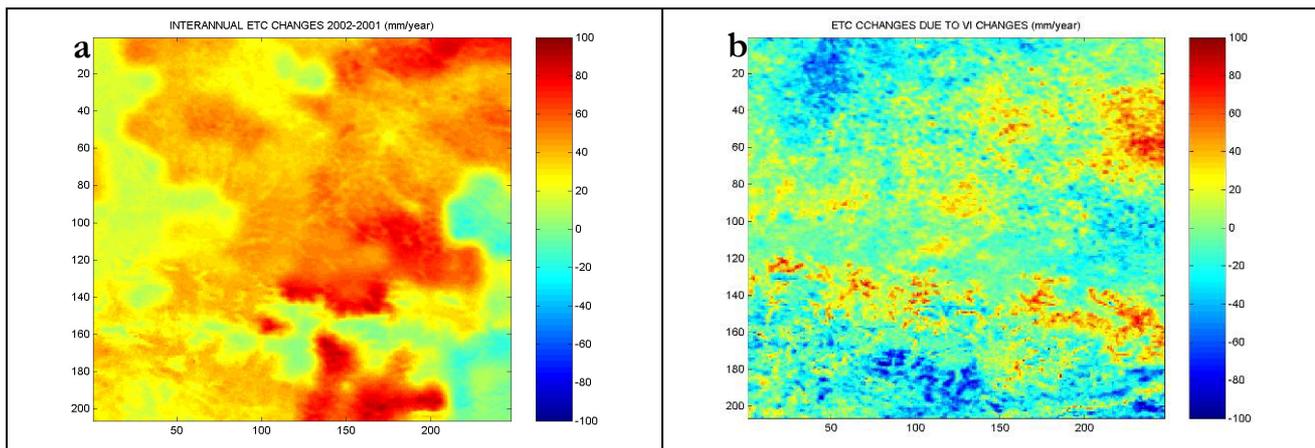


Figure 40 : différences des besoins en eau 2002 moins 2001 a) à indice de végétation NDVI constant et climat réel à gauche, b) et à climat constant et NDVI réel à droite.

Les estimations de besoins en eau, ETC, réalisées à l'aide de données à haute (SPOT 20m) et basse (VEGETATION 1km) résolutions ont été comparées pour l'ensemble de la zone commune d'environ 50x50 km (Figure 41). Les évolutions temporelles sont similaires, la différence étant de 40 mm en fin de période (6%). Les

valeurs prédites par la méthode FAO sans contrôle par des données satellitaires sont inférieures, de 9% (57 mm) en fin de période par rapport au pilotage de la méthode par VEGETATION.

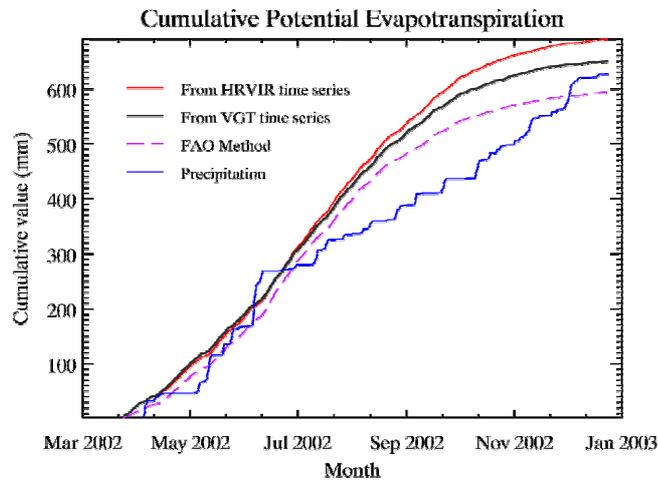


Figure 41 : Comparaison des besoins en eau, ETC, cumulés estimés par la méthode FAO pilotée à l'aide de données à haute (SPOT 20m, en rouge) et basse (VEGETATION 1km, en noir) résolutions pour l'ensemble de la zone commune d'environ 50x50 km.

#### 4.3.2 Modélisation ISBA : Résultats

La Figure 42 présente les évapotranspirations mensuelles estimées par la simulation de référence et la simulation alternative avec irrigation pour l'année 2003. L'impact de la modification de la seule description de l'occupation du sol est visible sur le mois d'avril (pas d'irrigation). Les différences entre les deux simulations peuvent atteindre localement 0.5 à 1 mm jour<sup>-1</sup>. Des différences plus importantes, jusqu'à 2 ou 3 mm jour<sup>-1</sup>, apparaissent les mois suivants en raison de l'irrigation du maïs dans les vallées de la Garonne et de la Save.

L'évapotranspiration réelle totale moyenne mensuelle pour l'ensemble de la zone est présentée Figure 43 pour l'ensemble des classes d'occupation du sol et Figure 44 pour le seul maïs. Les différences entre les simulations de référence et alternative sont faibles en 2002, mais beaucoup plus significatives en 2003, année de canicule. Les différences au mois de mai sont dues aux différences des valeurs de LAI des jeux de données, les valeurs d'ECOCLIMAP étant supérieures en mai (LAI ~ 3.5) aux valeurs de LAI dérivé de SPOT (LAI ~ 2). En juillet, les différences sont dues à la prise en compte de l'irrigation dans la simulation alternative. Les écarts atteignent 0.3 mm jour<sup>-1</sup> environ, soit 60% de plus que la simulation de référence, bien que le maïs n'occupe que 10% de la superficie.

L'analyse détaillée des résultats est en cours afin de déterminer le rôle des divers processus. L'évaluation de la pertinence des résultats à cette échelle est difficile. Nous envisageons de comparer les températures de surface, prédites aux températures estimées à partir de mesures satellitaires.

La comparaison entre l'approche simplifiée FAO et ISBA a également débuté (Figure 45). Les estimations ISBA sont en moyenne supérieures à celle de la méthode FAO (biais inférieur à 1 mm). Les différences s'expliquent probablement par une meilleure prise en compte de l'évaporation du sol nu par ISBA, ainsi que par des simulations différentes de l'irrigation du maïs.

La conclusion préliminaire de ce travail est que la prise en compte de l'hétérogénéité de la surface, des variations interannuelles de fonctionnement de la végétation (LAI) et de l'irrigation introduit des modifications importantes des flux de chaleur latente et plus généralement des termes du bilan hydrique à l'échelle régionale, tout particulièrement durant les années exceptionnelles comme 2003.

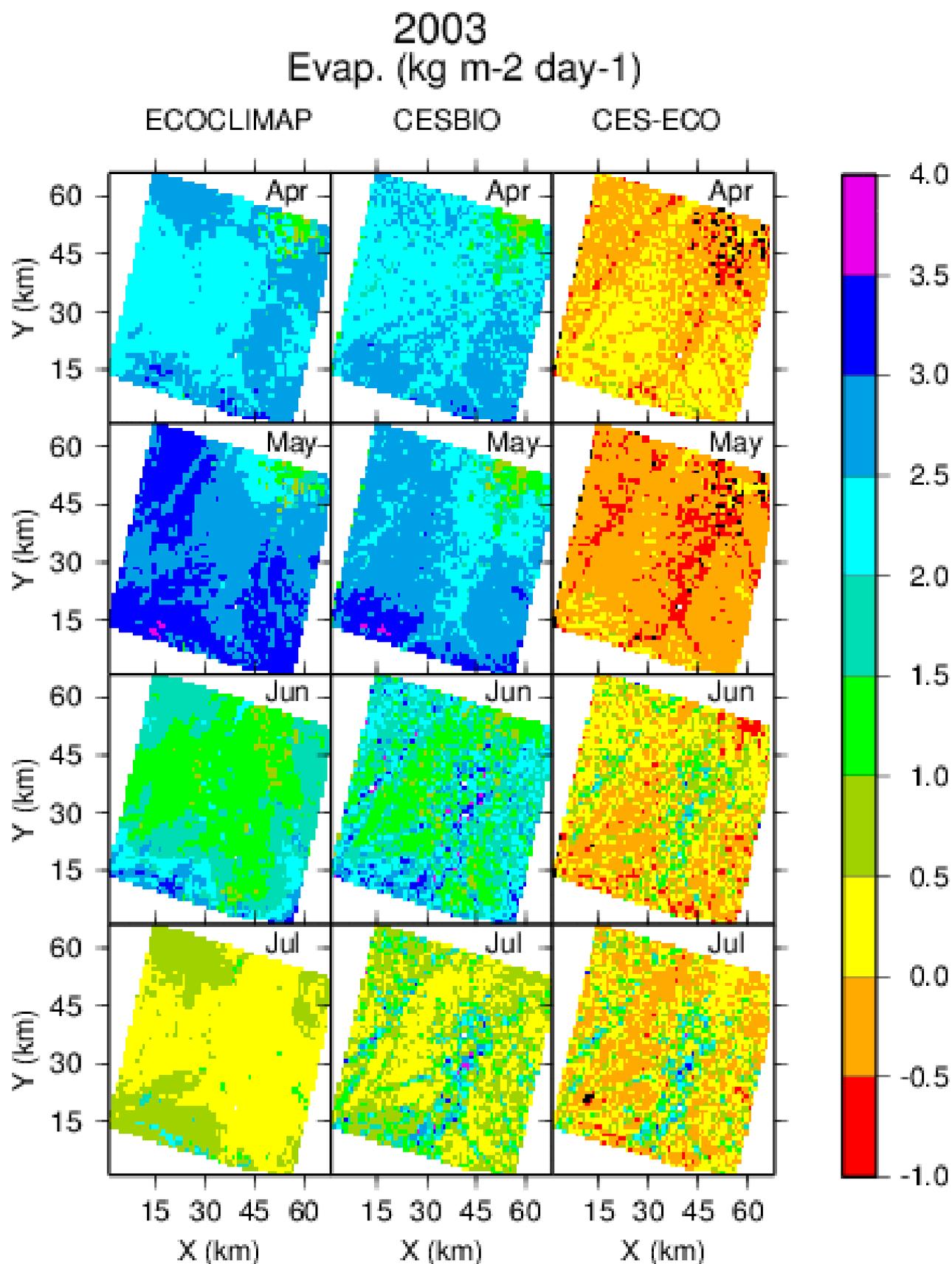


Figure 42 : simulation de l'évapotranspiration réelle par ISBA en 2003 ( $\text{kg m}^{-2} \text{j}^{-1}$ , ou  $\text{mm j}^{-1}$ ). Simulation de référence à gauche (résolution de l'occupation du sol et du LAI à 1km) et simulation alternative au milieu (données SPOT 20 m pour l'occupation du sol et le LAI). La colonne de gauche présente la différence Référence – Alternative.

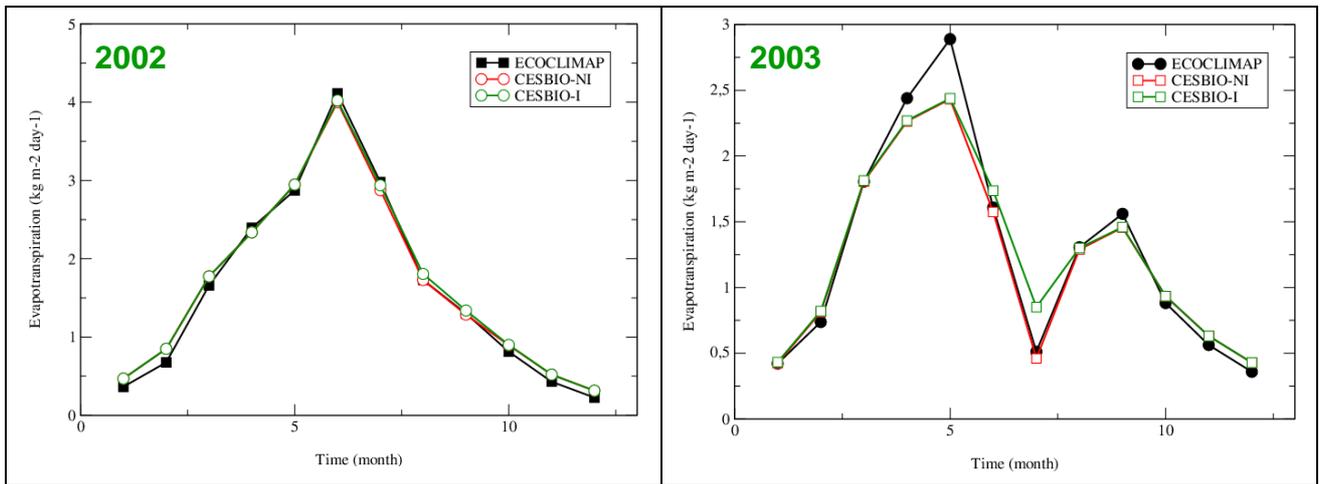


Figure 43 : Evapotranspiration réelle totale ( $\text{mm jour}^{-1}$ ) mensuelle moyenne pour l'ensemble de la zone de  $50 \times 50 \text{ km}$ , en 2002 (à gauche) et 2003 (à droite). Simulation de référence (ECOCLIMAP), simulation alternative sans irrigation (CESBIO-NI) et avec irrigation (CESBIO-I).

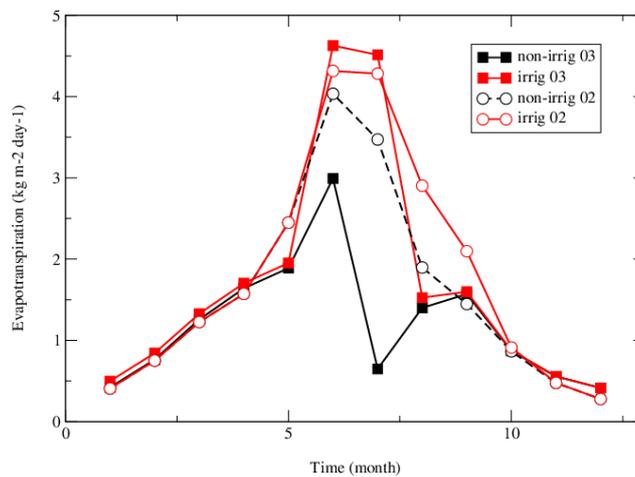


Figure 44 : Evapotranspiration réelle moyenne ( $\text{mm jour}^{-1}$ ) du maïs en 2002 et 2003 pour l'ensemble de la zone de  $50 \times 50 \text{ km}$  avec (rouge) et sans irrigation (noir). Dans ces simulations, le maïs occupait 7% de la superficie en 2002 et 10% en 2003.

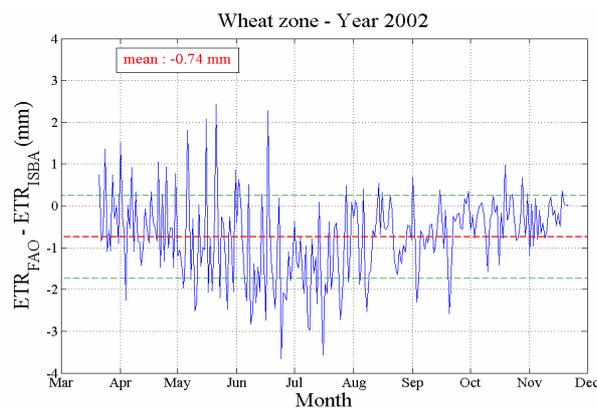


Figure 45 : Différence (mm) entre les estimations d'évapotranspiration calculées respectivement par la méthode FAO et ISBA (simulation alternative SPOT 20m), zone de blé en 2002

### 4.3.3 Modélisation hydrologique distribuée

#### 4.3.3.1 Simulation de l'hydrologie du bassin versant d'Auradé

Les écoulements sur un sous-bassin versant ont été simulés à l'aide de deux modèles, ISBATOP et SWAT, forcés par des données météorologiques acquises localement par le CESBIO en 1999. En outre, l'occupation du sol (Figure 46) a été introduite dans SWAT, ce qui n'est pas le cas pour ISBATOP qui discrétise l'espace selon un indice de similitude hydrologique. Notons que la prise en compte de l'occupation des sols améliore notablement l'efficacité de SWAT, évaluée sur les débits, par rapport à une simulation supposant une occupation des sols uniforme.

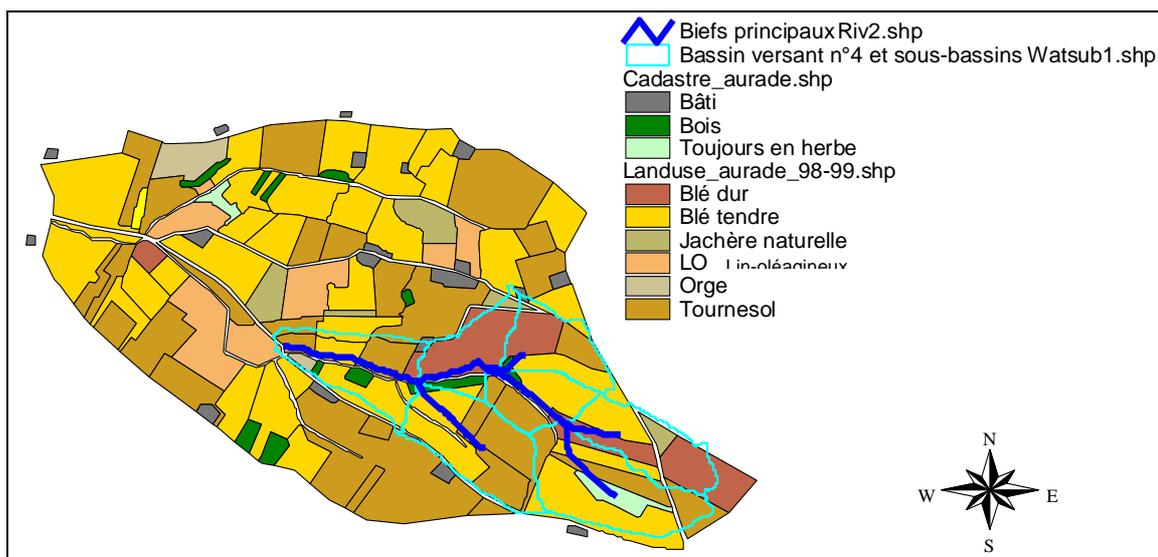


Figure 46 : Occupation du sol sur le bassin versant d'Auradé et sur le sous-bassin versant n°4 en 1999

La Figure 47 présente les simulations de débit obtenues avec chaque modèle. Les principaux enseignements de cette comparaison sont les suivants. Les deux modèles sous-estiment les débits, et SWAT tend à surestimer les crues, en particulier leur durée. L'essentiel du débit est constitué dans ISBATOP par le drainage latéral de subsurface, la contribution du ruissellement de surface au débit à l'exutoire est beaucoup plus réduite. La même configuration se retrouve pour le modèle SWAT mais à la différence notable que les flux profonds, à dynamique plus lente, contribuent au débit de base au cours de la période estivale. Ceci traduit une différence importante entre SWAT et ISBATOP, ce dernier ne prenant pas en compte les flux profonds participants au débit de base. Ainsi à la mi-juin on atteint la limite du modèle ISBATOP car les pluies sont faibles, le ruissellement sur surfaces contributives et le drainage latéral sont réduits, d'où l'annulation du débit simulé par ISBATOP tandis que SWAT maintient un débit de base à l'exutoire.

Il semble donc qu'ISBATOP convienne à la simulation des débits crue mais ne soit pas bien adapté aux régions où le stress hydrique est important. SWAT paraît de plus mieux adapté à la prise en compte de l'occupation des sols, et au couplage avec des modèles de végétation et des schémas de surface.

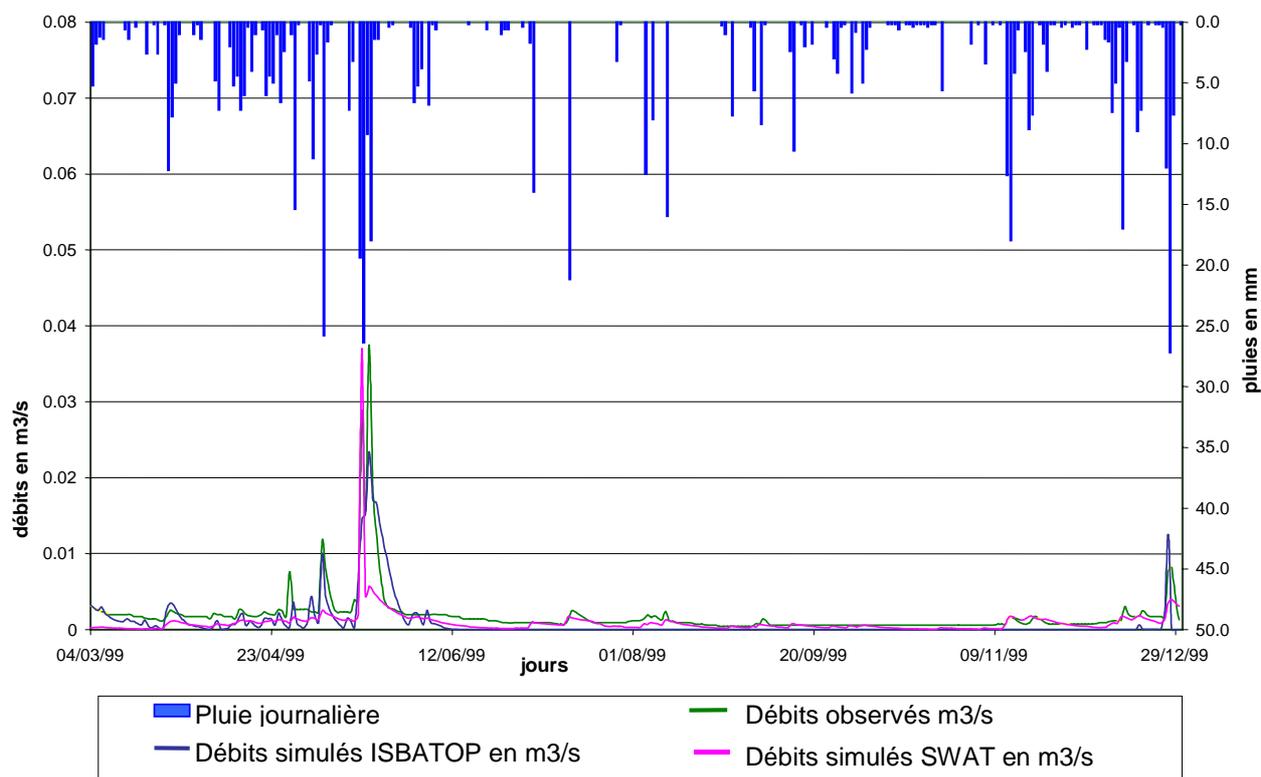


Figure 47 : Comparaison des débits observés aux débits simulés par SWAT et ISBATOP sur le sous-bassin versant n°4 du bassin versant d'Auradé avec un type de sol et une occupation du sol discrétisée pour le modèle SWAT. Efficience (coefficient de Nash) : ISBATOP=65%, SWAT = 41%.

#### 4.3.3.2 Influence de l'occupation des sols sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Hyse

La Hyse est un affluent en rive droite de l'Ariège avec laquelle elle conflue au niveau de Venerque. C'est un un cours d'eau assez linéaire de 35 km de longueur. Le bassin versant a une superficie de 154 km<sup>2</sup>.

Les travaux ont été réalisés dans le cadre d'un partenariat entre l'ARPE (Agence Régionale pour l'Environnement), le CESBIO, la Chambre Départementale d'Agriculture de la Haute Garonne (CDA), les élus et les agriculteurs. Plusieurs objectifs étaient visés :

- un objectif appliqué : proposer des scénarios d'aménagements parcellaires du bassin versant en vue de ralentir le ruissellement de l'eau de pluie afin de diminuer le risque d'inondation et de limiter l'érosion des terres agricoles. Il s'agissait également de quantifier l'impact des aménagements et des pratiques agricoles sur l'écoulement de l'eau, de réunir les acteurs locaux et de les sensibiliser aux problématiques de la gestion du territoire pour la réduction des risques d'inondation et d'érosion.
- un objectif scientifique : évaluer l'impact d'un changement d'occupation des terres sur les divers termes du bilan hydrologique d'un bassin agricole. Il s'agissait également d'évaluer la capacité du modèle SWAT à traiter ce type de problème.

Une enquête (diagnostic érosion de la CDA) auprès des agriculteurs a permis d'identifier les pratiques agricoles, de connaître leur perception de l'érosion et de fournir des données nécessaires au modèle (pédologie, rotations culturales...)

La modélisation hydrologique a été réalisée avec le modèle SWAT. Le modèle est contraint par : les données météorologiques (données SAFRAN 1997-2002, fournies par Météo France), une carte d'occupation des sols (image SPOT de février 1998), un modèle numérique de terrain à la résolution de 100m. Le bassin de la Hyse n'étant pas jaugé, les résultats ci-après sont présentés en relatif par rapport à la situation actuelle de l'occupation des sols.

Plusieurs simulations ont été effectuées.

- Tout d'abord, l'état actuel d'occupation du sol a été défini grâce aux enquêtes et à l'imagerie satellitale. Une rotation biennale blé-tournesol est majoritairement pratiquée sur le bassin versant. L'ensemble des surfaces cultivées couvre 93 % de la surface du bassin versant, 6% est boisée et 1% du bassin est urbanisé.
- Dans un deuxième temps, des scénarios de pratiques culturales ont été intégrés aux simulations : tout d'abord la mise en place d'une culture intermédiaire, l'avoine, d'août à février, afin de ne pas laisser le sol à nu l'hiver. Ensuite, la mise en place de rotations sur 5 ans combinées aux cultures intermédiaires a été testée.
- Enfin, un cas d'école a été modélisé sur l'ensemble du bassin: le sol est entièrement occupé soit par de la forêt (30 % de la surface du bassin, correspondant aux altitudes supérieures à 250m), soit par de la prairie (69 % du bassin). Le reste correspond aux zones urbanisées.

La Figure 48 indique que la mise en place de **cultures intermédiaires** l'hiver, d'août à mars, influe sur le ruissellement, surtout de surface (diminution de 13%) et sur l'érosion (réduction de 36% du transport de sédiments). Le débit, l'évapotranspiration et l'humidité du sol ne varient pas, en moyennes annuelles ou mensuelles. En effet, l'implantation de cultures intermédiaires ne modifie pas fondamentalement la structure et la profondeur du sol, elles permettent seulement de ne pas laisser le sol à nu l'hiver.

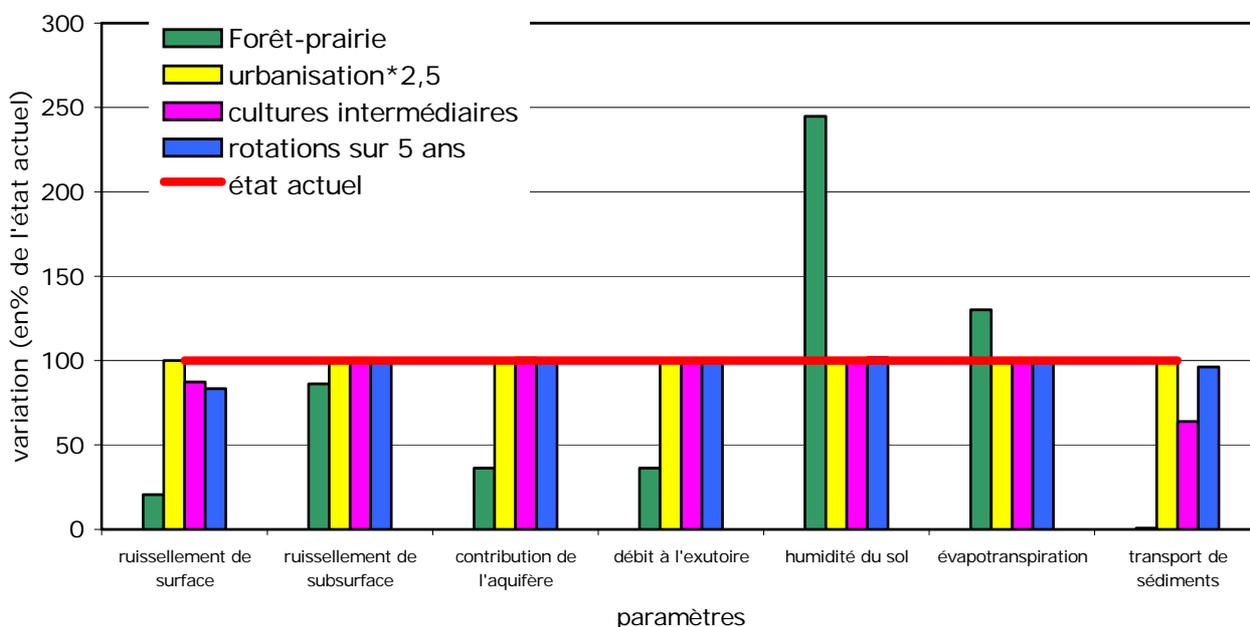


Figure 48: variation des paramètres hydrologiques en fonction de l'occupation du sol sur le bassin versant de La Hyse : moyennes annuelles sur 5 ans

L'allongement des rotations sur 5 ans avec la combinaison de cultures intermédiaires, c'est à dire l'implantation d'une culture différente tous les ans pendant 5 ans sans laisser le sol à nu l'hiver (Tableau 6)

permettrait, d'après le modèle, de réduire le ruissellement de surface de 17%. Le débit, l'évapotranspiration et l'humidité du sol ne changent pas pour les mêmes raisons que citées précédemment pour les cultures intermédiaires. L'érosion ne serait diminuée que de 4%. Tout dépend en fait des cultures choisies dans la rotation. En effet, chaque espèce a des caractéristiques foliaires différentes. Or, plus la surface foliaire est élevée, plus la pluie est interceptée avant d'atteindre le sol. Or, ce paramètre est plus faible pour le colza et le pois, ce qui explique la faible baisse de l'érosion.

Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5
Culture initiale				
Colza	Blé – avoine (CI)	Tournesol	Orge	Sorgho – avoine (CI)
Tournesol	Pois de printemps	Colza – avoine (CI)	Mais	Blé – avoine (CI)
Blé – avoine (CI)	Tournesol	Pois de printemps	Colza –avoine (CI)	maïs

Tableau 6 : rotations sur 5 ans et implantation de cultures intermédiaires, en fonction de la culture initiale (colza, tournesol ou blé) sur la carte d'occupation du sol utilisée lors de la modélisation. L'avoine est une culture intermédiaire (CI).

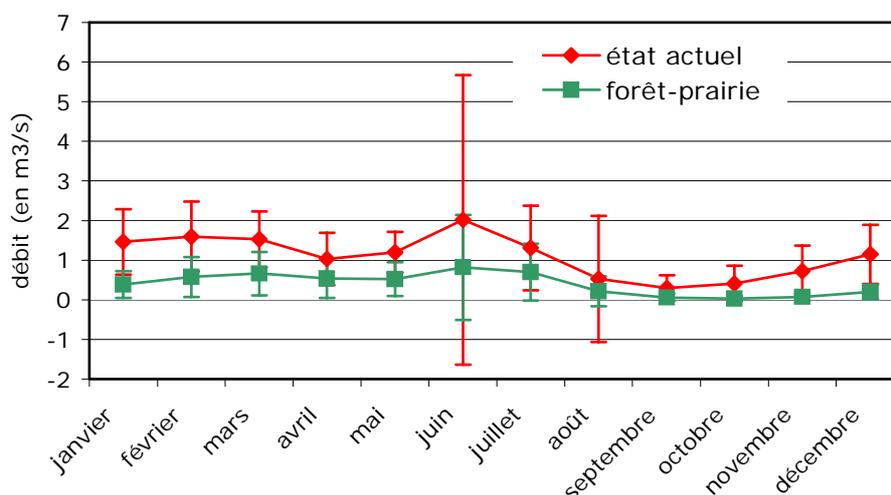


Figure 49 : Impact simulé d'un accroissement des superficies des forêts et des prairies sur le débit à l'exutoire du bassin versant de La Hyse : moyennes et écart-types mensuels sur 5 ans

L'occupation du sol en **forêt-prairie** est caractérisée par un enracinement relativement profond et donc par une épaisseur de zone racinaire plus importante que lors d'une occupation du sol par des cultures. De ce fait, ceci favorise un accroissement important de l'humidité du sol. L'évapotranspiration augmente également (Figure 49). Au contraire, le ruissellement et l'écoulement de la nappe diminuent fortement, ce qui contribue à réduire, quasiment à zéro, le transport de sédiments dans cette simulation. Etant donné que le ruissellement de surface, de sub-surface et la contribution de l'aquifère sont les trois composantes du débit du cours d'eau, ce dernier va également diminuer (Figure 49). L'eau n'a donc plus du tout le même devenir. Ainsi, ces écosystèmes interagissent très différemment avec l'atmosphère et le cycle hydrologique : une occupation du sol extrême par rapport à ce qui existe actuellement influence à la fois les flux ponctuels, le ruissellement de surface et de sub-surface, mais également les flux à long terme, et la contribution des aquifères à l'écoulement de la rivière.

Les résultats présentés ici sont à prendre avec précaution puisqu'ils sont issus "d'expériences numériques". Par exemple le modèle SWAT ne permet pas de représenter finement les différents types de couvert végétal d'un sous-bassin, ce qui rend difficile l'étude d'aménagements tels que les bandes enherbées.

Ces résultats, bien qu'obtenus avec un modèle relativement simple, ont selon nous le mérite d'attirer l'attention sur l'importance d'une prise en compte aussi globale (intégrée) que possible des processus et phénomènes. Par exemple, accroître significativement les superficies des forêts et prairies dans un bassin versant a probablement pour effet de freiner l'érosion des sols, de réduire et étaler dans le temps les lames d'eau en période de crue, et d'augmenter les stocks de carbone des sols. En contrepartie, le débit moyen dans le bassin et à l'exutoire diminue également. Une généralisation de ce type d'évolution, éventuellement induite par la nouvelle PAC, peut conduire à des problèmes de qualité des eaux et de difficulté à maintenir les débits objectifs d'étiage dans l'ensemble du réseau hydrographique. Un autre volet concerne les aspects socio-économiques, qui devront être abordés dans une phase ultérieure de ces travaux. Un des points bloquants actuels, à l'origine du projet de modélisation des surfaces continentales SEVE, est l'absence de modèle intégrant les différents processus de manière fiable et capable de simuler par exemple l'impact d'aménagements (bandes enherbées, zones humides, ..) des bassins versants.

## 5 Conclusion

Au stade actuel d'avancement des travaux, l'intégration des diverses composantes n'est que partielle. Les méthodes développées et la base d'informations accumulées constituent cependant les fondations nécessaires pour réaliser progressivement cette intégration et l'élargissement du projet à d'autres disciplines. Le projet a permis d'acquérir une somme importante de compétences qui ont été largement mises à profit pour définir et argumenter les spécifications de missions spatiales aussi originales que Venus et GMES-Continental, ou de projets de modélisation comme SEVE (Borrell et al., 2005).

Les travaux réalisés jusqu'à présent et les résultats obtenus fournissent une base de travail solide pour développer les recherches sur le fonctionnement des surfaces continentales aux échelles intermédiaires du paysage et de la région. Un effort particulier devra être consacré au développement de modèles couplant les principaux processus (en relation avec l'initiative SEVE de modélisation des surfaces continentales) et à l'exploitation des moyens de validation (mesures de flux). Les liens qui ont été établis avec des décideurs et gestionnaires institutionnels régionaux (collectivités territoriales, DDAF, DIREN, Agence de Bassin, Chambres d'Agriculture) devront également être approfondis.

## 6 Publications du projet

### 6.1 Publications

- Borrel, V., Braud, I., Dedieu, G., Boone A.A., Branger, F., Brunet, Y., Calmet, I., Carlier, N., Chanzy, A., Chibaudel, P., Creutin, J.-D., Davi, H., Ern, A., Habets, F., Lagacherie, P., Menaut, J.-C., Mestayer, P., Moussa, R., Noilhan, J., Ogée, J., Olioso, A., Prévot, L., Rodriguez, F., and M. Voltz, 2005 : Modélisation du fonctionnement des surfaces continentales aux échelles locales à régionales. SEVE : sol eau végétation énergie. Actes du colloque INSU-ECCO, Toulouse décembre 2005. 6p.
- Cardot, H., Faivre, R. and Maisongrande, P. (2004). Random Effects Varying Time Regression Models: Application to Remote Sensing. *Compstat 2004 proceedings* ed. J. Antoch, Physica-Verlag, 777-784.
- Dedieu, G., G. Chehbouni, V. Démarez, D. Ducrot, G. Flouzat, J.P. Gastellu-Etchegorry, P. Gouaux, T. Lamaze, F. Lavenue, T. Le Toan, A. Lopès, P. Maisongrande, G. Marty, J.-C. Menaut, N. Mognard, P. Mordélet, F. Timouk et C. Tosca, 2001: Carbon and water balance of France South-West region: an outline of the "Sud-Ouest" project. *Proceedings of the 8th International Symposium on Physical Measurements and Signature in Remote Sensing, 8-12 January 2001*, Aussois, France, edited by CNES, Toulouse, France, pp. 725-728.
- Faivre, R., Leenhard, D., Voltz, M., Benoît, M., Papy, F., Dedieu, G. and D. Wallach, 2004 : Spatialising crop models. *Agronomie*, 24, 205–217.
- Coret, L., Maisongrande, Ph., Boone, AA., Lobo, A., Dedieu, G., and P. Gouaux. 2005. Assessing the impacts of the 2003 hot and dry spell with SPOT HRVIR images time series over south-western France. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 26, no 11, pp. 2461 – 2469
- Herlin, I., J.P. Berroir, M. Auger, B. Guldner, D. Ducrot, P. Gouaux, P. Maisongrande, G. Dedieu : Typology of temporal behavior in agricultural areas and analysis of its multi-annual evolution. IEEE Int. Conf. on Image Processing, Sep 11-14 2005, Genova, Italy
- Fillol E., Baret F., Dedieu G, Gouaux P., Ducrot, D. 2005 Extraction of the phenological signal per plant functional type from medium resolution observations. The 9th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing (ISPMSRS) Oct. 17-19, 2005 International Conference Center, Beijing, China
- D. Courault, V. Benoit, F. Jacob, M. Weiss, G. Dedieu, P. Gouaux, M. Gay, A. French. Assessing the potential of ASTER data for the mapping of surface energy fluxes and air temperature, in the context of crop monitoring over an agricultural region of South Western France. The 9th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing (ISPMSRS) Oct. 17-19, 2005 International Conference Center, Beijing, China
- Deconchat M, Balent G, Cabanettes A, Gibon A, Hewison M, Bouyjou B, Dedieu G, Du Bus de Warnaffe G, Garine E, Gavaland A, Gouaux P, Gonzalez M, Lacombe J-P, Ladet S; Menaut J-C, Monteil C, Ouin A, Salles D, Sarthou J-P, Sourdril A, 2005. Un dispositif de recherche pour l'analyse des interactions entre

pratiques agricoles et forestières, paysages et processus écologiques. Communication pour le Symposium international "Territoires et enjeux du développement régional" Lyon, 9-11 mars 2005, 15 p. [http://www.inra.fr/rhone-alpes/symposium/pdf/session3-3\\_1.pdf](http://www.inra.fr/rhone-alpes/symposium/pdf/session3-3_1.pdf)

## 6.2 Rapports de Stages, rapports techniques internes

- Andral, R., 2004, Interpolation temporelle d'images de teledetection haute resolution. 38 pages stage de DEA Signal Image Acoustique, ENSEEIHT.
- Bedoya C., Delaunay, M., Diarra A., Kaci A., 2003 : Dynamique du paysage sur le bassin versant agricole d'AURADE : Reconstitution de l'occupation du sol durant les 150 dernières années. Mémoire CPU-DESS « Aménagement Intégré des Territoires », Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Beziat, G., 2001: Modélisation interannuelle des flux de carbone à l'échelle de la région Midi-Pyrénées (1998-1999). Mémoire du DEA Océan, Atmosphère, Environnement, Université Paul Sabatier, Toulouse, juin 2001.
- Béziat, P., 2005 : Flux de CO<sub>2</sub>, de chaleur latente (LE) et de chaleur sensible (H) à l'interface sol-atmosphère pour des agrosystèmes. Diplôme d'Etude Supérieure de l'Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Bordignon, G., 2004 : Utilisation de photographies hémisphériques et d'un modèle de transfert radiatif pour l'étude de couverts végétaux. 37 p. Stage IUP, Toulouse.
- Boucard A., 2003 : Variabilité du flux de carbone en provenance des sols agricoles. Mémoire du DEA Ecologie des systèmes continentaux, Université Paul Sabatier, Toulouse, septembre 2003.
- Courpière, C., et Michou-Saucet, C., 2005 : Historique du mode d'occupation du sol de 1946 à 2004: exemple des sites d'Auradé et de Lamasquère. Master 1ère année Biologie des Organismes, Populations et Ecologie, Université Paul Sabatier, Toulouse..
- Da Benta, Y., 2001 : Evaluation du bilan hydrique d'une parcelle en jachère de l'expérience MUREX. Mémoire du D.E.A BIOSPHERE CONTINENTALE : Sols, Ecosystèmes, Atmosphère. INA P-G, Paris VI et l'ENS, septembre 2001.
- Dubus, D., 2005 : modélisation de la BRDF et du coefficient d'agrégation des cultures. 30p, Stage ENSICA, Toulouse.
- Ducrot, D., P.Gouaux, O. El Kharki, B.Mora, 2002 : Méthode d'apprentissage automatique à partir d'une base de données de terrain et d'une segmentation d'images. Rapport interne Cesbio.
- Duthoit, S., 2001: Etude de l'impact des hétérogénéités de surface d'un couvert végétal sur l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR). Rapport de Diplôme d'Etudes Supérieures d'Université, Université Paul Sabatier, Toulouse, septembre 2001.
- Fortabat,L., 2005 : Flux de CO<sub>2</sub>, de chaleur latente (LE) et de chaleur sensible (H) à l'interface sol-atmosphère pour des agrosystèmes. Phénomènes basses fréquences et fermeture du bilan d'énergie. Master 2ème année Océan Atmosphère et Surface Continentales.
- Groult, E., 2002, Traitement et exploitation d'images haute et basse résolution du satellite SPOT 4. Mémoire de Stage de fin d'études ENSEEIHT () , INPT, Toulouse, juin 2002.
- Levallois, G., 2001 : Comparaison de deux versions d'un modèle de redistribution latérale de l'eau par zones contributives (TOPMODEL) couplé à un modèle de transfert Sol-Plante-Atmosphère -(ISBA) appliqué à un bassin versant agricole (Auradé). Mémoire du DEA Océan, Atmosphère, Environnement, Université Paul Sabatier, Toulouse, juin 2001
- Magnac, M., Application de la méthode FAO à l'évaluation des ressources hydriques en région semi-arides et tempérées. Mémoire du DESUPS, Université Paul Sabatier (UFR-PCA), Toulouse, septembre 2002.
- Picard, S., 2003 : Mise au point d'un protocole de mesures de réflectance bidirectionnelle. 37 p. Stage IUT (Québec).
- Pierre, N., 2003 : ruissellement, érosion et inondation : modélisation hydrologique du bassin versant de la Hyse et mise en place d'un partenariat. Rapport stage de DESS « Géoingénierie de l'Environnement », Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Robert, O., 2004 : Etude des Flux de carbone en milieu agricole dans le cadre du projet CarboEurope. Licence Organismes et Biosphère, 3ème année, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Sivade, E., 2002 : Comparaison des modèles hydrologiques ISBATOP et SWAT sur le bassin versant d'Auradé (Gers). Mémoire de fin d'étude E.N.S.A.M D.A.A. « Physique des surfaces naturelles et génie hydrologique » (ENSAR) Avril 2002 – Septembre 2002
- Van Gijssel, J., 2003 : Mise en forme d'informations pédologiques sur le Sud-Ouest. Stage. Université de Wageningen - Hollande.

Vermer, F., 2002: Influence du milieu physique sur la variabilité interannuelle des flux de carbone en région Midi-Pyrénées (1998-1999). Mémoire du DEA Océan, Atmosphère, Environnement, Université Paul Sabatier, Toulouse, juin 2002.

Zurita-Milla, R., 2003 : Couplage STICS et télédétection. Stage ETSIAM - Cordoba - Espagne.

## 7 Disponibilités des données

Les données sont organisées en bases de données et fichiers SIG. Certains produits du projet, comme la carte d'occupation des sols 2002 d'une zone de 50x50 km en Midi-Pyrénées sont disponibles sur demande dès maintenant, ou le seront prochainement (après valorisation par des publications).

Les cartes annuelles d'occupation des sols (assolement annuel) ont été fournies aux équipes indiquées ci-après :

- ❖ CNRM/Météo-France
- ❖ INRA Pôle télédétection, Climat-Sol-Environnement Site Agroparc 84914 Avignon Cedex (F. Baret) Changement d'échelle et Modélisation.
- ❖ INRA Avignon (D. Courault)
- ❖ INRA Toulouse (équipe Statistiques) transfert d'échelles.
- ❖ INRA Toulouse Dynafor (Balent G.)
- ❖ INRA Toulouse Ecologie des Populations, Institut de Recherche sur les Grands Mammifères, Dr. A.J.M. Hewison., Analyse de Paysage et comportement animal. Amorce d'une collaboration autour du sujet de mémoire d'une stagiaire (licence PRO GGAT<sup>3</sup> Auch). « Caractérisation de l'espace occupé par des populations de chevreuil pour les années 2001,2002 et 2003. Utilisation de la télédétection et des SIG pour la mise à jour d'une base de données cartographiques.
- ❖ CEMAGREF Bordeaux, U R " Aménités et Dynamiques des Espaces Ruraux ", 50, avenue de Verdun à Gazinet - 33 612 Cestas cédex (Francis MACARY, Ingénieur-chercheur en agro-environnement (diagnostic par des indicateurs agro-environnementaux, cartographie du risque de pollution diffuse, 2004,2005). Collaboration IMAQUE. Prise en compte de la carte d'OS, variable utile à la construction des indicateurs agro-environnementaux.
- ❖ INRIA Collaboration Méthodologie. Publications.
- ❖ Université P. Sabatier, LADYBIO S. PONSARD. Utilisation des cartes d'occupation du sol pour la localisation des champs de maïs en vue d'établir le plan d'échantillonnage de la collecte des données (comptage des larves de deux espèces de Lépidoptères parasite du maïs).

## 8 Valorisation des résultats sur le site GICC

Résultats qui mériteraient d'être valorisés dans le site Internet GICC :

- Simulation de l'impact d'un changement d'occupation des terres sur le bilan hydrologique d'un bassin versant et de manière plus générale arguments en faveur d'une approche intégrée, aux échelles intermédiaires, du fonctionnement des surfaces continentales.
- Besoins en eau des cultures 2002 et 2003
- Photosynthèse brute et variabilité interannuelle, à moyenne résolution (1km)

---

<sup>3</sup> GGAT Génie Géomatique pour l'Aménagement du Territoire

## 9 Liste des illustrations

FIGURE 1 : ZONE D'ETUDE (CARRE BLEU) ET LOCALISATION DES SITES-EXPERIMENTAUX. A : BASSIN D'AURADE ; L : FERME DE L'ESAP (LAMASQUERE) ET F : SITE DU FAUGA. ....	7
FIGURE 2 : PARCELLE EXPERIMENTALE ET BASSIN VERSANT D'AURADE (43° 32' 58'' N, 01° 06' 28'' E), SURFACE 14 HA, MESURES COMMENCEES EN MARS 2004. ROTATION BLE-TOURNESOL-BLE-COLZA. ....	8
FIGURE 3 : SITE DE LAMASQUERE (43° 29' 36'' N, 01° 14' 14'' E) , SURFACE = 37 HA, EN 2002, MESURES COMMENCEES EN JUIN 2004 SUR MAÏS IRRIGUE. ROTATION, MAÏS-BLE(OU TRITICALE)-MAÏS-TOURNESOL.....	9
FIGURE 4 : EXEMPLE SUR UN EXTRAIT DU SUIVI DE LA VEGETATION (EN ROUGE) A L'AIDE D'UNE SERIE DE 10 IMAGES SPOT MULTISPECTRALES ENTRE MARS ET NOVEMBRE 2002 .....	10
FIGURE 5 : .....	11
FIGURE 6 : BASSIN VERSANT D'AURADE ET LOCALISATION DES TRANSECTS D'ECHANTILLONNAGE DU SOL.....	12
FIGURE 7 : EVAPOTRANSPIRATION DE REFERENCE, ANNEE 2002, MM.JOUR <sup>-1</sup> .....	15
FIGURE 8 : EXEMPLE DE COURBE DE COEFFICIENT CULTURAL DANS LE CADRE DE LA METHODE FAO. ....	15
FIGURE 9: REPARTITION DES SUCCESSIONS CULTURALES PRATIQUEES (2002-2003) DANS LA ZONE D'ETUDE.....	24
FIGURE 10 : REPARTITION DES SUCCESSIONS CULTURALES PRATIQUEES (2003-2004) DANS LA ZONE D'ETUDE.....	24
FIGURE 11 : CARTE DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION DES TERRES ENTRE 1991 ET 2002, SUD-OUEST DE TOULOUSE ..	25
FIGURE 12 : VARIATIONS DE LA TENEUR EN CARBONE DU SOL SUR LE TRANSECT A (SOUS-BASSIN 5) POUR L'HORIZON 0-30 CM.....	26
FIGURE 13 : VARIATIONS DE LA TENEUR EN CARBONE DU SOL SUR LE TRANSECT A (SOUS-BASSIN 5) POUR LES DIFFERENTS HORIZONS DU SOL .....	26
FIGURE 14 : VARIATIONS DE LA RESPIRATION DU SOL EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DU SOL LE LONG D'UNE TOPOSEQUENCE EN BLE (PREMIERS TRANSECTS DE CHAQUE JOURNEE DE MESURE) .....	27
FIGURE 15 : VARIATIONS SAISONNIERES DE LA RESPIRATION DU SOL POUR DEUX TYPES DE CULTURE SUR LE BASSIN VERSANT D'AURADE (GERS) .....	27
FIGURE 16 : VARIATIONS DE LA RESPIRATION DU SOL EN FONCTION DE LA HAUTEUR DU COUVERT SUR UNE CULTURE DE BLE .....	28
FIGURE 17 : VARIATIONS JOURNALIERES DE LA RESPIRATION DU SOL LE LONG D'UNE TOPOSEQUENCE EN TOURNESOL LE 04 MAI 2003.....	28
FIGURE 18 : EVOLUTION DE L'OCCUPATION DES TERRES SUR LA COMMUNE D'AURADE (SOURCE DES DONNEES : SCEES ET DDAF) .....	29
FIGURE 19 : EVOLUTION HISTORIQUE DE L'OCCUPATION DES TERRES DU BASSIN VERSANT D'AURADE.....	30
FIGURE 20 : EVOLUTION DU NOMBRE DE PARCELLES EN CULTURES PERENNES ENTRE 1850 ET 1993 .....	31
FIGURE 21 : EVOLUTION DES FLUX NETS DE CO2 SUR LES SITES D'AURADE ET DE LAMASQUERE ENTRE MARS ET AOUT 2005 .....	34
FIGURE 22 : EVOLUTION DES FLUX DE CHALEUR LATENTE (LE) ET SENSIBLE (H) A AURADE ENTRE MARS ET AOUT 2005. A PARTIR DU 02/06 LA SENESCENCE DES PLANTS DE COLZA EN PROVOQUE UNE CHUTE IMPORTANTE DES FLUX DE CHALEUR LATENTE AU BENEFICE DU FLUX DE CHALEUR SENSIBLE. ....	34
FIGURE 23 : ETUDE DE LA FERMETURE DU BILAN D'ENERGIE A LAMASQUERE ENTRE MARS ET AOUT 2005 .....	35
FIGURE 24 : MESURES PAR EDDY CORRELATION (EC) ET SIMULATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION JOURNALIERE SUR UNE JEUNE HETRAIE EN 2003. MESURES OBTENUES SUR LE SITE ATELIER DE LA FORET DE HESSE PAR LES EQUIPES COORDONNEES PAR A. GRANIER, INRA-NANCY. ....	35
FIGURE 25 : MESURE PAR LA METHODE DES CORRELATIONS ET SIMULATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION JOURNALIERE EN 2003 SUR UNE OLIVERAIE MAROCAINE. ....	36
FIGURE 26 : MESURE PAR LA METHODE DES CORRELATIONS ET SIMULATION DU FLUX NET DE CARBONE SEMI-HORAIRE EN 2002 SUR UNE OLIVERAIE MAROCAINE. ....	36
FIGURE 27 : MESURE PAR LA METHODE DES CORRELATIONS ET SIMULATION DU FLUX NET DE CARBONE JOURNALIER EN 2005 SUR UNE CULTURE DE COLZA (R <sup>2</sup> = 0.90), SITE D'AURADE .....	37
FIGURE 28 : MESURE PAR LA METHODE DES CORRELATIONS ET SIMULATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION JOURNALIERE EN 2005 SUR UNE CULTURE DE COLZA (R <sup>2</sup> = 0.82), SITE D'AURADE .....	37
FIGURE 29 : A GAUCHE, PHOTOSYNTHESE BRUTE EN 1998. AU CENTRE, ALTITUDES DE LA ZONE (MNT IGN, BD-CARTHAGE). A DROITE, DIFFERENCE DES PHOTOSYNTHESES BRUTES ESTIMEES EN 1998 ET 1999 (1999-1998).....	38

FIGURE 30. (A) PRECIPITATIONS CUMULEES EN 2002 ET 2003, DE JANVIER A AOUT. (B) DUREE D'INSOLATION JOURNALIERE, MOYENNEE MENSUELLEMENT, EN HEURES. (SOURCE : METEO-FRANCE). .....	39
FIGURE 31. INDICES DE VEGETATION SPOT EN 2002 (BLEU) ET 2003 (ROUGE) POUR LE BLE (A GAUCHE) ET LE MAÏS (A DROITE). VALEURS MOYENNES ET ECARTS TYPES SUR L'ENSEMBLE DE LA ZONE POUR LE MAÏS, POUR UNE DIZAINE DE PARCELLES POUR LE BLE. ....	40
FIGURE 32 : BESOINS EN EAU 2002, CUMULS MENSUELS EN MM – BLE, MAÏS, TOURNESOL, SOJA. PROJECTION LAMBERT II ETENDU, RESOLUTION 20M. ....	40
FIGURE 33: BESOINS EN EAU DU MAÏS EN MILLIONS DE M <sup>3</sup> PAR ZONE HYDROGRAPHIQUE, CUMULES DE JUIN AOUT 2002..	41
FIGURE 34. DEFICIT DE PRECIPITATIONS ET EXCES DES BESOINS EN EAU DES CULTURES EN 2003 RELATIVEMENT A 2002. EN BLEU : CUMUL DES DIFFERENCES DES BESOINS 2003-2002 ('ETC'). EN ROUGE, CUMUL DES DIFFERENCES DE PRECIPITATIONS 2003-2002 ('RAIN'). CAS DU MAÏS (A GAUCHE) ET DU BLE (A DROITE). ....	41
FIGURE 35 : SIMULATION DES BESOINS EN EAU (ETp), DE L'HUMIDITE DU SOL (Wc) ET DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE (ETr) D'UNE PARCELLE DE MAÏS NON IRRIGUEE( A GAUCHE) ET IRRIGUEE POUR PREVENIR LE STRESS HYDRIQUE. ANNEE 2002. LE VOLUME TOTAL D'IRRIGATION NECESSAIRE EST ESTIME A 235 MM, EN EXCELLENT ACCORD AVEC L'APPORT REALISE PAR L'AGRICULTEUR (230 MM). ....	42
FIGURE 36 : EVAPOTRANSPIRATION REELLE ESTIMEE EN 2002 ET 2003, POUR UNE ZONE DE 5X5 KM. METHODE FAO PILOTEE PAR DES DONNEES SPOT. LES VALEURS D'ETR DURANT L'ETE CORRESPONDENT A DES PARCELLES DE MAÏS IRRIGUEE. ....	42
FIGURE 37 : IRRIGATION DU MAÏS ESTIMEE EN 2002 ET 2003, POUR UNE ZONE DE 5X5 KM. METHODE FAO PILOTEE PAR DES DONNEES SPOT .....	43
FIGURE 38 : BESOINS EN EAU CUMULES SUR L'ANNEE, EN MM, POUR 2001 (A GAUCHE) ET 2002 (A DROITE). ESTIMATIONS PAR LA METHODE FAO COMBINEE AUX DONNEES SPOT4-VEGETATION .....	44
FIGURE 39 : DIFFERENCE DES BESOINS EN EAU CUMULES SUR L'ANNEE, EN MM : ANNEE 2000 MOINS 1999 (A GAUCHE) ET 2002 MOINS 2001 (A DROITE). ESTIMATIONS PAR LA METHODE FAO COMBINEE AUX DONNEES SPOT4-VEGETATION .....	44
FIGURE 40 : DIFFERENCES DES BESOINS EN EAU 2002 MOINS 2001 A) A INDICE DE VEGETATION NDVI CONSTANT ET CLIMAT REEL A GAUCHE, B) ET A CLIMAT CONSTANT ET NDVI REEL A DROITE. ....	44
FIGURE 41 : COMPARAISON DES BESOINS EN EAU, ETC, CUMULES ESTIMES PAR LA METHODE FAO PILOTEE A L'AIDE DE DONNEES A HAUTE (SPOT 20M, EN ROUGE) ET BASSE (VEGETATION 1KM, EN NOIR) RESOLUTIONS POUR L'ENSEMBLE DE LA ZONE COMMUNE D'ENVIRON 50X50 KM. ....	45
FIGURE 42 : SIMULATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE PAR ISBA EN 2003 (KG M <sup>-2</sup> J <sup>-1</sup> , OU MM J <sup>-1</sup> ). SIMULATION DE REFERENCE A GAUCHE (RESOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL ET DU LAI A 1KM) ET SIMULATION ALTERNATIVE AU MILIEU (DONNEES SPOT 20 M POUR L'OCCUPATION DU SOL ET LE LAI). LA COLONNE DE GAUCHE PRESENTE LA DIFFERENCE REFERENCE – ALTERNATIVE. ....	46
FIGURE 43 : EVAPOTRANSPIRATION REELLE TOTALE (MM JOUR <sup>-1</sup> ) MENSUELLE MOYENNE POUR L'ENSEMBLE DE LA ZONE DE 50X50 KM, EN 2002 (A GAUCHE) ET 2003 (A DROITE). SIMULATION DE REFERENCE (ECOCLIMAP), SIMULATION ALTERNATIVE SANS IRRIGATION (CESBIO-NI) ET AVEC IRRIGATION (CESBIO-I). ....	47
FIGURE 44 : EVAPOTRANSPIRATION REELLE MOYENNE (MM JOUR <sup>-1</sup> ) DU MAÏS EN 2002 ET 2003 POUR L'ENSEMBLE DE LA ZONE DE 50X50 KM AVEC (ROUGE) ET SANS IRRIGATION (NOIR). DANS CES SIMULATIONS, LE MAÏS OCCUPAIT 7% DE LA SUPERFICIE EN 2002 ET 10% EN 2003. ....	47
FIGURE 45 : DIFFERENCE (MM) ENTRE LES ESTIMATIONS D'EVAPOTRANSPIRATION CALCULEES RESPECTIVEMENT PAR LA METHODE FAO ET ISBA (SIMULATION ALTERNATIVE SPOT 20M), ZONE DE BLE EN 2002.....	47
FIGURE 46 : OCCUPATION DU SOL SUR LE BASSIN VERSANT D'AURADE ET SUR LE SOUS-BASSIN VERSANT N°4 EN 1999 ..	48
FIGURE 47 : COMPARAISON DES DEBITS OBSERVEES AUX DEBITS SIMULES PAR SWAT ET ISBATOP SUR LE SOUS-BASSIN VERSANT N°4 DU BASSIN VERSANT D'AURADE AVEC UN TYPE DE SOL ET UNE OCCUPATION DU SOL DISCRETISEE POUR LE MODELE SWAT. EFFICIENCE (COEFFICIENT DE NASH) : ISBATOP=65%, SWAT = 41%. ....	49
FIGURE 48: VARIATION DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES EN FONCTION DE L'OCCUPATION DU SOL SUR LE BASSIN VERSANT DE LA HYSE : MOYENNES ANNUELLES SUR 5 ANS.....	50
FIGURE 49 : IMPACT SIMULE D'UN ACCROISSEMENT DES SUPERFICIES DES FORETS ET DES PRAIRIES SUR LE DEBIT A L'EXUTOIRE DU BASSIN VERSANT DE LA HYSE : MOYENNES ET ECART-TYPES MENSUELS SUR 5 ANS .....	51