

## Plan du rapport

Introduction	p1
Contexte de l'étude	
Les prairies : une surface devenue culture	p2
Les démarches de l'INRA	p3
Une base de données collectée sur le Massif Vosgien et des notions de typologie de prairie	p3
Objectifs de l'étude	p4
Etude préliminaire	p5
Travail sur les types fonctionnels	
Classification de l'ensemble des graminées prairiales de la base de données.	p8
Caractérisation de types pour les prairies.	p11
Travail sur les caractéristiques parcellaires	
Les paramètres sols	p13
Fertilisation azotée et date des apports	p14
Rendements observés et dates de coupes.	p14
Travail sur les données climatiques	
Description et analyse de la base de données AURELHY	p16
Création de zones géographiques et climatiques homogènes.	p18
Création de variabilité climatique journalière à partir de données AURELHY	p19
Simulations de rendements avec STICS	
Présentation de l'outil de simulation STICS.	p22
Constitution des fichiers de travail.	p23
Méthode d'analyse des résultats.	p26
Comparaison et analyse globale de l'ensemble des simulations	p28
Analyse des simulations afin d'évaluer l'impact des différents facteurs.	p29
Discussion des résultats des simulations.	p31
Discussion et conclusion de l'étude	
Des résultats assez éloignés de l'objectif initial.	p33
Des résultats intermédiaires intéressants.	p34
Perspectives.	p34
Conclusion.	p36
Bibliographie	p37
Annexes	



## Introduction

Les modèles de culture sont maintenant des outils couramment utilisés aussi bien comme outil de recherche que d'enseignement ou de choix de techniques culturales. La question du domaine de validité est néanmoins toujours posée avant chaque application, qu'il s'agisse de la validité spatiale et temporelle ou de la validité des sorties utilisées (productions, besoins en eau et en azote, drainage, lessivage).

Pour les prairies, le modèle STICS a été adapté et testé en différentes étapes (Tiers, 1998 ; Ruget et al, 1998, Ruget et al, 1999). Néanmoins les données qui ont servi à (calibrer et surtout) valider le modèle proviennent pour la plupart de stations expérimentales, et correspondent donc à des conditions de culture assez optimales (ou temporairement stressés) et de plaine (Ruget et al, 2006). Or les prairies sont adaptées à tous les milieux, et peuvent donc se développer dans des milieux défavorisés et en altitude. C'est pourquoi il paraît indispensable de pouvoir porter un jugement sur la qualité des estimations produites dans ces conditions. La moindre productivité des prairies d'altitude est difficilement estimée. C'est pourquoi il paraît indispensable d'analyser les causes possibles de mauvaise estimation.

Des résultats récents prouvent l'intérêt de la prise en compte des traits de vie des espèces prairiales (traits dits fonctionnels) pour prédire des fonctions éco systémiques (Ansquer et al, 2006). Il s'agit de vérifier dans des conditions réelles la pertinence des traits d'effets moyens pour la prédiction d'une fonction essentielle sur le plan agronomique : le rendement fourrager de prairies permanentes.

Des données récoltées sur le Massif Vosgien permettent d'aborder ces questions. Il s'agit d'estimations de production à partir de mesures simples (comptages de balles, chargement, durée de pâture,...) (Plantureux et al, 2007). Ces observations fournissent la partie "données observées" à comparer à des données simulées par le modèle STICS.

A partir de tous ces éléments, nous tenterons, après analyses des différentes données mises à disposition, de juger de la pertinence du modèle à simuler des productions dans des prairies de zones peu productives, parfois désignées « défavorisées ».



## Contexte de l'étude

L'étude qui a été menée repose sur de nombreux éléments qu'ont impliqué sa mise en place. Nous citerons ici les principaux, sachant qu'ils sont en interactions avec d'autres plus mineurs.

### *Les prairies : une surface devenue culture ...*

Les prairies permanentes furent sans doute la première « culture » de l'homme. Cependant, son statut a beaucoup évolué pendant ces dernières années, et les modes de conduite beaucoup changé. A l'origine simples surfaces de pâture pour les animaux, sauvages ou domestiques, les pâtures furent peu à peu valorisées afin de les adapter aux besoins de l'homme : fauche pour préparer l'hiver, puis fertilisation pour permettre de meilleurs rendements, puis autres pratiques de plus en plus techniques (sur semis, fertilisation minérale, prairies temporaires, ...).

Cette « culture » est donc une entité à part entière, dont les objectifs et les itinéraires techniques ne sont pas comparables à ceux des grandes cultures. Souvent moins rentables économiquement que les cultures de ventes, la prairie permanente a donc vu sa surface diminuer en France il y a une centaine d'années. Pourtant, depuis quelques années, notamment avec les changements de la Politique Agricole Commune et son second pilier (mesures environnementales), et avec une reprise des marchés des bovins et ovins, la prairie a tendance à reprendre un peu plus d'intérêts pour certains acteurs.

La prairie, de part sa nature et son origine, est très particulière. En effet, elle est composée non pas par une ou deux espèces, mais par la cohabitation de plusieurs dizaines, de groupes, genres différents. la prairie est présente partout, en particulier là où aucune autre culture ne pourrait se développer.

Grâce à sa conduite économique et à son rôle environnemental reconnu, la prairie permanente est donc un sujet de recherche d'actualité, notamment pour les zones « défavorisées » de l'agriculture, comme les zones de montagnes, où les prairies sont les seules cultures possibles, en permettant des marges économiques honorables pour les agriculteurs.



### ***Les démarches de l'INRA (recherche et développement)***

Les prairies permanentes sont donc un sujet de recherche actuel et permanent, au niveau de nombreux centres techniques (Arvalis, Cemagref, ...), mais aussi dans des organismes comme l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique).

Depuis plusieurs années, des équipes de chercheurs travaillent sur le fonctionnement des prairies, sur leurs modes d'exploitation, sur leurs compositions floristiques, ainsi que sur d'autres caractéristiques agronomiques, dans le but de mieux connaître cette culture, mais aussi de permettre une amélioration des rendements à travers une meilleure gestion de la flore et des interactions entre espèces, une meilleure caractérisation des besoins et des cycles de production, une adaptation des espèces prairiales aux besoins des animaux ou des agriculteurs, ...

Plusieurs équipes de l'INRA travaillent sur les prairies permanentes, en étudiant plus particulièrement les aspects pour lesquels ils sont spécialisés. Ainsi, à Avignon, une équipe de recherche travaille sur la modélisation des rendements des prairies, par l'intermédiaire d'un logiciel, STICS, développé par ses soins pour les grandes cultures. Une adaptation de ce modèle a été réalisée depuis dix ans pour les prairies. Cette adaptation a débouché sur la création d'un réseau de suivi, nommé ISOP (commandité par le Ministère de l'Agriculture), qui modélise pour la France entière et par mois l'état des prairies et une estimation de la variabilité de la production par rapport à une référence de la même période (Ruget et al, 2006).

Cependant, il a été observé par le suivi de ce réseau une sur évaluation de la production en zone de montagne. Dans un objectif d'amélioration du modèle, il est donc intéressant pour l'équipe CSE 'Climat Sol et Environnement', de l'INRA d'Avignon, de travailler sur un jeu de données de prairies permanentes de montagne.

### ***Une base de données collectée sur le Massif Vosgien et des notions de typologie de prairie***

Dans ce même but de mieux comprendre et de mieux caractériser les prairies, une équipe de l'UMR Agronomie et Environnement de l'INRA de Nancy Colmar a entrepris durant les années 2000 à 2004 des suivis floristiques et agronomiques sur 119 parcelles du Massif Vosgien. Cette étude a abouti sur une classification en 11 types des prairies permanentes du Massif basée sur des dominances d'espèces prairiales (Plantureux et al, 2006).

Dans un même temps, à l'INRA de Toulouse, des travaux sont menés depuis de nombreuses années sur la recherche d'une classification des espèces prairiales, et plus

**Encadré 0** : Notion de type fonctionnel définis à partir de traits foliaires.

Niveau de ressources		Capture de ressources (milieux riches)	Conservation de ressources (milieux pauvres)
Régime de défoliation			
<b>Recyclage rapide des organes</b> (défoliation fréquente et rase)	Production de biomasse élevée, plafond de croissance rapidement atteint, digestibilité élevée	<i>Surface spécifique et teneur en eau des feuilles élevées, durée de vie des feuilles courte, phénologie précoce</i>	Production de biomasse faible, plafond de croissance atteint tardivement, digestibilité faible
	<b>Recyclage lent des organes</b> (défoliation peu fréquente et/ou partielle)	Production de biomasse élevée, plafond de croissance atteint tardivement, digestibilité assez élevée	Production de biomasse faible, plafond de croissance atteint très tardivement, digestibilité très faible

**Tableau 1 : Les caractéristiques agronomiques de communautés et leurs TFP associés (en italique) selon quatre stratégies types**

Extrait de l'article de Fasçade n° 18, (Cruz et al, 2003)

particulièrement des graminées, à partir des traits fonctionnels tels que la Teneur en Matière Sèche (TMS) ou la surface spécifique des feuilles (Specific Leaf Area), théoriquement caractéristique de chaque espèce (Duru et al, 2004, Cruz et al, 2002)(**Encadré 0**). Ainsi, la caractérisation en types A, B, C ou D a permis de proposer une classification stable d'une quinzaine d'espèces de graminées prairiales. Des études sont toujours en cours afin d'étendre cette classification à une quarantaine d'espèces supplémentaires (INRA de Toulouse).

### *Objectifs de l'étude*

La base de données de l'équipe de Nancy constitue une source d'informations riche sur des prairies permanentes de moyenne montagne. C'est pourquoi Françoise Ruget, responsable de la partie « prairie » sur STICS, a envisagé d'utiliser cette source pour évaluer le modèle en moyenne montagne. Ceci permet également pour l'équipe de Nancy de valoriser sa base et de permettre une analyse différente de celles qu'elle avait pu mener jusque là.

Cependant, il faut rappeler que la base qui sera utilisée n'a pas été acquise pour cette étude. Ceci implique qu'une partie importante du travail sera de « mettre en forme » la base de données du Massif Vosgien afin de transcrire ses informations en données utilisables par STICS.

Une utilisation optimale du logiciel STICS nécessite également la mise en place ou l'acquisition d'une méthode de représentation simplifiée de la prairie, « culture de référence » du modèle. La classification en types fonctionnels développée à l'INRA de Toulouse a donc semblé proposer des caractéristiques adaptées à nos problèmes, notamment par la limitation des groupes (4 seulement) et le caractère « universel » qu'elle semble pouvoir proposer à travers les traits de vie. Un des premiers travaux est donc de proposer une méthode pour étendre la typologie élaborée à Toulouse à l'ensemble des graminées pérennes recensées sur le massif.

Le but de l'étude est donc, dans un premier temps, de compléter, d'analyser et d'extraire de la base les informations nécessaires à STICS. Parallèlement, un travail a été mené sur les types fonctionnels et sur les espèces prairiales, afin tout d'abord de proposer une mise en relation (statistique) de caractères reflétant le comportement de la prairie et de groupes d'espèces (groupes fonctionnels) et définis à partir de traits mesurables, tels que la TMS. Ensuite, à partir de simulations de STICS et des données observées sur le Massif Vosgien, l'efficacité du modèle à prédire des rendements de moyenne montagne est évaluée. Enfin, ces résultats devraient permettre de mieux cibler les pistes d'amélioration possibles du modèle, et de mieux comprendre les différences.

**Tableau 1** : Liste des variables de la base initiale exploitable pour le traitement empirique

ID_PARC	Identifiant des parcelles
Rdt_tot_moy	Rendement moyen, en t MS/ha
alti	Altitude, en m
pen	Pente, en %
expo	Exposition, en degrés
H_S	Humidité simplifiée (sec, sain, ...)
bhc_1 à bhc_12	Bilan hydro climatique par mois (janvier à décembre)
som_bhc	Somme des bilans hydro climatiques
dh_1 à dh_12	Déficit hydrique par mois (janvier à décembre)
som_dh	Somme des déficits hydriques
etp_1 à etp_12	Evapotranspiration potentielle par mois (janvier à décembre)
cn	Rapport Carbone/Azote du sol
ph	pH du sol
rad_1 à rad_12	Rayonnement global par mois (janvier à décembre)
ru	Réserve Utile du sol
tmax_01 à tmax_12	Température maximale par mois (janvier à décembre)
tmax_13	Moyenne annuelle des températures maximales
tmin_01 à tmin_12	Températures minimales par mois (janvier à décembre)
tmin_13	Moyenne annuelle des températures minimales
tmoy_01 à tmoy_12	Température moyenne par mois (janvier à décembre)
tmoy_13	Moyenne annuelle des températures moyennes
p_01 à p_12	Précipitations par mois (de janvier à décembre)
P	Somme des précipitations annuelles
TYP_04	Type prairial défini par la typologie Massif Vosgien
ppc	Pression de pâturage en classe
de	Date de première exploitation
A_f	Quantité d'apports de fertilisation (en classe)
N_c	Nombre de coupes par an
NP	Indice d'azote de Ellenberg
ECP	Indice d'état calcique de Ellenberg
HP	Indice d'état hydrique de Ellenberg

## Etude préliminaire

Dans le but de mieux connaître la base de données initiale, mais surtout de mieux visualiser les relations entre productions observées et caractéristiques du milieu, il nous a paru intéressant de mener un étude statistique afin de construire une relation empirique permettant d'exprimer les principales variables influençant le rendement des parcelles. Les traitements ont été réalisés à l'aide du logiciel SAS. Ne seront ici présentés que les résultats les plus pertinents et dégageant les tendances les plus marquées.

### Méthode :

Plusieurs traitements ont été mis en place, afin d'évaluer au mieux quelles variables présentes dans la base initiale (**Tableau 1**) avaient le plus d'impact sur le rendement final d'une part, et sur le rendement de première coupe d'autre part. A chaque fois, la procédure de régression de type Step-wise Forward de SAS est utilisée.

### Résultats :

Les premiers traitements, effectués sur une seule année de référence (année 2004, pour laquelle les données étaient les plus complètes), ont montré la trop forte corrélation de la variable « nombre de coupes » avec le rendement final (masquant les autres relations), ainsi que certaines corrélations impossibles d'un point de vue agronomique ou chronologique (ex : fort impact de la température minimale d'août sur le rendement de première coupe).

Suite à ces premiers traitements, certaines variables de la base initiale ont donc été supprimées, sur critères logiques. Ainsi, les variables pédo climatiques de la période hivernale (octobre à mars) ont été supprimées, ainsi que la variable « Nombre de coupes », qui était trop liée au critère « Rendement ». Il a également été jugé préférable de soumettre à la procédure l'ensemble des données observées, et non plus seulement une seule année de référence. Les résultats obtenus, même présentant un coefficient de corrélation moindre, seront ainsi plus pertinents et la régression plus robuste.

En prenant la base entière « épurée » des variables incohérentes avec le rendement, nous avons un modèle avec un  $r^2=30\%$  et 10 variables (**Encadré 1**).

**Encadré 1** : Traitement avec les rendements totaux moyens, sans la variable « nombre de coupes ».

Variables Observées prises en compte pour le premier traitement empirique :

- altitude
- pente
- exposition de la parcelle
- niveau d'humidité dans la parcelle
- indices C/N et pH
- réserve utile en eau du sol
- toutes les données climatiques au cours des mois : bilan hydro climatique, déficit hydrique, ETP, radiations, températures maximales, minimales et moyennes, précipitations
- type de prairie
- date de 1ère exploitation
- pression du pâturage
- apport de fertilisation
- NP (indice d'azote d' Ellenberg), ECP (indice d'état calcique d' Ellenberg), HP (indice d'état hydrique d' Ellenberg)

Résultats :

1	P	(Précipitations annuelles AURELHY)	+
2	tmin_13	(Températures minimales moyennes AURELHY)	+
3	ECP	(état calcique de la prairie)	+
4	A_f	(Apport de fertilisation Azotée)	+
5	de	(date de première exploitation)	+
6	alti	(altitude de la parcelle)	-
7	ph	(valeur du pH du sol de la parcelle)	-
8	cn	(indice C/N du sol de la parcelle)	-
9	tmax_13	(Températures maximales moyennes AURELHY)	+
....10	som_dh	(Somme des déficits hydriques de la parcelle sur l'année)	-

*Les variables sont présentées dans l'ordre décroissant de leur contribution à la régression.*

Malgré le faible coefficient de corrélation, le modèle obtenu semble cohérent avec la théorie. L'ordre des variables qu'il met en place dans la régression est intéressant : l'importance des précipitations et de l'apport de fertilisation sont confirmés, mais aussi celles de l'altitude, et des nombreux paramètres pédologiques. Ceci va donc pouvoir servir de base pour une meilleure analyse et une meilleure exploitation de la base de données.

Cependant, toutes ces premières régressions n'ont pris en compte que les variables quantitatives de la base ou des variables qualitatives transformées en quantitatives. Certaines variables ne pouvant être transcrites en quantitatives avaient donc été simplement supprimées de l'analyse. Cette méthode pose cependant un certain nombre de problèmes, notamment l'élimination de certaines variables qui peuvent être assez bien corrélées au rendement, mais qui sont de caractère qualitatif. C'est pourquoi d'autres traitements ont été envisagés afin de permettre une meilleure caractérisation du rendement à travers des variables mieux adaptées.

Ne pouvant, dans la limite de nos connaissances et de nos capacités, effectuer des régressions de type step-wise avec un mélange de variables quantitatives et qualitatives, l'ensemble des variables qualitatives a dû être traduit en variables quantitatives.

Devant l'impossibilité de traiter l'ensemble des variables (près d'une centaine), un tri a été effectué sur les variables quantitatives (avec test de corrélation et élimination sur critères agronomiques) et sur les variables qualitatives (avec test du Khi<sup>2</sup>).

Les variables qualitatives sélectionnées ont subi une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC, procédure CORMU sur SPAD), qui a permis de récupérer les coordonnées des différentes parcelles selon les axes de l'AFC. A l'aide des diagrammes, les 2 axes créés ont pu être définis par les variables qualitatives les composant.

Par cette méthode, on obtient donc pour les différentes parcelles des coordonnées que l'on peut faire correspondre avec les variables qualitatives caractérisant ces axes. L'ensemble des variables ainsi obtenues peuvent donc être caractérisées par des valeurs quantitatives. Pour les variables quantitatives, la même sélection que précédemment a été effectuée, afin de ne garder que les variables acceptables d'un point de vue agronomique. Par contre, quatre autres variables correspondant aux sommes de températures ont été ajoutées, calculées sur la base de 0°C et à partir du 1er avril, les degrés jours obtenus au 1er mai, 1er juin, 1er juillet et 1er octobre, de façon à caractériser la précocité de production. Les variables qualitatives étant en nombre restreint, toutes ont été conservées pour l'AFC.

**Encadré 2 :** Traitement avec les rendements totaux moyens, avec tri des variables pertinentes d'un point de vue agronomique.

Variables Observées prises en compte pour le traitement :

- altitude
- pente
- exposition de la parcelle
- niveau d'humidité dans la parcelle
- indices C/N et pH
- réserve utile en eau du sol
- uniquement les données climatiques correspondant aux mois de végétation (de mars à septembre)
- type de prairie
- date de 1ère exploitation
- pression du pâturage
- apport de fertilisation
- NP (indice d'azote d' Ellenberg), ECP (indice d'état calcique d' Ellenberg), HP (indice d'état hydrique d' Ellenberg)
- sommes des degrés jours au 1<sup>er</sup> mai, 1<sup>er</sup> juin, 1<sup>er</sup> juillet et 1<sup>er</sup> octobre.
- Coordonnées Axe 1 de l'AFC des variables qualitatives
- Coordonnées Axe 2 de l'AFC des variables qualitatives

Résultats :

1	pente (Pente moyenne de la parcelle)	-
2	P (Précipitations moyennes annuelles AURELHY)	+
3	som_bhc (Somme du Bilan Hydro Climatique de la parcelle)	+
4	ECP (Etat Calcique de la Prairie)	+
5	tmax (température maximale moyenne annuelle AURELHY)	+
6	som_defhyd (Somme des Déficits Hydriques sur la parcelle)	-
7	tmin (température minimale moyenne annuelle AURELHY)	-
8	dj_juin (Somme des degrés jours au 1 <sup>er</sup> juin)	+
9	dj_juil (Somme des degrés jours au 1 <sup>er</sup> juillet)	+
10	dj_mai (Somme des degrés jours au 1 <sup>er</sup> mai)	+
11	Axe_2 (Variable discriminante de l'Axe 2 de l'AFC : type tiré de la typologie du Massif Vosgien)	+

*Les variables sont présentées dans l'ordre décroissant de leur contribution à la régression.*

L'AFC présente au final 2 axes, définis à 13% et 10%. La récupération des coordonnées des parcelles sur les axes permettra de traiter ces variables qualitatives, indirectement, en régression.

Le modèle obtenu met en jeu onze variables, avec un  $r^2=23\%$ (Encadré 2). Ce nouveau modèle, même si son coefficient de corrélation est encore plus faible, amène de nouveaux éléments. Il est tout d'abord intéressant de voir que certaines variables sont toujours aussi importantes : Précipitations, températures, pente, déficits hydriques, ... Cependant, ce modèle confirme aussi par l'AFC l'importance du type prairial. La sortie des sommes de degrés jour ouvre également une voie pour d'éventuelles simulations basées sur ce critère (Trnka, 2006).

### Conclusion :

Cette étude a permis de dégager plusieurs points :

- ✓ la difficulté d'avoir une régression simple et efficace, dès lors que les variables « trop » explicatives du rendement sont écartées (ex : nombre de coupes). Les différentes régressions obtenues et retenues présentent donc un nombre important de variables, ainsi qu'un  $r^2$  peu élevé.
- ✓ l'importance confirmée à plusieurs reprises de certaines variables : altitude, pente, températures minimales et maximales, précipitations, variables du sol (RU, C/N, ...), somme des déficits hydriques, mais aussi Type selon la typologie Massif Vosgien (TMV)(Plantureux et al, 2006).

Ces observations orientent donc les choix à faire dans l'étude à venir, avec le logiciel de simulation STICS. Elles mettent en évidence les variables, sur lesquelles il sera nécessaire de travailler.

Avant de débiter les simulations avec le modèle, il paraît indispensable de mieux connaître la base initiale, et de travailler sur ces paramètres fortement déterminants du rendement :

- le type prairial
- les itinéraires techniques et leur suivi
- le climat et l'altitude.

**Tableau 2** : Liste des variables utilisées pour la classification C2, et statut des variables lors du traitement des données.

Variable	Définition	Statut			
		Traitement 1	Traitement 2	Traitement 3	Traitement 4
		Toutes les espèces sont actives	Seules les espèces typées par P CRUZ sont actives	Toutes les espèces sont actives	Seules les espèces typées par P CRUZ sont actives
N	Indice de Ellenberg par rapport à l'azote (échelle de 1 à 10)	VA	VA	VA	VA
RC	Indice de Ellenberg par rapport à la résistance aux coupes fréquentes (échelle de 1 à 10)	VA	VA	VA	VA
RP	Indice de Ellenberg par rapport à la résistance au piétinement (échelle de 1 à 10)	VA	VA	VA	VA
CRS	Stratégie de Grimme (Competitive, Resistant ou Stress tolerant)	VA	VA	VA	VA
Floraison	Début de floraison de l'espèce	VA	VA	VA	VA
SLA	Specific Leaf Area	VA	VA	VI	VI
LDMC	Leaf Dry Matter Content	VA	VA	VI	VI
VF	Valeur Fouragère (échelle de 1 à 10)	VI	VI	VI	VI
LF	Largeur des feuilles	VI	VI	VI	VI
SF	Surface des feuilles	VI	VI	VI	VI
RS	Stratégie de reproduction	VI	VI	VI	VI
PC	Type défini par Pablo CRUZ selon la méthode Duru	VI	VI	VI	VI

VA : Variable Active  
VI : Variable Inactive

## **Travail sur les types fonctionnels.**

L'importance de cette partie repose sur deux observations importantes :

- le traitement empirique a mis en évidence l'importance des paramètres « types fonctionnels » sur le rendement. Il semble donc nécessaire, afin de mieux comprendre la suite des simulations, de travailler sur les espèces de graminées de cette base de donnée. Une bonne analyse et une classification justifiée de ces espèces étant nécessaire à l'utilisation de la base.
- les propriétés du modèle de simulation STICS en lui-même. Afin de pouvoir adapter ce modèle aux prairies permanentes, il est nécessaire de pouvoir représenter une prairie par une espèce ou par un type d'espèce dominant et représentatif. Plusieurs travaux ont déjà été effectués sur ce sujet, proposant des méthodes de caractérisation des prairies naturelles en fonction de traits biologiques des espèces la composant (Cruz et al, 2002).

Les travaux de l'équipe de Toulouse (dont Pablo Cruz, Michel Duru, Jean Pierre Theau, Pauline Ansquer) présentent une classification de quelques espèces prairiales en 4 types permettant l'appréciation de la valeur d'usage d'une prairie. Cette typologie, propose l'évaluation des espèces non par relevés botaniques, mais par mesure d'un ou plusieurs traits foliaires (TMS et SLA, principalement) (Cruz et al, 2003). Nous appellerons par la suite « type fonctionnels » (ou TF) les types issus de cette classification.

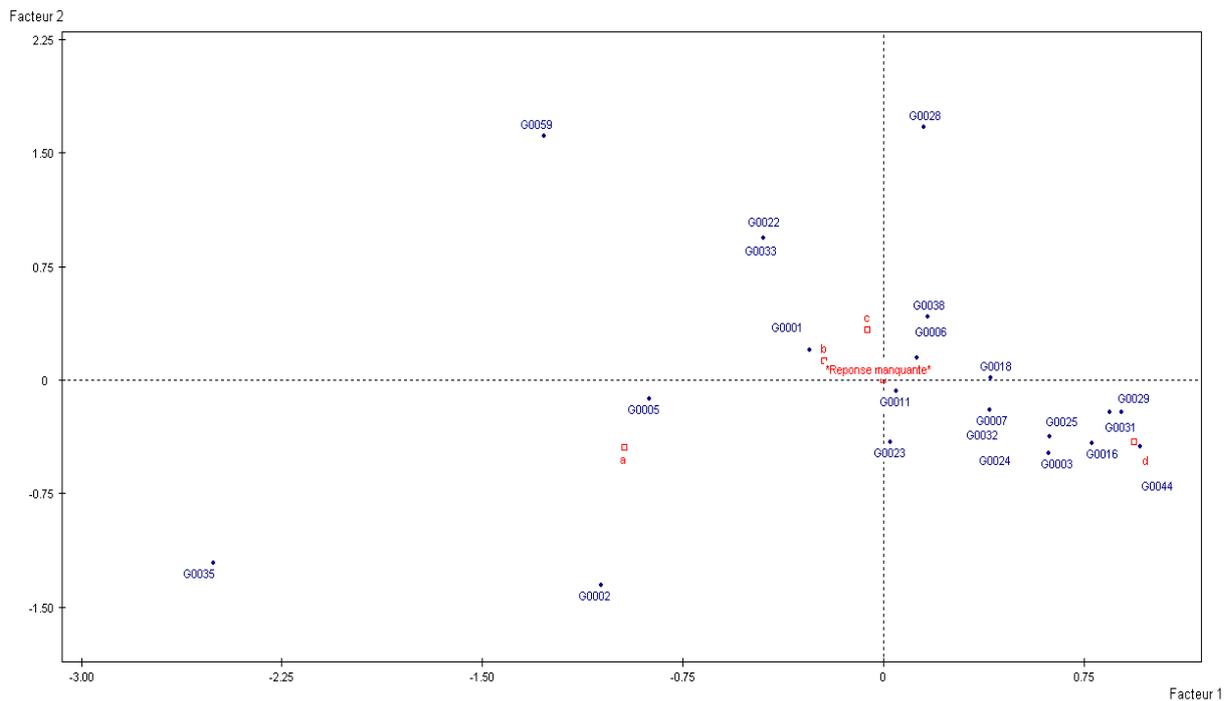
A partir de cette typologie, nous tentons de classer les espèces non caractérisées dans les différents types, par une AFC. Cette classification des graminées prairiales en types fonctionnels débouche ensuite sur une proposition de classification des prairies elles mêmes, toujours en fonction du type fonctionnel. Cette seconde classification sera ensuite utilisée pour les simulations, afin de mieux juger de l'importance des paramètres d'entrée « plante » sur les sorties du modèle.

### ***Classification de l'ensemble des graminées prairiales de la base de données.***

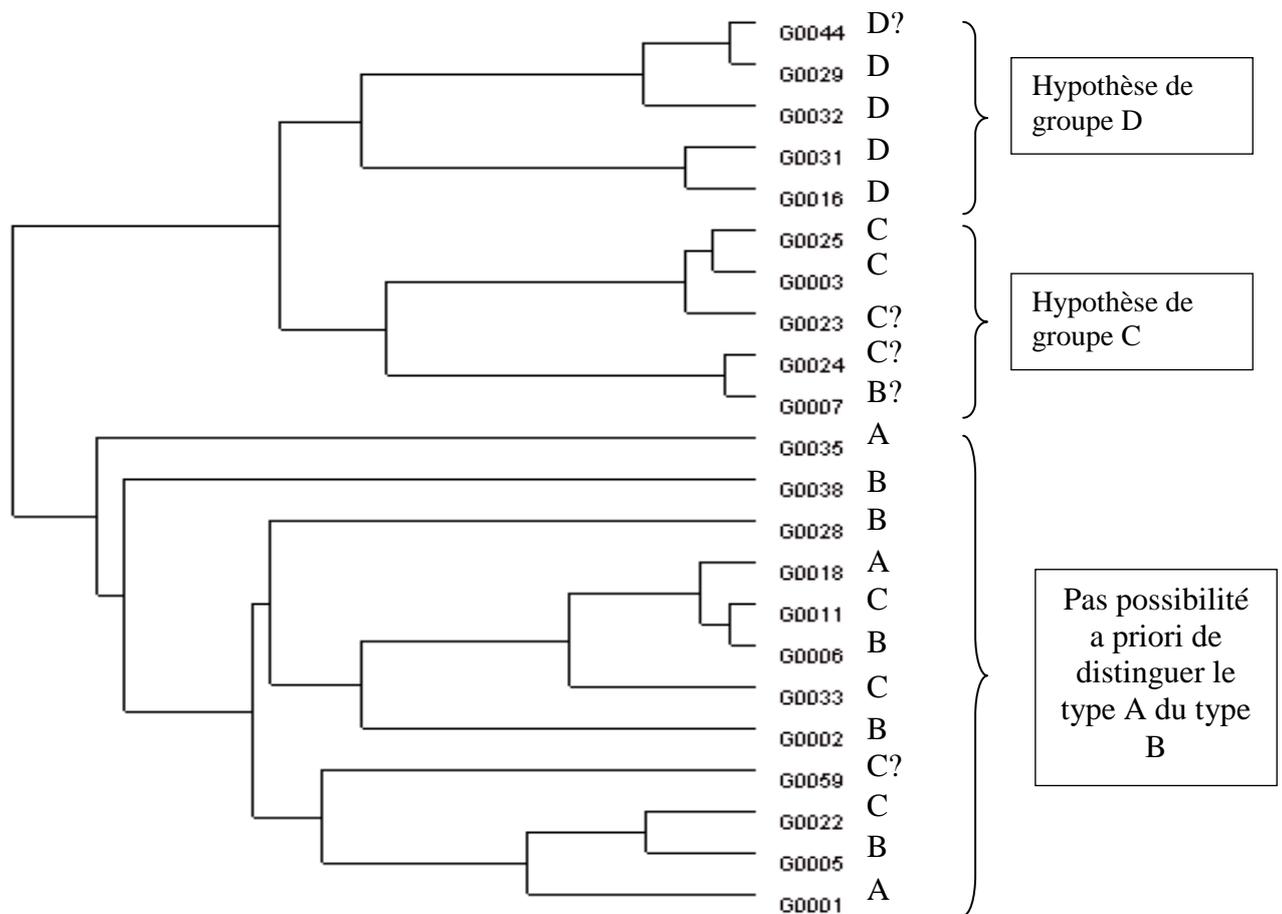
L'objectif premier est donc de classer les différentes espèces répertoriées dans les prairies du Massif Vosgien afin de pouvoir utiliser STICS, qui ne fonctionne qu'avec au maximum deux cultures de référence. Il est donc nécessaire d'avoir au final une espèce représentative de la prairie permanente ciblée.

Les graminées présentant la principale source de biomasse dans la prairie, le but sera de mettre en place une classification permettant la représentation d'une prairie et donc de nombreuses espèces par l'intermédiaire d'une classe.

**Figure 1** : Sortie de l'AFC, espèces actives (bleu) et types fonctionnels (rouge).



**Dendrogramme 1** : Classification hiérarchique directe, validation de la méthode.



Pour cette raison, la classification en TF, présentée par Duru et al a été adoptée. Il a été établi que le fonctionnement des communautés végétales peut être traduit par des caractéristiques biologiques pertinentes des espèces dominantes qui les composent (Ansquer et al, 2004).

Cette classification en groupes fonctionnels a été construite en fonction de la réponse des espèces aux variations de facteurs du milieu ou de leur effet sur le fonctionnement de l'écosystème prairial (Duru et al, 2007) (**Encadré 0**).

La première étape, afin de pouvoir répartir les différentes espèces de graminées vosgiennes dans la classification TF, a donc été une analyse à dire d'expert par l'intermédiaire de Pablo Cruz, co-auteur. Certaines espèces ont donc pu être classées en A, B, C ou D, suivant les études ayant déjà été effectuées par leur équipe.

Cependant, un grand nombre de graminées n'ont pas pu être classées, la mesure de la TMS (à la base de la classification TF) n'ayant pas été effectuée pour toutes les espèces de graminées.

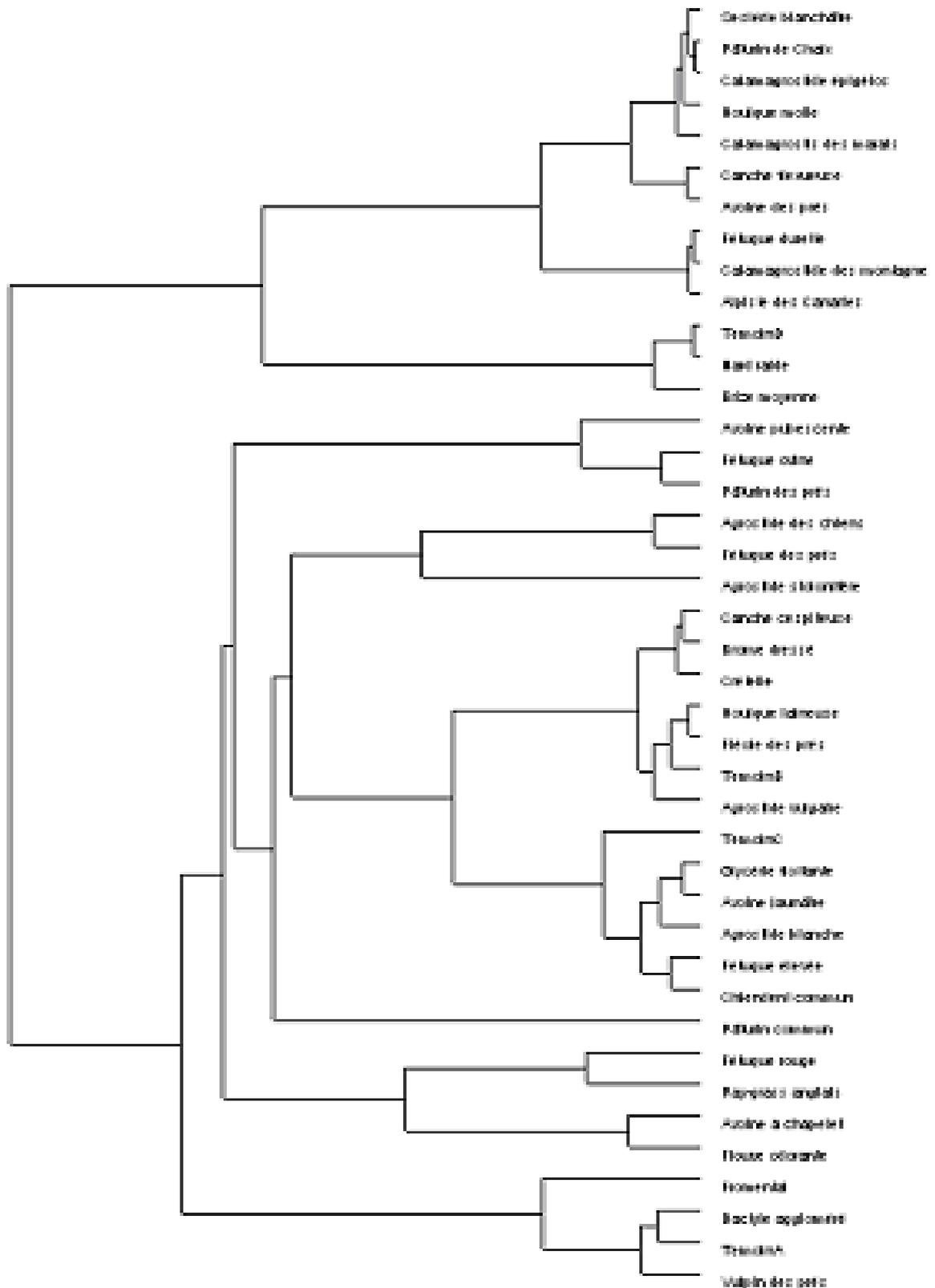
Dans le but de confirmer ces résultats et, par extension, de classer les espèces non reconnues, une AFC a été réalisée. Les individus traités ont été répartis en 2 classes : ceux identifiés par Pablo Cruz comme appartenant à un certain type (A, B, C ou D), et ceux non classés.

Comme nous ne disposons pas toujours des données nécessaires pour caractériser les traits biologiques utilisés par l'équipe de Duru, d'autres caractéristiques ont été mises en place en essayant d'approcher au mieux les traits d'origine (**Tableau 2**): teneur en azote (N), résistance aux coupes fréquentes (RC), résistance au piétinement (RP) stratégie CRS, valeur fourragère (VF), surface et largeur des feuilles (SF et LF), période et durée de floraison (Flo), et type reconnu par Pablo Cruz (PC). Les valeurs de ces paramètres, pour chaque espèce, ont été tirées de la bibliographie.

En plus de ces critères, les traits SLA et TMS ont été ajoutés, pour les espèces sur lesquelles des mesures ont été effectuées. Cependant, en aucun cas les mesures n'ont été réalisées sur les plantes étudiées. Des valeurs différentes pour une même espèce ont même été trouvées dans la bibliographie. C'est pourquoi ces valeurs ont été prises en compte avec la même pondération que les autres critères, malgré la place importante qu'ils occupent dans la typologie TF.

L'AFC a été réalisée avec le logiciel SPAD 5.5. A chaque fois, une analyse des correspondances multiples a été effectuée, suivie d'une classification sur facteurs puis d'une coupure de l'arbre et description des classes.

**Dendrogramme 2** : Classification hiérarchique directe, extrapolation de la méthode



## Résultats :

Les résultats obtenus montrent l'importance de prendre en compte le maximum de variables actives, au vu du grand nombre de modalités présentes dans l'analyse. C'est pourquoi nous ne nous intéresserons ici qu'aux traitements prenant comme variables actives N, RC, RP, CRS, Floraison, SLA et TMS.

Deux traitements sont présentés ici : celui prenant l'ensemble des espèces comme actives, ce qui permet de regrouper l'ensemble des espèces et de les classer selon les différents types, et un traitement ne prenant comme actives que les espèces qui ont été identifiées par Pablo Cruz comme étant de tel ou tel type. Ceci nous permettra de confirmer cette analyse à dire d'expert par une analyse de données.

Pour chaque traitement, les résultats obtenus semblent cohérents. En effet, l'ordre des modalités des différentes variables, actives ou illustratives, est respecté, tout comme l'ordre des types A B C ou D

### *a. Validation de la méthode avec les types fonctionnels.*

Après un traitement sous SPAD, et en mettant en parallèle le type identifié par Pablo Cruz, on obtient les résultats présentés avec la **figure 1** et le **dendrogramme 1**. Les espèces pour lesquelles le type n'a pas été clairement identifié, mais pour lesquels Pablo Cruz émettait une hypothèse, sont indiquées avec un point d'interrogation. Pour les autres espèces, le type indiqué a été confirmé par les chercheurs de l'équipe Agronomie et Environnement de l'INRA de Nancy.

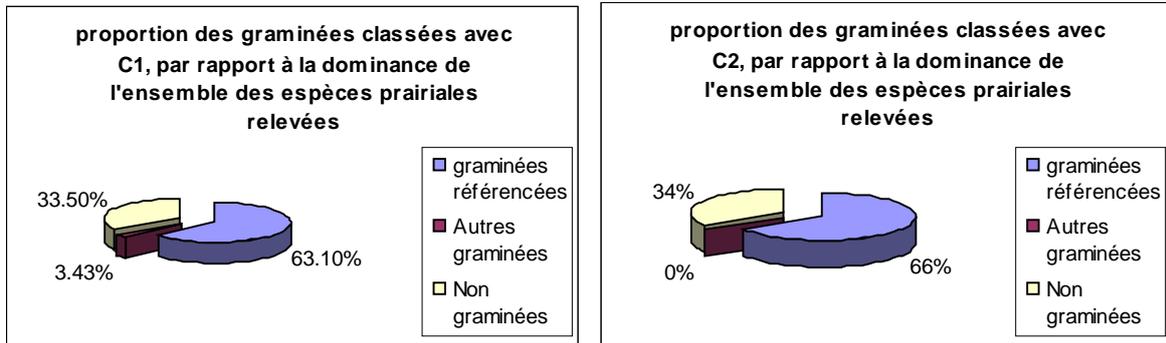
A partir de ce dendrogramme, il est assez facile de distinguer, en replaçant les informations de Pablo Cruz, les types D et C. Par contre, les types A et B se différencient assez mal.

Cette analyse prouve tout de même la cohérence des résultats de l'équipe de l'INRA de Toulouse avec la méthode de classification ici proposée, malgré le fait qu'ils ne reposent pas sur les mêmes variables de départ. Ceci nous permet donc d'extrapoler cette analyse aux autres espèces de graminées prairiales afin de proposer une classification comprenant la totalité des espèces présentes.

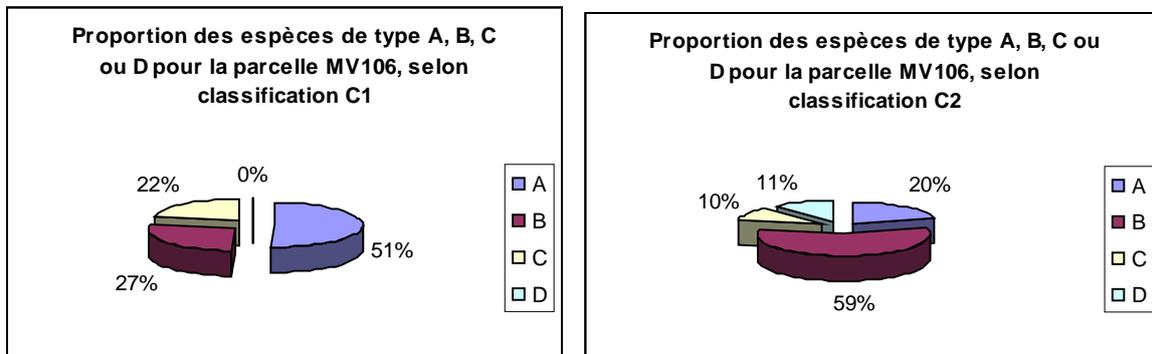
### *b. Extrapolation de la méthode pour la classification de l'ensemble des espèces de graminées.*

Des traitements intermédiaires ont montré une mauvaise discrimination des différents types A B C et D, par manque d'informations dans la base, comparé au nombre de variables manquantes. Pour pallier à ce problème, la base a été complétée par des informations théoriques. Ceci a été effectué en prenant pour principe que lorsqu'on connaît la SLA ou la TMS, on peut en déduire le type fonctionnel, et inversement. Ces affirmations sont basées sur

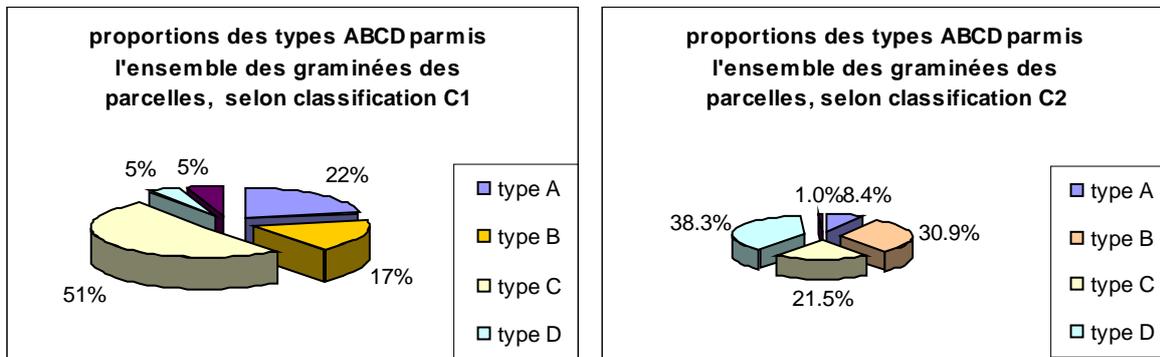
**Figure 2 :** Comparaison de la proportion de graminées classées avec C1 et C2



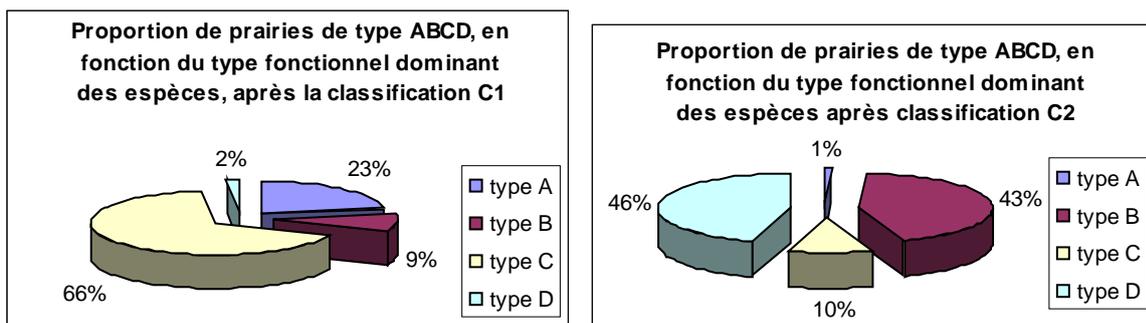
**Figure 3 :** Exemple de la parcelle MV106, type B selon C1 ou type D selon C2.



**Figure 4 :** Impact du choix de la classification sur la typologie des espèces, pour l'ensemble des parcelles



**Figure 5 :** Impact du choix de la classification sur la typologie des prairies.



les observations de l'équipe de Duru et al, ainsi que sur les thèses de Raouda Al Haj Khaled (2005), Pauline Ansquer (2006), et du mémoire de fin d'étude d'Aurélié Thébault (2004). A partir de cette base complétée par la littérature, et en appliquant la même méthode que précédemment, le **Dendrogramme 2** nous permet de dresser des hypothèses de classifications (**Tableau 3**). Après observation des différentes analyses effectuées, une première classification de toutes les espèces de graminées contenues dans la base de donnée du Massif Vosgien a été proposée. Celle-ci a ensuite été discutée avec des experts. La classification retenue est donc celle présentée dans le **Tableau 4**.

### *Caractérisation de types pour les prairies*

Un travail de typologie des graminées a été mené. Cependant, les prairies étant constituées de dizaines de genres et d'espèces différentes, il est nécessaire pour l'utilisation de STICS d'appliquer une méthode à partir de la typologie mise en place pour caractériser les parcelles elles mêmes. Dans la majorité des situations, les graminées représentent la majorité de la biomasse, et du fait expliquent la grande partie des rendements. Nous pouvons donc accepter une typologie exclusivement « graminées » pour caractériser les parcelles. Sur les données dont nous disposons, il a été évalué pour chaque parcelle la dominance relative de chaque espèce (note en %). C'est donc à partir de celles-ci que nous allons travailler.

#### Méthode et Résultats:

A partir des classifications obtenues après AFC, la dominance relative des types fonctionnels A, B, C et D a été calculé pour chaque parcelle, et ceci pour les classifications d'origine (C1) et celle modifiée et complétée par nos soins (C2). Ceci a permis de caractériser chaque parcelle par le type fonctionnel qui était le plus représenté, en dominance (**Figures 3 et 4**).

Ainsi, nous pouvons observer que la classification C1, qui ne comprend pas la majorité des espèces, représente à elle seule 95% de la dominance, en moyenne, dans les parcelles étudiées. Toutes les AFC et études préliminaires n'ont donc pour impact que 3.4 % en moyenne (**Figure 2**).

Cependant, les types acquis par l'AFC et activés dans la classification C2 entraînent une caractérisation très différente des prairies (**Figure 5**). En effet, seules 26 prairies sur 116 sont typées identiquement selon que l'on prend la classification C1 ou C2.

Beaucoup de prairies sont donc passées du type A au type B, et du type C au type D. Ceci peut être dû en partie à l'arrivée de nouvelles espèces typées, mais surtout au passage de

**Tableau 3** : Passage de la classification C1 à C2.

Type A	Type B	Type C	Type D
Vulpin des prés ?? <u>Houlque laineuse</u> Ray grass anglais	Frommental Dactyl aggloméré Fétuque élevée <u>Fétuque des prés</u> Flouve odorante Pâturin commun  Chiendent commun Glycérie flottante Brome dressé Houlque laineuse	Avoine pubescente Fléole des prés Avoine jaunâtre Agrostide stolinifère ?? Agrostide des chiens ?? Agrostide vulgaire Fétuque rouge Pâturin des prés  Crételle Agrostide blanche Fétuque des prés Canche cespiteuse	<u>Canche cespiteuse ??</u> Brize moyenne Canche flexueuse <u>Fétuque ovine ??</u> Nard raide ??  Avoine à chapelet Alpiste des canaries Calamagrostide des montagnes Fétuque durette Seslérie blanchâtre Calamagrostide des marais Avoine des prés Houlque molle Calamagrostide epigéos Pâturin de chaix

*Légende :*  
 noir : type proposé par Pablo CRUZ, avec ?? ses suggestions (classification C1)  
 rouge : type proposé après AFC, avec ?? les incohérences qui ont pu être suspectées  
 → Espèce passée d'une classe à une autre après analyse de l'AFC

**Tableau 4** : Classification retenue, désignée ensuite classification C2.

Type A	Type B	Type C	Type D
Vulpin des prés Ray grass anglais	Frommental Dactyl aggloméré Fétuque élevée Flouve odorante Pâturin commun Chiendent commun Glycérie flottante Brome dressé Houlque laineuse	Avoine pubescente Fléole des prés Avoine jaunâtre Agrostide stolinifère Agrostide des chiens Agrostide vulgaire Fétuque rouge Pâturin des prés Crételle Agrostide blanche Fétuque des prés Brize moyenne Fétuque ovine	Canche cespiteuse Canche flexueuse Nard raide Avoine à chapelet Alpiste des canaries Calamagrostide des montagnes Fétuque durette Seslérie blanchâtre Calamagrostide des marais Avoine des prés Houlque molle Calamagrostide epigéos Pâturin de chaix

quelques espèces d'un type à l'autre, entre les deux classifications (**Tableau 3**). Il est remarquable que certaines graminées, telles que la Houlique Laineuse, la Canche cespiteuse, la Fétuque ovine et la Fétuque des prés, prennent une place importante au sein des prairies vosgiennes.

Il apparaît donc important de réfléchir à la manière de typer les prairies avec les types fonctionnels des espèces : faut-il prendre en compte le type majoritaire, ou plutôt une combinaison de plusieurs types (ex : 20%A, 50%B, 20%C, 10%D ...) (Duru et al, 2007). Encore faudrait-il que le modèle STICS arrive à simuler des combinaisons de cultures ..., ce qui n'est pas possible pour le moment avec plus de deux cultures de références !

Il apparaît également important de s'interroger, une nouvelle fois, sur les mesures des traits servant de base à la typologie mise en place (Viégas et al, 2005, Poozesh et al, 2005). Il serait donc intéressant d'évaluer l'évolution de ces traits au cours des différents stades des graminées, mais aussi au cours de leur « vie » au sein de la culture (après une coupe, après une deuxième coupe, lors de coupes journalières ; pâturage, ...), et également comparer les différentes mesures selon des sols différents, des climats différents, ...

### ***Conclusion sur le travail avec les types fonctionnels.***

Ce travail est intéressant par ses résultats et par son originalité. Originalité du fait de la méthode de la classification : non pas uniquement sur des traits fonctionnels comme la TMS ou la SLA, mais sur de nombreux facteurs, faciles à trouver dans la littérature pour un grand nombre d'espèces. Cette classification semble donc plus robuste face à des types dont certains paramètres sont mal connus au long du cycle et des pratiques culturales.

Les résultats obtenus sont donc assez positifs, puisqu'ils permettent de définir clairement un groupe d'espèces D, un groupe A et un groupe BC (non différenciables par les analyses menées). Dans notre cas d'analyse des prairies de montagne, ceci montre l'importance de différencier le groupe D (présent proportionnellement en grand nombre par rapport aux autres zones géographiques) des autres groupes lors des traitements et des simulations.

Mis à part ce résultat à part entière de classification des espèces de graminées prairiales par types fonctionnels, ceci nous permettra par la suite de justifier la création au niveau de STICS de deux fichiers « plantes » avec des paramètres différents : un fichier pour les prairies de type B, C, A, et un fichier pour les prairies de type D. Des simulations avec un fichier plante prairie standard (utilisé actuellement pour toutes les simulations prairies) permettra de juger de l'efficacité de cette nouvelle dichotomie.

**Tableau 5** : Caractéristiques des sols attribués

n° de sol	profondeur	Réserve Utile	teneur en argile (%)	Teneur en N org (%)
10	30	25.336	9.5	0.05
11	40	31.272	9.5	0.05
12	50	40.972	9.5	0.05
13	70	52.844	9.5	0.05
18	60	62.85	9.5	0.05
19	70	70.8	9.5	0.05
162	80	78.81	9.5	0.2
24	100	94.71	9.5	0.05
25	110	102.7	9.5	0.05

## **Travail sur les caractéristiques parcellaires (sols, techniques, productions observées).**

Dans le but de simuler des productions, le renseignement des itinéraires techniques est très important : apport de fertilisation, dates de fauches, dates de pâtures, ... sont autant de paramètres ayant une grande influence sur le rendement final (Trnka, 2006). Lors de l'utilisation du logiciel de simulation de rendement STICS, il est donc impératif de renseigner avec le plus de précision possible ces critères.

De même, ayant pour objectif de tester l'efficacité du modèle, il est nécessaire d'avoir au préalable une base de données complète des rendements observés par coupe, par parcelle, et par an, afin de pouvoir les comparer aux simulations du modèle.

Cependant, la base fournie ne contenait pas au départ toutes ces informations. Un travail pour compléter ces données a donc été fourni à partir de valeurs théoriques et de valeurs à dire d'experts.

### ***Les paramètres « sol ».***

Dans la base initiale, pour chaque parcelle étaient renseignés la Réserve Utile (RU), le pH et le rapport C/N. Le logiciel STICS n'utilisant pas directement ce type d'information, mais des caractéristiques d'un sol (texture, composition en éléments, ...), il a été nécessaire de créer un fichier, à partir des informations de la base, de sols spécifiques au Massif Vosgien.

Après recherches d'informations et de contacts auprès de l'ENGREF, il ne nous a pas été possible de trouver des cartes pédologiques couvrant toute la zone et à une précision supérieure au 1/1.000.000 (Piedallu, 2006). Les mailles alors représentées étant beaucoup trop importantes pour la taille des parcelles, il a été décidé de raisonner sur les valeurs de RU connues pour chaque parcelle, ceci étant le paramètre des sols ayant le plus d'influence sur le rendement au niveau du logiciel STICS (Ruguet, 2002).

Pour cela, 8 sols ont été repris à partir d'études effectuées quelques années plus tôt sur des sites Vosgiens. Pour chaque sol, correspondant à des arènes granitiques (Podzols), la profondeur a été adaptée pour obtenir différentes valeurs de RU. Pour chaque parcelle, un sol a donc été ensuite attribué en fonction de la RU qu'il présentait.

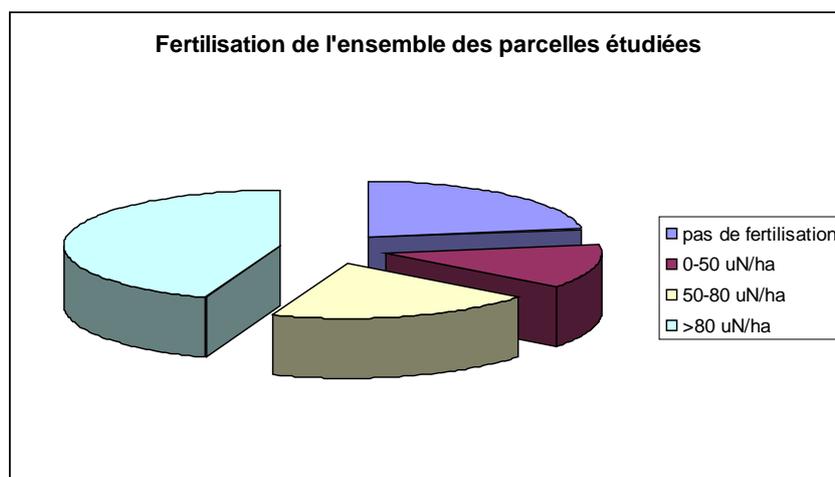
Cette méthode est donc loin d'être exacte et précise. Mais elle a permis de constituer des sols sans nécessiter d'analyses, et présentant une valeur de RU (paramètre ayant le plus d'impact sur le rendement) proche de la réalité, ceci en utilisant une gamme de sols déjà

**Tableau 5** : Méthode d'attribution de dates de fertilisation.

Classe d'altitude/Classe de Fertilisation N	400-600 m	600-800 m	800-1000 m	1000-1200 m
<b>0-50 unités :</b> 1 seul apport de <b>40</b> unités	Jour 60	Jour 70	Jour 80	Jour 90
<b>50-80 unités :</b> 2 apports de <b>40</b> , puis <b>30</b> unités	Jour 60 et Jour 90	Jour 70 et Jour 100	Jour 80 et Jour 110	Jour 90 et Jour 120
<b>&gt;80 unités :</b> 2 apports de <b>50</b> unités	Jour 60 et Jour 90	Jour 70 et Jour 100	Jour 80 et Jour 110	Jour 90 et Jour 120

*Remarque : la date de pâturage n'est présente que pour les prairies mixtes, et pas nécessairement toutes les années.*

**Figure 6** : Fertilisation azotée des parcelles.



utilisés par STICS dans certaines zones de moyenne montagne. Il est important de préciser que ces sols sont définis comme « à plat », ce qui écarte tout phénomène de ruissellement, mais aussi tout effet d'orientation, de versants, ou autre.

Cependant, il est certain que cette approximation est très grossière, et que les imprécisions sur les caractéristiques des sols seront à prendre en compte lors de l'analyse des simulations (peut être une source d'erreurs !).

#### ***Fertilisation azotée et date des apports.***

La fertilisation azotée est reconnue par tous comme étant un des facteurs principaux du rendement en matière sèche. C'est pourquoi il est important de bien renseigner les informations relatives à ce facteur pour une bonne appréciation de STICS (Brisson, 2002).

Dans les parcelles étudiées, la fertilisation organique est la source majoritaire d'apport azoté, notamment par le biais des restitutions animales. La base initiale est donc renseignée en quantité d'apports organiques, ce qui permet (à partir de divers coefficients) de calculer la quantité d'azote réellement apportée par hectare. La quantité d'azote apportée par an varie fortement en fonction des parcelles (**Figure 6**). Cependant, la base ne mentionne ni la date de l'apport, ni la possibilité de fractionnement. Ne disposant donc d'aucune information sur ces pratiques, un schéma théorique a été appliqué pour l'ensemble des parcelles, en fonction de la quantité apportée et de l'altitude. Ainsi, la répartition théorique a été mise en place comme présenté dans le **Tableau 5**. Cette attribution théorique, même si inexacte, permet dans un souci de temps de répondre de manières approximative et globale aux réalités du terrain. Mais comme pour les sols précédemment, cette généralisation et les incertitudes qu'elle implique seront à prendre en compte dans l'analyse finale des simulations.

#### ***Rendements observés et dates de coupes.***

Par rapport aux données « rendements observés » et « dates de coupes », un double objectif se présente : pour les simulations à proprement parler, et pour la comparaison post-simulation entre rendements observés et rendements simulés, dont nous nous servons pour analyser la pertinence des simulations. Il est donc très important pour les simulations et pour les résultats de l'étude d'avoir des données observées les plus précises possibles.

Dans la base de données initiale, pour chaque parcelle est indiquée son mode d'exploitation (Fauche, Pâture ou Mixte), sa date de première exploitation, le nombre de coupes effectuées dans l'année, ainsi que les rendements annuels (sur les années 2000 à 2004) de fauche et de pâture. Ces données ont été obtenues par l'intermédiaire de relevés d'agriculteurs. Pour le rendement de fauche, le nombre de bottes a été multiplié par le poids moyen d'une botte. Pour le rendement de pâture, il a été estimé à partir du nombre d'UGB et de leur temps de passage.

**Tableau 6** : Méthode d'attribution des dates de coupe par parcelle.

Nombre de coupes	Date 1 <sup>ère</sup> coupe	Date 2 <sup>ème</sup> coupe	Date 3 <sup>ème</sup> coupe	(Date pâturage)
1	$C1=DPE$			$(P=C1+30)$
2	$C1=DPE$	$C2=C1+60$		$(P=C1+30)$
3	$C1=DPE$	$C2=C1+60$	$C3=C2+40$	$(P=C1+30)$
4	$C1=DPE$	$C2=C1+60$	$C3=C2+40$	$P=C3+30$

*DPE : Date de Première Exploitation, date caractéristique pour une parcelles et pour l'ensemble des années.*

La marge d'erreur estimée sur ces données est de 15% environ (Plantureux, communication personnelle). Cependant, pour la majorité des cas, seul le rendement total annuel est mentionné : la répartition par coupe n'apparaît que très rarement. De même, les seules dates à disposition sont les « dates de première exploitation », attribuées à une parcelle pour l'ensemble des années. Ne sont donc renseignés ni les dates exactes de première coupe, années par année, ni les dates des coupes suivantes. L'analyse des plannings de pâturage dans les différentes Chambres d'Agriculture (Vosges, Haut et Bas Rhin) a permis de compléter en partie la répartition du rendement global sur les différentes coupes, mais jamais les dates de coupe.

Pour pallier à ce problème, la base a été une nouvelle fois complétée à partir d'informations théoriques et de dires d'experts. Ainsi, pour les parcelles où ne figurait que le rendement total pour l'année, la répartition suivante a été effectuée :

$$\text{Rendement total} = 2/3 (1^{\text{ère}} \text{ coupe}) + 1/3 (2^{\text{ème}} \text{ coupe}).$$

De plus, un autre problème a été l'insertion du pâturage dans le rendement global, et surtout pour l'attribution d'une date de coupe fixe (nécessaire pour le modèle). En effet, lors d'une pâture, les animaux sont laissés plusieurs jours ... mais la base ne nous renseigne pas sur les dates où a lieu la pâture. C'est pourquoi cette dernière n'a pu être prise en compte avec exactitude. Une généralisation a, là encore, été obligatoire, à la fois par manque de données observées et par nécessité du modèle de faire une coupe à une seule date (et non la répartir sur une durée ...).

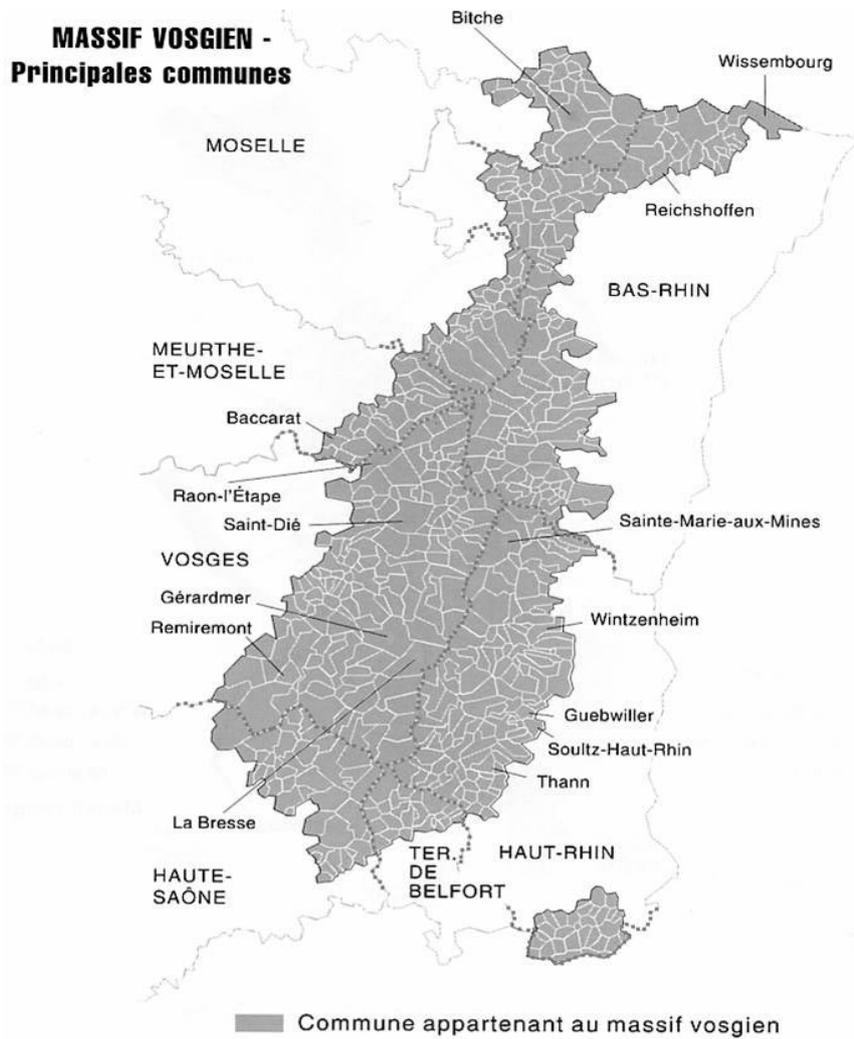
Pour toutes ces raisons, les dates de coupes et les données observées ont été complétées suivant le **Tableau 6**, toujours à partir de la date de première exploitation propre à la parcelle traitée.

### ***Conclusion :***

La base initiale de données observées a donc été complétée en grande partie par des informations tirées de la théorie. Les grandes faiblesses de ces valeurs sont donc la globalisation, et le manque de variabilité interannuelle. Le grand nombre de données, le manque de suivi et d'observations directes et l'impossibilité de retrouver ces éléments de pratiques changeant au cours des années n'a pas permis de mener des réflexions au cas par cas (par exemple, en fonction de l'altitude, de la proximité de l'exploitation, ...)

Au final, nous avons donc une base assez approximative, mais permettant d'effectuer des simulations avec STICS et de les comparer. Il ne faudra donc pas être trop ambitieux sur la précision des résultats et des comparaisons !

Figure 7 : Le Massif Vosgien.



## Travail sur les données climatiques.

Le traitement empirique effectué préalablement à ce travail a montré la grande influence des données climatiques sur le rendement final observé, notamment les précipitations, l'altitude et les températures maximales.

Au niveau de la base de données des prairies du Massif Vosgien (**Figure 7**), nous avons une caractérisation d'un climat par parcelle, calculé par la méthode AURELHY (Benichou et al, 1987). Sont donc à disposition par parcelle les températures minimales et maximales, les évapotranspirations, les précipitations et les rayonnements globaux, mais sous forme de moyennes mensuelles interannuelles.

Au vu de l'importance de ces variables sur le logiciel de simulation STICS, ainsi que de l'obligation d'avoir des données à pas de temps journalier, un travail important a été effectué sur ces données.

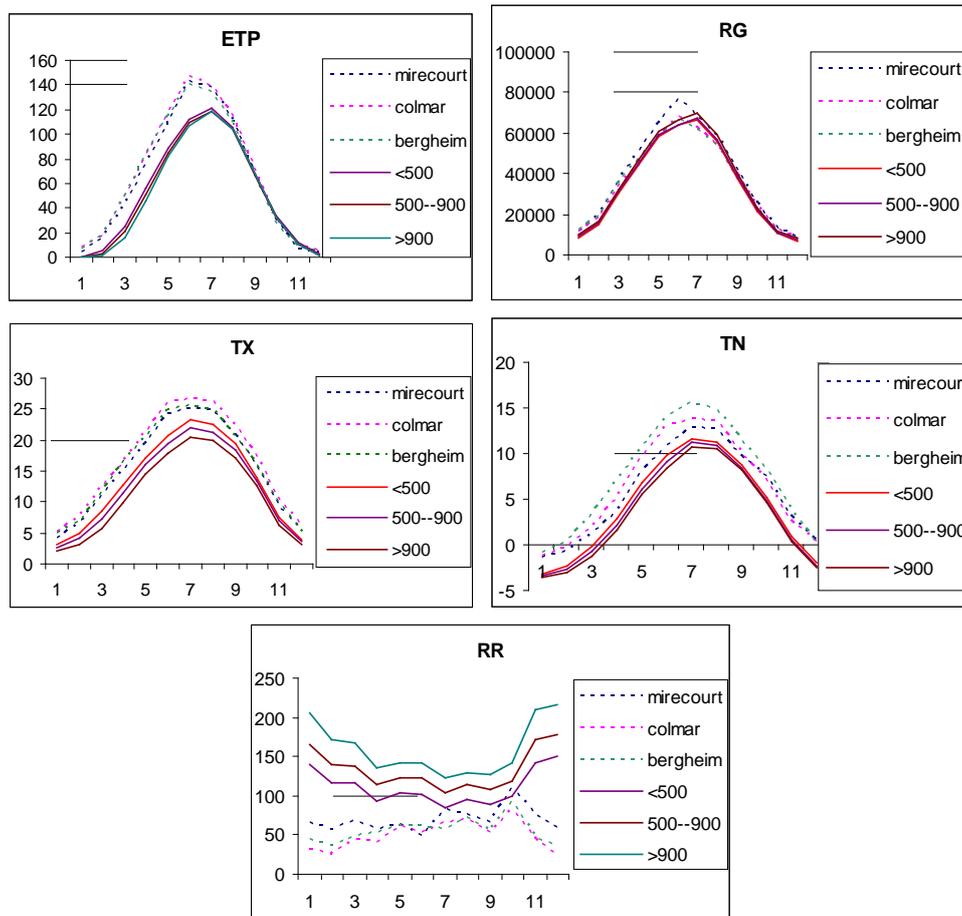
### *Description et analyse de la Base de Données AURELHY \_ Comparaison aux stations expérimentales des INRA de Colmar, Bergheim et Mirecourt*

Les données auxquelles nous avons eu accès (AURELHY) nous ont été fournies sous forme de moyenne, parcelle par parcelle et mois par mois. Cependant, STICS travaille à intervalles de temps journalier, ce qui pose donc un problème : comment transcrire les données mensuelles en données journalières, ou encore comment créer de la variabilité sur les données ?

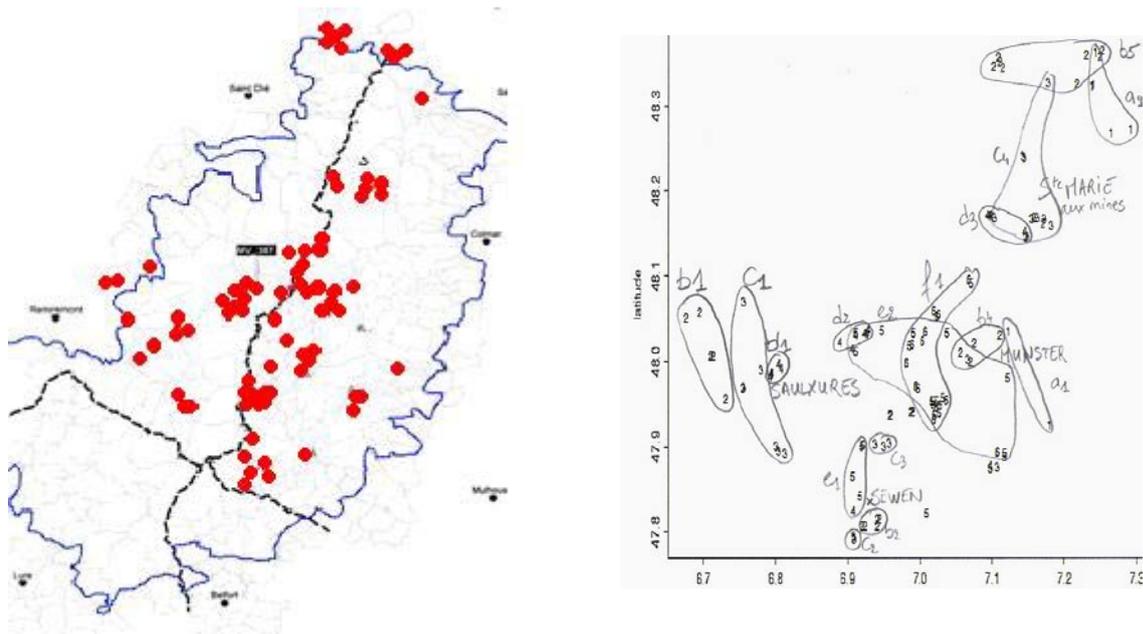
Pour cela, plusieurs possibilités ont été envisagées :

- travailler avec un générateur climatique, programmé pour apporter une variabilité journalière sur la base de moyennes de variations observées sur grande période.
- demander les données climatiques à Météo France, à partir de stations se trouvant sur les hauts des Vosges, et qui ont donc sensiblement les mêmes conditions climatiques que les parcelles. Cette hypothèse sera écartée compte tenu du coût financier qu'elle nécessite.
- créer nous même une variabilité à partir de relevés de stations expérimentales INRA situées autour du massif vosgien. Le problème est que ces stations sont en plaine, et que les conditions climatiques ne sont pas les mêmes ! Il faudra donc, à partir de nos données, essayer d'établir des corrélations les plus fines possibles pour pouvoir transposer les variations journalières.

**Figures 8 :** Comparaison des données AURELHY brutes avec les données des stations expérimentales INRA.



**Figures 8 bis :** Illustration de la méthode de création des zones géoclimatiques homogènes.



De toute manière, il paraît important de mieux observer et analyser les données, afin de pouvoir les comparer plus efficacement aux différents jeux de données que nous pourrions leur confronter.

### Méthodologie.

#### 1. Analyse de nos données et comparaisons avec celles des stations de l'INRA

Il existe autour du Massif Vosgien trois stations météorologiques du réseau INRA : Mirecourt, dans la plaine vosgienne, située à environ 50km des premières parcelles, Colmar et Bergheim, dans la plaine Alsacienne connue pour son microclimat particulièrement doux. C'est pourquoi aucune, a priori, ne semble convenir pour décrire exactement les conditions hydro climatiques sur les parcelles étudiées. Toutefois, il est intéressant de se pencher plus en détail sur ces données et de les comparer entre elles afin de se rendre compte des différences et des corrélations qu'il serait possible d'établir.

Pour chaque variable des données INRA, une moyenne (sur les 7 années : 2000 à 2006) mois par mois est effectuée, afin de pouvoir comparer aux données parcelles. Les variables étudiées sont : ETP Penman, pluviométrie, températures maximales et minimales, et rayonnement global.

Pour les données parcelles, il a été fait la moyenne, variable par variable, de toutes les parcelles. Après différents tris de données, des traitements ont également été mis en place pour comparer les variables selon l'altitude (<500m ; de 500 à 900m ; >900m) et selon l'exposition (Est ; Nord ; Sud ; Ouest) de la parcelle.

#### 2. Création de variabilité à partir du générateur climatique LARSWG4

Le générateur climatique a pour but de créer de la variabilité climatique en se basant sur des années de référence. On obtiendrait donc des années moyennes. L'objectif ici est d'obtenir de la variabilité climatique journalière, mais aussi interannuelle.

L'utilisation du générateur climatique ne nous est donc pas opportun ici.

### Conclusion :

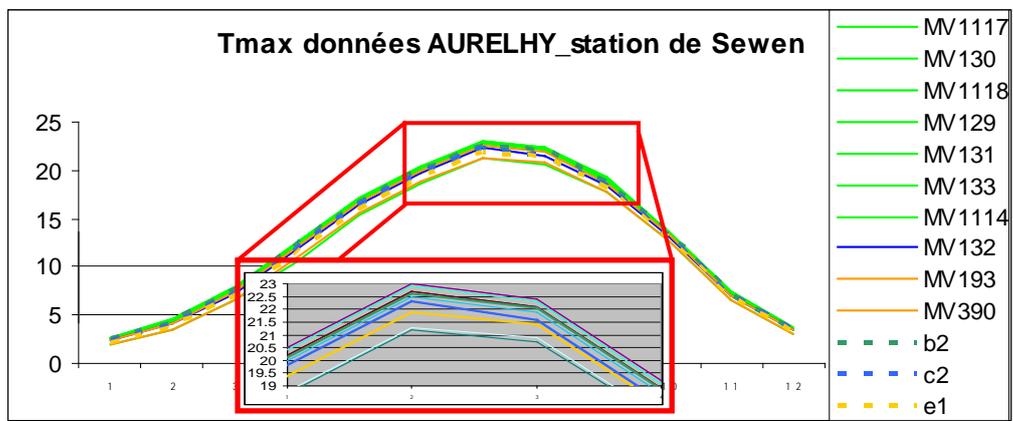
Nous voyons nettement que même s'il paraît faisable d'associer les parcelles à des stations INRA pour les paramètres température, ETP, et rayonnement global, ceci est impossible pour le paramètre précipitation (**Figures 8**).

Il est donc nécessaire pour ce critère au moins d'effectuer des regroupements judicieux de parcelles, et de trouver des données plus précises pour recréer la variabilité.

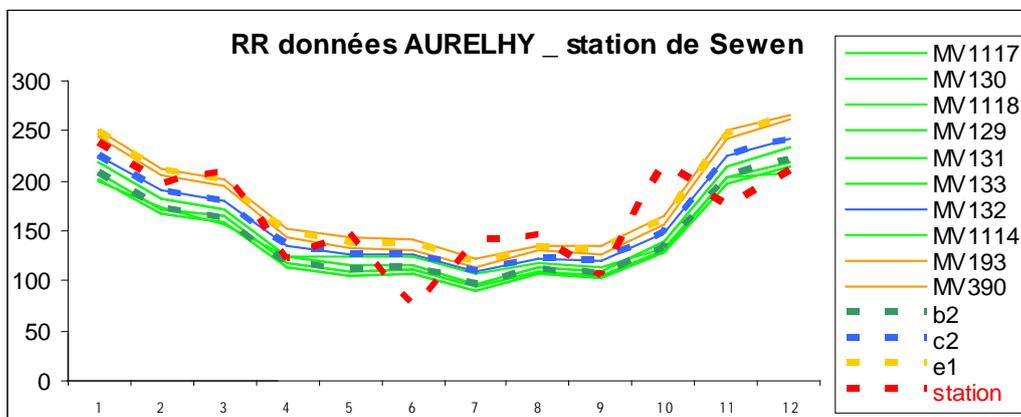
**Tableau 7** : Liste des secteurs géo climatiques formés

Code	Classe d'altitude	Station de référence
a1	200-400 m	Guebwiller
a2		Aubure
b1	400-600 m	Remiremont
b2		Sewen
b3		Kruth
b4		Munster
b5		Breitenbach
c1	600-800 m	Saulxures
c2		Husseren
c3		Sewen
c4		Orbey
d1	800-1000 m	Saulxures
d2		La Bresse
d3		Orbey
e1	1000-1200 m	Sewen
e2		La Bresse / Munster
f1	1200-1400 m	Munster

**Figures 9** : Homogénéité des groupes formés. Exemple de la zone de Sewen.



a.



b.

### *Création de zones géographiques et climatiques homogènes.*

Comme il vient d'être démontré, les précipitations ne peuvent être mises en relation avec aucune station expérimentales INRA. Il est donc nécessaire de regrouper les parcelles en plus petits secteurs, afin de pouvoir leur attribuer des données plus précises.

De plus, étant donné la méthode de calcul de l'ETP (basé sur la température et le rayonnement) et le peu de variations du rayonnement global entre les stations, nous ne traiterons ici que les résultats concernant la température et les précipitations.

#### Matériel et Méthodes

Le regroupement des parcelles a été effectué pour en faire des groupes « homogènes » pour les données climatiques. C'est pourquoi deux critères principaux ont été pris en compte : l'altitude et les coordonnées géographiques (Lebourgeois, 2005).

Tout d'abord, une mise en classe d'altitude a été réalisée. Puis grâce aux coordonnées, les parcelles ont été replacées sur un graphique, où étaient placées en indice la classe d'altitude des parcelles (**Figures 8 bis**).

Ainsi, des regroupements ont pu être réalisés, en prenant pour premier critère la classe d'altitude (de a : « 200-400m » à f « 1200-1400 »), puis en divisant ces premiers groupes par secteur géographique (en indice). Exemple : a2 : parcelles d'altitude 200-400m du secteur de Aubure (**Tableau 7**).

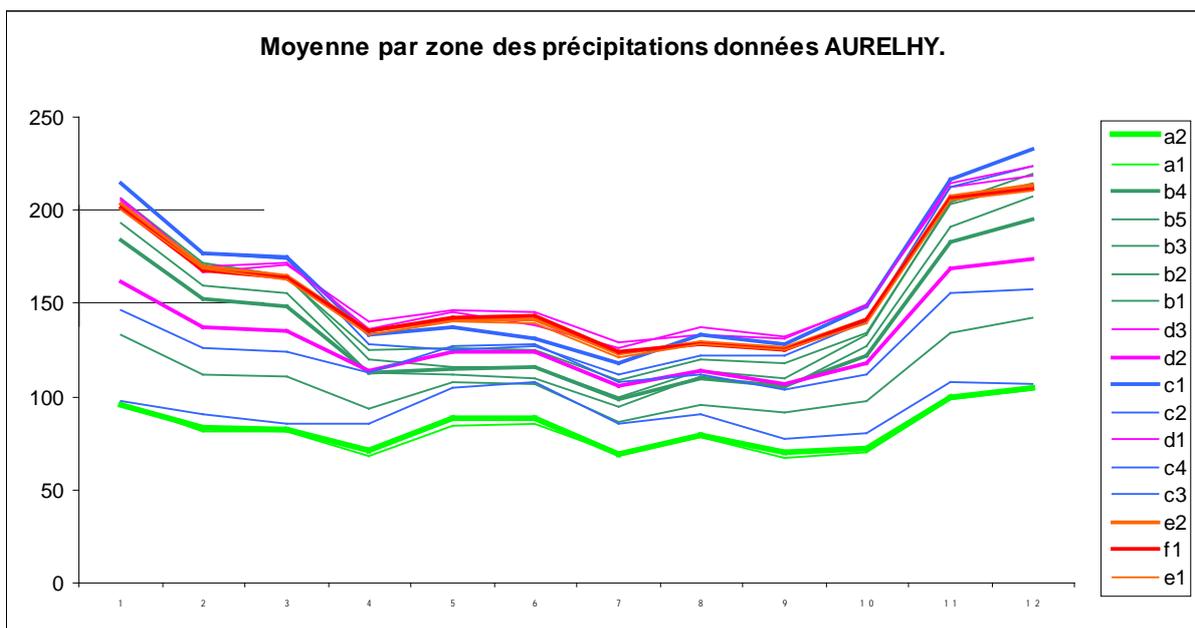
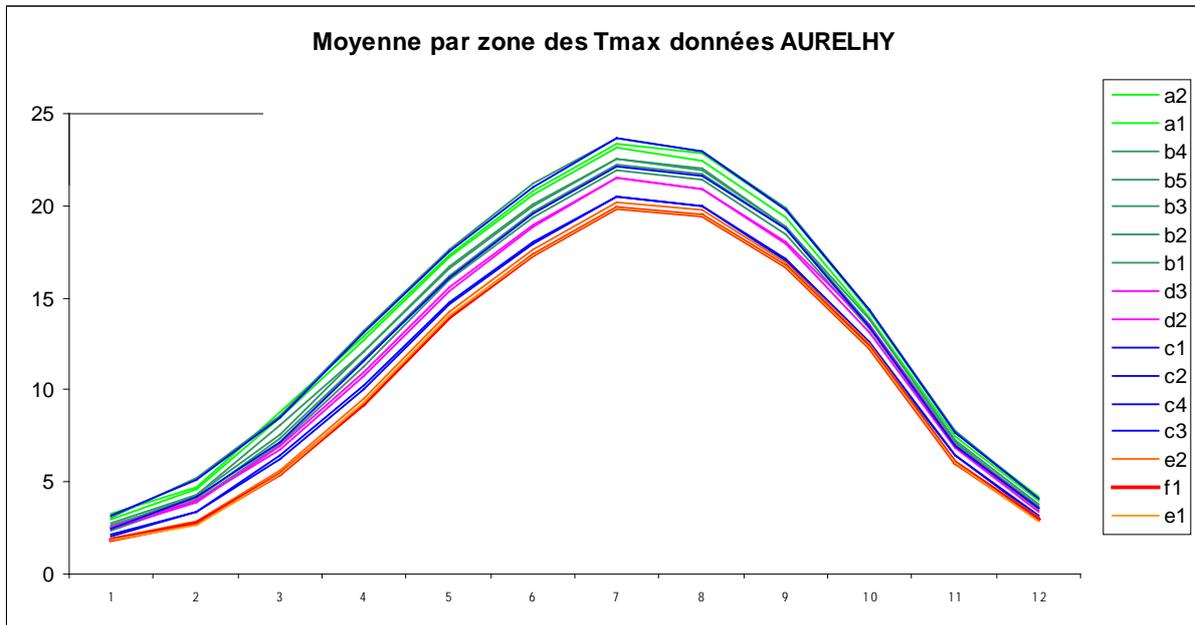
Enfin, chaque groupe est attribué à une station météo de référence, se situant le plus près possible du groupe. La variabilité climatique peut donc ainsi être assez facilement recréé.

#### Résultats :

Le regroupement des parcelles a permis la création de 18 groupes, répartis selon 6 classes d'altitude. L'attribution à chaque groupe d'une station Météo France de référence s'est faite selon la proximité géographique. Pour une même station météorologique, on peut avoir différentes classes de parcelles, suivant leurs altitudes. La représentation graphique de principaux paramètres (Tmin, Tmax, Précipitations, ...) permet rapidement de se rendre compte de l'homogénéité (ou non) des groupes. On observe ainsi qu'au sein d'une même zone géographique, les données sont assez homogènes.

Par rapport aux températures, il existe un gradient en fonction de l'altitude (**Figure 9a**). Cependant, ce gradient est assez peu marqué dans certaines stations, comme nous pouvons le constater dans la station de Sewen. Ceci est important à noter car la température est un facteur important du rendement. Le fait que la température ne varie que peu (1°C pour 800 m de

**Figures 10** : Comparaison des 18 zones géographiques entre elles, pour TX et RR



dénivelés) aura sans doute un impact conséquent sur le rendement simulé. D'autres méthodes pourront alors être mises en place pour pallier à ce problème

Par rapport aux précipitations (**Figure 9b.**), nous observons un gradient en fonction de l'altitude conforme à ce qui est attendu, ce qui est satisfaisant. Par contre, les répartitions au cours de l'année des estimations AURELHY et de la station de référence ne sont pas comparables. Ceci vient vraisemblablement en partie du fait du lissage des données AURELHY (moyenne sur 30 ans) par rapport aux données station (moyenne sur 6 ans). Lors de la création de variabilité journalière, il faudra donc essayer de plus calquer les valeurs sur les données stations que sur les données AURELHY (plus précises sur la période voulue).

En comparant maintenant les 18 zones géographiques entre elles, une bonne variabilité interzone est observable, avec toutefois un gradient d'altitude qui reste conservé, en général (**Figures 10**).

#### Conclusion :

Des groupes géo climatiques homogènes ont donc été mis en place. Attachés à une station de référence Météo France, ils représentent un secteur tenant compte à la fois de la position géographique (regroupant entre 1 et 3 communes « qui se touchent ... »), de l'altitude (par tranche de 200 mètres) et du relief (bassins versants, ...). Ils constituent donc une base adéquate pour la création de micro climats que l'on souhaite variable en altitude, relief, et zones.

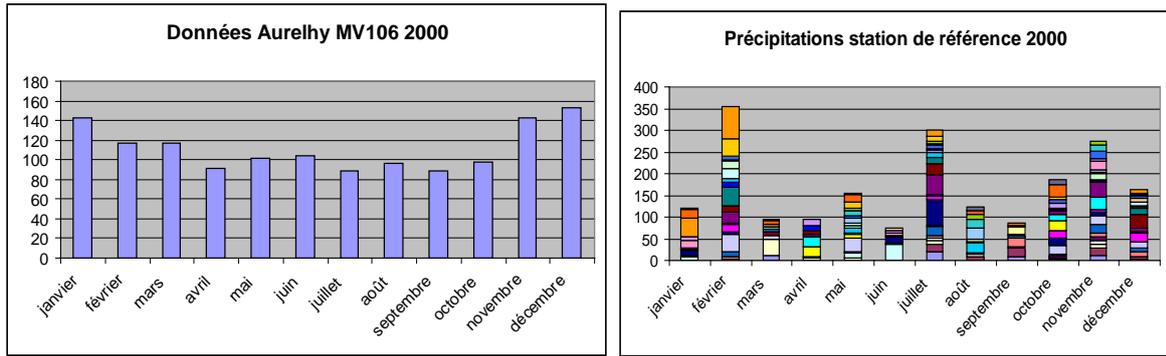
#### ***Création de variabilité climatique journalière à partir de données AURELHY***

Le but de cette partie est, à partir de données AURELHY moyennes sur 30 ans, mensuelles et pluriannuelles, à partir des zones géo climatiques homogènes et à partir de stations de références ayant des données observées journalières sur la période voulue, de recréer par parcelle, par altitude et par zone géographique, des données climatiques, ayant une variabilité journalière et annuelle. Tout ceci toujours dans le même objectif d'utiliser des données climatiques les plus proches possibles de la réalité pour les simulations avec le modèle d'estimation STICS.

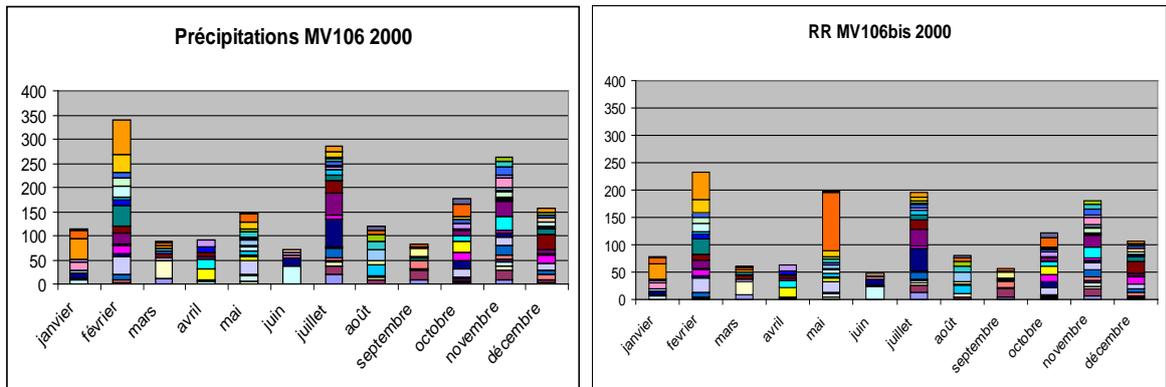
#### Méthode de création de variabilité journalière, pour les différentes variables climatiques :

Pour les températures minimales et maximales, la station de référence est Colmar. Les écarts à la moyenne, pour un mois donné (toutes années confondues), jour par jour, ont été ajoutées aux données mensuelles AURELHY de la parcelle.

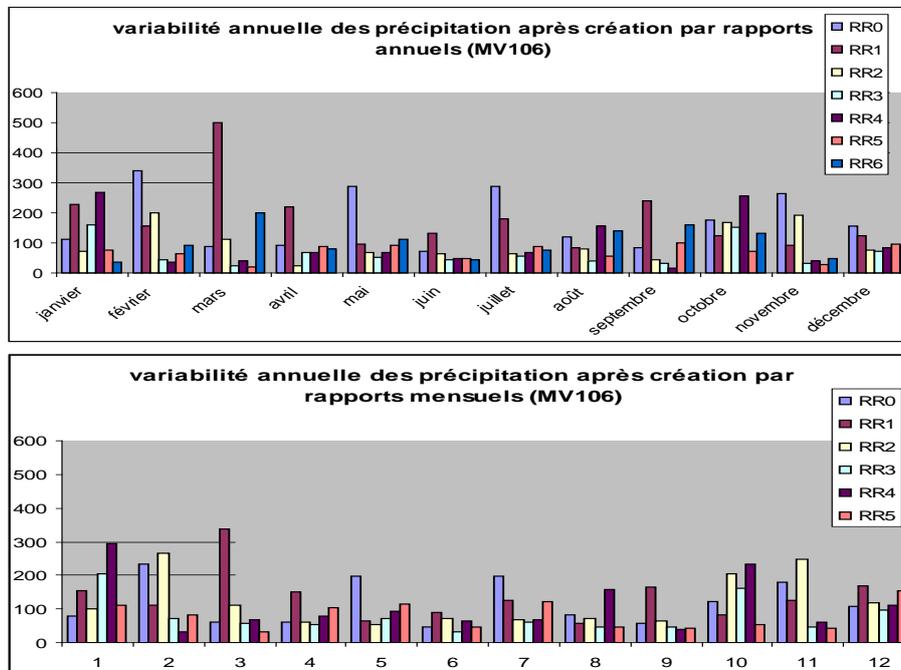
**Figures 11** : Création de variabilité climatique \_ Exemple de la parcelles MV106



*Données de références pour la création de variabilité précipitations da la parcelle MV106.*



*Création de variabilité journalière pour les précipitations en utilisant un rapport de cumul annuel ou mensuel (« bis »)*



Pour l'ETP et le Rayonnement Global, la station de référence était Colmar. Les données journalières de cette station ont donc été multipliées par le rapport du cumul annuel (ou mensuel) AURELHY sur le cumul annuel (ou mensuel) Colmar.

Pour les précipitations, la station de référence a été celle désignée comme la plus proche géographiquement de la parcelle. De même que pour l'ETP et le RG, le rapport (Précipitations Mensuelles (annuelles) AURELHY / Moyenne Précipitations Mensuelles (annuelles) station) a été multiplié par la valeur journalière de la station, dans le but de garder l'alternance de jours avec et sans pluie.

### Résultats :

Afin de prendre du recul sur l'effet de la météo AURELHY par rapport aux stations de référence, et entre parcelles à altitudes différentes et localisées dans des zones géographiques différentes a semblé nécessaire. Ceci pour juger de l'homogénéité des résultats sur une même zone géographique, mais aussi de leur variabilité entre zones et à l'intérieur d'une même zone à altitudes différentes.

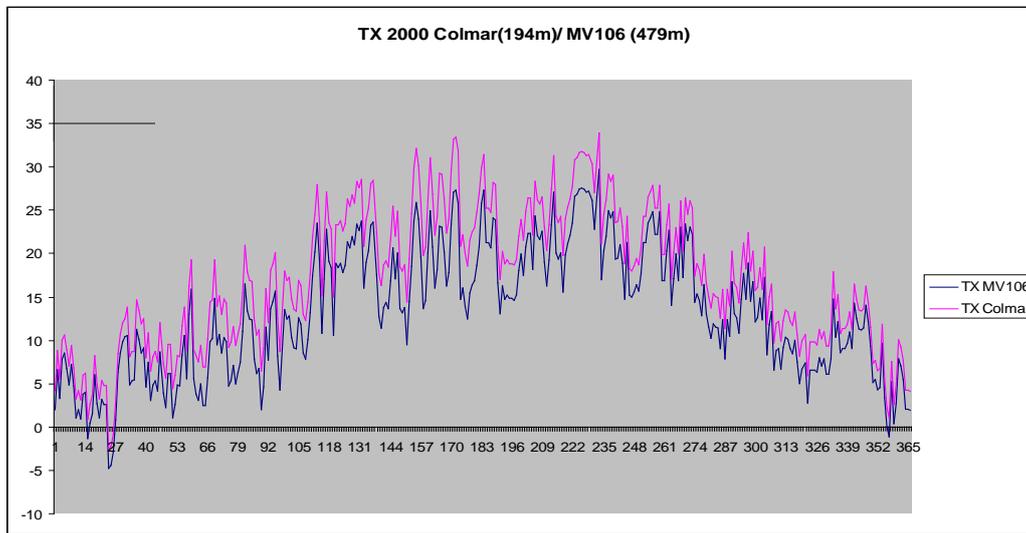
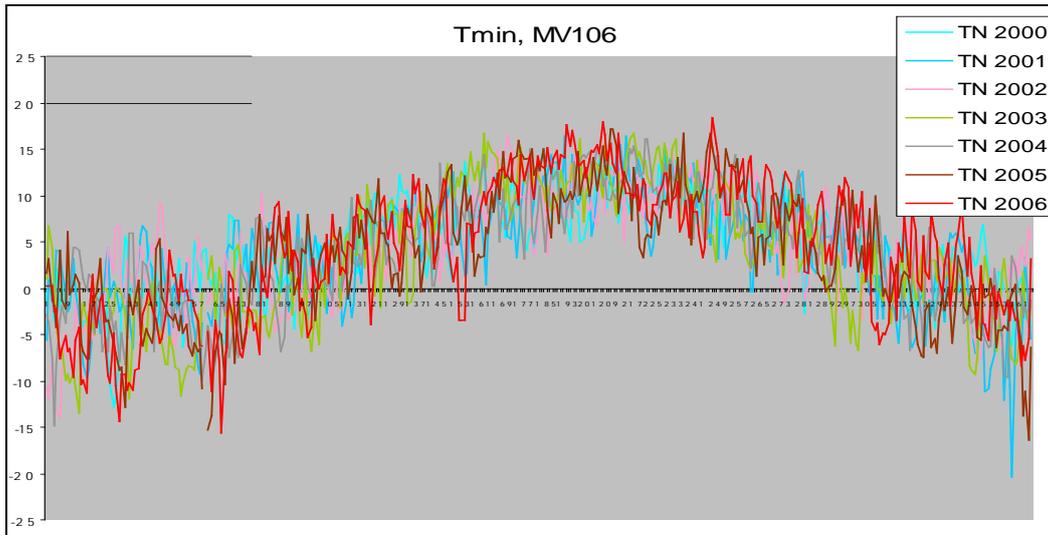
Tout d'abord pour les températures, la variabilité créée ressemble bien à la variabilité existant dans les stations de référence (amplitude, allure générale de la courbe, ...) tout en ayant les caractéristiques propres des données AURELHY (moyenne mensuelle). De plus, la variabilité interannuelle est bien recréée. Ceci répond donc bien aux objectifs initiaux, puisque de la variabilité journalière et interannuelle est créée tout en conservant la variabilité inter parcellaire des données AURELHY (**Figure 12**).

Pour les précipitations, deux traitements ont été mis en place : un premier basé sur un rapport de cumulés annuels, et un second prenant des cumulés de précipitations mensuels (**Figures 11**). Pour le premier, la répartition des précipitations au cours de l'année suit la tendance des données AURELHY. Ceci peut être utile particulièrement pour créer des scénarios représentatifs d'une année moyenne. Le deuxième traitement tend plus vers une répartition de même type que la station de référence, ce qui est logique puisque le rapport a été effectué sur les cumulés mensuels. L'avantage que cela présente est que l'on garde la variabilité spécifique aux années étudiées. La répartition des précipitations est donc cette fois spécifique à l'année, ce qui est beaucoup plus proche de la réalité (**Tableau 8**).

### Conclusion :

La méthode utilisée a permis de dégager des groupes de parcelles homogènes, du point de vue géographique (altitude et coordonnées) ainsi que du point de vue de leurs données climatiques. A partir de ces groupes, nous avons pu créer pour chaque parcelle des données climatiques journalières qui lui sont propres.

**Figure 12** : Variations journalière et interannuelle créée à partir des données Aurelhy



**Tableau 8** : Résumé des données moyennes avant et après création de variabilité.

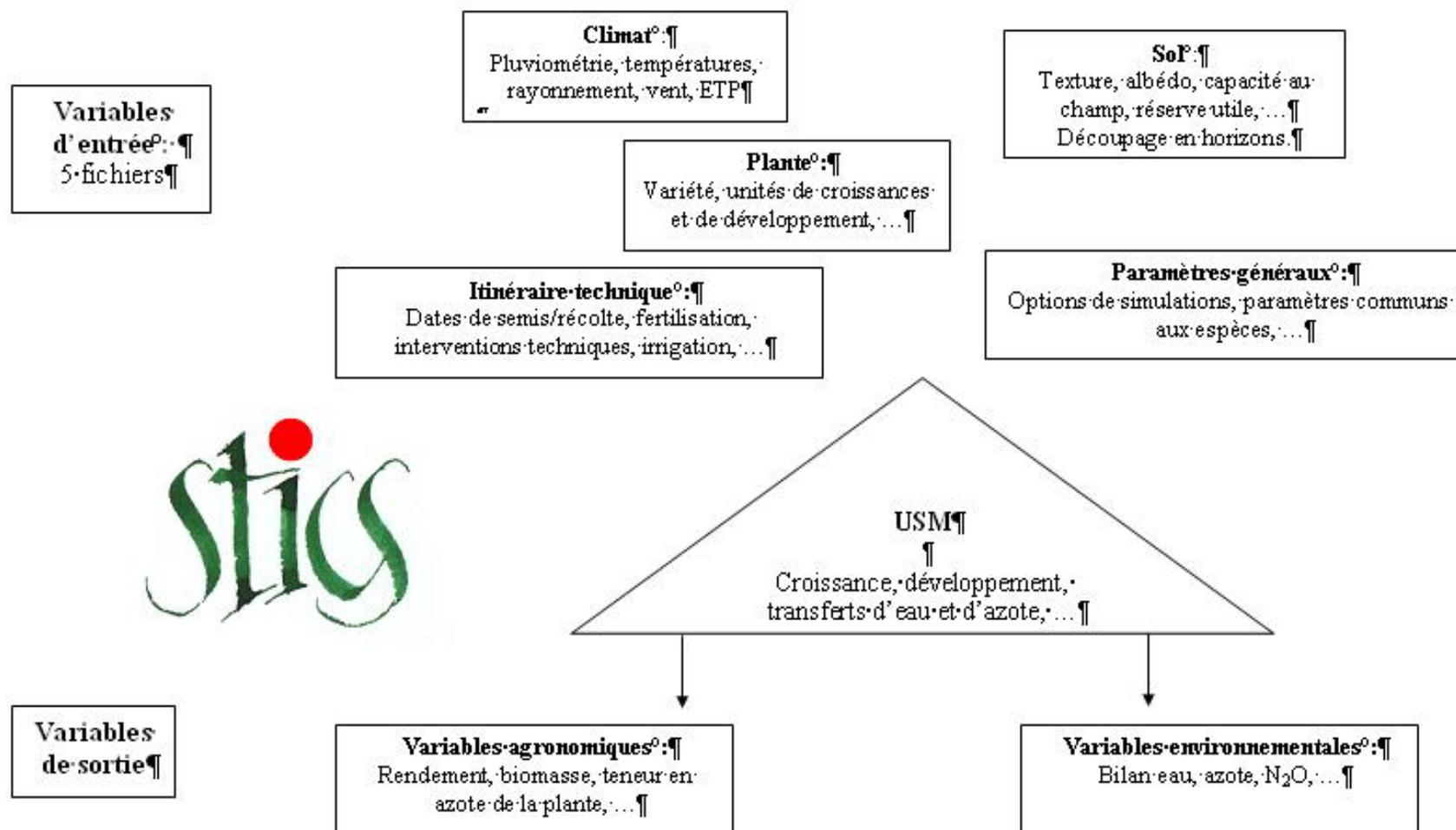
	TX Aur var	TX Aur ori	RR Aur Ann	RR Aur Mens	RR Aur ori
janvier	3.07	3.10	125	143	143
février	4.15	4.20	143	139	117
mars	8.29	7.90	134	149	117
avril	12.04	12.00	91	96	91
mai	16.40	16.40	112	116	102
juin	19.81	20.00	66	67	104
juillet	22.71	22.60	114	124	89
août	21.96	22.10	95	101	96
septembre	19.07	19.20	105	102	89
octobre	13.74	13.90	153	163	98
novembre	7.14	7.30	93	105	143
décembre	4.05	4.10	101	106	153

Toutes ces données sont à la fois spécifiques à la parcelle, mais aussi spécifiques à l'année. Cela correspond donc a priori à nos attentes. Ces différents « climats » spécifiques à chaque parcelle ou à chaque zone seront utilisés pour tester les réponses du modèle STICS sur le rendement et les autres variables explicatives.

### ***Conclusion sur la partie travail sur les données climatiques :***

Tout le travail effectué dans cette partie représente en lui-même un résultat à part entière. En effet, pour la première fois un protocole a été mis en place, testé et validé afin de créer de la variabilité journalière à partir de données de type AURELHY. Ce premier résultat peut être important car il permet pour des micro zones (type parcelles agricoles) de recréer un climat complet à pas de temps journalier, avec une précision acceptable. Ce type de démarche est également une préoccupation pour d'autres équipes de recherches (C. Piédallu, ENGREF). Ce travail a également permis, à partir des différentes méthodes de création de la variabilité, de pouvoir par la suite comparer ces méthodes et analyser les réponses du modèles à des climats de types « standards » répondant à des moyennes, par rapport à des climats plus précis et plus sensibilisés à des variabilités intra et interannuelles. De plus, un protocole de création de zones géographiques homogènes a été élaboré, et validé par des observations graphiques et par des valeurs moyennes de stations de références. Enfin, et surtout, toutes ces démarches débouchent sur des possibilités multiples de simulations par l'intermédiaire du logiciel STICS, qui peut maintenant être applicable (les données sont toutes à pas de temps journaliers, avec des variations entre années). Il sera donc possible par la suite d'évaluer l'impact des différents types de climats sur les multiples paramètres de STICS.

Figure 13 : Diagramme du principe de fonctionnement du modèle STICS



## Simulations de rendements avec STICS

### *Présentation de l'outil de simulations STICS (Figure 13):*

STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standards) est un modèle de fonctionnement des cultures à pas de temps journalier. Sa fonction est de simuler une situation culturale donnée dans un contexte pédoclimatique précis dans le but d'étudier l'interaction entre le milieu physique et le système de culture. Les grands processus simulés sont la croissance et le développement de la culture et les bilans hydriques, azotés, carbonés. Les nombreuses variables de sortie sont relatives à des données agronomiques et environnementales (Brisson et al, 2003). La limite supérieure du système est l'atmosphère dont les variables climatiques sont les températures (maximales et minimales), la pluviométrie, le rayonnement, l'humidité et le vent. Le sol est assimilé à une succession de couches horizontales caractérisées par des teneurs en eau, en azote minéral et organique ... La culture est caractérisée principalement par des paramètres caractéristiques de chaque plante ou variété qui permettent de calculer la biomasse aérienne, la teneur en azote, l'indice foliaire et la masse des organes récoltés. Ses interactions avec le sol se font par l'intermédiaire des racines. La croissance de la culture est simulée par l'interception du rayonnement par le feuillage puis la transformation en biomasse aérienne et le transfert vers les organes de récolte en fin de cycle. Les stress hydriques (excès ou manque) et azotés sont représentés par des indices qui peuvent influencer sur la croissance. Pour valider le modèle dans un contexte précis, il est possible de forcer des variables et d'optimiser des paramètres (Brisson, 2002). On utilise le modèle dans un contexte agricole donné pour représenter des interactions complexes entre mécanismes, et déterminer des impacts agro-environnementaux. C'est un outil d'aide à la réflexion qui possède des limites comme toute représentation simplifiée de la réalité.

Pour exécuter le modèle, il faut constituer ce qu'on appelle une unité de simulation (USM) définie par un climat (ensembles des variables pour une année), un sol, un ensemble de caractéristiques de la plante et de sa variété (fichier plante) ainsi qu'un itinéraire technique.

L'USM, lors de son exécution fera appel, à tous les fichiers qui lui ont été indiqués. Dans notre cas, chaque jeu de 207 situations ou parcelles, que nous nommerons ensuite « simulation », a demandé l'exécution de 207 USM. L'adaptation de STICS à la prairie a été réalisé en 1998 dans le cadre du projet ISOP (Tiers, 1998 ; Ruget et al, 1998 et 1999).

A partir de ce modèle et des différents travaux menés sur la base de données du Massif Vosgien, ainsi que sur la typologie des graminées, plusieurs séries de simulations ont été effectuées afin de tester les réponses du modèle à ces prairies de moyenne montagne.

**Tableau 9** : Comparaison des paramètres des différents fichiers plantes « prairie »

	prairie.plt	Prairie.plt	prairiD.plt	prairiB.plt	variante cv
stlevamf	0	116	id	id	id
tdmin	0	0	2 puis 0 ?	2 ?	
tcmin	0	0	2 puis 0 ?	2 ?	
dlaimaxbrut	$3.8 e^{-4}$		$1.9 e^{-4}$	$3.8 e^{-4}$	
densite		200	100	200	
temin		0	5 puis 0	0	
efcroijuv		2	1		
efcroiveg		2.5	1		
teopt		24	id	id	18

*gel : actif*

**Encadré 3** : Justifications des changements des paramètres des fichiers plantes

Stlevamf (sommées de températures de la levée à la montaison) : était à 0 (résultat d'essai statistique avec Sylvain Satger, mais peu satisfaisant car fait disparaître la période de tallage) pour éviter la longue période à mise en place d'indice foliaire très lente en début de cycle (ou après coupe), donc retour à une valeur classique antérieure

tdmin (température minimale de développement) et tcmin (température minimale de croissance) : ralentir le développement et la croissance du couvert en température basse (et en altitude),

tcmx (température maximale de croissance) pour les types D : réaction positive moins forte aux hautes températures pour les plantes d'altitude

teoptbis (température optimale borne maximale du plateau): restriction du plateau de photosynthèse : l'efficacité de conversion diminue dès 18 °C au lieu de 24 (peu d'influence, car peu de températures moyennes aussi élevées)

dlaimaxbrut (vitesse de développement de l'indice foliaire) : ralentir la production de feuilles, donc de matière sèche pour les plantes à stratégie de conservation

densite : diminuer le rayonnement intercepté par le couvert : non gardée, effet trop faible.

efcroijuv (efficacité de conversion du rayonnement en MS, au stade juvénile) et efcroiveg diminuer aussi l'efficacité de conversion pour les plantes à stratégie de conservation

En résumé, les changements sont peu nombreux, mais violents. Les valeurs ont été attribuées sans optimisation, seulement pour que l'effet soit sensible dans les conditions testées. Ce sont donc plutôt des ordres de grandeur que des valeurs précises de paramètres.

### *Constitution des fichiers de travail*

Comme il a été indiqué précédemment, l'utilisation du modèle fait appel à des fichiers de types différents, qui sont requis au cours de la simulation. Ainsi, avant d'utiliser STICS, il est nécessaire de rassembler ces différentes sources d'informations. Les informations disponibles pour les parcelles de pâture étant insuffisantes, l'étude se limite aux fauches, que ce soit dans les parcelles de fauches ou dans les parcelles mixtes (au moins une fauche dans l'année).

Dans le but d'analyser la sensibilité des sorties du modèle aux entrées et à leur précision, et d'analyser les écarts des sorties aux observations, il a été jugé utile de constituer, pour chaque type de fichier de travail, différentes versions avec des changements de paramétrage, ce qui conduit à différentes simulations. Cette première partie de méthodologie a donc pour but d'expliquer quelles sont ces configurations de simulation et de quelle manière ils ont été adaptés.

#### o Les fichiers plante

Le paramétrage de STICS et son adaptation aux prairies ont abouti à un paramétrage spécifique à la prairie, contenu dans le fichier Prairie.plt. Cependant, après l'étude menée sur les types fonctionnels, il est apparu nettement que le type D (plutôt spécifique des prairies d'altitudes élevées, ou avec des conditions de stress particulières) était bien différenciés des autres types fonctionnels. De plus, à l'origine, il avait été observé à travers les suivis ISOP une mauvaise estimation des rendements dès lors que l'altitude était trop élevée, ce qui est logique car les données ayant servi à la calibration ont été obtenues en conditions standardisées sur des stations expérimentales de plaine.

A partir de ces observations, il a été jugé utile de mettre en place des fichiers caractérisant la plante différents pour les prairies D par rapport aux autres. Ainsi, deux nouveaux fichiers « plante » ont été créés en ne changeant que les valeurs de quelques paramètres par rapport à la version initiale (**Tableau 9** + **Encadré 3**).

Au niveau du fichier PrairiB.plt, peu de paramètres ont été touchés. Ceci dans le but de retarder la croissance des plantes, qui avait tendance (dans les pré simulations) à démarrer trop tôt en saison.

Pour le fichier PrairiD.plt, la même méthode de raisonnement a été suivie. De plus, l'efficacité de conversion du rayonnement intercepté a été diminuée. Cette décision est appuyée par la nature des caractéristiques même des plantes de type D (moins productives).

A partir de ces deux jeux de fichiers plante, il sera donc possible de comparer les simulations qui en découleront et de tester la pertinence de renseigner des types fonctionnels de prairies pour ce type de modèle ...

**Tableau 10** : Résumé des possibilités pour construire les USM, avant chaque simulation.

Type fichier	Choix variable		
Fichier Plante		Fichier initial	Prairie.plt
		Fichier modifié en type B ou D	PrairiB.plt PrairiD.plt
Fichier climatique	précipitations	Station de référence (zone géoclimatique)	Attribué par zone géographique et par altitude
			Colmar, en tant que station témoin
		Valeurs AURELHY	Cumuls annuels
			Cumuls mensuels
	température	AURELHY à partir de Colmar	
		Calculs de STICS à partir de Colmar ou de Mirecourt (altitude)	
		Colmar comme station témoin	
	ETP	AURELHY à partir de Colmar	
		Calcul de STICS à partir de Colmar	Méthode Penman
			Méthode Priestley-Taylor
		Colmar comme station témoin	
Rayonnement	Colmar		

*La signification de chacune des possibilités est expliquée en détail dans la partie « travail sur les données climatiques ».*

- Les fichiers techniques

Ces fichiers regroupent l'ensemble des pratiques culturales qui ont été effectuées sur les parcelles. Ils sont donc spécifiques d'une parcelle pour une année. Dans notre cas, ont été renseignées les quantités et dates d'apport de fertilisation azotée, ainsi que les dates de coupes, à partir des informations obtenues du travail effectué sur les données techniques.

Ces fichiers ont été fixés et sont identiques pour toutes les simulations.

- Les fichiers climatiques

L'objectif initial était de simuler les rendements à partir des données AURELHY, propres à chaque parcelle. Ainsi, de la variabilité journalière a été créée à partir de ces données, comme il a été montré dans la première partie de ce rapport.

Cependant, il a été montré certaines faiblesses des données AURELHY, notamment pour les températures. Ceci peut s'expliquer par le mode de calcul de ces données, qui sont des valeurs calculées par des modèles mathématiques prenant en compte théoriquement les bassins versants et les reliefs, tout ceci basé sur une référence moyenne de 30 ans. Les valeurs obtenues sont donc lissées par la moyenne, mais comportent également une marge d'erreur difficile à évaluer compte tenu de notre manque d'informations sur les méthodes de calculs. De plus, à l'aide du travail effectué sur la mise en place des zones géo climatiques, d'autres jeux de climats peuvent être utilisés, permettant par la suite une meilleure analyse des résultats.

Pour chaque paramètre du climat, plusieurs méthodes de calculs ont donc été mises en place (**tableaux 10 et 11**).

*\_Rayonnement Global (RG)* : La comparaison entre les parcelles et les stations INRA de référence effectuée en première partie ont montré qu'il n'y avait pas de différences observables entre les différents RG. Les valeurs ont été calculées comme indiqué en première partie (rapport de cumuls annuels) à partir des données de Colmar (Station expérimentale la plus proche de l'ensemble des parcelles).

*\_Températures minimales et maximales (TX et TN)* : Un premier jeu de données a été constitué pour chaque parcelle selon la méthode décrite dans la première partie, à partir des données AURELHY et des stations de Mirecourt et Colmar.

Cependant, des incohérences ont été montrées dans les données AURELHY de base. Les températures ayant, à travers STICS, un rôle important sur le rendement, d'autres méthodes de calculs ont été employées afin de pouvoir tester la sensibilité du modèle, mais aussi d'obtenir des valeurs les plus proches possibles de la réalité afin de limiter les erreurs dues

**Tableau 11** : Origine des données météorologiques utilisées pour l'étude.

	Pas de temps	Paramètres	Nombre de Stations
Inra Agroclim	Journalières	TX, TN, RG, RR, ETP	3
Météo France	Journalières	RR	8
AURELHY	Moyennes mensuelles sur 30 ans	TX, TN, RG, RR, ETP	119 (parcelles)
Autres	Journalières	TX, TN, RR	Husseren

aux données sources. Ainsi, l'option « climat en altitude » de STICS a été activée. Celle-ci recalcule des valeurs de températures à partir d'un jeu de données initial, en utilisant principalement la relation empirique classique de diminution de température de 2°C tous les 300 m d'altitude. Ne pouvant, pour des raisons matérielles, employer cette méthode pour l'ensemble des parcelles étudiées, les climats ont été constitués pour chaque zone géo climatique (dont la création a été détaillée en première partie). Pour chacune de ces zones, les températures ont été créées en fonction de leur altitude moyenne, avec pour référence la station de Colmar (plaine alsacienne, 194 m d'altitude) pour les parcelles alsaciennes, ou la station de Mirecourt (plaine vosgienne, 218 m d'altitude) pour le versant Vosgien. Ainsi, 18 jeux de températures ont été calculés par STICS (indépendamment des valeurs AURELHY). Enfin, dans un but de comparaison finale et initiale des simulations, un dernier jeu de températures a été constitué pour toutes les parcelles en reprenant intégralement les données de Colmar.

*Evapotranspiration potentielle (ETP)* Un premier jeu de données est constitué à partir des données AURELHY et de la station de Colmar, comme indiqué en première partie (rapport de cumuls annuels). Cependant, d'après les analyses et les conclusions de cette dernière, il a été observé que l'ETP AURELHY des parcelles présentait un léger décalage avec les observations des stations expérimentales. De plus, il semblerait que la méthode de calcul des ETP soit basée sur les températures. Compte tenu de l'incertitude liée à ces valeurs par AURELHY, il a été une nouvelle fois jugé préférable de constituer d'autres jeux de données à partir de méthodes différentes.

Une autre option de STICS permet, à partir de TX, TN et RG, un calcul d'ETP selon deux méthodes différentes : Penman et Priestley-Taylor. Quatre nouveaux jeux de données ont donc été mis en place, à partir de ces méthodes de calcul et des températures de Colmar, ou des zones géo climatiques. De même que pour les températures, cette méthode permet de s'affranchir des données AURELHY, pour lesquelles les méthodes de calcul sont inconnues.

Enfin, toujours dans ce but de comparaison témoin, un jeu de données a été mis en place avec les données de Colmar.

*Précipitations (RR)* Les précipitations furent à la base de la constitution des zones géo climatiques (cf. première partie). Ce travail a débouché, notamment pour les précipitations, à la constitution de deux jeux de données basés sur le rapport des cumuls annuels puis mensuels des précipitations avec une station de référence propre à chaque zone. De plus, le calcul des précipitations étant basé à l'origine sur des données acquises par la méthode AURELHY, les jeux obtenus semblent assez robustes.



Cependant, afin de pouvoir tester la pertinence du travail effectué sur ces regroupements en zones, et pour pouvoir expliquer de potentiels écarts entre traitements, il a paru intéressant de s'affranchir une nouvelle fois des données AURELHY.

Ainsi, un jeu de données a été créé en appliquant à chaque parcelle les précipitations de sa station Météo France de référence.

De même que pour les paramètres précédents, un jeu témoin « Colmar » est également créé.

### *Méthode d'analyse des résultats.*

De nombreux climats ont été créés, combinant les différentes possibilités offertes (**tableau 10**). En interprétant les simulations de sorties, il sera donc possible de mieux comprendre les facteurs à l'origine des écarts entre rendements simulés et observés.

Le but de cette étude est de tester le modèle de simulations STICS avec des prairies « atypiques ». L'efficacité du modèle et la pertinence des résultats peuvent être évalués de différentes manières : interprétation directe des simulations, ou comparaison avec les valeurs observées.

#### Visualisation des paramètres de sortie STICS

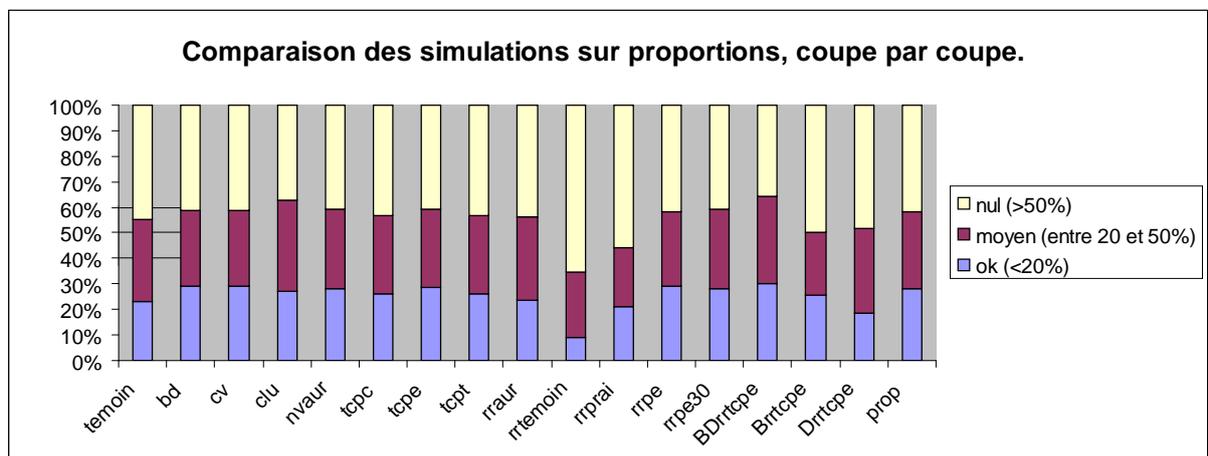
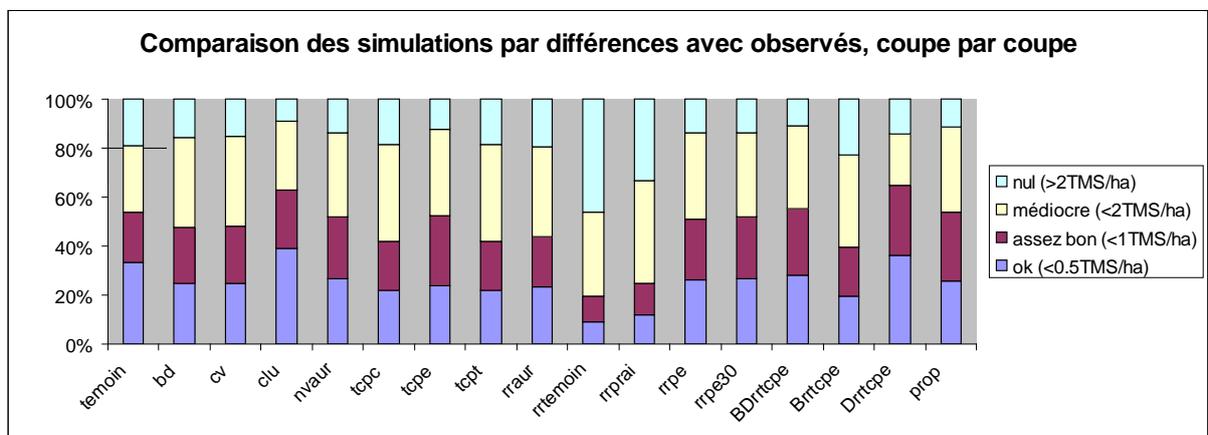
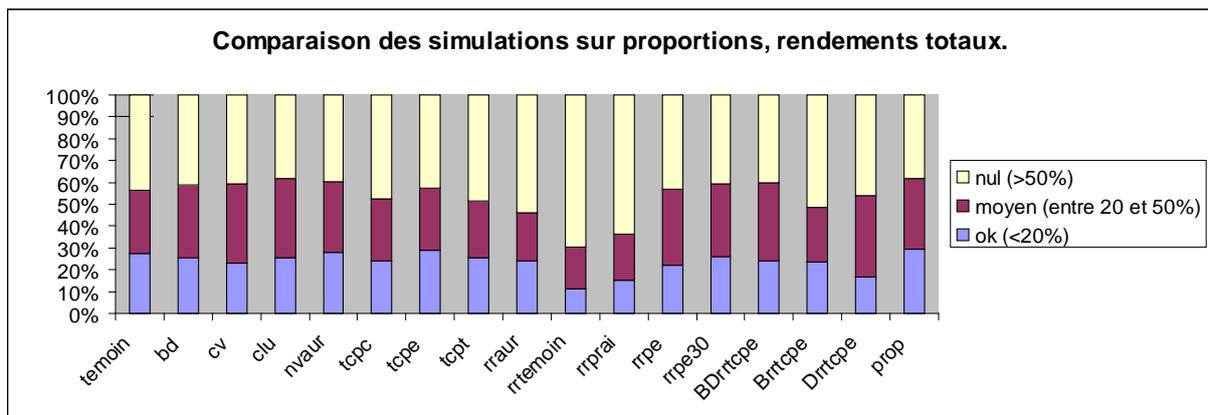
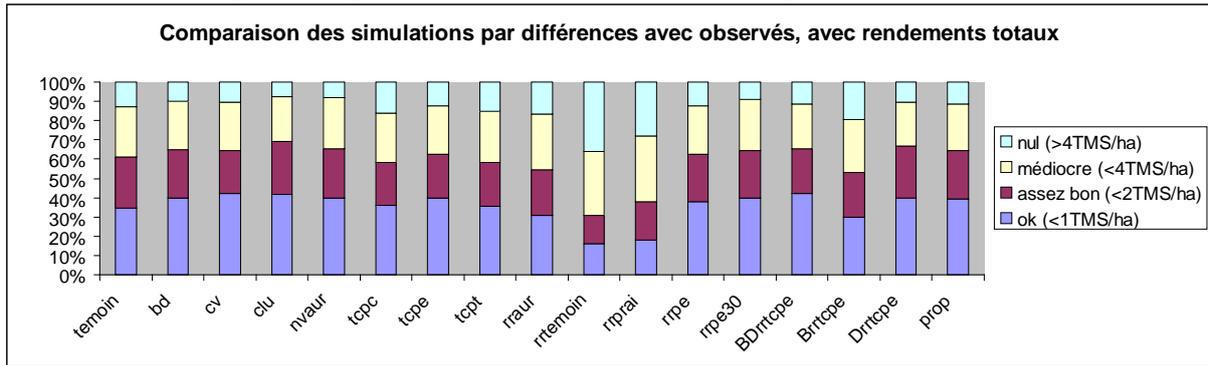
Le logiciel STICS propose différents types de sorties : graphiques ou rapports textes. Les sorties graphiques permettent de visualiser directement l'évolution d'un ou deux paramètres de sortie (cf liste en annexe). Ce mode d'observation est pertinent pour suivre un paramètre sur une simulation, ou encore pour comparer un paramètre entre deux parcelles, deux années, ... Par contre, la seule possibilité d'extraction de ces graphiques est la forme papier, ce qui rend impossible le traitement parallèle par un autre logiciel. Cette forme est intéressante lors de l'analyse d'un nombre restreint de parcelles, mais devient vite limitant dès que l'effectif augmente.

Les sorties sous forme rapport texte permettent d'avoir un résumé détaillé par parcelle et par année de différents paramètres choisis, et ce, à la fin de la culture et coupe par coupe.

#### Comparaison des rendements simulés avec les rendements observés dans le Massif Vosgien

Cette seconde méthode d'analyse a été très utilisée pour l'interprétation des résultats. Elle a pour intérêt de prendre en compte l'ensemble des parcelles et l'ensemble des paramètres, et d'en ressortir sous forme de graphiques ou de tables de valeurs des informations sur quelques variables d'intérêt, principalement le rendement. Cependant, l'analyse de ces données nécessite quelques étapes intermédiaires.

**Figures 14 :** Comparaison par différences observés - simulés pour l'ensemble des simulations.



Après simulation par STICS, toutes les variables de sortie sont placées automatiquement dans un rapport texte, classé par parcelle. Une fusion avec le fichier contenant les caractéristiques techniques des parcelles est alors nécessaire pour la comparaison avec les rendements observés d'une part, et avec les variables d'entrée d'autre part. Cette fusion a été réalisée à chaque fois à l'aide du logiciel S+ sous Unix.

A partir de ce nouveau fichier fusionné, des comparaisons sont possibles entre les rendements observés et les simulés, ainsi que l'interprétation des simulations à l'aide des variables d'entrées, et ceci avec l'ensemble des parcelles, ou en les prenant au cas par cas.

Tout ce travail peut être ensuite présenté sous formes de graphiques, de rapport texte, de figures chiffrées, réalisées sous S+ ou sous Excel. Les principales variables de sortie prises ici en compte sont le rendement simulé, et les indices de stress hydriques et azotés. Nous tenterons de les expliquer à travers les variables d'entrées dont elles dépendent, en théorie (rendement observé, altitude et conditions climatiques, fertilisation azotée, ...)

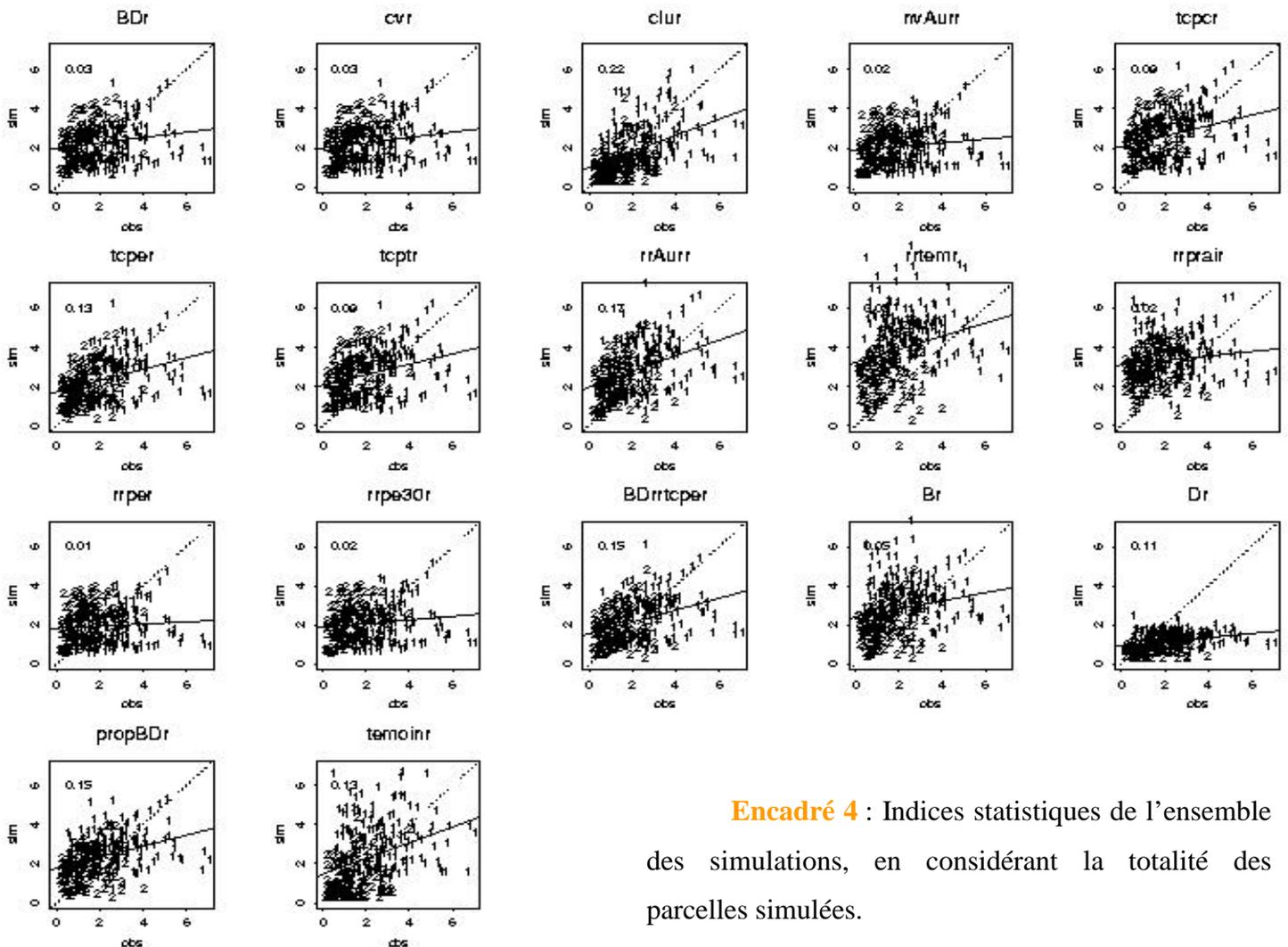
Pour les rendements, deux comparaisons ont été effectuées : une basée sur la différence de rendement (entre simulé et observé), l'autre basée sur un pourcentage d'erreur. Cette dernière méthode semble donc plus juste, mais elle nécessite une bonne précision des données (notamment pour les parcelles avec des rendements inférieurs à 1 t MS/ha, qui représentent tout de même 10% des données), ce qui n'est pas le cas. Les deux approches sont donc conservées.

Des classes sont mises en place pour faciliter la lecture des données et pour mieux repérer les parcelles bien simulées, et celles qui au contraire sont toujours très mal corrélées. Le but de cette analyse est de comprendre les facteurs impliquant des mauvaises simulations, de visualiser l'origine de ces distances, pour ensuite proposer de nouvelles simulations pour confirmer ou infirmer les hypothèses formulées. Tout ceci avec l'objectif de visualiser quels paramètres sont à l'origine des écarts entre les rendements observés et simulés, en zone de montagne.

La même méthode est appliquée après avoir calculé les rendements totaux par an et par parcelle.

Différentes simulations ont donc été effectuées par STICS, avec l'ensemble des USM, constituées en choisissant une combinaison particulière de fichiers plante et fichiers climatiques. Chaque simulation est donc représentative de toutes les prairies, mais avec des combinaisons de données d'entrées différentes. L'ensemble des simulations et de leurs significations est présenté dans le **Tableau 12**.

**Figure 15** : Représentation rendements observés/simulés de l'ensemble des simulations des parcelles de fauches et mixtes. En indice le n° de coupe, et en haut à gauche le r<sup>2</sup>.



**Encadré 4** : Indices statistiques de l'ensemble des simulations, en considérant la totalité des parcelles simulées.

	erreur residuelle	ordorig	penne	r <sup>2</sup>	nash efficacit *	biais	RMSE	RMSEs	RMSEu	nbdonnées
temoin	1.38	1.47	0.4	0.13	-0.45	-0.24	1.6	0.83	1.37	291
BD	0.96	1.99	0.14	0.03	-0.29	-0.21	1.51	1.17	0.96	291
cv	0.96	1.99	0.14	0.03	-0.28	-0.2	1.51	1.17	0.96	291
clu	1.02	1.01	0.41	0.22	0.04	0.22	1.31	0.82	1.02	291
nvAurr	0.93	1.89	0.09	0.02	-0.3	-0.02	1.52	1.2	0.92	291
tcpc	1.11	2.08	0.27	0.09	-0.41	-0.56	1.58	1.13	1.11	291
tcpe	1.02	1.72	0.29	0.13	-0.12	-0.26	1.41	0.98	1.02	291
tcpt	1.11	2.08	0.27	0.09	-0.41	-0.56	1.58	1.13	1.11	291
rrAurr	1.16	1.96	0.4	0.17	-0.41	-0.72	1.58	1.08	1.16	291
rrtemoin	1.55	3.24	0.33	0.08	-2.74	-1.86	2.57	2.06	1.54	291
rrprai	1.09	3.11	0.11	0.02	-1.38	-1.28	2.05	1.74	1.08	291
rrpe	0.89	1.85	0.05	0.01	-0.35	0.11	1.54	1.26	0.89	291
rrpe30	0.93	1.89	0.09	0.02	-0.3	-0.01	1.52	1.2	0.92	291
BDrrtcpe	0.97	1.55	0.3	0.15	-0.03	-0.11	1.35	0.93	0.97	291
Brrpe	1.21	2.41	0.21	0.05	-0.79	-0.78	1.78	1.31	1.21	291
Drrpe	0.4	0.94	0.11	0.11	-0.35	0.91	1.55	1.49	0.4	291
proprrpe	0.9	1.78	0.28	0.15	-0.02	-0.29	1.34	1	0.9	291

Devant le volume conséquent de résultats, nous commencerons par présenter les résultats globaux des simulations. Ensuite, une analyse plus fine de la simulation témoin permettra de commenter les différentes méthodes d'interprétation des résultats. Puis, à partir de comparaisons de simulations particulières, la pertinence des modifications des données d'entrées pourra être évaluée.

### *Comparaison et analyse globale de l'ensemble des simulations.*

Les histogrammes (présentés en **Figures 14**) montrent, tout d'abord, un très faible taux de bonnes simulations, quelles que soient les simulations. Il apparaît nettement cependant que certaines simulations sont meilleures que d'autres, ce qui prouve l'influence des données d'entrée (et de leurs changements) sur les rendements simulés.

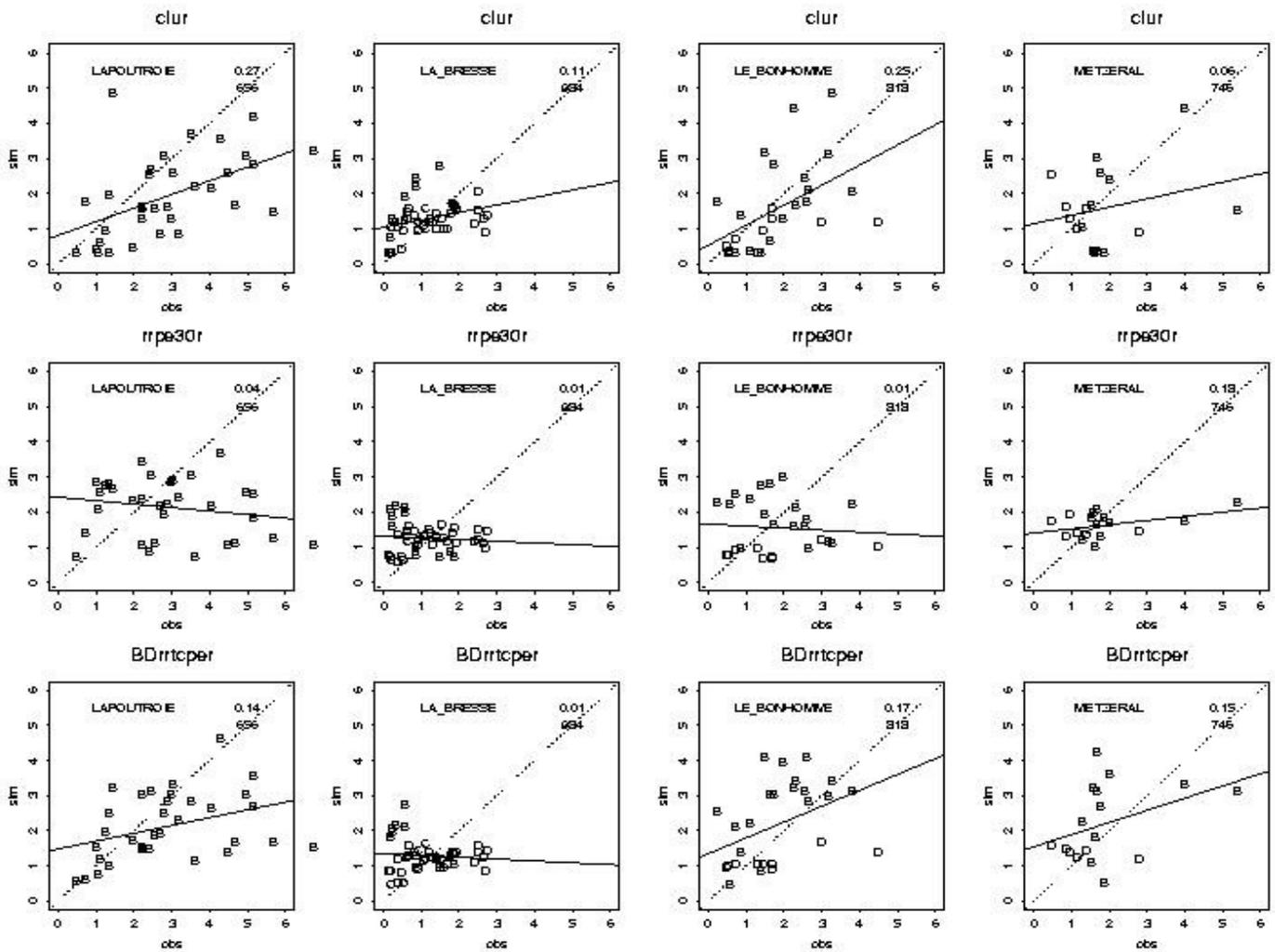
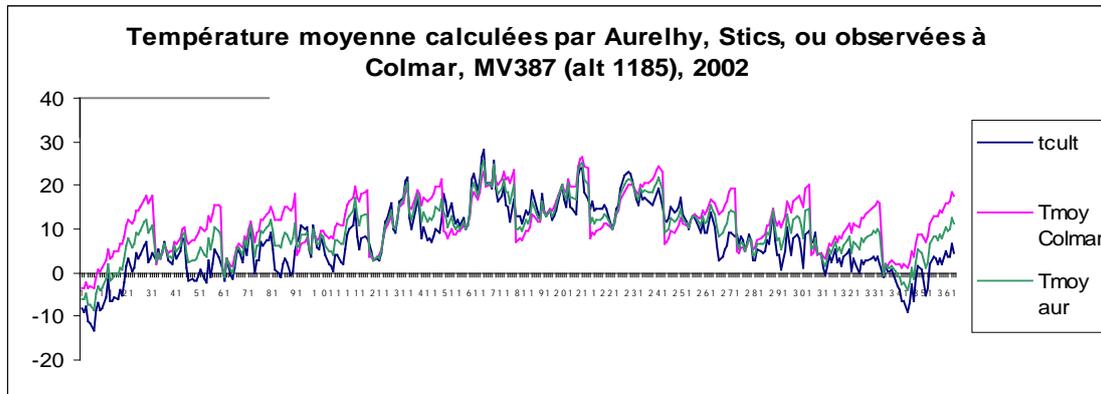
De même, les comparaisons en rendements totaux présentent de meilleurs résultats que les comparaisons des rendements par coupe. Ceci vient sans doute du fait de la levée des incertitudes liées à la répartition des rendements entre coupes, comme il a été montré dans la partie « travail sur les données techniques ».

La représentation graphique «rendements observés/rendements simulés » (**Figures 15**) permet de mieux apprécier la dispersion des différentes coupes par rapport à la régression linéaire calculée, et de les comparer avec l'axe théorique  $y=x$ . De manière globale, les représentations sont très dispersées. Les pentes sont généralement positives (ce qui est rassurant), mais montrent une sur estimation pour des rendements inférieurs à 2 tMS/ha et une sous estimation ensuite.

Ceci est confirmé avec le rapport texte (**Encadré 4**), où ont été calculés quelques indices statistiques tels que le biais, les RMSE, le  $R^2$ , ... Ces résultats permettent de comparer avec plus de précision les différentes simulations, même si l'appui de représentations graphiques restent utiles pour visualiser plus facilement les résultats.

A partir de ces différents traitements graphiques et statistiques, une comparaison des différentes comparaisons est possible. Ainsi, les meilleures simulations, correspondant a priori aux meilleures combinaisons des différents fichiers d'entrée, montrent des bons résultats pour le témoin et principalement pour Clu. Ceci est assez négatif, car les données d'entrée de ces deux simulations correspondent à des climats uniformes sur l'ensemble de la zone, donc à la négation d'une variabilité climatique « évidente » entre plaine et altitude (**Tableau 12, Figures 14 et 15**).

**Figures 16 :** Données d'entrées et résultats de simulations permettant d'évaluer l'influence de la température. Les graphiques représentent les rendements simulés par rapport aux observés.



*Sont représentés les résultats de 3 simulations opposées sur les parcelles de 4 communes. Le r<sup>2</sup> de la régression et l'altitude moyenne sont indexés en haut à droite.*

A l'inverse, la simulation rrtmoin est, pour chaque représentation graphique ou statistique, la plus mauvaise. Ceci peut être dû au fichier plante (qui n'a pas été modifié), ou encore aux méthodes de calcul des variables climatiques.

Enfin, trois simulations semblent se distinguer à travers les diverses représentations : tcpe, rrpe30 et prop. Ces simulations seront particulièrement discutées.

### *Analyse des simulations afin d'évaluer l'impact des différents facteurs.*

Par ces observations, il apparaît que cette méthode d'analyse reste parfois trop globale, car les variables sont à chaque fois liées entre elles. Dans notre objectif initial de mieux percevoir et analyser l'origine des écarts (cette fois, il a été démontré qu'ils étaient bien présents), des comparaisons entre simulations deux à deux ont été effectuées. Elles permettent de fixer certains paramètres d'entrées pour mieux visualiser l'impact du facteur variable sur le rendement simulé.

Différentes comparaisons ont donc été menées. Chaque variable d'entrée a ainsi pu être évaluée indépendamment.

#### Influence de l'ETP :

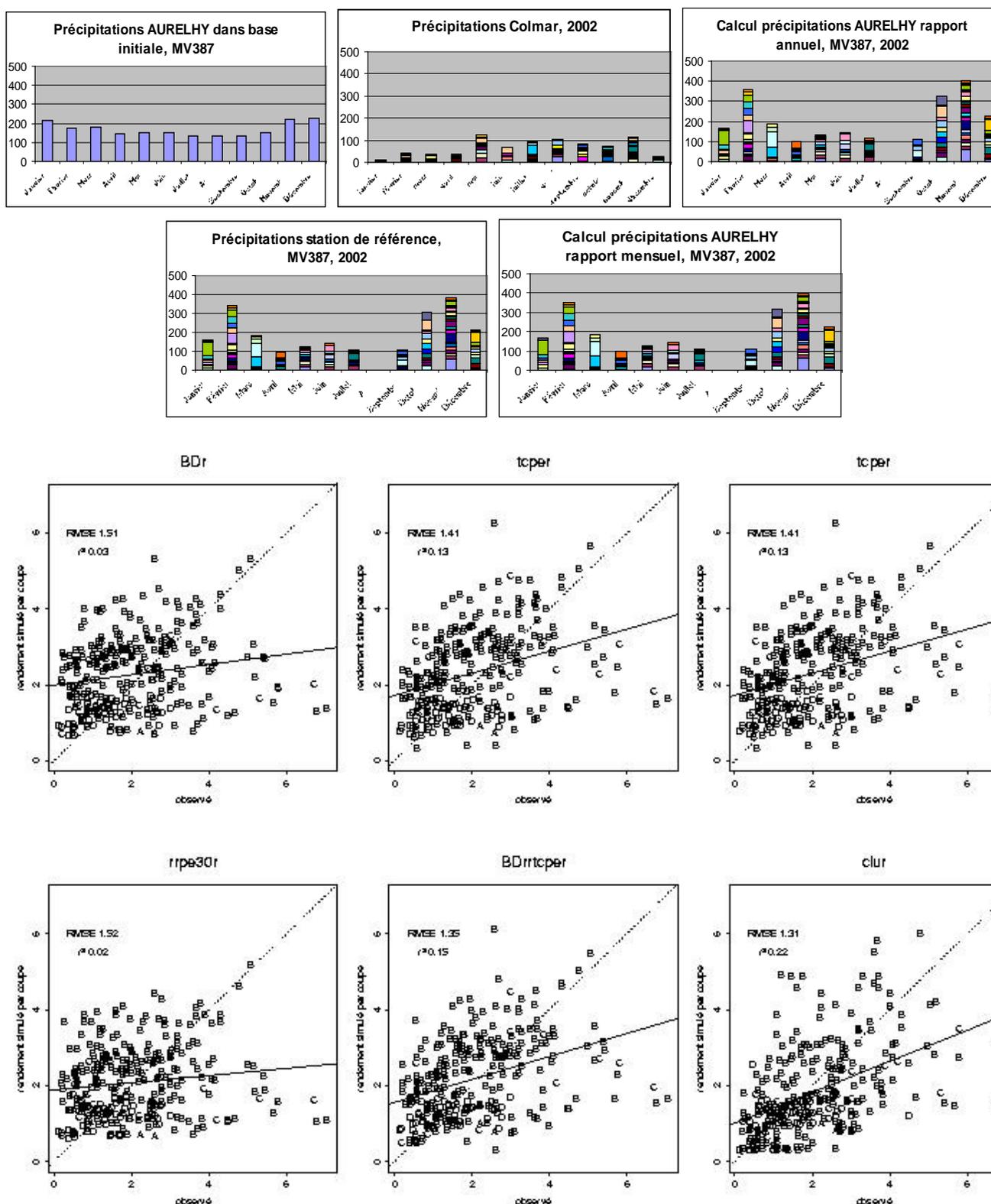
Après évaluation par comparaison entre les simulations tcpe, tcpc et tcpt, il a été établi que ces modifications n'avaient que peu d'impact sur le rendement. car les méthodes de calculs conduisent à des valeurs d'ETP proches. Les valeurs obtenues par AURELHY sont assez différentes (20% par mois), mais n'ont pas été analysées. Il est donc impossible de conclure sur l'influence réelle de l'ETP sur les rendements simulés par STICS.

#### Influence de la température (Figures 16):

Les simulations rrpe (représentant les températures calculées avec AURELHY), BDrrtcpe (représentant les températures calculées avec STICS), et Clu (représentant les températures de Colmar) ont été comparées, de même que les simulations nvAur et rrAur (pour confirmation des résultats). De manière globale, les simulations pour lesquelles la température a été calculée avec STICS présentent de manière générale de meilleurs résultats que celle où les données AURELHY (modifiées par les traitements présentés en première partie) ont été utilisées, et ceci principalement dans les parcelles de basse altitude. Ceci se traduit aussi par une tendance à limiter la sur production dans ces parcelles.

Il faut noter une évaluation nettement meilleure pour la simulation Clu, où les températures de Colmar ont été appliquées à toutes les parcelles. Ceci n'est pas conforme à la variabilité climatique réelle, mais peut traduire certaines observations.

**Figures 17** : Données d'entrées et résultats de simulations permettant d'évaluer l'influence des précipitations.



Les graphiques représentent les rendements simulés par rapport aux observés. Le type fonctionnel de chaque parcelle est indexé. Sont également indiqués le  $r^2$  et l'altitude moyenne.

Ces différentes comparaisons dégagent une première hypothèse de doutes sur la pertinence d'utilisation des températures AURELHY pour notre modèle, ce qui avait déjà été soupçonné dans la première partie. De plus, concernant l'option calcul des températures par STICS, les limites de la relation empirique sont visibles avec les parcelles d'altitude supérieure à 1000m ... sans doute du fait que le différentiel de température est alors exagéré.

Mais ceci met aussi en évidence une potentielle faiblesse de STICS dans l'importance liée à la température. En effet, il existe à certains moments de l'année une différence de température moyenne de près de 10 °C entre les deux méthodes de calcul et pour certaines parcelles de haute altitude. Or cette différence a peu de conséquences sur les rendements simulés, ce qui montre qu'elle est sans doute mal prise en compte par STICS.

#### *Influence des précipitations (Figures 17):*

Les précipitations étaient à l'origine de tout le travail sur les données climatiques, car considérées comme déterminantes du rendement. Sont comparées ici les simulations BD (précipitations calculées avec les données AURELHY et un rapport annuel) avec rrpe30 (précipitations calculées avec les données AURELHY et un rapport mensuel), BDrrtpe (précipitations calculées avec les données AURELHY et un rapport mensuel) avec tcpe (précipitations observées dans la station Météo France de référence, par zone géo climatique), et enfin tcpe avec Clu (précipitations de Colmar affecté à toutes les parcelles).

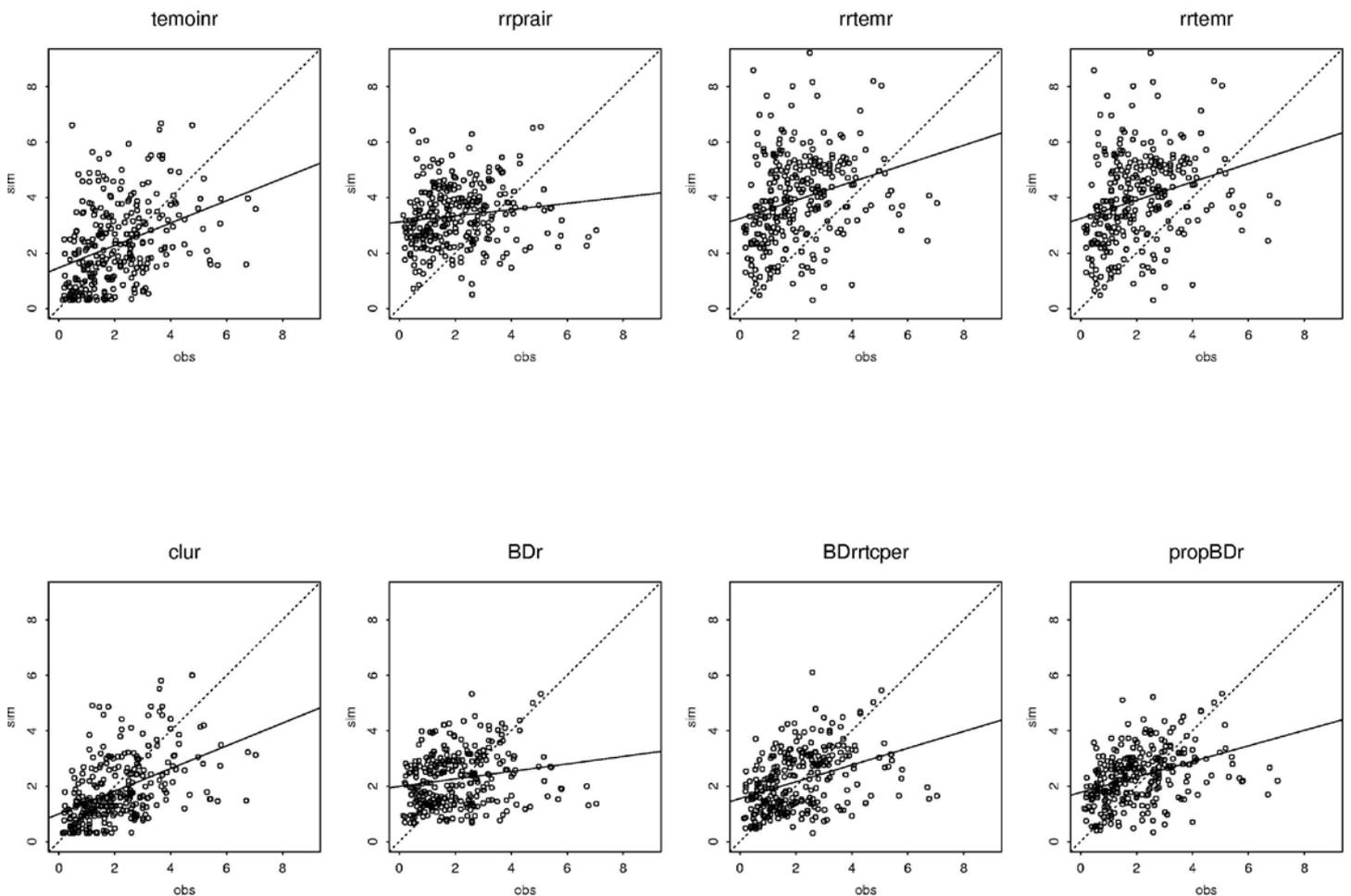
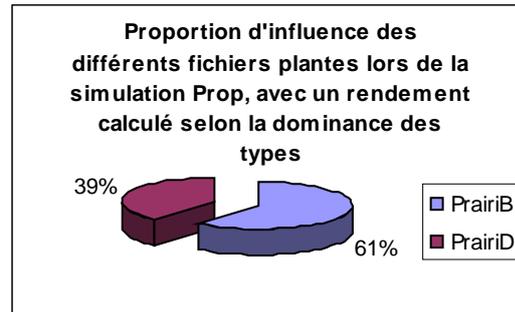
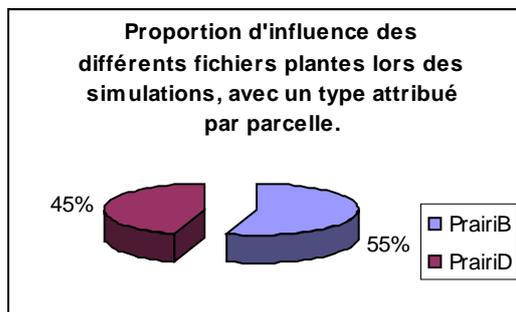
BD/rrtpe30 : De manière globale, on observe peu de différences entre les rendements simulés des deux simulations. Ceci peut s'expliquer par le peu de différences, pour certaines parcelles (même de haute altitude), sur les données d'entrée, même si ce n'est pas le cas de toutes les parcelles (première partie).

BDrrtpe/tcpe : Là encore, il n'existe pas, ou peu, de différences entre les résultats des deux simulations, avec une légère tendance de tcpe à présenter de meilleurs résultats dans certaines zones géographiques (principalement basse altitude). D'un côté, ces observations peuvent être rassurantes car indiqueraient le peu d'erreurs dans la méthode de création de variabilité climatique à partir des données AURELHY. Par contre, elles peuvent être aussi un signe d'une mauvaise réponse de STICS par rapport à des données d'entrées qui divergent.

Tcpe/Clu : Cette fois, la simulation Clu se distingue très bien de tcpe, avec des rendements simulés nettement mieux corrélés aux rendements observés ... ce qui n'est pas logique, puisque les précipitations de Colmar seraient mieux adaptées à toutes les parcelles que toutes les autres ! Dans de nombreux cas, c'est la distribution des précipitations avec l'altitude qui paraît dégrader les résultats. Il est important de noter également que les résultats médiocres des simulations où les précipitations ont été calculées par zone géographique, aucun gradient

**Figures 18** : Résultats de simulations permettant d'évaluer l'influence du fichier plante. Les graphiques représentent les rendements simulés par rapport aux observés.

	prairie.plt	Prairie.plt	prairiB.plt	prairiD.plt
stlevamf	0	<b>116</b>	116	116
tdmin	0	0	<b>2</b>	2
tdmax	30	30	30	30
tcmn	0	0	<b>2</b>	2
tcmax	40	40	40	<b>30</b>
temn	0	0	0	<b>5</b>
teoptbis	24	24	<b>18</b>	18
temax	40	40	40	40
dlaimaxbrut	$3.8 \text{ e}^{-4}$	$3.8 \text{ e}^{-4}$	$3.8 \text{ e}^{-4}$	<b><math>1.9 \text{ e}^{-4}</math></b>
densite	200	200	200	<b>100</b>
efcroijuv	2	2	2	<b>1</b>
efcroiveg	2.5	2.5	2.5	<b>1</b>



de précipitations n'a été appliqué en fonction de l'altitude.

Ces différentes simulations semblent montrer une des origines des écarts des simulations de STICS avec les rendements observés : la présence d'eau en quantité importante, donc toujours suffisante. Il semble en effet que seules les précipitations de Colmar puissent expliquer assez correctement les rendements dans le Massif Vosgien, ce qui n'est pas possible. A l'inverse, les autres simulations semblent « souffrir » d'une trop bonne satisfaction des besoins en eau.

#### Influence du fichier Plante (Figures 18):

L'objectif est de comparer deux à deux différents jeux de simulations afin d'évaluer l'impact sur les rendements simulés de l'utilisation d'un fichier « standard », ou d'un fichier différencié pour les types B et D. Les couples de comparaisons sont (PrairieB.plt et PrairieD.plt/ Prairie.plt): clu /temoin, rrprai/BD, rrtem/BDrrtce, et rrtem (PrairieB.plt et PrairieD.plt)/prop (%PrairieB.plt et %PrairieD.plt en fonction de la dominance des espèces de type B ou D).

Les trois premiers couples de comparaisons mettent en évidence à chaque fois des meilleures simulations avec les fichiers plantes modifiés qu'avec le fichier plante initial. De plus, avec la dernière comparaison, les résultats semblent encore meilleurs lorsque les types sont pondérés par la dominance des types fonctionnels au sein de la prairie.

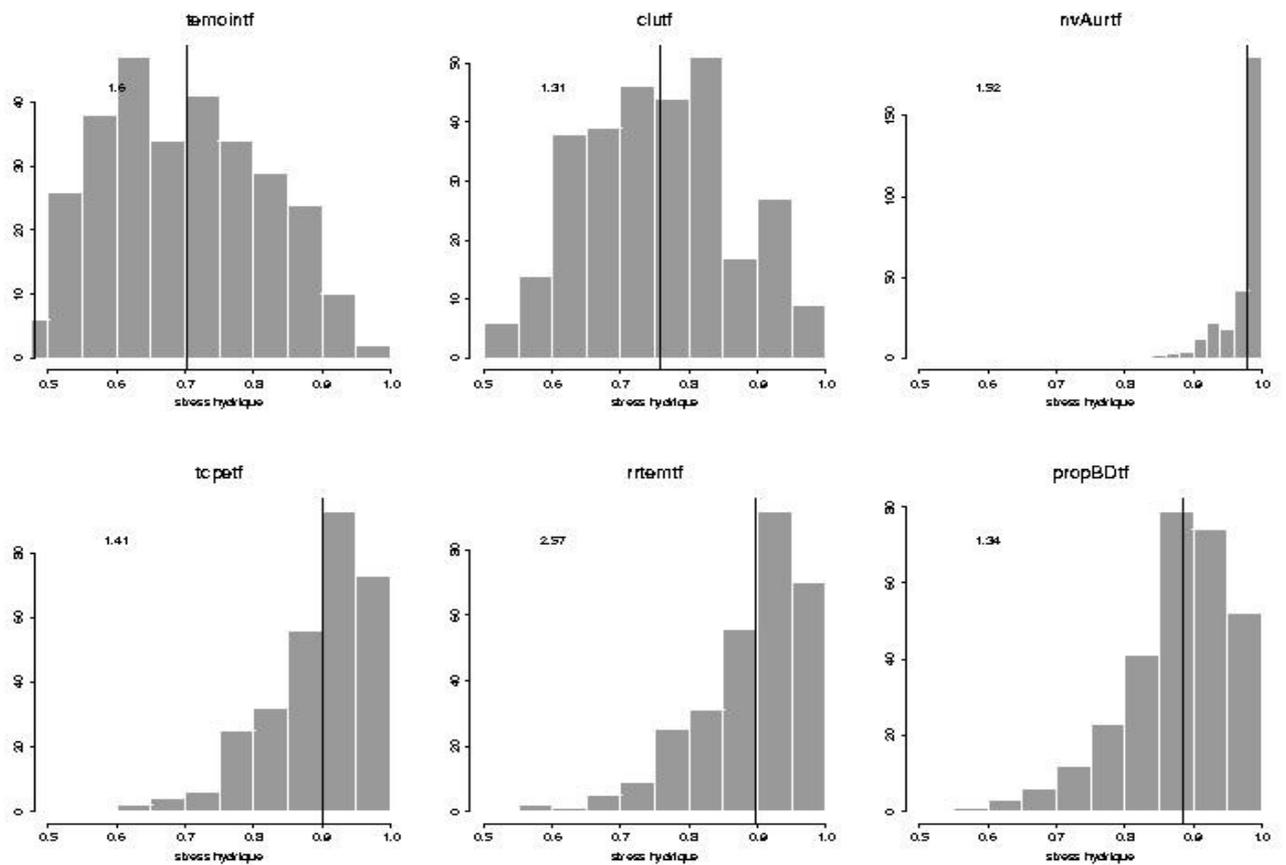
Tout ceci montre la nécessité de prendre en considération les types fonctionnels même lors d'une modélisation. C'est un résultat important car cela fait partie des objectifs de l'étude.

#### ***Discussion des résultats des simulations :***

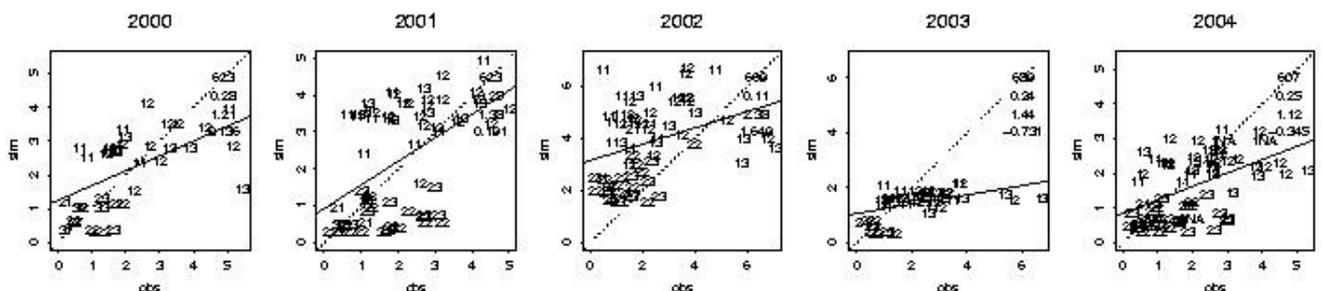
Les différentes simulations ont été construites à partir de divers fichiers d'entrée pour lesquels des incertitudes ont été mises en évidence dans la première partie. Tous ces travaux et ces « améliorations » ont été effectués dans le but de se rapprocher le plus possible des conditions initiales théoriques, autant du point de vue climatique que du point de vue physiologie de la plante. Or il apparaît dans ces résultats que les simulations présentant des rendements simulés les mieux corrélées aux rendements observés ne sont pas celles ayant les caractéristiques les plus pertinentes des conditions du Massif Vosgien.

Par les comparaisons effectuées une amélioration des simulations, a été mise en évidence par la modification du fichier plante, et également par la prise en compte de la proportion des espèces de graminées. Ce résultat est important car il permet la jonction entre les conclusions de l'équipe de Nancy dont la typologie des prairies est basée sur la dominance des espèces, l'équipe de Toulouse travaillant sur les types fonctionnels, et l'équipe d'Avignon modélisant à l'aide de STICS. Cependant, beaucoup d'incohérences ont été découvertes en ce

**Figures 19 :** Représentations de l'indice de stress hydrique en fonction du rendement simulé.

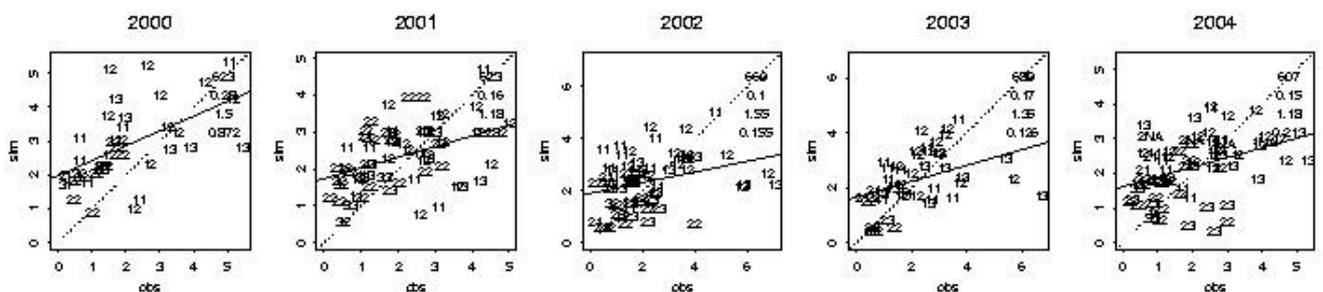


**Figures 20 :** Variabilité selon les années.



*Simulation Clu (climat de Colmar appliqué à toutes les parcelles)*

*Simulation BDtcrpe (climat composé après différents calculs, en théorie plus représentatif des conditions réelles)*



qui concerne les climats, ce qui permet de dresser des hypothèses sur les causes, et les méthodes pour les résoudre.

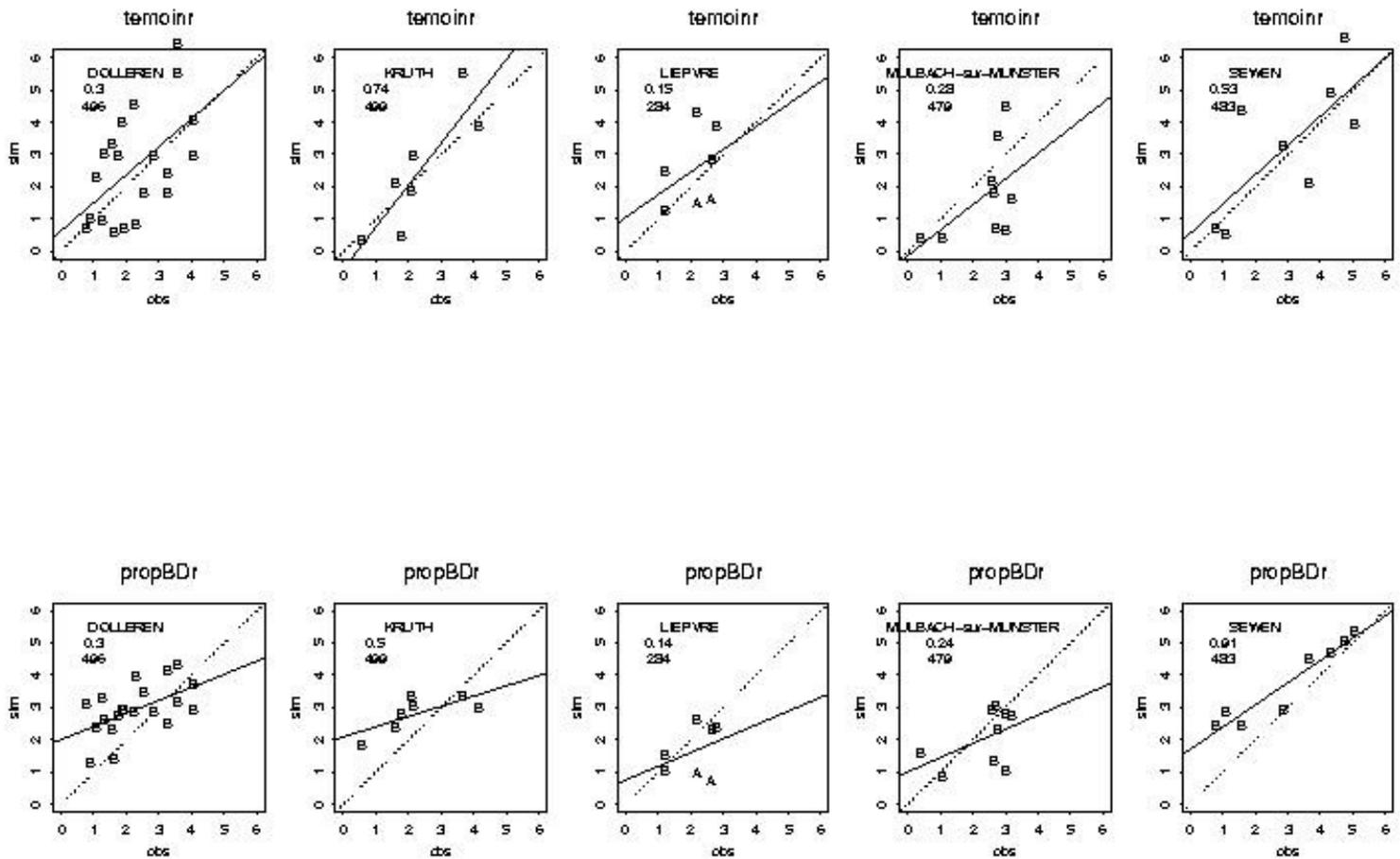
Il apparaît tout d'abord, quelques problèmes liés aux variations de températures : même en appliquant des températures très différentes, sur plusieurs mois, le modèle réagit presque de la même manière. Ceci peut venir du fait que le modèle ne gère pas l'amplitude thermique, puisqu'il fonctionne à partir de la température moyenne journalière. Il semblerait pourtant qu'en montagne, l'amplitude de température journalière soit beaucoup plus importante qu'en plaine ... ce qui justifierait la sur estimation de la production printanière par le modèle.

Les précipitations semblent être une cause encore plus importante des écarts du modèle. En effet, il a été montré que les « pires » précipitations théoriques sont celles qui à travers STICS présentent les meilleures simulations. En comparant les rendements simulés avec les indices de stress hydriques, pour chaque simulation, il apparaît nettement qu'aucune simulation ne présente de manque d'eau, à part pour les simulations ayant le climat de Colmar (**Figures 19**). Ceci confirme les hypothèses selon lesquelles le bilan hydrique serait responsable d'une partie des écarts : la majorité des parcelles étant en capacité au champ toute l'année, la production est maximale (ou presque) durant tout le cycle végétatif, ce qui n'est pas le cas lorsqu'on applique des conditions climatiques plus sèches (Colmar dans notre cas).

Cette satisfaction des besoins en eau peut avoir plusieurs causes : un problème de sol, au niveau des entrées du modèle, qui a été mal estimé (trop profond, trop limoneux, ...) ou encore le ruissellement, que les sols qui ont été définis ne prennent pas en compte, et qui peut être présent sous différentes formes dans les parcelles, même si les RU renseignées restent faibles.

Un autre résultat important est l'importance du climat, mis en évidence par les graphiques « rendements observés/rendements simulés » année par année. La réponse du modèle est différente d'une année à l'autre, ce qui est rassurant. L'année 2003 particulièrement sèche se distingue facilement des autres années, comme par exemple pour la simulation Clu où les rendements simulés sont beaucoup trop faibles (**Figures 20**). Cette observation est très intéressante car elle prouve l'impact du déficit en eau sur les simulations du rendement par STICS. Ce résultat amène donc à remettre en cause le seuil de prise en compte du déficit hydrique.

Figures 21 : Exemples de communes proches de la plaine alsacienne.



## Discussion et conclusion de l'étude

L'objectif initial de cette étude était, à partir d'une base de données existante et d'une nouvelle typologie de graminées, d'effectuer des simulations avec le logiciel STICS et d'analyser les résultats afin de mieux comprendre l'origine des écarts entre les rendements simulés et les rendements observés, sur une zone de moyenne montagne. Les résultats obtenus ne permettent malheureusement pas de répondre précisément à ces attentes, ce qui est donc assez décevant. Par contre, un travail important a été effectué en parallèle sur la base de données en elle-même. Celui-ci a mis en évidence un certain nombre de résultats indépendants, mais qui se révèlent intéressants.

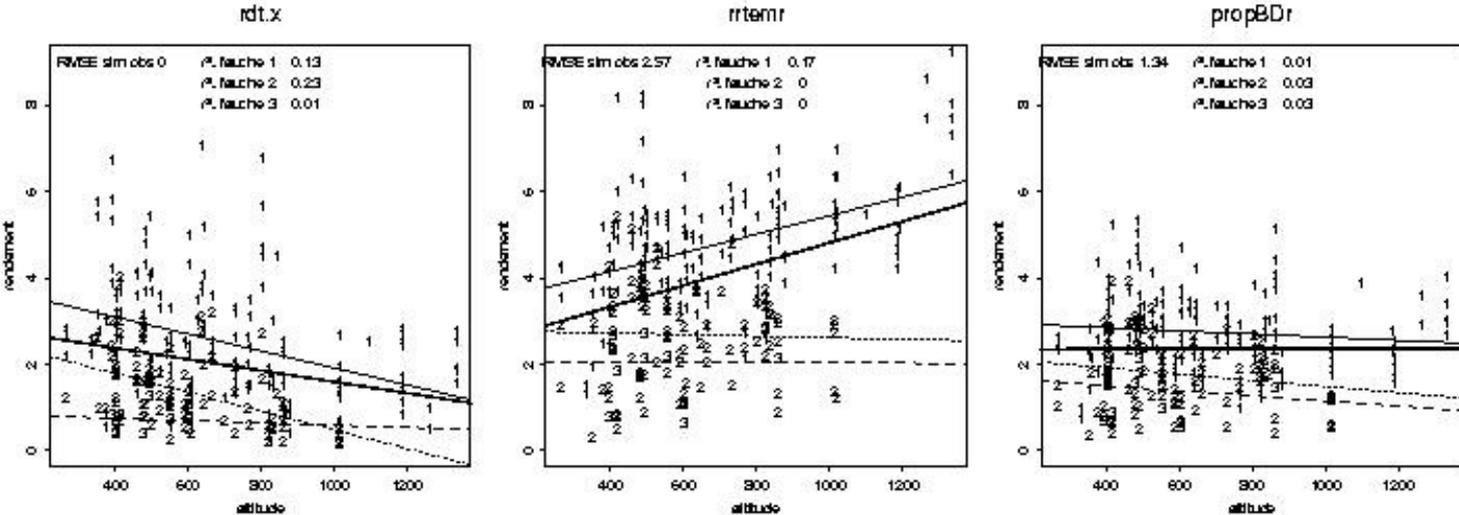
### *Des résultats assez éloignés de l'objectif initial.*

Les résultats obtenus par cette étude ne permettent de dégager que des tendances et des pistes de réflexions. Ainsi, aucune modification importante n'aura été apportée au logiciel STICS (mis à part sur quelques paramètres plantes), mais les pistes dégagées permettront sans doute de poursuivre le travail dans ce sens.

Cet écart par rapport aux objectifs initiaux est dû principalement à un travail important « annexe » de traitement et d'analyse de la base de données initiale, ainsi qu'aux incertitudes qui lui sont liées. Celles-ci ont été envisagées et détaillées dans la première partie du rapport. Elles sont présentes au niveau de toutes les variables d'entrées : dans les fichiers techniques (sols, dates de fauches et de fertilisations, quantités de matières sèches récoltées et de fertilisation apportée...), dans les fichiers plantes (liées aux types fonctionnels, à leur transposition pour la caractérisation des parcelles, ...), dans les fichiers climatiques (liées à l'utilisation de données créées et non observées, ainsi qu'à toutes les erreurs que cela peut engendrer, ...). De plus, certaines pistes de recherches, qui avaient été suggérées, n'ont pu être développées, comme l'utilisation des degrés jours, par exemple, bien qu'ils soient implicitement employés par le modèle.

Au final, les résultats obtenus comprennent donc de nombreuses incertitudes indépendantes au modèle STICS. Compte tenu de tous ces éléments, les résultats obtenus ne sont donc pas si mauvais, en ce qui concerne l'efficacité du modèle. Il faut par exemple remarquer une bonne sensibilité du modèle aux précipitations, mais aussi aux températures. Enfin, il faut noter que certaines parcelles de basse altitude et bien renseignées présentent des rendements simulés très proches des rendements théoriques. C'est le cas par exemple des parcelles de certaines communes d'Alsace (**Figure 21**). Inversement, certaines parcelles où un

Figures 22 : Effet de l'altitude sur la production réelle et sur les simulations.



grand nombre de données ont été appliquées de manière théorique sont systématiquement très mal simulées par STICS. L'altitude semble toutefois être mieux prise en compte ([Figure 22](#)).

### *Des résultats intermédiaires intéressants.*

Comme il vient d'être dit, les objectifs de l'étude ne sont donc que partiellement atteints. Cependant, ce stage a tout de même dégagé quelques résultats intéressants :

- d'un point de vue climatologique, quelques pistes ont été proposées et explorées :
  - création de variabilité climatique à l'échelle d'une parcelle, à partir de données AURELHY ;
  - protocole de constitution de zones de moyenne montagne homogènes d'un point de vue « géo climatique » ;
  - extrapolation de la typologie des graminées prairiales sur une base statistique.
- d'un point de vue type fonctionnel, la caractérisation de types pour quelques espèces, à travers une méthode de classification originale pour ces travaux a permis de confronter et de relier différentes typologies de prairies (TMV et TF).
- d'un point de vue simulation, enfin, cette étude a permis de proposer quelques résultats intéressants et d'avancer dans la compréhension des erreurs de STICS.

Mais ce stage aura surtout permis de soulever un grand nombre de limites et de tendances, qui pourront être approfondies dans des travaux à venir, et ceci dans plusieurs domaines :

\_Météorologie, avec une reconnaissance et une nouvelle utilisation des données AURELHY dans la création de micro climats

\_STICS, avec de nombreuses tendances mises à jour, et des possibilités de dégager des paramètres « responsables », et de les optimiser pour mieux les adapter aux prairies de montagne.

\_Types fonctionnels, avec de nouvelles méthodes pour analyser et extrapoler des typologies existantes. Là encore, de nombreuses recherches sont en cours, et ce travail a également pour but d'apporter quelques tendances et résultats qui ont pu être analysés.



## *Perspectives*

### *a. Pour les simulations*

De manière globale, il est certain qu'un grand nombre d'idées n'ont pu être développées par manque de temps, notamment du fait des nombreux travaux menés sur la base de données initiale. Ces pistes, formulées explicitement ou non, seraient donc intéressantes à explorer. En particulier, il serait utile d'acquérir une base de données construite pour STICS, même sur une courte durée et avec moins de parcelles. En lui appliquant la même analyse et les mêmes travaux que cette étude a pu développer, elle amènerait un point de vue pertinent et critique sur tout le travail qui a été effectué, à la fois pour les simulations et les utilisations de STICS, mais aussi pour toutes les hypothèses qui ont été formulées dans les différents travaux annexes (climats, types fonctionnels, regroupements de parcelles, itinéraires techniques, ...). Quelques relevés sur quelques unes des parcelles étudiées permettraient donc d'avoir une meilleure analyse des résultats et une meilleure évaluation des erreurs d'entrées.

Pour les simulations, il pourrait également être intéressant de simuler l'ensemble des parcelles avec les 2 fichiers plantes « *PrairiB* » et « *PrairiD* », et de pondérer ensuite les rendements simulés en fonction de la dominance des types dans la parcelle en question. De plus, une des pistes de recherche pourrait être une meilleure définition des paramètres contenus dans les fichiers plantes « *PrairiB* et *D* », ceci en prenant pour base des valeurs tirées d'expérimentations sur des prairies caractéristiques.

### *b. Pour les types fonctionnels*

En ce qui concerne les groupes fonctionnels, de nombreuses voies ont été découvertes et restent à explorer. Il serait tout d'abord intéressant d'appliquer la même méthode d'analyse avec les prochains résultats de P. Cruz et son équipe de l'INRA Toulouse, avec notamment la caractérisation d'une quarantaine de graminées supplémentaires. Cette analyse pourrait compléter et vérifier par d'autres biais la robustesse de la typologie proposée.

De même, il est apparu dans cette étude une grande importance de la composition floristique des prairies et de la dominance de certaines espèces. Ceci tend à prouver l'intérêt de mettre plus en relation des typologies comme celle proposée par S. Plantureux avec les notions de typologie de traits fonctionnels, surtout pour le passage de la caractérisation de la parcelle.



### c. Pour les climats

Les méthodes utilisées pour la création de variabilité climatique sont nouvelles, et ouvrent donc la voie à de nombreuses pistes de développement. Il est possible d'imaginer par exemple l'utilisation de cette méthode pour créer des climats spécifiques à chaque parcelle, afin d'avoir une meilleure sensibilité, etc... Cependant, il est nécessaire avant tout de consolider la méthode en la testant sur des parcelles témoins, afin de mieux évaluer sa précision (ou son taux d'erreur !).

La méthode de regroupement en zones homogènes peut également être intéressante à confronter avec d'autres méthodes, et présente l'avantage d'être assez simple d'utilisation.

### d. Pour la base initiale.

Les méthodes employées pour analyser et compléter la base de données peuvent être utilisées pour traiter d'autres bases incomplètes ou qui ne correspondent pas au format STICS. Il faudrait cependant tester ces méthodes en acquérant quelques valeurs observées témoins et en les confrontant aux données simulées.

De nombreuses pistes restent donc à explorer, non seulement à partir des simulations de STICS, mais aussi dans les différents domaines que cette étude a pu toucher.

## ***Conclusion générale***

Malgré des résultats contrastés, cette étude aura tout de même permis d'avancer sur de nombreux sujets annexes, et de confirmer ou remettre en cause certains acquis.

Ce travail aura donc participé à la grande marche collective de la recherche sur les prairies permanentes et sur leur fonctionnement.

Il reste cependant encore beaucoup à faire, comme cela à déjà été évoqué dans les discussions, aussi bien sur la typologie des graminées et sa « translation » sur les prairies, que sur l'adaptation du modèle STICS pour ces prairies au fonctionnement si complexe et si mal connu encore aujourd'hui.

D'un point de vue personnel enfin, ce stage m'aura ouvert aux mondes fantastiques de la recherche fondamentale et de l'informatique, m'apprenant ainsi patience et rigueur dans la travail et dans la gestion de l'étude. Ceci en fait donc une expérience enrichissante.



## **Bibliographie**

- Al Haj Khaled R. L'évaluation des caractéristiques agronomiques d'espèces par leurs traits de vie comme étape préalable au diagnostic des communautés à flore complexe. Thèse INPL, Nancy. 260 p. + annexes. 2005
- Ansquer P. Caractérisation agroécologique des végétations prairiales naturelles en réponse aux pratiques agricoles, Thèse INPT, Toulouse. 272p + annexes. 2006
- Ansquer P., Theau J. P., Cruz P., Viegas J., Al Haj Khaled R. and Duru M. Caractérisation de la diversité fonctionnelle des prairies à flore complexe. Vers la construction d'outils de gestion. Fourrages 179:353-368. 2004
- Ansquer P., Cruz P., Theau J.P., Lecloux E. and Duru M. How to simplify tools for natural grassland characterisation based on biological measures without losing too much information ? , Proceedings Internat. Grassl. Congress, Dublin. 2005
- Benichou P., Le Breton O. Prise en compte de la topographie pour la cartographie de champs pluviométriques statistiques : la méthode AURELHY, Agrométéorologie des régions de moyenne montagne, Les colloques de l'INRA n°39. 1987
- Brisson N., Mary B. Notice concept et formalisme STICS, 2002
- Brisson N., F. Ruget, P. Gate, J. Lorgeou, B. Nicoullau, X. Tayot, D. Plenet, M.H. Jeuffroy, A. Bouthier, D. Ripoche, B. Mary and E. Justes. STICS, a generic model for simulating crops and their water and nitrogens balances. II model validation for wheat and maize, Agronomie 22, 69-92. 2002
- Cornelissen J.H.C., Lavorel S., Garnier E., Diaz S., Buchmann N., Gurvich D.E., Reich P.B., ter Steege H., Morgan H.D., van der Heijden M.G.A, Pausas J.G. and Poorter H. A book hand ok protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide, Australian Journal of Botany, 2003, 51, 335-380. 2003
- Cruz, P., M. Duru, J. P. Theau, and P. Ansquer Déterminer la valeur d'usage des prairies permanentes, une lecture simplifiée des communautés végétales, façade, journal interne INRA, n°18

- Cruz, P., M. Duru, O. Therond, J. P. Theau, C. Ducourtieux, C. Jouany, R. Al Haj Khaled and P. Ansquer. Une nouvelle approche pour caractériser les prairies naturelles et leur valeur d'usage. *Fourrages* 172:335-354. 2002
- Debril J., E. Kerneis, S. Carré, P. Cruz, F. Gastal. Specific leaf area on fresh matter basis : a soft trait for leaf thickness ?, *Proceedings Internat. Grassl. Congress, Dublin*. 2005
- Duru, M., P. Cruz and D. Magda. Using plant traits to compare sward structure and composition of grass species across environmental gradients. *Applied Vegetation Science* 7:11-18. 2004
- Duru, M. and A. Pflimlin. Outils et méthodes de conception et d'évaluation de systèmes fourragers. *Actes du colloque "Aide à la décision et choix de stratégies dans les entreprises agricoles"*, Laon, France. p. 127-142. 1996
- Duru, M., E. Chia, P. Geslin and A. Chertier. Production ou co-conception des outils? Le cas d'un outil de diagnostic pour la gestion du pâturage. *Actes du colloque Territoires et enjeux du développement régional, Lyon, France*. 17 p. 2005
- Duru M., Ansquer P., Cruz P., Théau J.P., Al Haj Khaled R., Jouany C. and Therond O. Typologie de prairies naturelles en vue d'évaluer leur valeur d'usage; base agro écologique et exemples d'applications, document de travail. 2007
- Gateau C., Novak, F. Kockmann, F. Ruget, S. Granger. Evaluation du potentiel herbager et de sa variabilité en élevage allaitant, *Fourrages* (2006) 186, 257-269. 2006
- Grime, J.-P., J. G. Hodgson and R. Hunt. *Comparative plant ecology*. Unwin Hyman Ltd, London, UK. 742 p. 1988
- Lebourgeois F., C. Piedallu. Appréhender le niveau de secheresse dans le cadre d'études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques, *Rev. For. Fr.* LVII. 2005
- Piedallu C., J.C. Gégout. Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modelling, document de travail, 2007
- Plantureux S., Bonischot R., Guckert A. Classification, vegetation dynamics and forage production of permanent pastures in Lorraine. *European journal of agronomy*. II(1):11-17. 1993
- Plantureux S. La biodiversité des prairies au cœur des débats de l'AFPF : enjeux et perspectives. *Fourrages* . 179 : 451-453. 2004

- Plantureux S. Le Massif Vosgien \_ Typologie des prairies naturelles. 2007
- Poozesh V., R. Al Haj Khaled, P. Ansquer, J.P. Theau, M. Duru, G. Bertoni and P. Cruz. Are leaf traits stable enough to rank native grasses in contrasting growth conditions? Proceedings Internat. Grassl. Congress, Dublin. 2005
- Tiers N. Participation à la modélisation de la production fourragère à l'échelle nationale. Rapport d'activité, 38 p.+annexes, INRA, Bioclimatologie, Avignon. 1998
- Ruget F., S. Novak, S. Granger Du modèle STICS au modèle ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée, Fourrages (2006) 186, 241-256. 2006
- Ruget F., N. Brisson, R. Decolle, R. Faivre Sensitivity analysis of a crop simulation model, STICS, in order to choose the main parameters to be estimated, Agronomie 22 (2002) 133-158. 2002
- Ruget F., Delécolle R., Tiers N., Rabaud V., Duru M., Gastal F., Donet I. "Estimating alarm situations on grassland production at regional scale", 7th ICCTA, Computer Technology in Agricultural management and risk prevention, Firenze, Italia, 15-18 November 1998, abstract, 130. 1998
- Ruget F., Duru M., Gastal F. "Adaptation of an annual crop model (STICS) to a perennial crop : grassland", Int. Symp. modelling cropping systems, Lleida, 21-23 June 1999, 111-112. 1999
- Thébault A. Etude du fonctionnement écologique des prairies et de sa contribution à la diversité des usages dont elles font l'objet, mémoire de fin d'étude de l'ENSAR. 2004
- M. Trnka, J. Eitzinger, G. Gruszczynski, K. Buchgraber, R. Resch and A. Schaumberger A simple statistical model for predicting herbage production from permanente grassland, Grass and Forage Science, 61, 253-271. 2006
- Viégas J., M. Duru, P. Cruz, J.P. Theau, P. Ansquer and C. Ducourtieux Herbage growth model for different types of natural grasslands, Proceedings Internat. Grassl. Congress, Dublin. 2005
- Viégas J., P. Cruz, J.P. Theau, C. Jouany, P. Ansquer, R. Al Haj Khaled, O. Therond and M. Duru Variation of LDMC and SLA relationship between growth forms in natural grasslands, Proceedings Internat. Grassl. Congress, Dublin. 2005



## Annexe 1 : Liste des documents en vis-à-vis.

**Tableau 1** : Liste des variables de la base initiales exploitables pour le traitement empirique  
**Tableau 2** : Liste des variables utilisées pour la classification C2, et statut des variables lors du traitement des données.  
**Tableau 3** : Passage de la classification C1 à C2.  
**Tableau 4** : Classification retenue, désignée ensuite classification C2.  
**Tableau 5** : Caractéristiques des sols attribués  
**Tableau 5** : Méthode d'attribution de dates de fertilisation.  
**Tableau 6** : Méthode d'attribution des dates de coupe par parcelle.  
**Tableau 7** : Liste des secteurs géo climatiques formés  
**Tableau 8** : Résumé des données moyennes avant et après création de variabilité.  
**Tableau 9** : Comparaison des paramètres des différents fichiers plantes « prairie »  
**Tableau 10** : Résumé des possibilités pour construire les USM, avant chaque simulation.  
**Tableau 11** : Origine des données météorologiques utilisées pour l'étude.  
**Tableau 12** : Signification des simulations effectuées avec STICS sur les prairies de fauches du Massif Vosgien.

**Encadré 1** : Traitement avec les rendements totaux moyens, sans la variable « nombre de coupes ».  
**Encadré 2** : Traitement avec les rendements totaux moyens, avec tri des variables pertinentes d'un point de vue agronomique.  
**Encadré 3** : Justifications des changements des paramètres des fichiers plantes  
**Encadré 4** : Indices statistiques de l'ensemble des simulations, en considérant la totalité des parcelles simulées.

**Figure 1** : Sortie de l'AFC, espèces actives (bleu) et types fonctionnels (rouge).  
**Figure 2** : Comparaison de la proportion de graminées classées avec C1 et C2  
**Figure 3** : Exemple de la parcelle MV106, type B selon C1 ou type D selon C2.  
**Figure 4** : Impact du choix de la classification sur la typologie des espèces, pour l'ensemble des parcelles  
**Figure 5** : Impact du choix de la classification sur la typologie des prairies.  
**Figure 6** : Fertilisation azotée des parcelles.  
**Figure 7** : Le Massif Vosgien.  
**Figures 8** : Comparaison des données AURELHY brutes avec les données des stations expérimentales INRA.  
**Figures 8 bis** : Illustration de la méthode de création des zones géoclimatiques homogènes.  
**Figures 9** : Homogénéité des groupes formés. Exemple de la zone de Sewen.  
**Figures 10** : Comparaison des 18 zones géographiques entre elles, pour TX et RR  
**Figures 11** : Création de variabilité climatique \_ Exemple de la parcelles MV106  
**Figure 12** : Variations journalière et interannuelle créée à partir des données Aurelhy  
**Figure 13** : Diagramme du principe de fonctionnement du modèle STICS  
**Figures 14** : Comparaison par différence observés - simulés pour l'ensemble des simulations.  
**Figure 15** : Représentation rendements observés/simulés de l'ensemble des simulations des parcelles de fauches et mixtes. En indice le n° de coupe, et en haut à gauche le r<sup>2</sup>.  
**Figures 16** : Données d'entrées et résultats de simulations permettant d'évaluer l'influence de la température. Les graphiques représentent les rendements simulés par rapport aux observés.  
**Figures 17** : Données d'entrées et résultats de simulations permettant d'évaluer l'influence des précipitations.  
**Figures 18** : Résultats de simulations permettant d'évaluer l'influence du fichier plante. Les graphiques représentent les rendements simulés par rapport aux observés.  
**Figures 19** : Représentations de l'indice de stress hydrique en fonction du rendement simulé.  
**Figures 20** : Variabilité selon les années.  
**Figures 21** : Exemples de communes proches de la plaine alsacienne.  
**Figures 22** : Effet de l'altitude sur les simulations.

**Dendrogramme 1** : Classification hiérarchique directe, validation de la méthode  
**Dendrogramme 2** : Classification hiérarchique directe, extrapolation de la méthode

## Annexe 2 : Liste des variables utilisées dans les traitements de la base de données.

variable	type de variable	définition	unité
alti	quantitative	altitude	m
alti_classe	qualitative	Altitude en classe	m
App_ferti=A_F	qualitative	apport de fertilisation	unités d'N/ha?
cn	quantitative	rapport C/N	
DATE_1ere_expl=de	qualitative	date de première exploitation	
dj_juil	quantitative	somme des degrés jours au 1er juillet (base 0°C, début 1er avril)	°j
dj_juin	quantitative	somme des degrés jours au 1er juin (base 0°C, début 1er avril)	°j
dj_mai	quantitative	somme des degrés jours au 1er mai (base 0°C, début 1er avril)	°j
dj_oct	quantitative	somme des degrés jours au 1er aout (base 0°C, début 1er avril)	°j
ECP	quantitative	état calcique ?	?
expo	quantitative	exposition	?
HP	quantitative	?	
hs	qualitative	humidité simplifiée	
ID_PARC	identificateur	identification de la parcelle	
NB_coup	quantitative	nombre de coupes effectuées sur la parcelle	
NP	quantitative	indice d'azote?	
P	quantitative	somme des précipitations sur l'année	mm
pente	quantitative	pente	?
ph	quantitative	valeur du pH	
PRATdetail	qualitative	détail des pratiques culturales	
precocite	qualitative	cf codification (fiche n°3) SP	
pression_pat_classes=	qualitative	classes de pressions de paturage	somme d'ugb par jour?
Rdt_class	qualitative	rendements en classe	
rdt_totsf2003_moy	quantitative	rendement	tMS/ha/an
ru	quantitative	teneur de la réserve Utile	mm/an?
som_bhc	quantitative	somme des bilans hydriques sur l'année	?
som_defhyd	quantitative	somme des déficits hydriques sur l'année	mm/an?
tmax	quantitative	température maximale (moyenne mensuelle) observée pendant l'année	°C
tmin	quantitative	température minimale (moyenne mensuelle) observée pendant l'année	°C
tmoy	quantitative	température moyenne(moyenne mensuelle) observée pendant l'année	°C
TYP_04	qualitative	type de prairie codifiée par Sylvain Plantureux et al	

### Annexe 3 : Correspondances codes-noms des espèces

Code	Nom vernaculaire	Nom scientifique
G0001	Vulpin des prés	<i>Alopecurus pratensis</i> L.
G0002	Fromental	<i>Arrhenatherum elatius</i> (L.) Beauv.
G0003	Avoine pubescente	<i>Avenula pubescens</i> (Huds.) Dumort.
G0004	Pâturin de Chaix	<i>Poa chaixii</i> Villars
G0005	Dactyle aggloméré	<i>Dactylis glomerata</i> L.
G0006	Fétuque élevée	<i>Festuca arundinacea</i> Schreber
G0007	Fétuque des prés	<i>Festuca pratensis</i> Huds.
G0011	Fléole des prés	<i>Phleum pratense</i> L.
G0012	Chiendent commun	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Desv. & Nevski
G0014	Brome dressé	<i>Bromus erectus</i> Huds.
G0015	Brome mou	<i>Bromus hordeaceus</i> subsp. <i>hordeaceus</i> L.
G0016	Canche cespiteuse	<i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) Beauv.
G0017	Glycérie flottante	<i>Glyceria fluitans</i> (L.) R.Brown
G0018	Houlque laineuse	<i>Holcus lanatus</i> L.
G0021	Ray-grass italien	<i>Lolium multiflorum</i> Lam.
G0022	Avoine jaunâtre	<i>Trisetum flavescens</i> (L.) Beauv.
G0023	Agrostide stolonifère	<i>Agrostis stolonifera</i> L.
G0024	Agrostide des chiens	<i>Agrostis canina</i> L.
G0025	Agrostide vulgaire	<i>Agrostis capillaris</i> L.
G0027	Vulpin genouillé	<i>Alopecurus geniculatus</i> L.
G0028	Flouve odorante	<i>Anthoxanthum odoratum</i> L.
G0029	Brize moyenne	<i>Briza media</i> L.
G0030	Crételle	<i>Cynosurus cristatus</i> L.
G0031	Canche flexueuse	<i>Deschampsia flexuosa</i> (L.) Trin.
G0032	Fétuque ovine	<i>Festuca ovina</i> L. subsp. <i>ovina</i>
G0033	Fétuque rouge	<i>Festuca rubra</i> L. subsp. <i>rubra</i>
G0034	Houlque molle	<i>Holcus mollis</i> L.
G0035	Ray-grass anglais	<i>Lolium perenne</i> L.
G0036	Pâturin annuel	<i>Poa annua</i> L.
G0038	Pâturin commun	<i>Poa trivialis</i> L.
G0039	Avoine des prés	<i>Avenula pratensis</i> (L.) Dumort.
G0040	Calamagrostis des marais	<i>Calamagrostis canescens</i> (Web.) Rothm.
G0043	Brome stérile	<i>Bromus sterilis</i> L.
G0044	Nard raide	<i>Nardus stricta</i> L.
G0056	Alpiste des Canaries	<i>Phalaris canariensis</i> L.
G0059	Pâturin des prés	<i>Poa pratensis</i> L.
G0062	Calamagrostide épigéios	<i>Calamagrostis epigejos</i> (L.) Rothm.
G0072	Agrostide blanche	<i>Agrostis gigantea</i> Rothm.
G0074	Avoine à chapelet	<i>Arrhenatherum elatius</i> subsp. <i>bulbosum</i> Sch.&M.
G0107	Seslérie blanchâtre	<i>Sesleria coerulea</i> (L.) Ard.
G0111	Calamagrostide des montagnes	<i>Calamagrostis varia</i> (Schrad.) Host
G0141	Fétuque durette	<i>Festuca duriuscula</i> L.

### ***Résumé français.***

Les modèles de culture sont aujourd'hui couramment employés pour le conseil mais aussi pour la recherche fondamentale et appliquée. Le logiciel STICS développé à l'INRA d'Avignon propose depuis une dizaine d'années des possibilités de simulations de rendements en prairie permanente. Paramétré à l'origine pour des parcelles de plaine, les simulations présentent de nombreux écarts lors des estimations en montagne.

Cette étude propose dans un premier temps des méthodes d'analyse et de mise au format STICS des bases de données d'origines « agricole », aux variables observées simples. Elle contient ensuite des travaux sur les typologies de graminées prairiales et de prairies en général, ainsi que sur la création de variabilité climatique à partir de données AURELHY. Tout ceci effectué dans le but d'évaluer STICS sur des prairies de moyenne montagne et de dresser des hypothèses sur l'origine des écarts de simulations.

Les résultats permettent d'ouvrir de nouvelles voies dans des domaines aussi variés que la climatologie, la botanique ou le traitement de données observées. Mais ils montrent aussi la source de certains écarts, pouvant ainsi être corrigés ultérieurement dans le but d'améliorer les simulations.

### ***Résumé anglais.***

Nowadays, the models of culture are usually employed for advises but also for fundamental and applied researches. STICS Software developed by the INRA of Avignon have been putting forward for ten years the abilities of yields simulations in permanent meadows. First defined with parameters for plain parcels simulations induct many variations for mountain estimations. This study initially puts forwards methods of analysis and conversion of agricultural data with simple observed variables to STICS format, It also contains work on graminaceous typologies in meadows, and on meadows in general, and on creation of climatic variability from AURELHY data. All this has been carried out with an aim of evaluating STICS on medium mountains meadows and of drawing up assumptions on the origin of the simulation variations. The results make it possible to open new ways in games as diversified as climatology, botany or processing of observed data. But they also show the origin of some variations, that could be corrected later on with an aim of improving simulations.