



Projet inter-régional Rhône-Alpes, Languedoc-Roussillon, Midi-Pyrénées, dans le cadre PSDR3

CLIMFOUREL

« Climat, fourrages, élevage du sud de la France face au changement climatique »

Impacts du changement climatique 1950-2009 sur la production fourragère dans le Sud de la France

François Lelièvre, Stephan Sala et Florence Volaire

INRA, UMR CEFE, Montpellier



Les données climatiques utilisées proviennent de Météo-France et INRA

AgroClim

Climfourel : questions et objectifs

1. Diagnostic : les irrégularités et la baisse de la disponibilité fourragère sont-elles conjoncturelles ou structurelles ?

→ *Tester l'hypothèse structurelle : premiers effets sensibles du changement climatique? Sensibilité particulière à l'interface tempéré/médit.?*

→ Étude 1 : le climat a-t-il significativement changé? Analyse du changement passé, récent, présent, et proche futur sur la base du climat observé

→ **Etude 2 : quels impacts ont les tendances climatiques sur la production d'herbe et l'offre fourragère? La variabilité est-elle modifiée? Quelles évolutions pour les toutes prochaines décennies?**

2. Adaptations: comment adapter les systèmes d'alimentation et d'élevage aux changements et aux aléas climatiques?

→ *Innover dans les systèmes d'alimentation, les conduites des prairies, les variétés fourragères semées, etc ?*

Climat historique (jusqu'en 1980) des stations



Climat historique :

- temp. hum. Atlant.
- tempéré humide
- tempéré sub-Médit.
- Méditerranéen

Altitude :

- plaine (< 200 m)
- plateau (500-700 m)

Climat actuel (2009) des stations

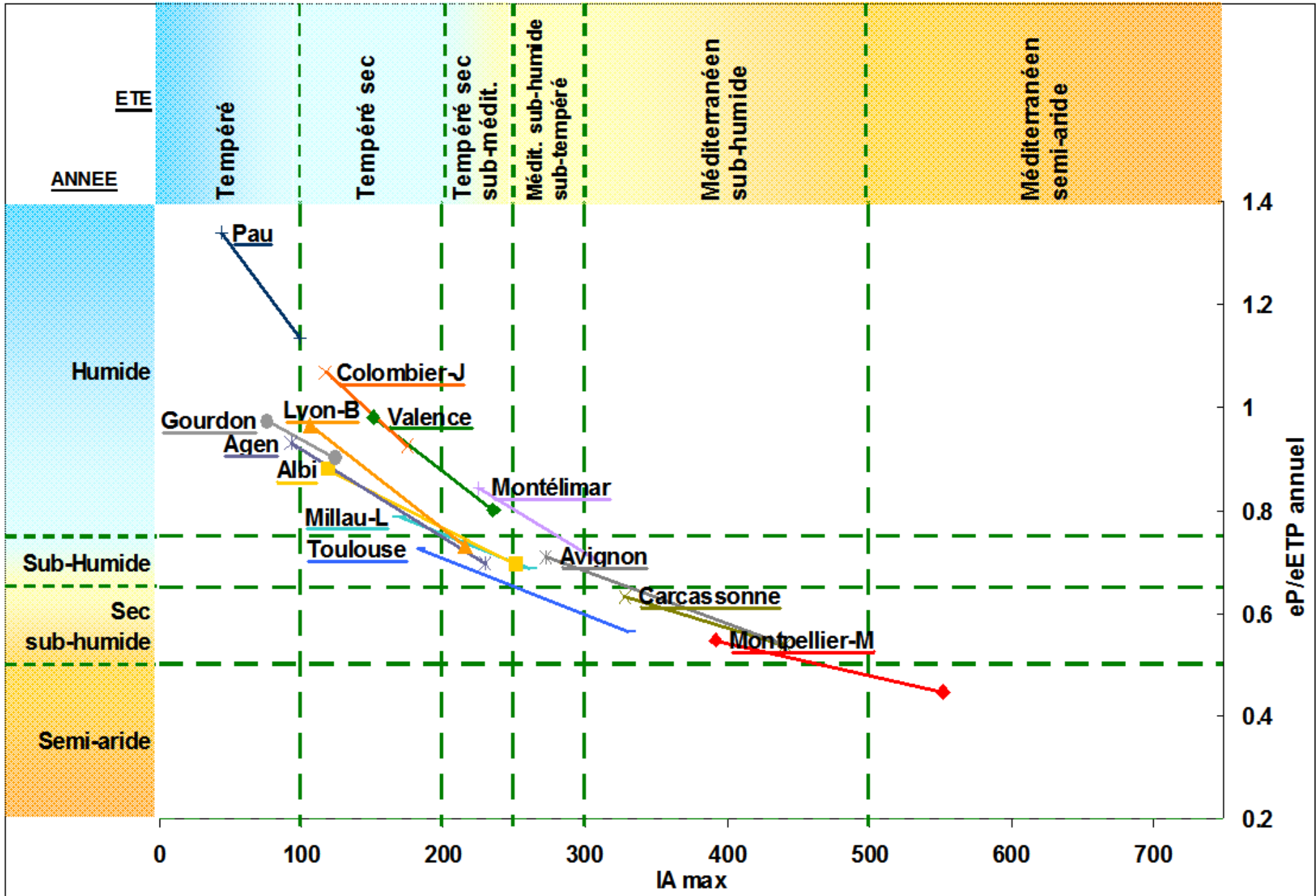


Climat historique :

- ▲ temp. hum. Atlant.
- ▲ tempéré humide
- ▲ tempéré sub-Médit.
- Méditerranéen

Altitude :

- plaine (< 200 m)
- △ plateau (500-700 m)



Trajectoires d'évolution climatique 1980-2009

Types d'études

- **Enquêtes-diagnostic** : adaptation des systèmes fourragers et d'élevage aux variations et aléas climatiques récents (années sèches 2003, 2005, 2006 vs années humides 2002, 2007 et 2008)
 - **Causses Lozère-Gard;**
 - **Ardèche ;**
 - **Sud-Aveyron (plaine, Causse)**
- **2. Analyses des variations d'indices bioclimatiques de croissance-développement;**
- **3. Simulation par modèle de culture : STICS-herbe,** que nous avons adapté au contexte méditerranéen

Ces méthodes sont utilisées avec les données climatiques 1979-2009 pour estimer les impacts du changement réel.

NB : on n'a pas fait d'étude prospective typique du domaine, combinant 3 modèles:

- « scénarios » d'émissions (CO₂, G.E.S, aérosols ; GIEC, 2000)
- modèles climatologiques simulant les données climatiques futures (2050, 2080)
- modèles de croissance-rendements à 2050, ou 2080

**qui explore les « possibles » à long terme, mais avec de grandes incertitudes
C'était déjà en cours (étude ACTA, Arvalis, Institut de l'élevage, oct. 2009)**

Saisons ; facteurs étudiés

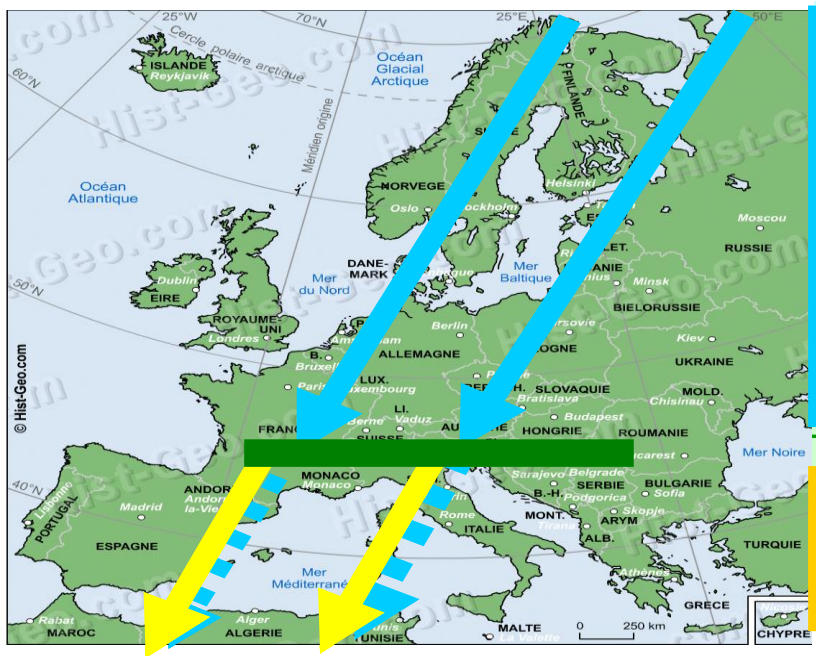
➔ Les impacts ont été analysés en séparant 3 saisons de 4 mois

- (1) Janvier à Avril : pas de déficit hydrique, facteur limitant principal = températures
- (2) Mai à Août : temp. optimale, facteur limitant principal = déficit hydrique,
- (3) Septembre à Décembre : facteur limitant principal : déficit hydrique et/ou températures

➔ A chaque saison, les variations des facteurs de croissance sont calculés de 1979 à 2009 par (a) des indices simples, (b) STICS-herbe adapté

- déficit hydrique (combine ETP et P en ETP-P ou P/ETP) : arrête la croissance: perte de jours et de temps thermique de croissance (périodes 2 et 3)
- températures (réchauffement), suit le rayonnement global : sous nos latitudes, le gain de temps thermique (somme des degrés-jours) augmente la production de biomasse si alimentation d'eau OK:
 - gain de précocité de développement au printemps
 - gain de production (degrés-jours et rayonnement global très corrélés)
- Concentration [CO₂]air (+50 ppm/30 ans) : gain de croissance moyen de +3% pour + 50 ppm CO₂ (couvert à dominante de graminées)

Approche par étude des gradients climat-production prairiale en Euro-méditerranée



- 70 °N. Rendement récoltable d'un parcours boréal < 0.5 tDM/ha/an

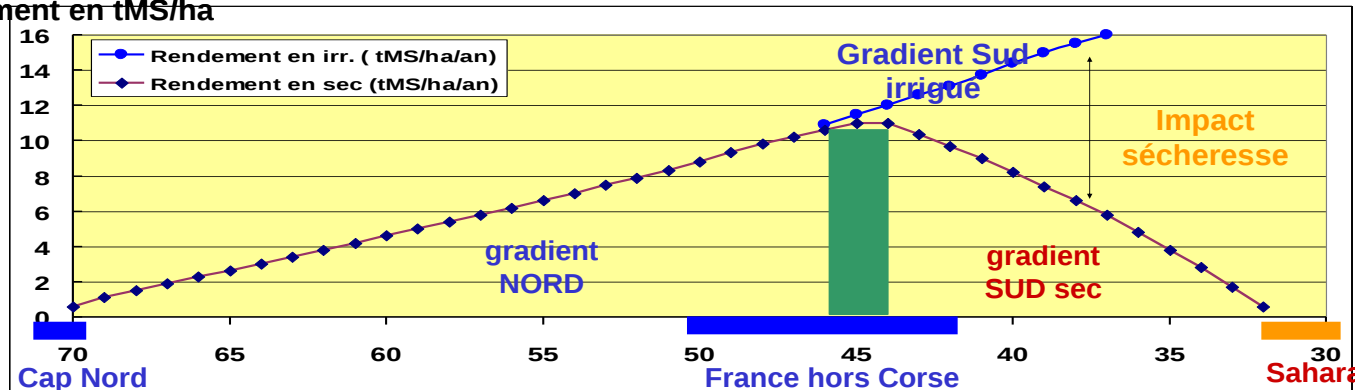
1. NORD (où $P > ETP$): déficit hydrique peu fréquent et faible ; climats et potentialités définis sur la base des températures

- 46-44°N ($ETP - P \approx 1$, sous climat stable 1950-80) = Transition Nord-Sud ex: Bordeaux, Brive, Albi, Valence, Lyon, Milan, Venise)
Rendement récoltable bonne prairie maxi : 10-12 tMS/ha/an

2. SUD : déficit hydrique ($P < ETP$), arrêt de croissance systématique en été; climats définis sur base de l'aridité

- 33°N : Rend. récoltable parcours sub-saharien < 0.5 tDM/ha/an

Rendement en tMS/ha



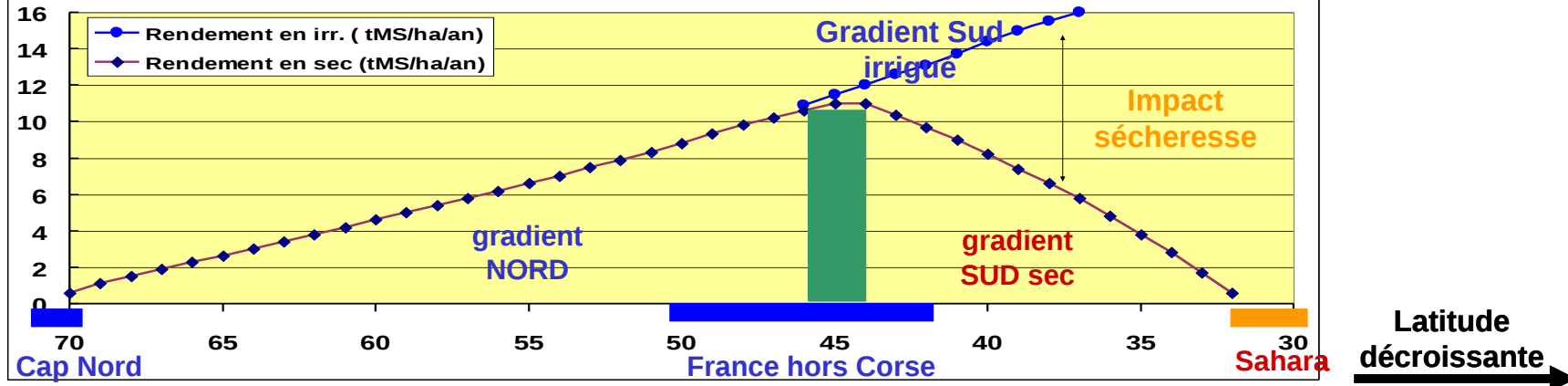
Gradients vers 1980

Latitude décroissante



Etude gradients Euro-méditerranéenne (suite)

Rendement en tMS/ha



Changement climatique 1979-2009 $\approx$ déplacement Nord des iso-climats (+1.2 à 2.2 °N selon critères) $\approx$ déplacement des prairies vers le Sud (°LS) dans les gradients climat-rendements moyens d'avant 1980. Gradients par 1°LS en partant d'une prairie à 10tMS/ha:

	NORD (+SUD IRR) où $P > ETP$	SUD , $P < ETP$ (année comme été)
-Radiation globale	+100 MJ/m ² /an	+100 MJ/m ² /an
Température moyenne	+0.6 à +0.7 °C	+0.6 à +0.7°C
Déficit hydrique climatique ETP-P - dont ETP annuelle - dont Pluie P annuelle	+ 0 mm (car ETP-P reste <0) +20 à +30 mm; 0	+140 mm +90 mm -50 mm
Variation de degrés-jours (d-j) : dont d-j gagnés par réchauff. des jours de croissance dont d-j perdus par supplément de déficit hydrique	+120 à 150 d-j +120 à 150 d-j (180 à 240 j croiss/an) 0	-300 à -400 d-j +150 à 120 d-j (sur 240 à 180 j/an) -400 à -500 d- j (-20 à -25 j à 20°C)
-Variation de rendement d'une bonne prairie (tMS/ha /an) - dont gagnée par réchauffement des jours de croissance - dont perdue par supplément de déficit hydrique	+0.35 t. MS/ha +0.35 0	-0.9 t. MS/ha +0.35 -1.3 t. MS/ha

Etude gradients Euro-méditerranée (suite)

Opposition entre les 2 gradients :

● NORD humide (+ Sud irrigué) gagnants du changement tant que $P > ETP$

Le transfert N du climat augmente la biomasse annuelle, fonction croissante de la somme de rayonnement et de temps thermique (somme degrés-jours) : +0.35 à +0.4 tMS/ha par °N.

En tenant compte du gain supplémentaire CO₂, le gain total en 30 ans a été entre +0.7 et +1.0 tMS/ha (+7 à +10%)

● SUD sec (où $P < ETP$), perdant du changement

Fort gradient de déficit hydrique (+140 mm de déficit/°LS) ↘ croissance de 20-25 j soit 400 à -500 d-j/°LS, environ -1.3 tMS/ha en été. L'augmentation de température sur la saison de croissance, compense 1/3 de cette perte (+120 à 150 d-j, environ +0.35 t.MS/ha). Reste -0.9 à -1.0 tMS/hab.

En ajoutant l'effet CO₂ positif, on a environ -0.7 tMS/ha (-7%) en 30 ans

Gradient Sud : ↘ ↘ prod. été,

↗ prod. aut-(hiver)-print.

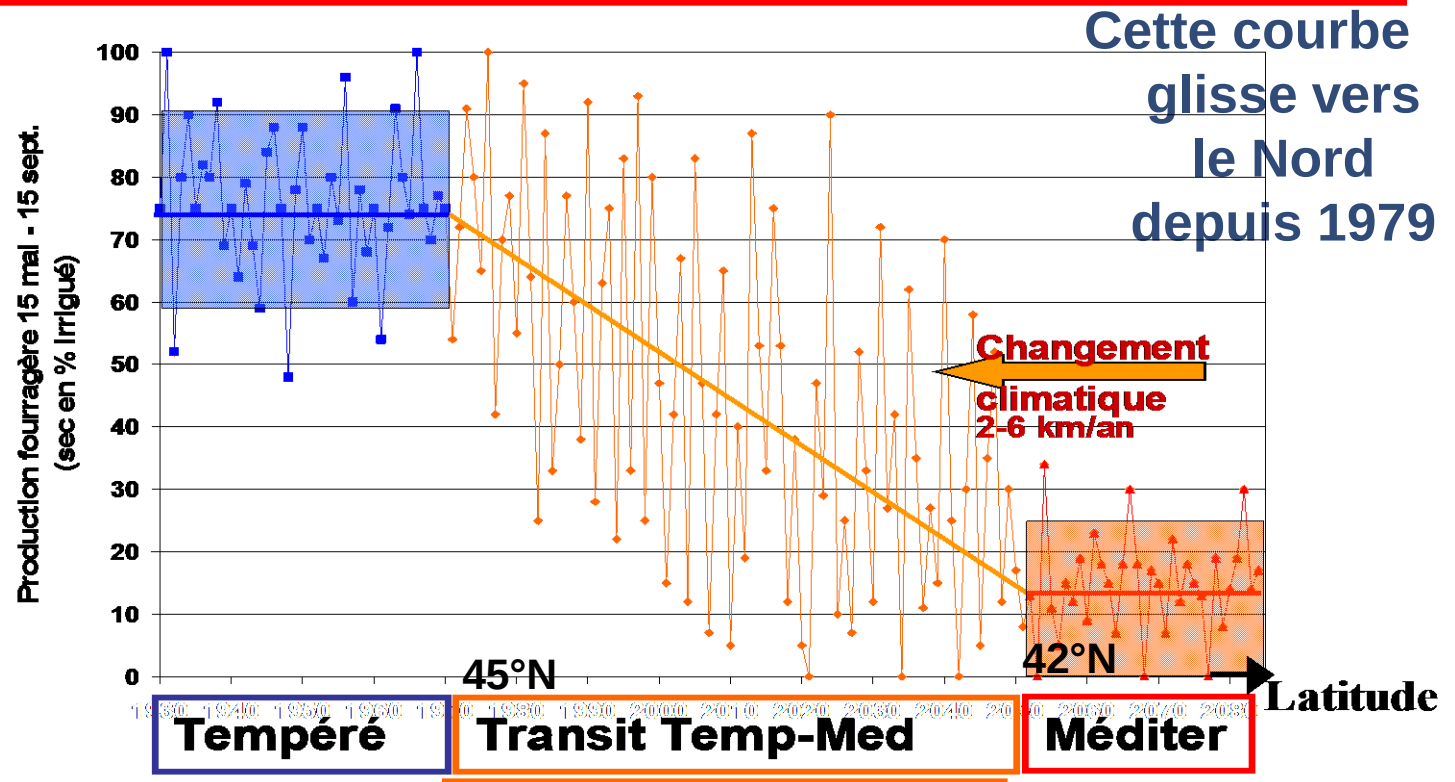
↘ perte globale

+ variabilité

● La limite SUD/NORD remonte en latitude : des régions d'abord Nord-gagnantes basculent Sud-perdantes plus tard.

Perte de production estivale des prairies selon la latitude

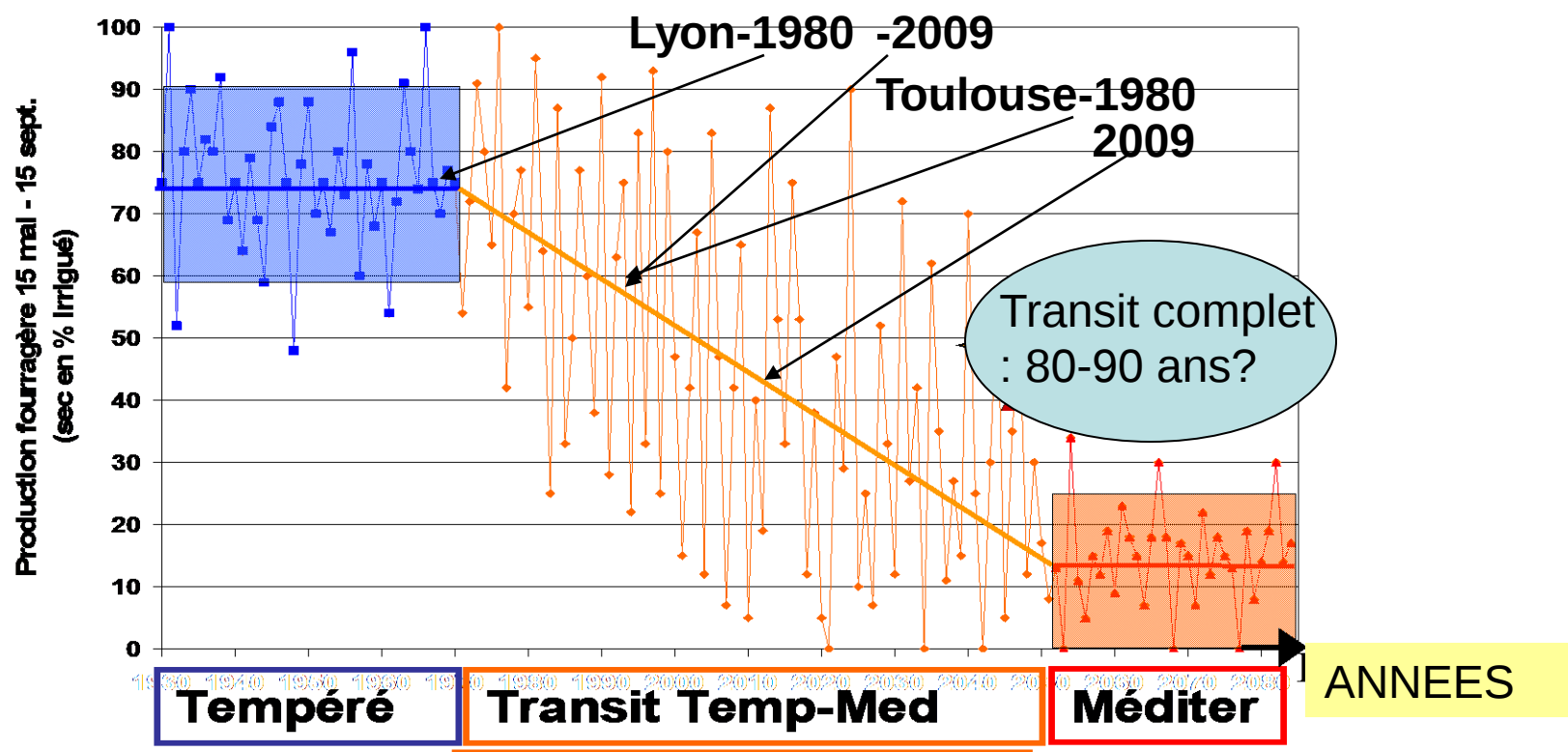
Perte quasi complète du rendement MJJA sur 300-400 km (3-4° LS). La zone de transition a une très forte variabilité autour de l'espérance



Des régions tempérées basculent en transition Temp-Med: baisse lente de potentiel, et très forte variabilité autour de la tendance

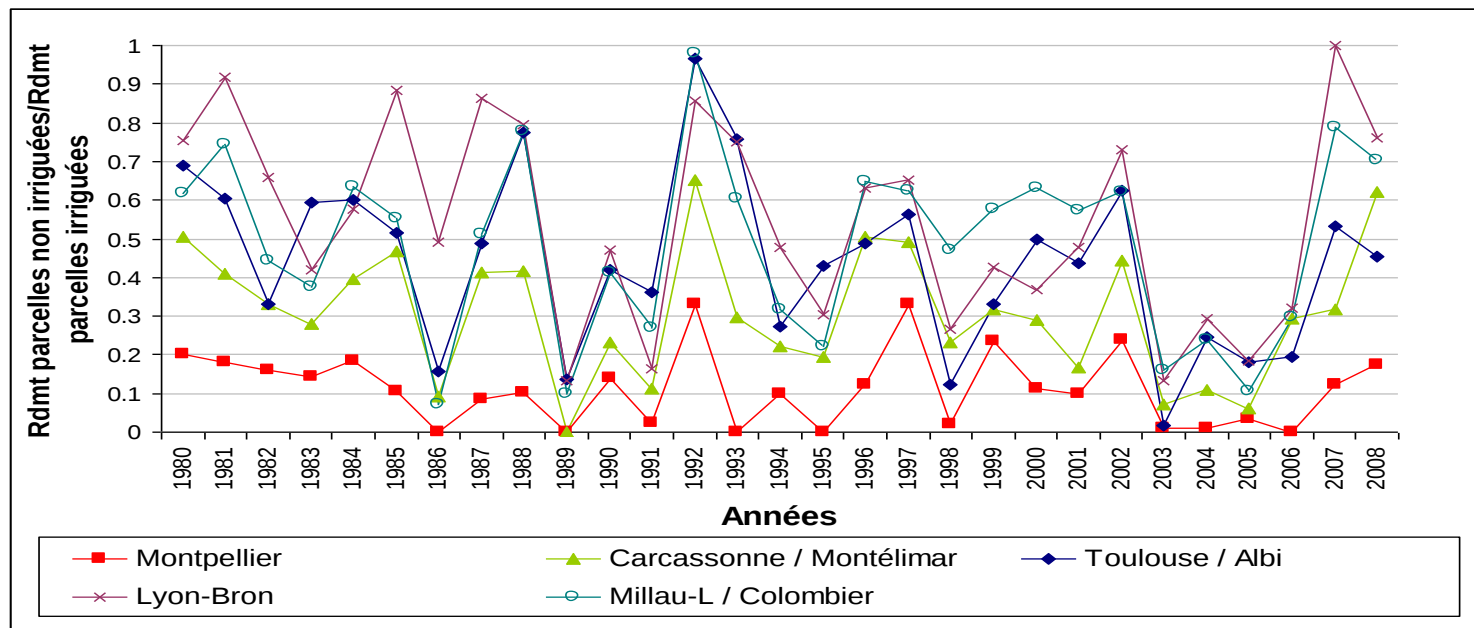
Perte de production estivale des prairies avec la latitude décroissante

La perte quasi complète du rendement MJJA de 300-400 km (3-4° LS) va se faire en 90 ans sans bouger...



NB : dans le même temps, le rendement Sept-Avril ↗ régulièrement

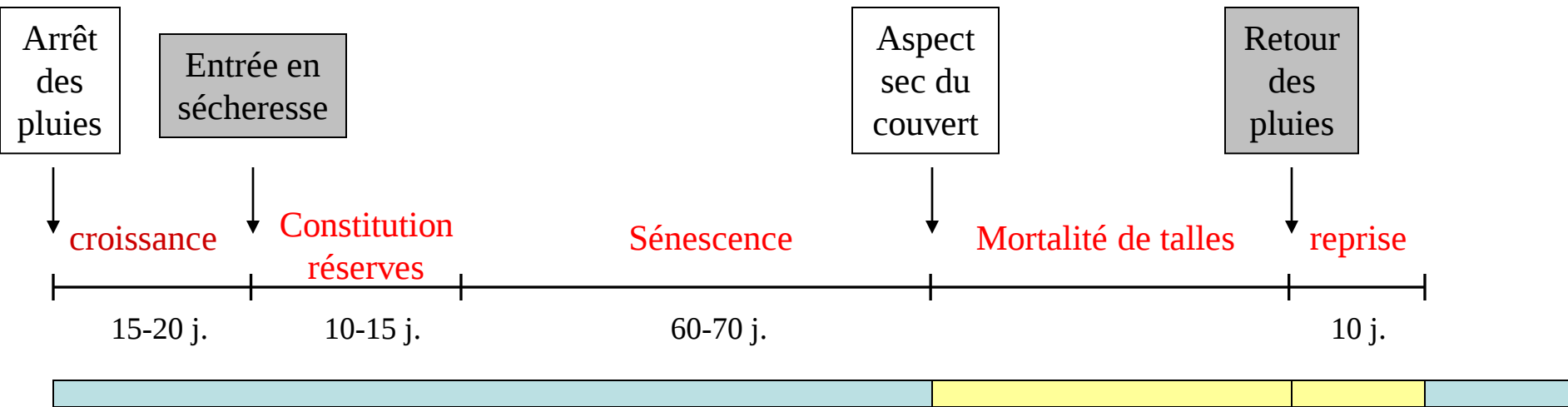
Variations inter-annuelle 1980-2008 de production d'herbe mai-août en fonction du bilan hydrique



Variabilité inter-annuelle +++ et contrastes entre sites :

- Montpellier : production toujours basse : 0-30% de l'irrigué (1 à 1,5 tMS/ha)
- Carcassonne-Montélimar : 0-60% de l'irrigué. Tendance à la baisse
- Toulouse, Albi, Millau-L, et Lyon-Valence : 5-20% à 80-100% de l'irrigué, soit variations entre 1 et 7 tMS/ha sur la période.
- Tendance générale à la baisse, mais non significative (car variabilité +++)

Utilisation et modifications de STICS-prairie



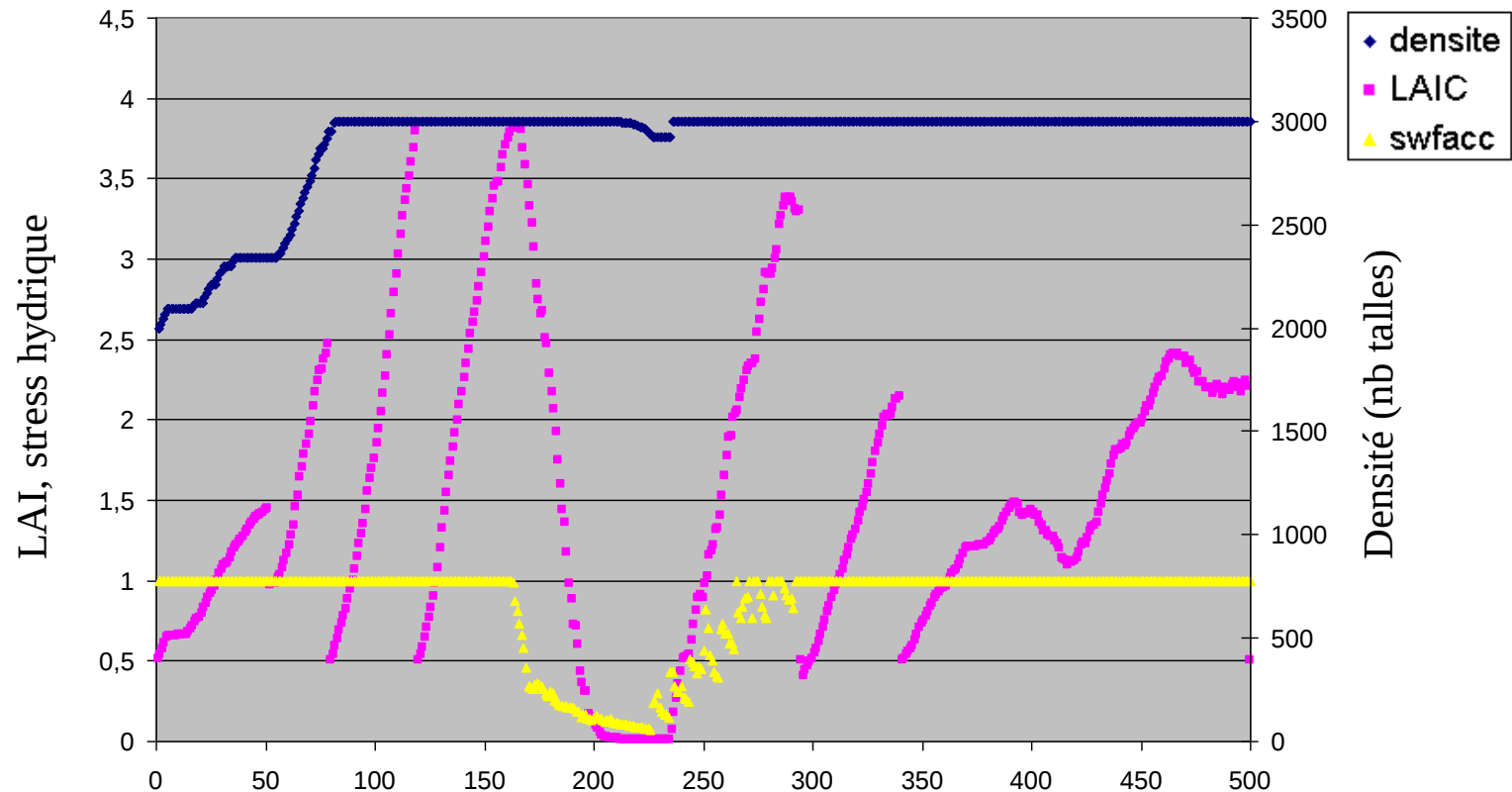
- Utilisation de STICS-prairie en limitant les modifications de formalismes
 - gestion du peuplement de talles
 - effet des températures élevées
- Utilisation de STICS-prairie « en ajoutant » des formalismes spécifiques (boucle « forte sécheresse »)

Résultats de simulations obtenus : effet durée de sécheresse

Conditions de simulation :

→ Durée de sècheresse : 107 j (01/05-14/08) → Seuil = 0.03

→ Somme d'ETP : 680 mm

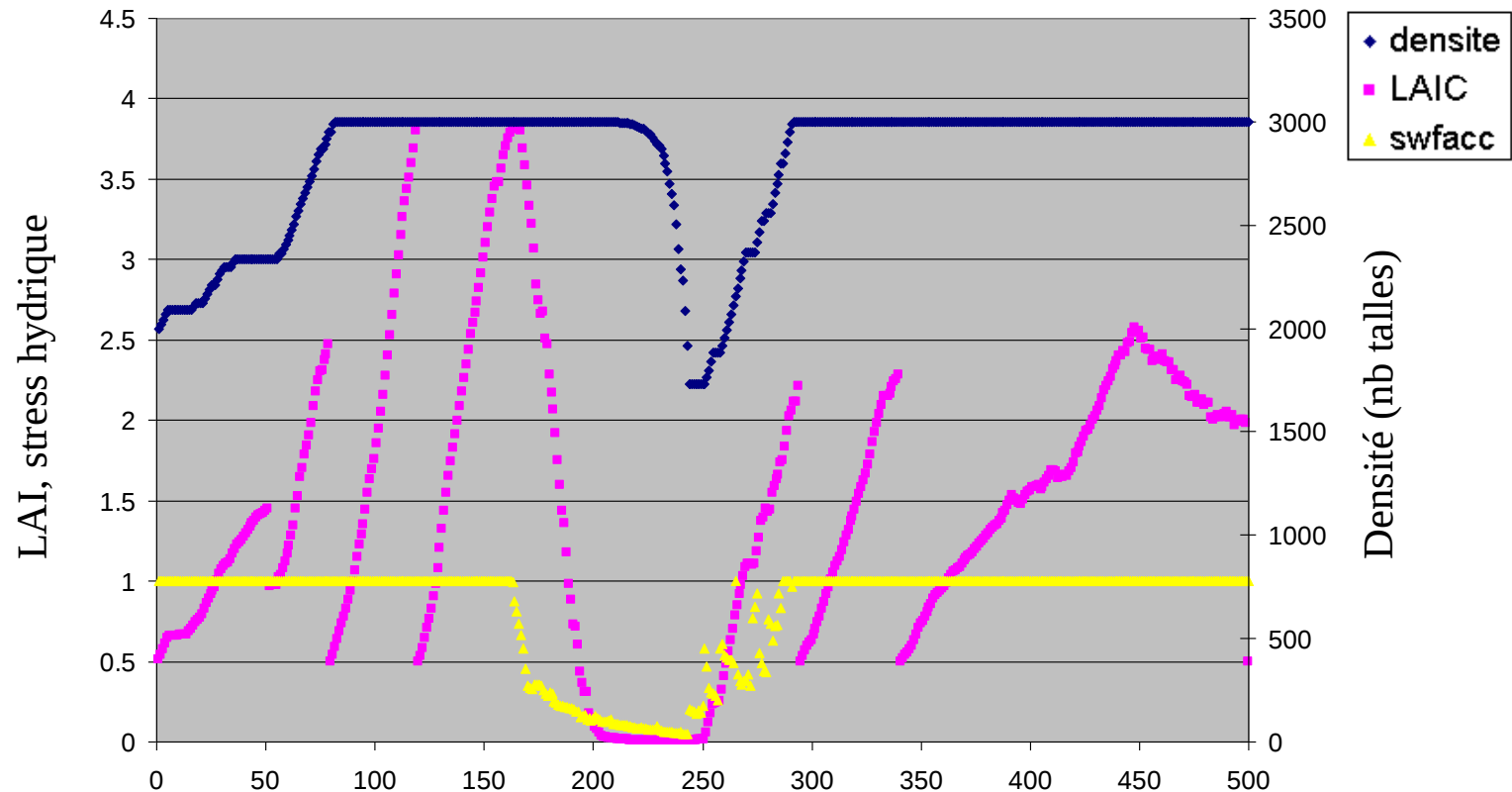


Résultats de simulations obtenus : effet durée de sécheresse

Conditions de simulation :

→ Durée de sécheresse : 124 j (01/05-31/08) → Seuil = 0.03

→ Somme d'ETP : 790 mm

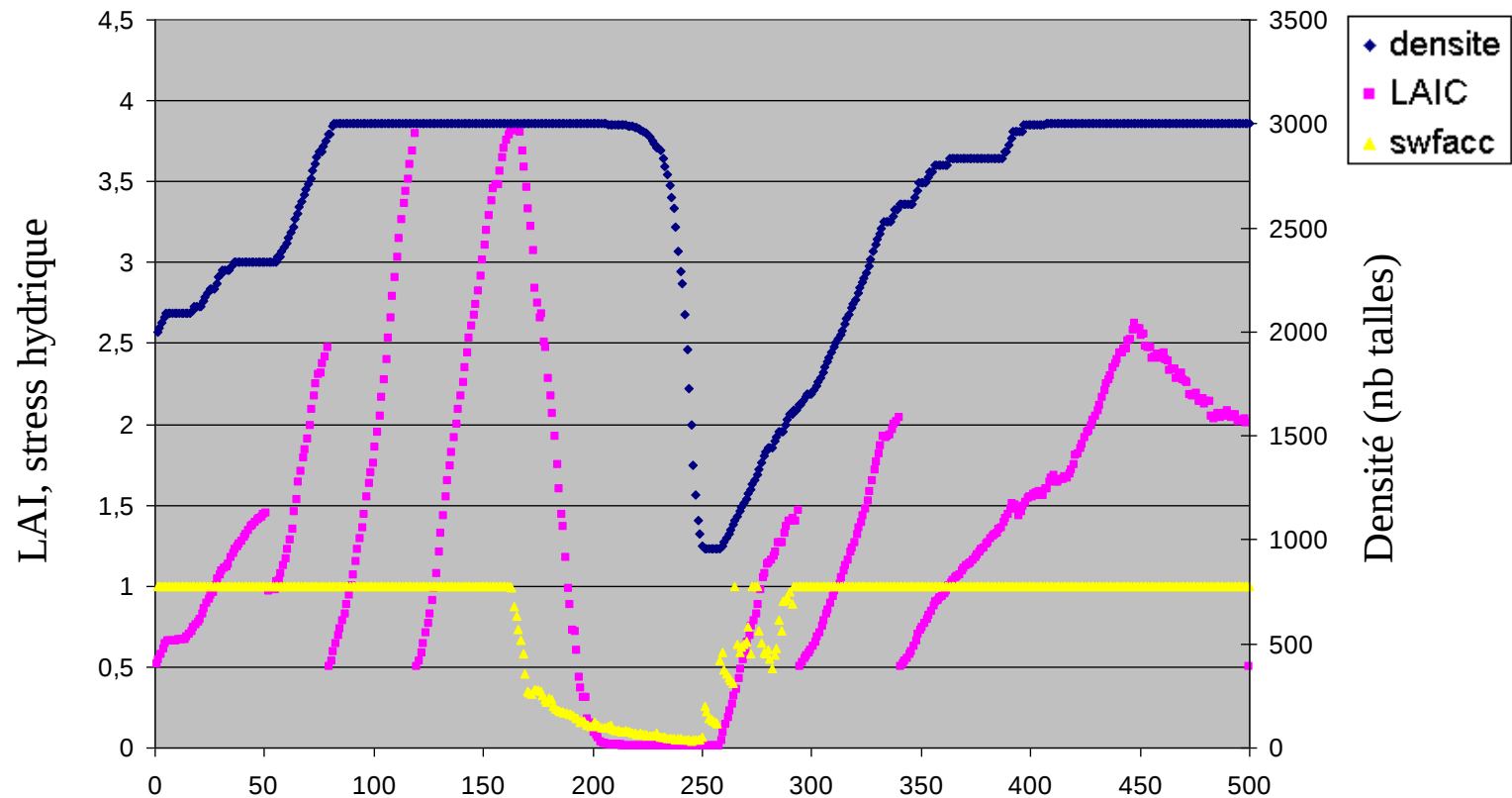


Résultats de simulations obtenus : effet durée de sécheresse

Conditions de simulation :

→ Durée de sécheresse : 132 j (01/05-05/09) → Seuil = 0.03

→ Somme d'ETP : 820 mm

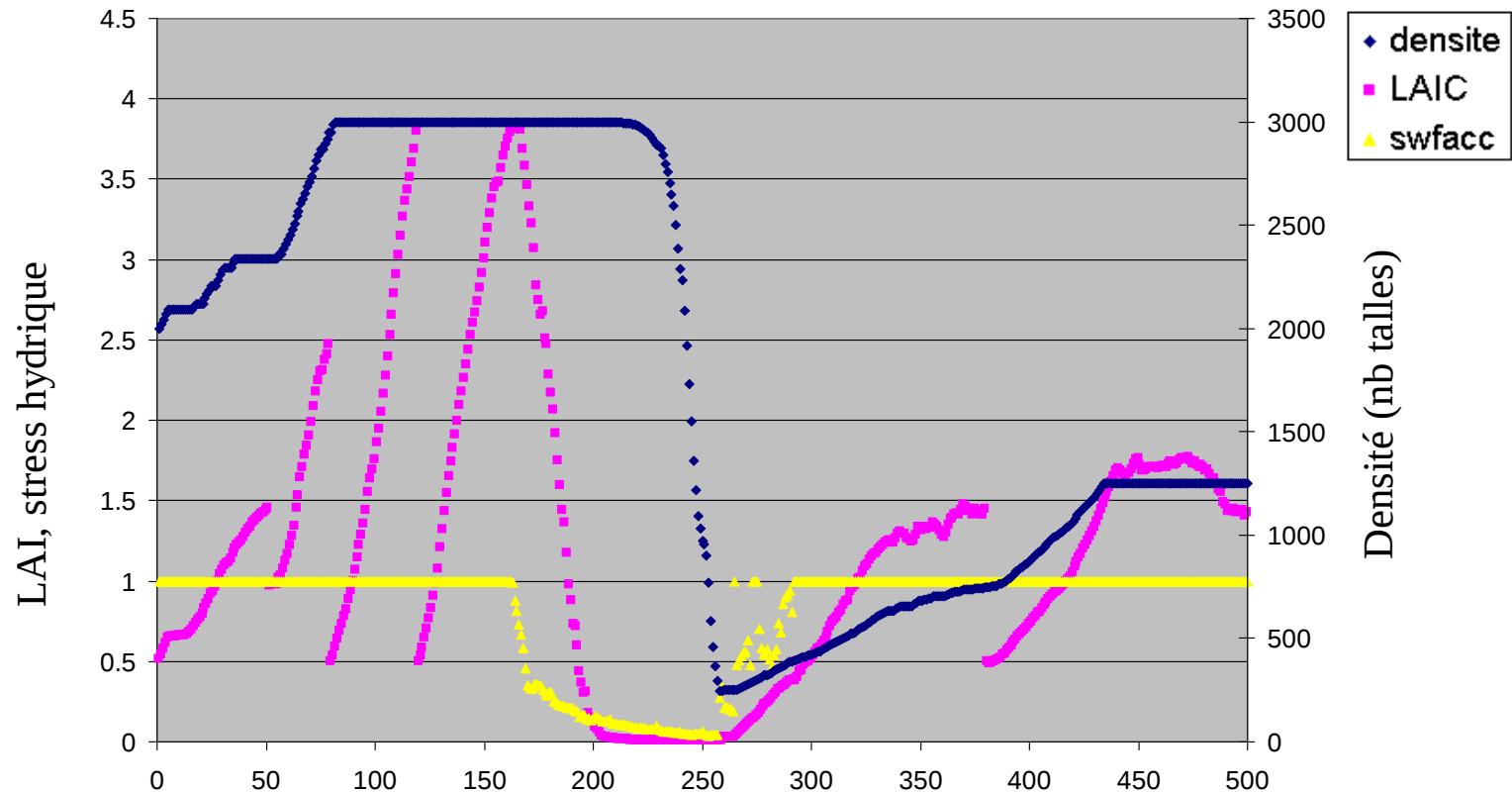


Résultats de simulations obtenus : effet durée de sécheresse

Conditions de simulation :

→ Durée de sécheresse : 138 j (01/05-14/09) → Seuil = 0.03

→ Somme d'ETP : 860 mm

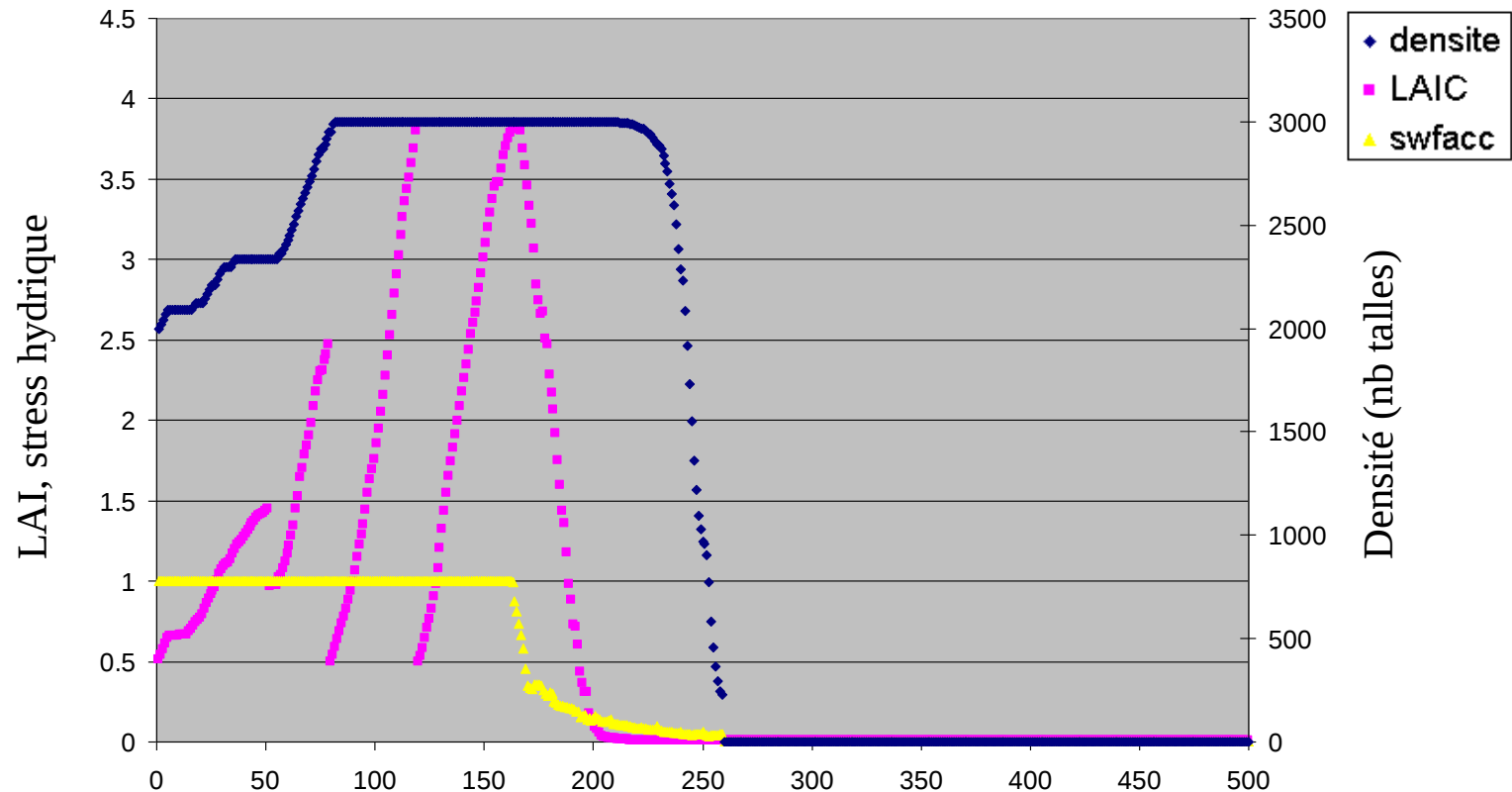


Résultats de simulations obtenus : LAI, densité et stress hydrique

Conditions de simulation :

→ Durée de sécheresse : 153 j (01/05-18/09) → Seuil = 0.03

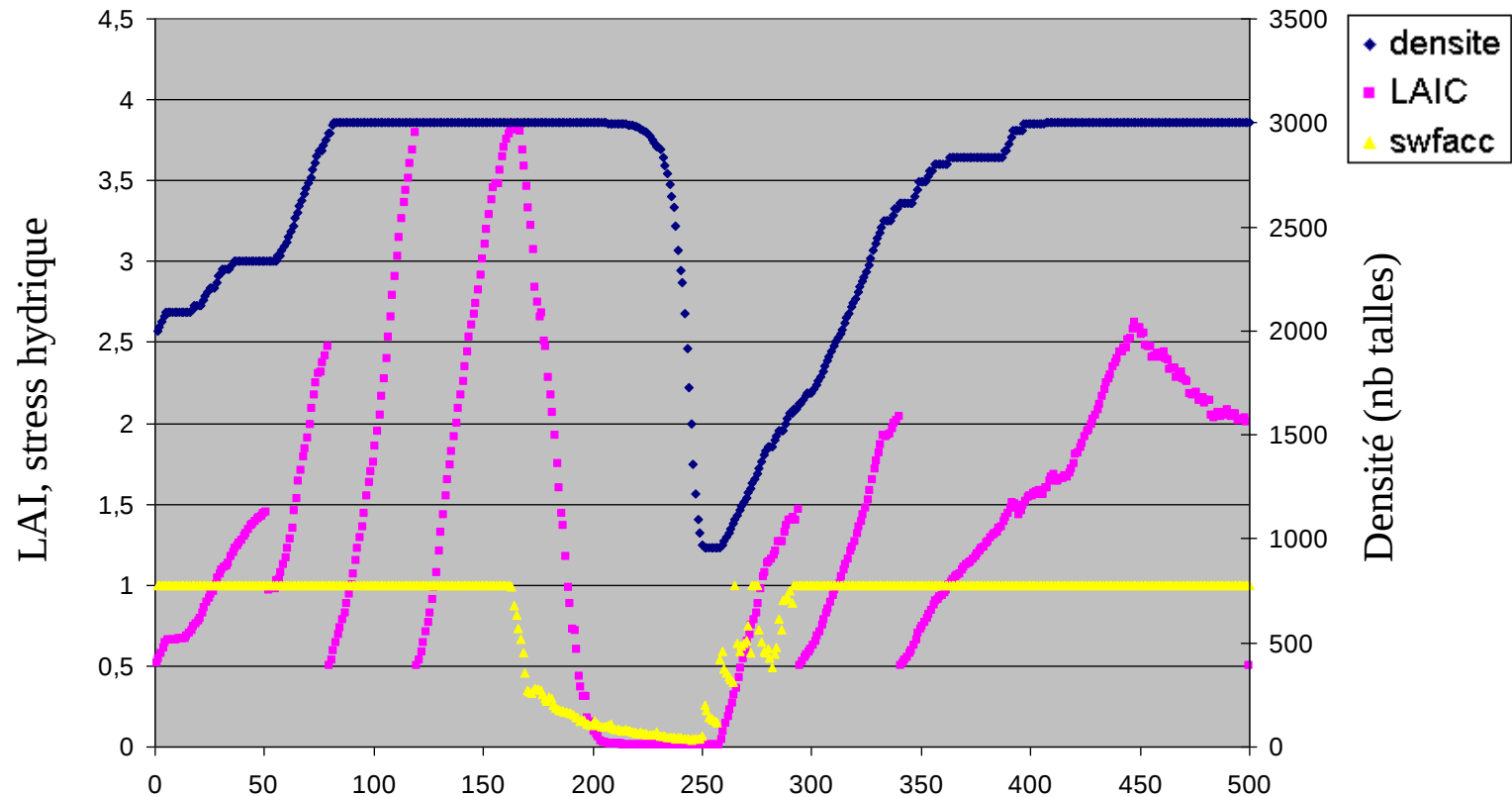
→ Somme d'ETP : 910 mm



Résultats de simulations obtenus : effet seuil de mortalité

Conditions de simulation :

- Durée de sécheresse : 132 j (01/05-05/09) → Seuil = 0.03
- Somme d'ETP : 820 mm



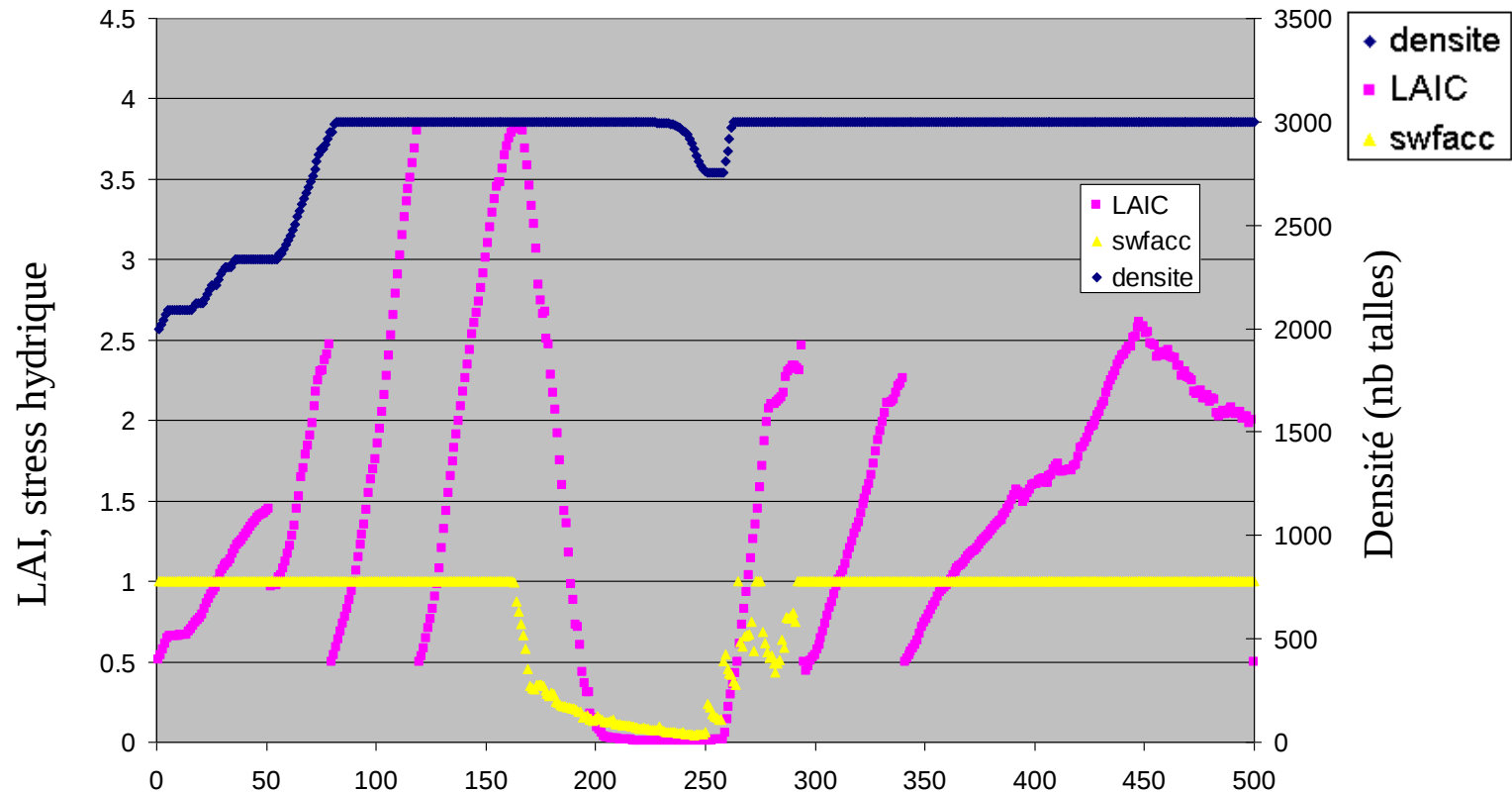
Résultats de simulations obtenus : effet seuil de mortalité

Conditions de simulation :

→ Durée de sécheresse : 138 j (01/05-05/09)

→ Seuil = 0.02

→ Somme d'ETP : 860 mm

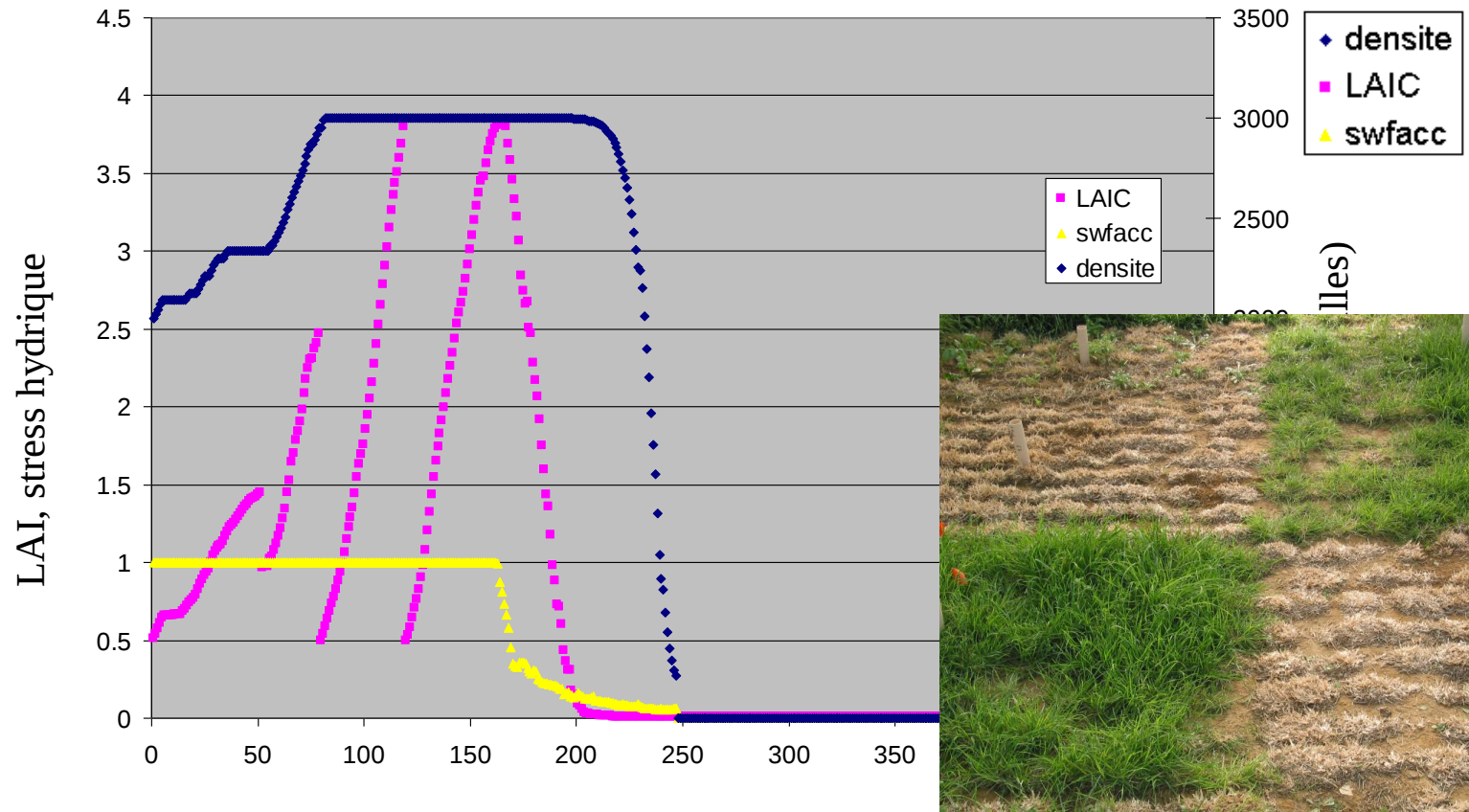


Résultats de simulations obtenus : effet seuil de mortalité

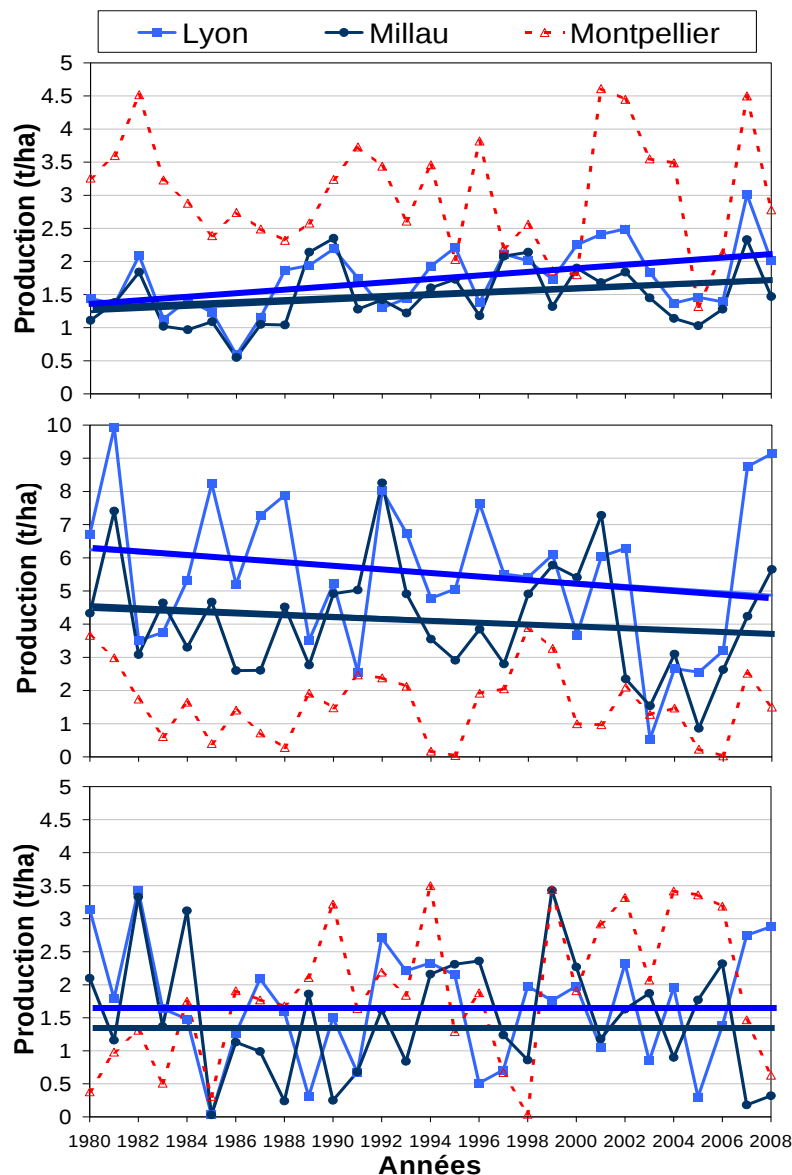
Conditions de simulation :

→ Durée de sécheresse : 138 j (01/05-05/09)

→ Somme d'ETP : 860 mm → Seuil = 0.04



Simulations STICS de la production d'une prairie



1980-2008 **Lyon** et Millau

Printemps : tendance +
+0.6 / +0.4 tMS/ha
 Variations inter-annuelles +++

Eté : tendance --
-1.3 / -0.9 tMS/ha
 Variations inter-annuelles +++

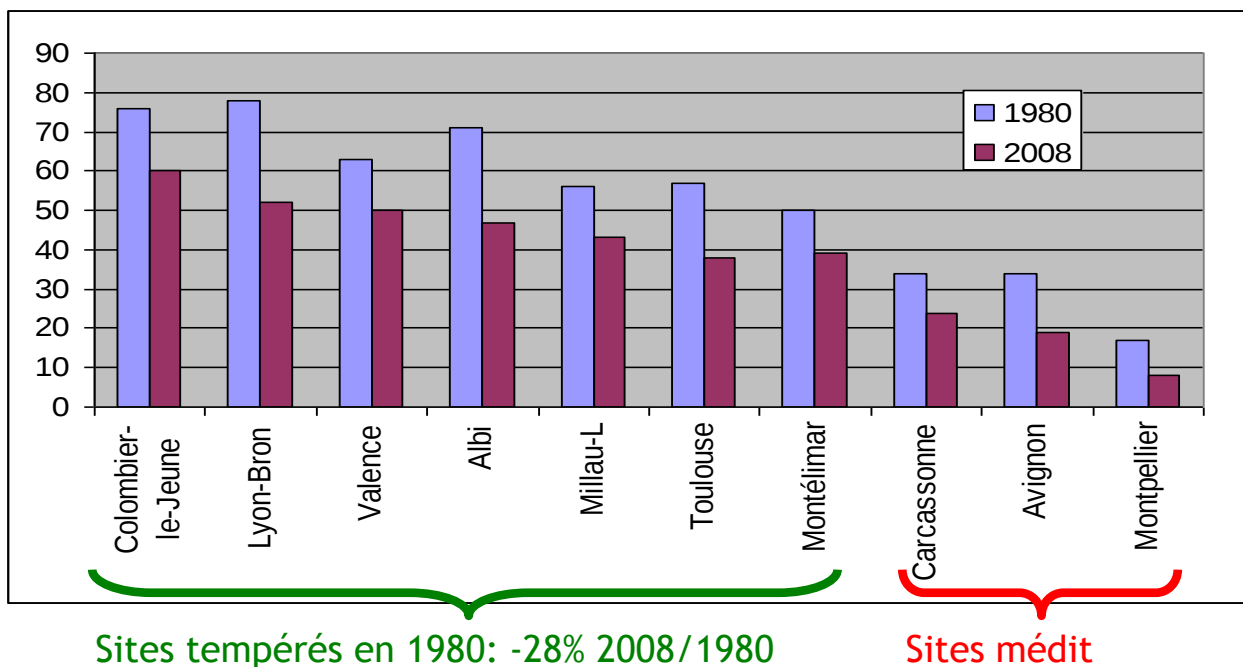
Automne :
 Pas de tendance

**Résultats comparables à ceux
 de l'analyse simplifiée**

Effet de la sécheresse estivale (mai à août) sur la production fourragère - modèle simplifié - 1980 /2008

Modèle simplifié en remplaçant P et ETP mai-août par leur espérance :
 $e(P) = \text{moy}(1980-2008)$; $e(ETP) = \text{valeurs de la régression}$

Les ratio R/R_m sont transformés en nombre de jours de pleine croissance de l'herbe mai-août selon la formule $123 \times (R/R_m)$



- Sites médit.: nombre de jours de pousse faible dès 1980
- Autres sites (sauf Colombier): en moyenne -28% soit -18 à 20 i

Modélisation de l'effet température sur la précocité

Somme des degrés-jours en base 0°C 1 février-30 avril

	SDJ0	Jours	Jours/décennies
Toulouse, Albi, Millau-L, Carcassonne, Montpellier	+128 à +143	9 à 11	3 à 3.5
Montélimar, Avignon, Mende	+145 à +168	10 à 13	3.5 à 4.5
Lyon, Valence, Colombier	+170 à +190	12 à 14	4 à 4.5
Moyenne	+152	11	3.8

➔ Gain de 10 jours en 29 ans à l'Ouest de la région ;
13 jours en Rhône-Alpes

Modélisation de l'effet température sur la production

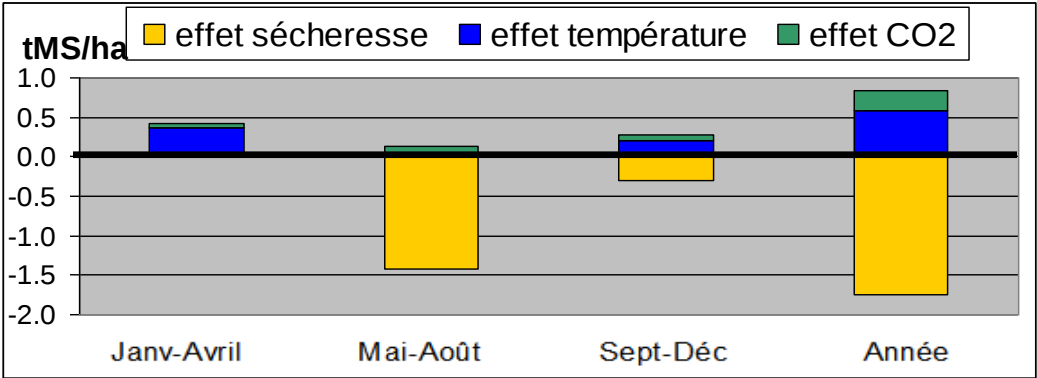
L'effet température est calculé par la variation [1980-2008] de 2 indices :

- somme de degrés jour base 0 (SDJ0)
- somme de degrés jour base 5 (SDJ5)

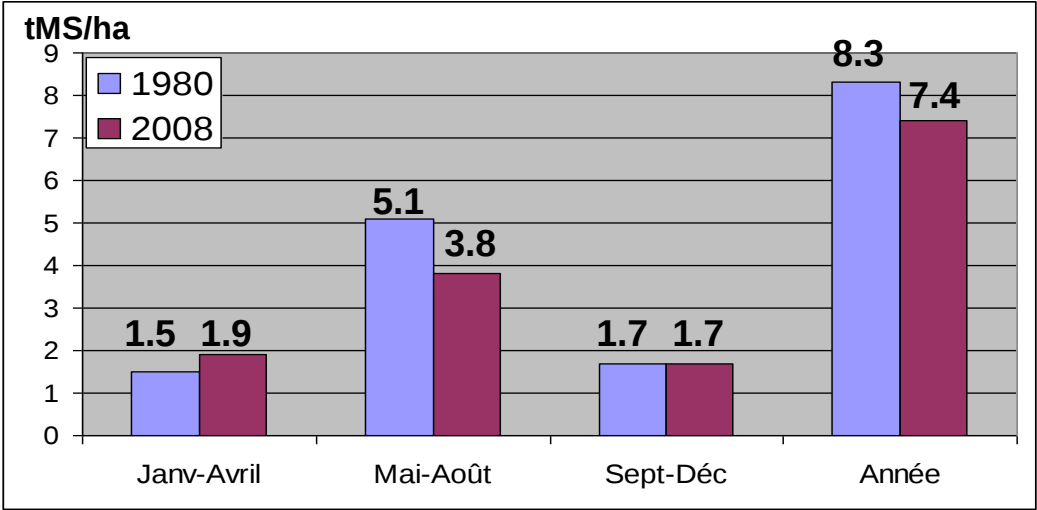
Cas des stations tempérées et péri-méditerranéennes de plaine

	fevrier-avril		septembre-novembre	
	Δ SDJ ₀	Δ SDJ ₅	Δ SDJ ₀	Δ SDJ ₅
Lyon	16.3	37.1	11.3	19.5
Valence	16	35	10.8	18.0
Albi	18	36	10.2	16.3
Toulouse	15	29	9.9	15.8
Montélimar	14	28	10.0	16.0
Moyenne	16	33	10	17
% appliqué	25		15	

Tendances de la production d'une prairie moyenne péri-méditerranéenne de 1980 à 2008



**Variations moy.
1980-2008
(-11%)**



**Productions moy.
1980-2008**

- Effet sécheresse : -28% été ; -18% aut. ; **total -1.75 tMS/ha (-21%)**
- Effet température : +25% print. ; 10-15% aut. ; **total +0.58 tMS/ha (+7%)**
- Effet CO₂ : faible ; **total +0.25 tMS/ha (+3%)**

Tendances de la production d'une prairie moyenne péri-méditerranéenne de 1980 à 2008

Bilan global

		1. Janv-Avril		2. Mai-Août		3. Sept-Déc		Total année	
		% var	Rend.	% var	Rend.	% var	Rend.	% var	Rend.
Moyenne 1970-1979 Irrigué (tMS/ha)		-	1.5	-	7	-	2.7	-	11.2
Ratio moyen Sec/Irrigué vers 1980		-	1	-	0.73	-	0.68	-	0.76
Espérance de rend. en sec 1980 (tMS/ha)		-	1.5	-	5.1	-	1.7	-	8.3
Variations de 1980 à 2008 en tMS/ha (et %)	effet sécheresse	0	0	-28	-1.43	-18	-0.31	-21	-1.74
	effet température	+25	0.37	0	0	+15	0.21		0.58
	effet CO ₂	+3.5	0.06	+3.5	0.13	+3.5	0.06		0.25
	Total variations	+28	0.43	-25	-1.3	-3	-0.04	-11	-0.9
Espérance de rend. en sec 2008 (tMS/ha)			1.9		3.8		1.7		7.4

- Janv-Avril : effet température ++ et léger effet CO₂

→ +28% de production soit +0.43tMS/ha

- Mai-Août : Effet sécheresse à peine compensé par l'effet CO₂

→ -25% de production soit -1.3tMS/ha

- Sept-Déc : Les effets se compensent

→ PERTE GLOBALE MOYENNE DE -11% soit -0.9tMS/ha en 30 ans
+ changement de structure annuelle

Conclusion sur l'impact du changement climatique sur la production fourragère

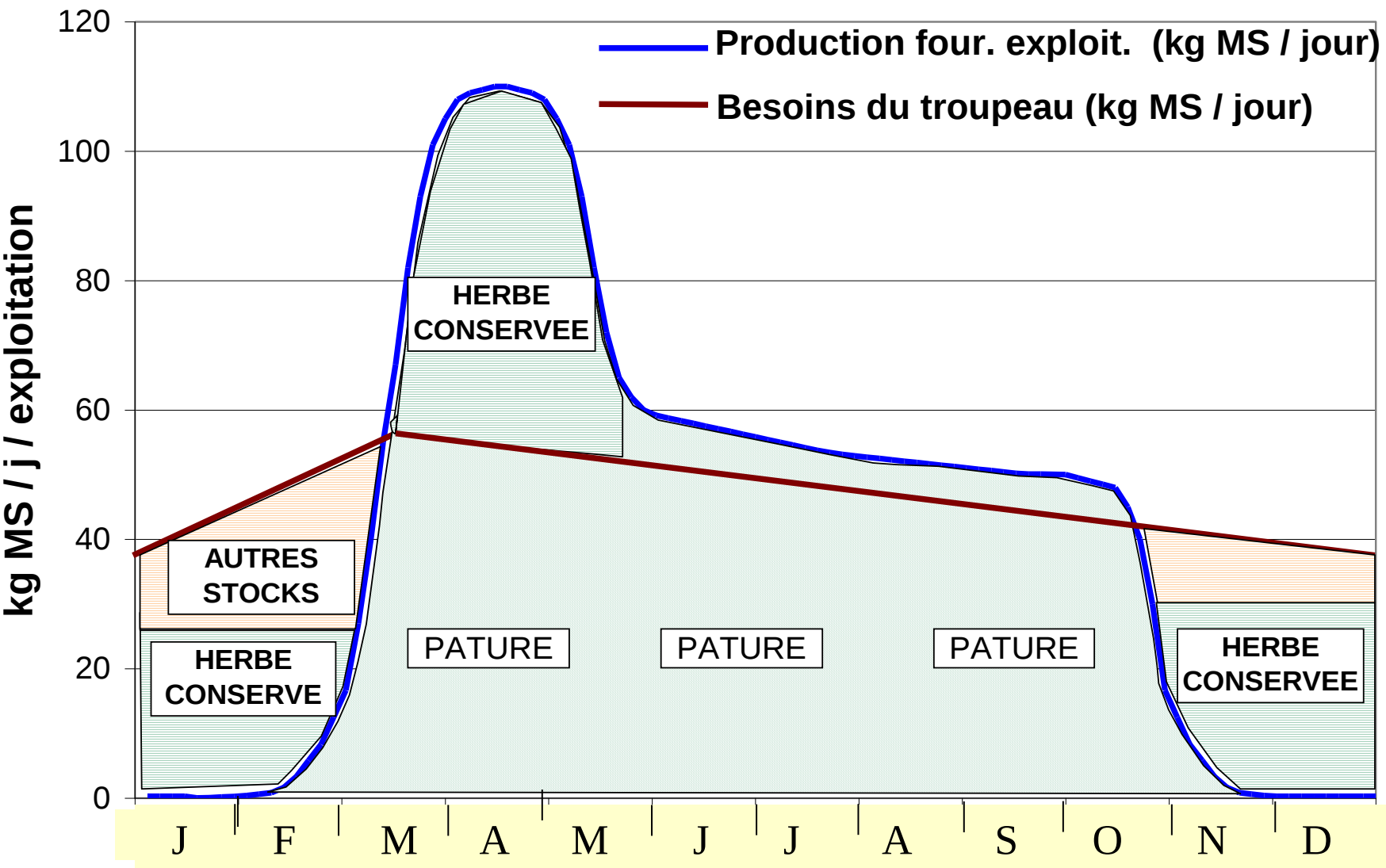
Régions NORD, à forte pluvio estivale (>300 mm MJJA, >900 mm/an) : l'impact est positif (+5-8% précocité et tardivité; +3% CO2)

La limite Nord/sud remonte: le changement de situation, de « NORD » à « SUD » et entrée en transition Temp-Med, est rude, marqué par :

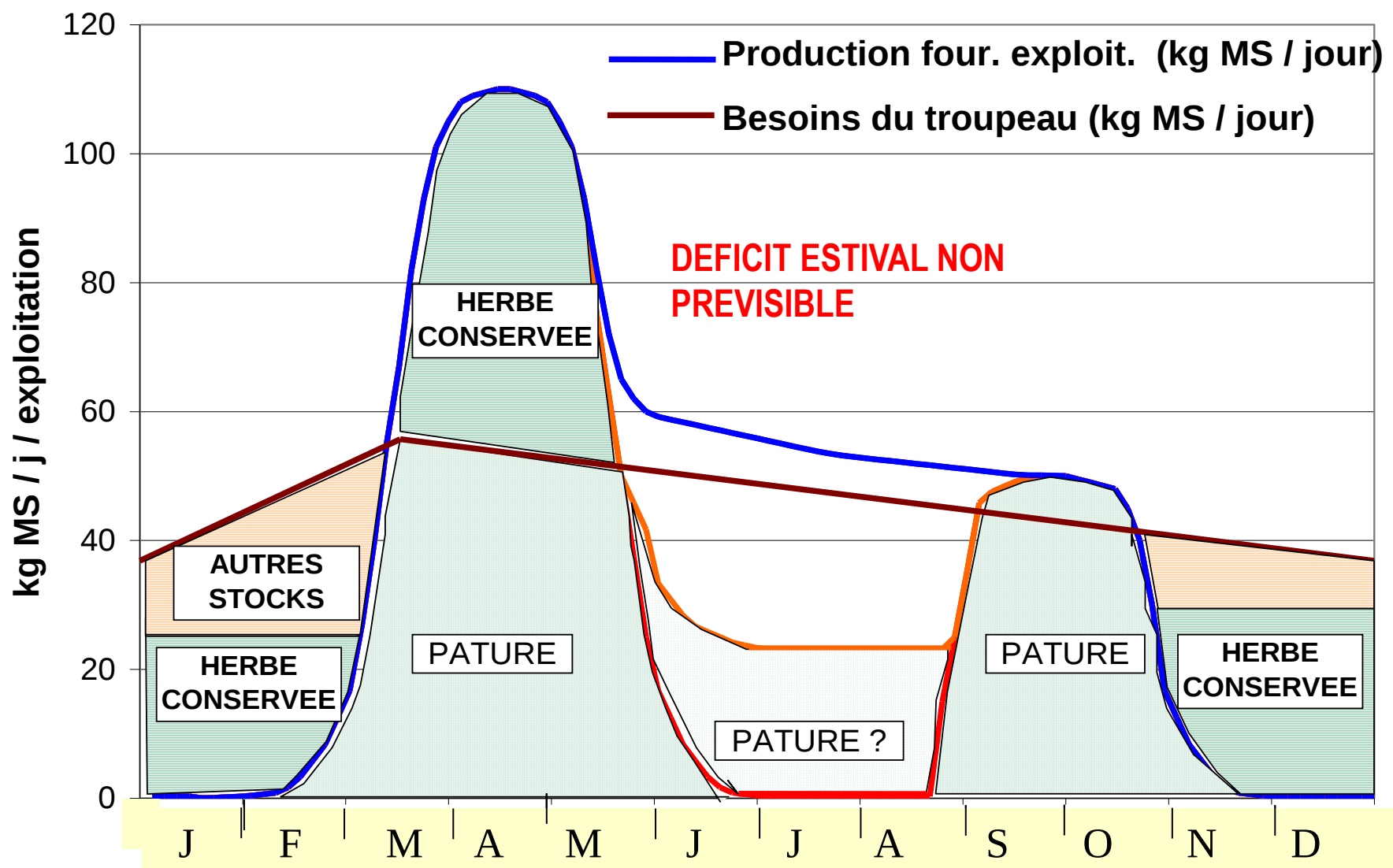
- **↑ de la variabilité inter-annuelle été-automne (principal pb ressenti)**
- cycles plus précoces au printemps, plus tardifs à l'automne
- baisse progressive de la production moyenne été
- compensation globale print.+aut, environ 1/2 de la perte en été, qui peut être boostée par des changements techniques

→ Assez net pour être un caractère structurel dans beaucoup de petites régions Grand Sud de la France : il faut adapter les systèmes d'alimentation animale

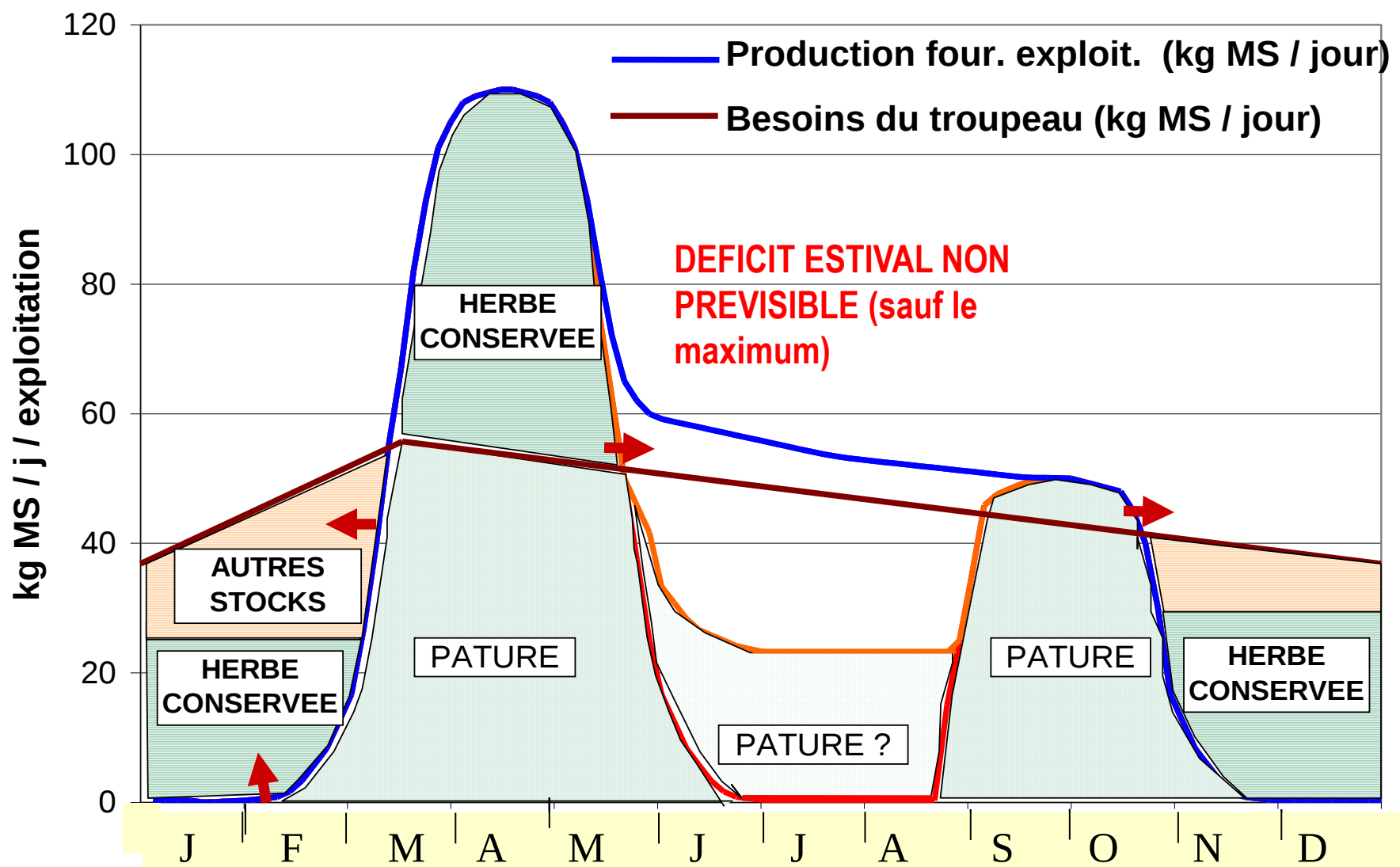
Ajustement entre production et besoins fourragers en climat tempéré



Ajustement entre production et besoins fourragers en climat incertain Temp-Med



Ajustement entre production et besoins fourragers en climat incertain Temp-Med



QUELLES AMELIORATIONS ENVISAGER?

Evolution lente vers renforcement progressif des caractères méditerranéens

⇒ se donner les moyens techniques pour :

- s'adapter aux nouvelles contraintes (anticiper sur les crises d'été)**
- valoriser les nouvelles possibilités à l'automne et au printemps**

- 1. Léger abaissement de charge (extension des surfaces?)**
- 2. Accroissement global des stocks**
(faire des stocks pour l'hiver ET pour l'été)
 - Hiver : prévisible (période de non croissance répétable entre années)*
 - Eté : incertain (entre 0 et 3 mois de pâturage)*
- 3. Stratégie d'économie des stocks d'hiver par**
 - report de pâturage sur pied fin d'automne**
 - mise à l'herbe très précoce (ex : RGI, brôme, orge)**
- 4. Reports sur pied de la fin de printemps vers l'été**
(types de prairies + modalité de gestion au printemps)

QUELLES AMELIORATIONS ENVISAGER?

6. Réanalyser les types de conserve (stock) :

Maïs / sorgho / céréales immatures / herbe ?
Ensilage / enrubannage / foin ?

7. Surfaces d'ajustement (quand c'est possible) : parcours; estives d'altitude; sorgho ou maïs à double fin.

8. Avoir 10-15% de surface irriguée; rôle stratégique des petites surfaces irriguées en situation médit.

En tenir déjà compte dans les politiques à long terme de gestion de la ressource en eau

9. Organisations collectives des ajustements 6-7-8

10. Adaptations variétales des prairies semées et adaptations techniques :

- Evolution variétale et composition de mélanges (prairies de pâture et de fauche)
- Dates de semis, de pâture et fauches, fertilisation : éléments nouveaux liés à l'évolution variétale et climatique

EN TERME DE MATERIEL VEGETAL, LA TRANSITION TEMPERE / MEDITERRANEEN EST PARTICULIERE

Climats tempérés

(actuellement, lat > 44-45°N)

Climats très médit. (lat < 42°N, sud de la ligne Barcelone-Ajaccio-Rome)

Climat en été, 15 Mai- 15 Sept

ETP < 550 mm, P > 200 mm,
P/ETP compris entre 0,35 et 1,3 :

Le climat permet une croissance fourragère importante : *les variétés sont sélectionnées pour pousser l'été.*

Résistance à la sécheresse estivale = aptitude à maintenir de la croissance et de l'offre fourragère pendant des périodes de déficit hydrique modérés en début ou en cours d'été. (utilisation d'eau en profondeur, par des enracinements profonds).

Croissance printemps-été-automne

Arrêt (repos) végétatif » en hiver par effet des basses températures. Coût énergétique et hydrique très faible.

ETP > 550 mm, P < 150 mm,
P/ETP compris entre 0,2 et 0,05 :

Le climat bloque la croissance : *les variétés médit. pour le sec ne sont pas sélectionnées pour la croissance estivale*

Tolérance à la sécheresse : aptitude à la survie (sans croissance, avec sénescence plus ou moins accentuée) en maintenant le peuplement pour permettre une reprise vigoureuse en automne.

L'inaptitude à pousser en été (dormance estivale) est même un facteur de tolérance

Croissance automne- (hiver)-printemps (vitesse de croissance hiver souvent élevée).

Arrêt ou repos végétatif » en été par effet de la sécheresse. Ce « repos » a un coût énergétique et hydrique (transpiration pour maintenir les organes de survie hydratés)

RYTHMES DE CROISSANCE (OFFRE FOURRAGERE) DU MATERIEL VEGETAL TEMPERE/MEDITERRANEEN

	Tempéré (actuellement >44-45° N)	Médit (<42° N), sud de Barcelone-Corse-Rome
Arrêt végétatif (blocage hormonal plus ou moins net)	En hiver (par le froid) « dormance hivernale » (faible potentiel l'hiver)	En été (par la sécheresse) Soit quiescence, soit « dormance estivale » (alors faible potentiel l'été)
croissance	PRINT- <u>ETE</u> -AUT (haut potentiel l'été)	AUT- <u>HIVER</u> -PRINT (haut potentiel l'hiver aux temp fraîches)
Coût en eau de la survie	Très faible (« au frigidaire », ETP très faible)	Important (perte d'énergie; perte d'eau) pour éviter déshydratation
Efficience de l'eau	élevée	Moyenne (perte d'eau pour survivre sans produire l'été)
Résistance / Tolérance à la sécheresse	Aptitude à maintenir croissance (offre fourragère) en été sous des stress limités	Aptitude à survivre l'été sans croissance (pas d'eau)

Problématique



Reprise d'automne après
Forte sécheresse de dactyles
tempéré / méditerranéen
(LUTETIA / MEDLY)



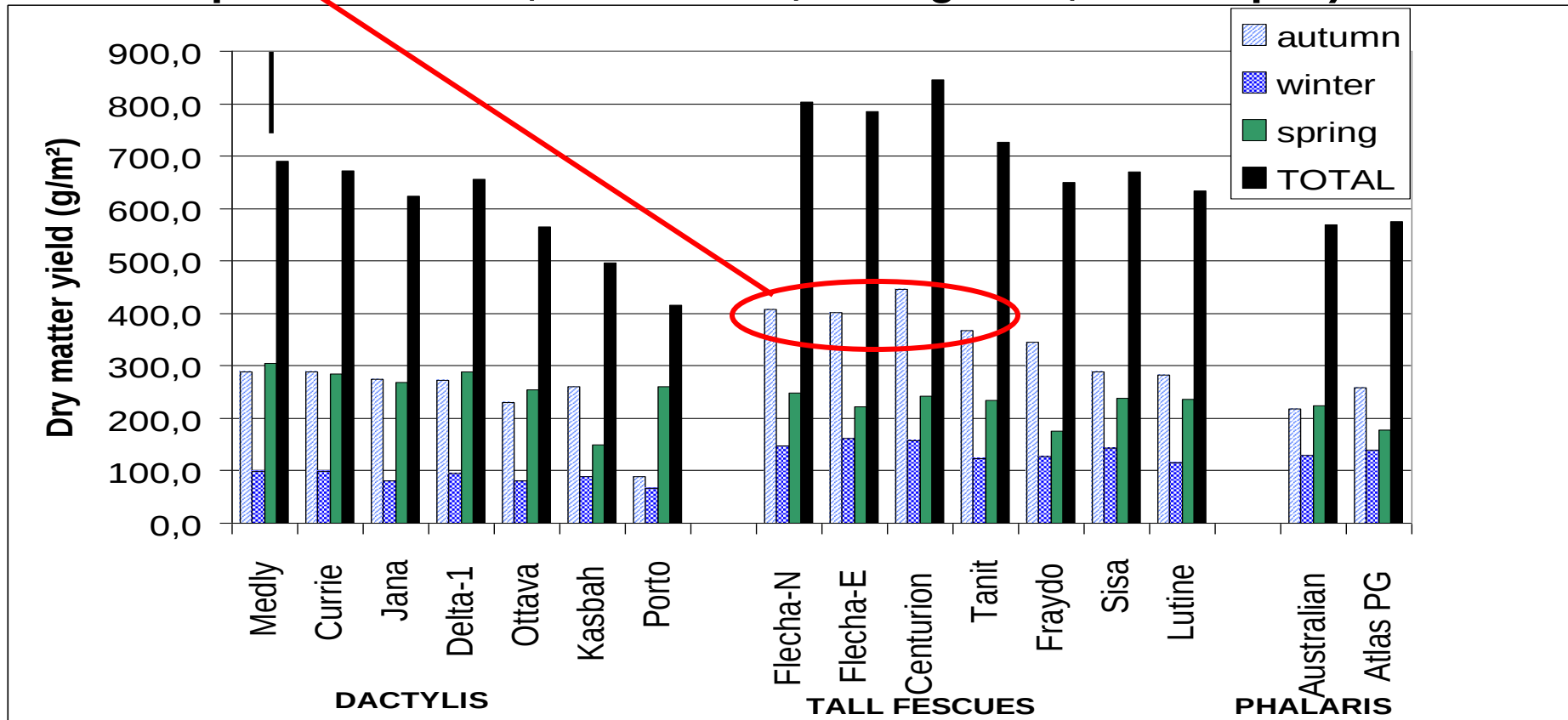
Reprise d'automne après sécheresse
dactyles-fétuque élevées Médit/temp
Flecha/Soni et Medly/Porto

• **Dans les zones intermédiaires** [42-44°N actuellement], les 2 types de variétés sont utilisées mais + ou – bien adaptées selon la réserve hydrique du sol (profondeur, texture) et le climat de l'année (altitude importante).

Les zones Climfourel basses sont en train de basculer franchement dans cette situation intermédiaire

Croissance saisonnière de graminées pérennes méditerranéennes à Montpellier (année 3 de l'essai)

- Les fétuques méditerranéennes ont une haute production automne + hiver (bleu) : de 5 à 6 tMS/ha en année 3 (essai Montpellier-Permed, mi-extensif, 130 kg N/an, 4-5 coupes)



(T3) Analyse du comportement de matériel végétal dans des collections + modélisation

→ Une collection à Vernoux en Vivarais



La sensibilité aux attaques fongiques des variétés méditerranéennes se confirme.

→ Un essai à Montpellier

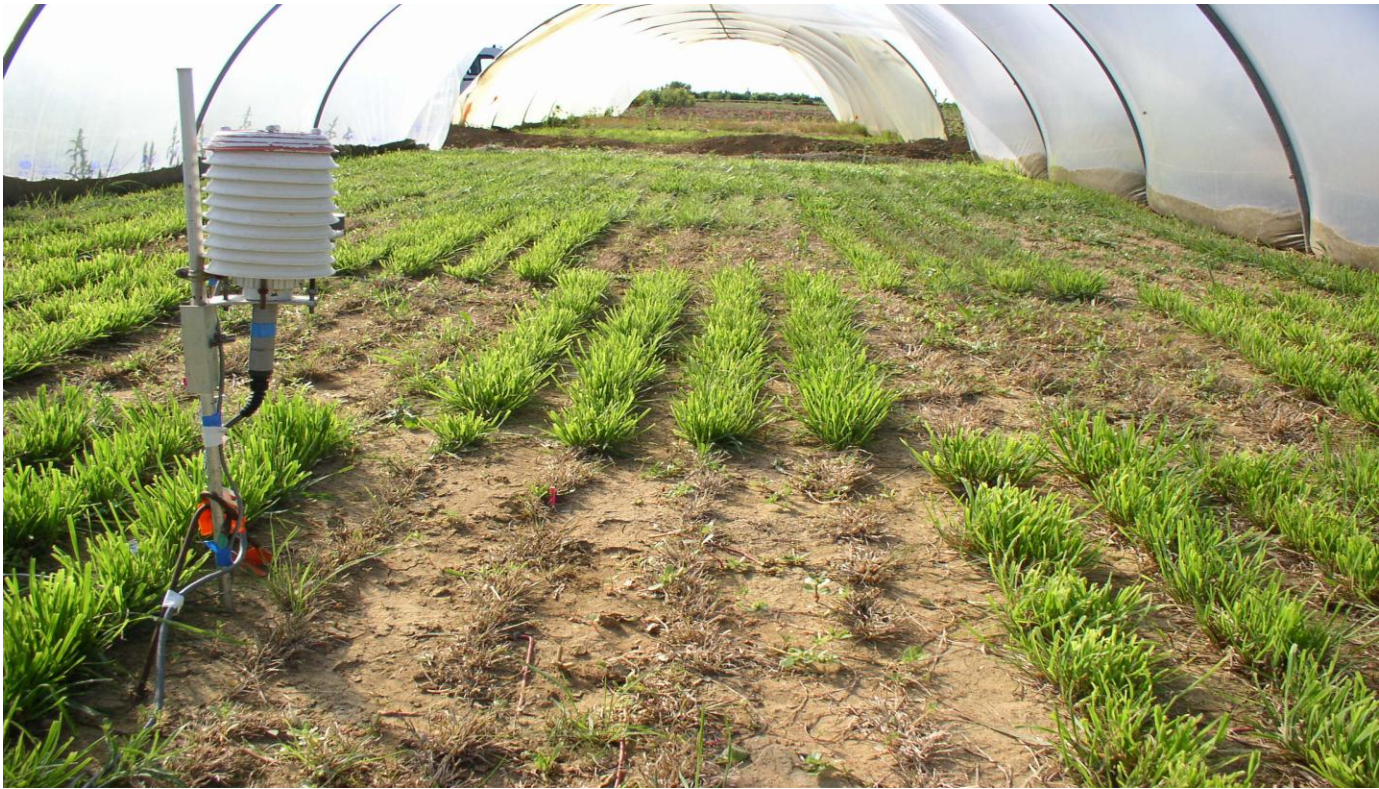
La sensibilité à la sécheresse des variétés tempérées est clairement mise en évidence.





Merci de votre attention





Les mêmes que diapo précédente, maintenus sous irrigation, également en août:

- en vert, dactyle médit. non dormant (Medly) : forte croissance (avec N)**
- en brun, dactyle méditerranéen très dormant (Kasbah) : sénescence induite en juin, même irrigué;. Hyper résistant à la sécheresse; il redémarre en septembre à partir de bourgeons enterrés. Il ne pousse que de septembre à mai Adapté seulement comme plante fourragère dans les régions semi-arides ou à l'enherbement des vignes chez nous.**

Description schématique du comportement des graminées prairiales pendant une sécheresse estivale longue

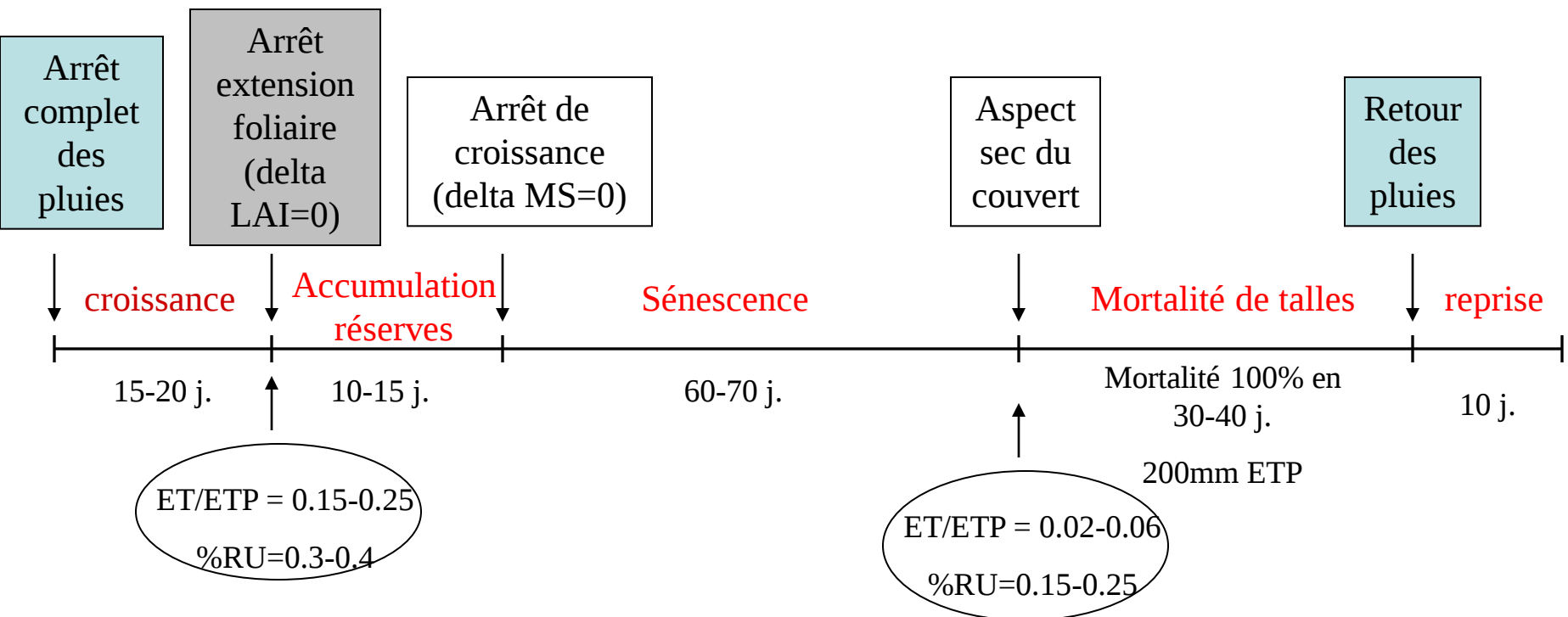
- Entrée en sécheresse : constitution de réserves

4 phases à traduire:

- Sénescence

- Mortalité de talles

- Reprise



Modélisation simplifiée de l'effet sécheresse (été et automne)

R = production en MS/ha pour une période et une prairie moyenne

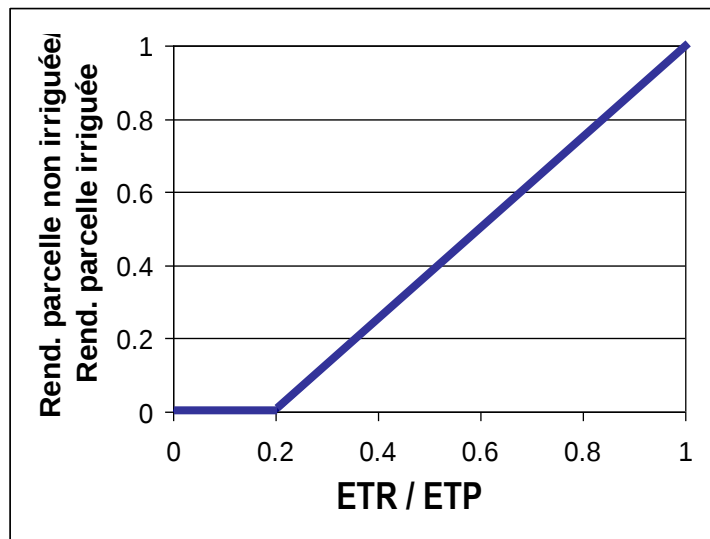
R_m = production de la même prairie irriguée à l'optimum

Ratios R/R_m calculés par :

$R/R_m = 0$ quand $ETR/ETP < 0.2$

$R/R_m = 1.25(ETR/ETP) - 0.25$ quand $0.2 < ETR/ETP < 1$,

$R/R_m = 1$ Quand $ETR = ETP$,



ETR/ETP estimé

été : $(P+65)/ETP$ calculé sur les 4 mois mai-aout

automne : par P/ETP calculé du 20/08 au 15/10