

Etude des impacts des changements climatiques sur la culture de miscanthus (production et impacts environnementaux) : Simulation avec le modèle de culture STICS pour trois localités des Hauts-de-France

Anaëlle MAZINGARBE et Hélène DESMYTTERE

JUNIA – Lille - Unité mixte de recherche transfrontalière BioEcoAgro

JUNIA

PREAMBULE

LOT 1 : Services écosystémiques pour les collectivités locales et détermination de zones de productions préférentielles

T12. Caractériser l'impact du climat de demain sur la culture dans ces zones

Etape 1 : Identifier des scénarios les plus probables sur les aires de production de miscanthus en région



Etape 2 : Analyser les impacts des évolutions climatiques probables sur la culture du miscanthus dans les zones de production définies



Travail réalisé dans le cadre d'un stage de mémoire de fin d'étude (M2) d'une durée de 5 mois

Auteur : Anaëlle MAZINGARBE, étudiante AgroSup Dijon

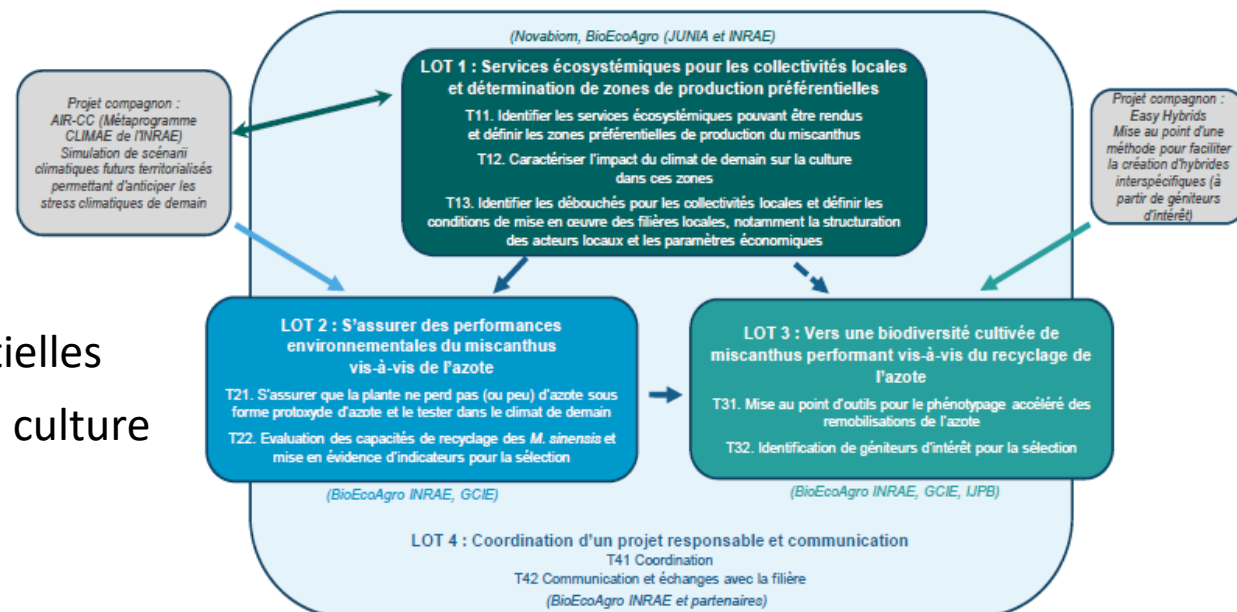


Figure 1. Présentation des lots et de leurs liens.



1

CONTEXTE

2

PROBLÉMATIQUE

3

METHODOLOGIE

4

RESULTATS ET
DISCUSSION

5

LIMITES ET
PERSPECTIVES

6

CONCLUSION

MISCANTHUS

Graminée rhizomateuse, C4, culture pérenne

Culture à fort potentiel :

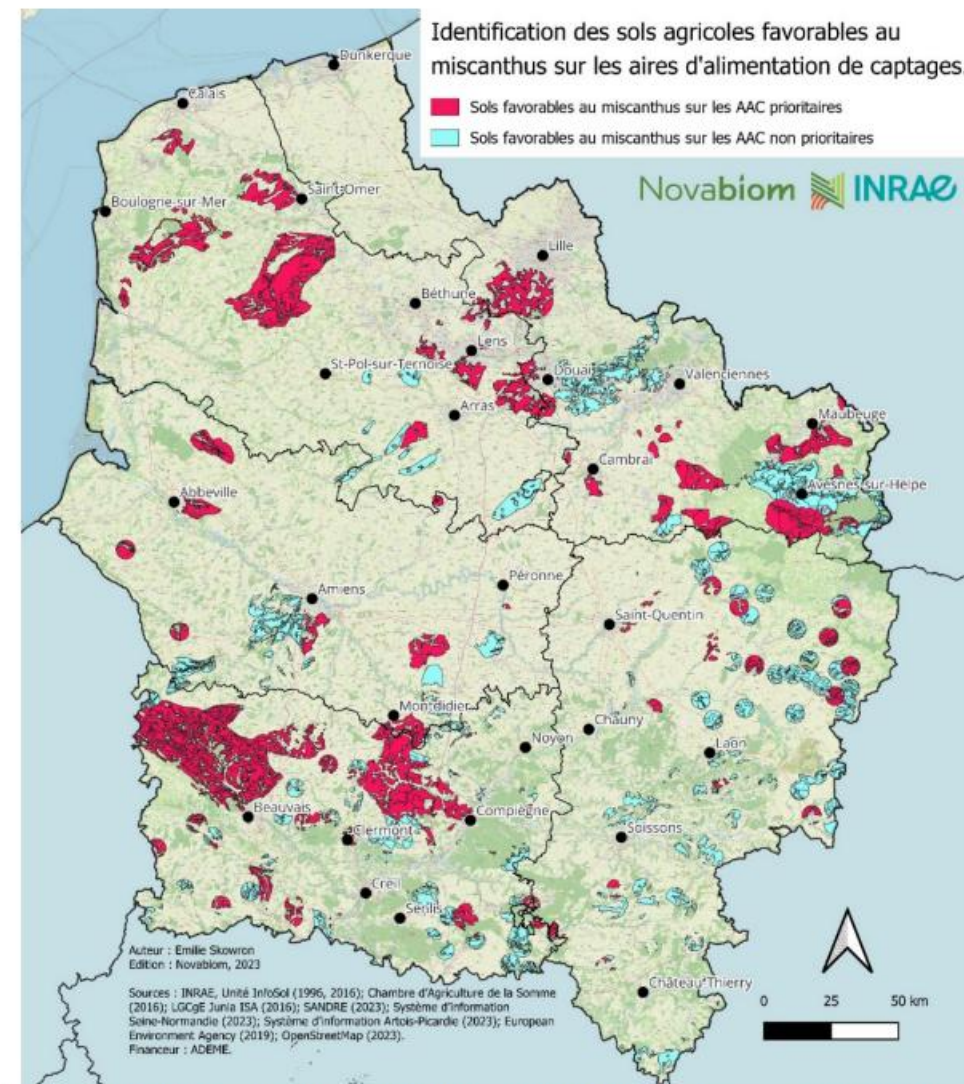
- Pérenne et bas-intrants
- Biomasse importante, récoltée en sec

→ Nombreux services écosystémiques tels que :

- Prévention contre l'érosion
- Maintien de la qualité de l'eau, du sol
- Fourniture de biomasse
- Stockage carbone...

Seulement **une centaine d'hectares de miscanthus** sont plantés chaque année dans les Hauts-de-France

58 % de la surface des AAC prioritaires sont favorables au miscanthus, soient **217 378 ha**



Identification des sols agricoles favorables au miscanthus sur les AAC (Novabiom).

CHANGEMENTS CLIMATIQUES

+2°C entre 1955 et 2017 en Hauts-de-France (cerdd, 2022)

+4,2°C d'ici 2100 d'après le scénario RCP 8.5 (MétéoFrance) avec changements des précipitations et de leur répartition

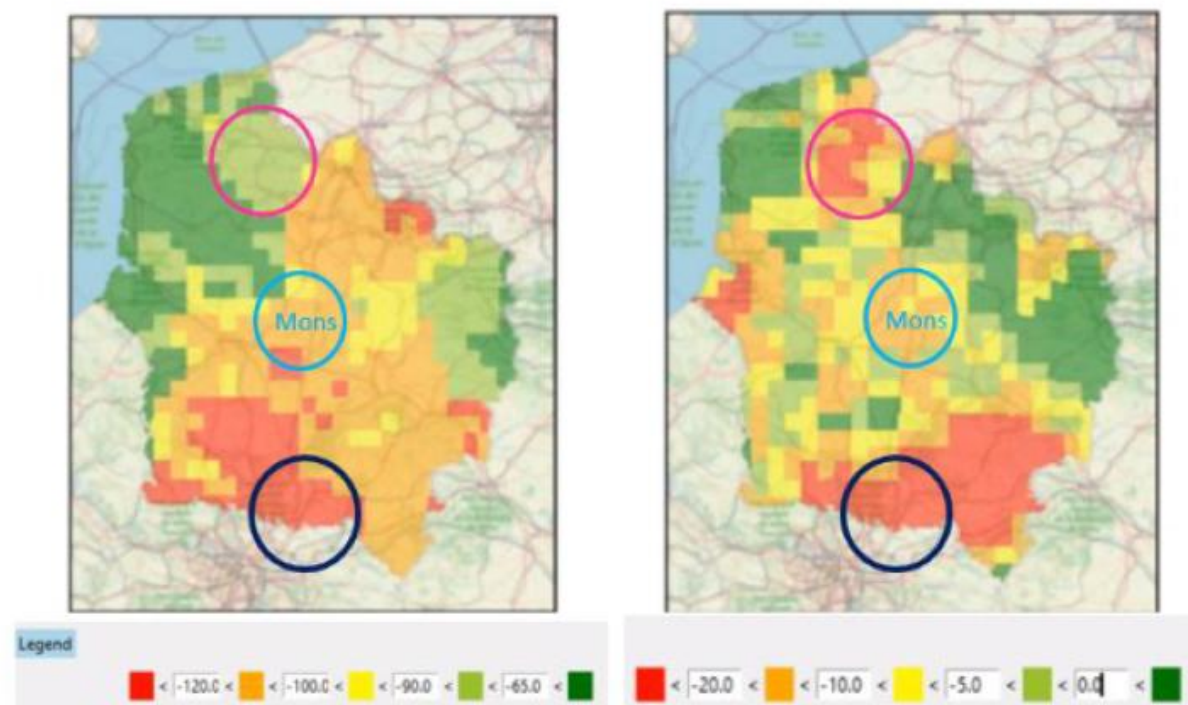
Travaux préliminaires :

- Cartographie régionale de l'évolution des IC (UPJV)
- Focus : analyse du déficit hydrique atmosphérique (P-ETP)
 - Un gradient Sud-Nord du déficit hydrique atmosphérique, avec un déficit plus important au sud de la région.
 - A horizon moyen, ↗ du P-ETP au **Nord** comme au **Sud**
Zone **centrale** de la région, ↗ plus légère P-ETP

Différences contrastées des évolutions climatiques en région Hauts-de-France → quels impacts sur le miscanthus ?

Période de référence (PR) 1976-2005

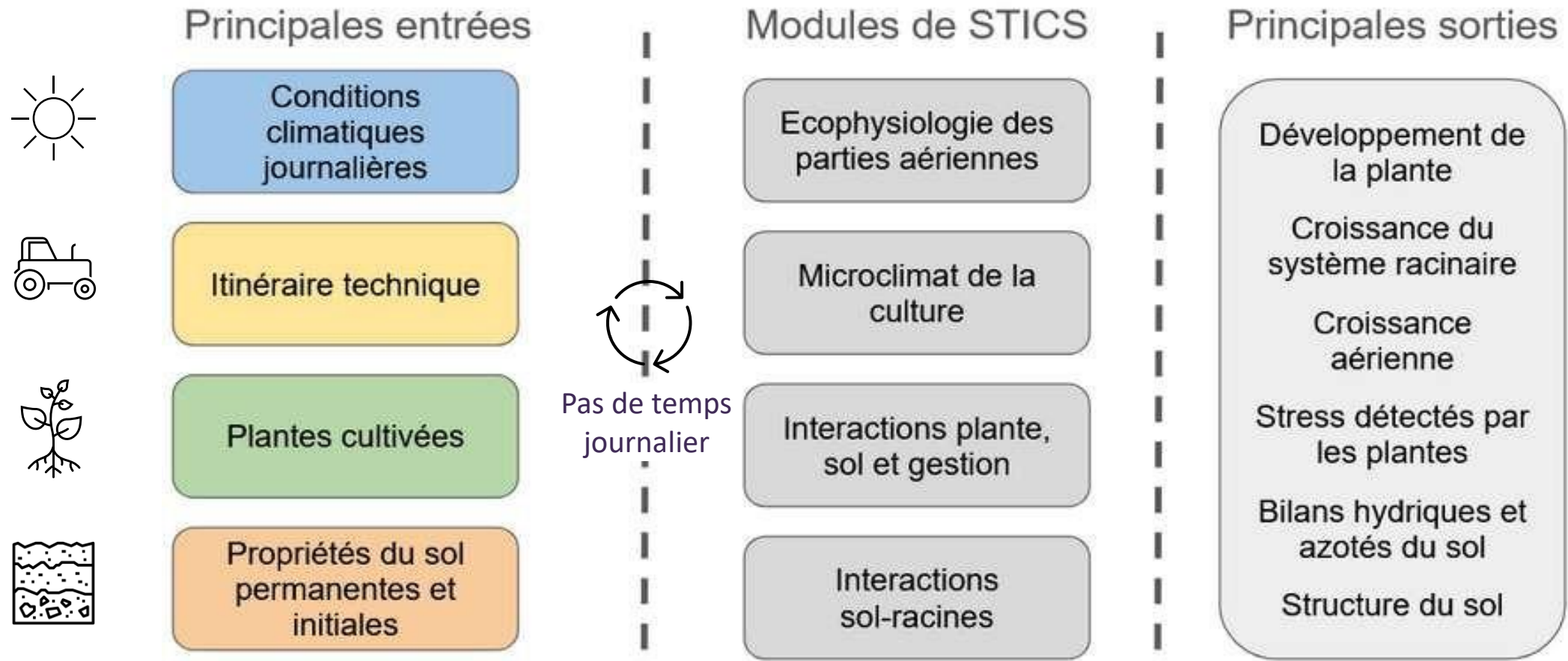
Ecart Horizon moyen (2041-2070) RCP 8.5



Interface « cartes climatiques » André 2024 - Modèle climatique Aladin

Représentation du déficit hydrique atmosphérique en Haut-de-France sur la période de référence (à gauche) et à l'horizon moyen (à droite), à partir du modèle climatique Aladin appliqué selon le scénario climatique RCP 8.5 sur la période estivale. Sortie de l'interface « carte climatique » (A. André 2024).

STICS “Scientific, Technical and Interdisciplinary simulator of soil-Crop System functioning”



Représentation schématique des principaux **composants** et **modules** du **modèle STICS**

Beaudoin et al., 2020 Strullu et al., 2012, 2015

PROBLEMATIQUE

Quels sont les impacts des **changements climatiques** sur la culture de **miscanthus** (production et services écosystémiques) en **Hauts-de-France** ?
Etude prospective par modélisation

PRODUCTION DE BIOMASSE

- (+) Effet positif de l'augmentation du CO₂
- (-) Stress hydriques avec effet négatif

CAPACITE DE LIMITATION DE LA LIXIVIATION

- (-) La lixiviation pourrait augmenter, notamment en raison des épisodes de pluies extrêmes et d'une minéralisation accrue

CAPACITE DE STOCKAGE CARBONE

Stable en contexte de CC

CHOIX DE SIMULATION

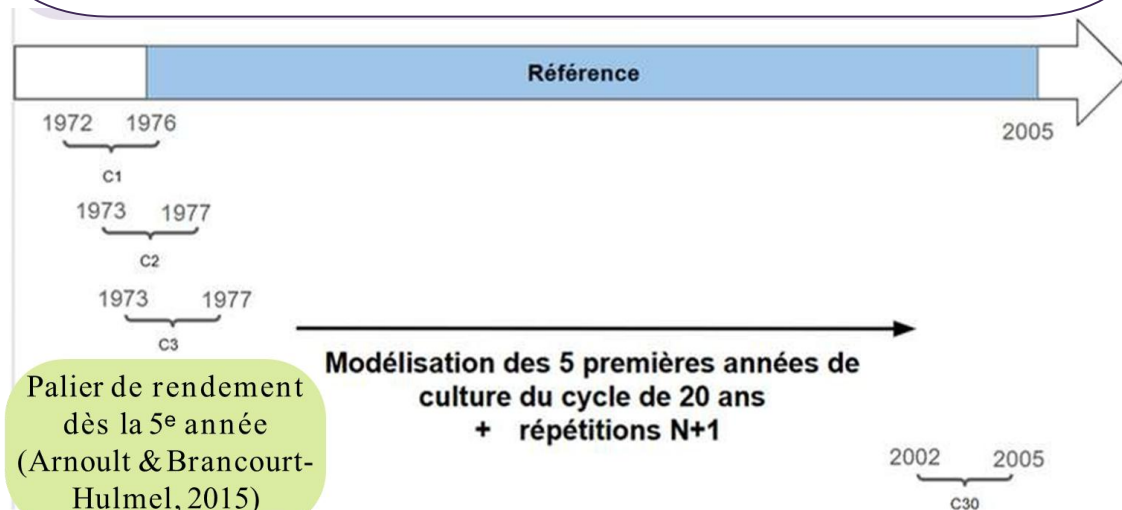
3 périodes climatiques sélectionnées



Plan de simulations

5 premières années : effet **climat** (sol & pratiques constants)
Représentatif sur zones climatiques sélectionnées

6 cycles complets de **20 ans** :
impact climatique sur l'ensemble du cycle de la culture



Exemple sur la période de référence de la simulation sur les 5 premières années de culture du miscanthus (c1 = cycle 1, etc)

Périodes climatiques	Référence	Futur Proche	Futur Lointain
Cycles de culture	C1 : 1976 - 1995	C3 : 2031 - 2050	C5 : 2071 - 2090
	C2 : 1986 - 2005	C4 : 2041 - 2060	C6 : 2081 - 2100

CARACTERISATION DES ZONES CLIMATIQUES

Superposition des cartes des **zones favorables** à la culture du miscanthus et des projections climatiques régionales

↳ Choix de **3 localités théoriques** avec un gradient **Nord-Sud** → Représenter une diversité climatique en région



Carte des 3 localités retenues en région Hauts-de-France

↳ Choix du modèle **RACMO22E–EC-Earth** et scénario **RCP 8.5**

	Hazebrouck			Estrées-Mons			Soissons		
Variables	Réf	Δ FP	Δ FL	Réf	Δ FP	Δ FL	Réf	Δ FP	Δ FL
Tmin (°C)	7	+2	+3	7	+2	+3.5	7.2	+2	+3.5
Nb jours gel (T min < 0°C)	40	-10	-20	42	-8	-18	45	-7	-20
Tmax (°C)	13.5	+2	+3	14	+2	+3	15	+2	+4
Nombre de jours > 28°C	5	+5	+15	10	+5	+25	12	+10	+35
PP annuel (mm)	700	+150	+50	650	+100	+60	700	+100	+60
PP juin	65	+10	-20	60	0	-20	60	+10	-10
HR (%)	80	-0.5	-2	79	-0.8	-2.2	78	-0.5	-2.5
RG (MJ/m²) août	15	0	+2	15	+1	+3	15	0	+1.5

Caractéristiques climatiques des zones retenues simulées par le modèle RAC MO22E–EC-Earth selon le scénario RCP 8.5, pour les périodes de référence (réf), futur proche (FP) et futur lointain (FL)

INPUTS STICS

Données climatiques :
Modèle RAC MO22E-EC EARTH
et scénario RCP 8.5

Téléchargement sur DRIAS pour les 3 points de grille

Variables climatiques	Unités
Température minimale	°C
Température maximale	°C
Précipitations	mm
Rayonnement global	MJ/m²/j
Humidité relative	%
Vitesse du vent	m/s

+ [CO2 atm] (ppm)

Données plante :
Paramétrage *Miscanthus × giganteus*

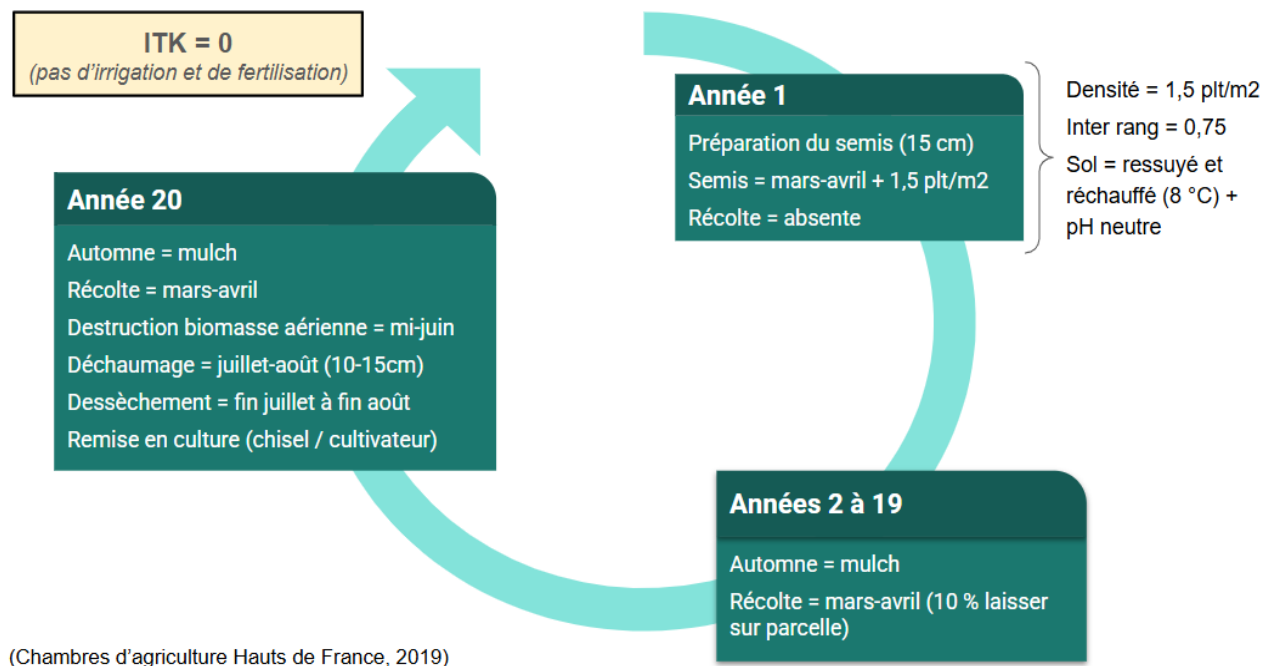
Variables		Valeurs
Phases phénologiques	Emergence	~150 °C.j
	Floraison	~1500 °C.j
	Sénescence	~2000 °C.j
Paramètres	Température de base	10 °C
	indice de surface floiaire max	6 - 7
	Efficiencie de conversion de la lumière	~3.5 g/MJ

INPUTS STICS

Données sol :
Site INRAE Estrées-Mons

Variables	Valeurs (unité)
Texture	17.03 % argile + 0.105 % N organique
Profondeur utile	1.35 m
pH	8.25 (basique)
Capacité au champ	22.5 à 30 %
C/N	9.46
Porosité	1.43 à 1.56 g/cm ³
Cailloux	/

Données ITK :
Simplification maximale



OUTPUTS STICS

Variables issues de STICS sélectionnées dans l'étude

Thématiques	Variables STICS	Description
Biomasse	masecn _p	Biomasse aérienne exploitable (t MS/ha)
	masectot	Biomasse totale aérienne (t MS/ha)
	msrac(n)	Biomasse souterraine (t MS/ha)
Stockage de carbone / GES	DSOCTot	Variation du stock de carbone organique dans le sol (kg C/ha)
	GHG	Émissions de gaz à effet de serre (kg eq. CO ₂ /ha)
Qualité de l'eau	Qles	Quantité de nitrates lessivés (kg N/ha)
	drat	Drainage profond (mm)
Fonctionnement hydrique	etr_etm _{lmoy}	Efficiencia de l'eau en phase végétative (0 à 1)
	swfac	Indice de stress hydrique stomatique (0 à 1)
Cycle de l'azote	Qem_N ₂ O	Émissions de N ₂ O (kg N/ha)
	DSO _N tot	Variation du stock d'azote organique dans le sol (kg N/ha)
	inn _s	Facteur de réduction de la croissance de la biomasse dû à une carence en azote (NNI) (inn _{min} à 1)
Température	nbjgel	Nombre de jours de gel (T<0°C) – indicateur de dormance (jours)

Analyses statistiques

Itérations :

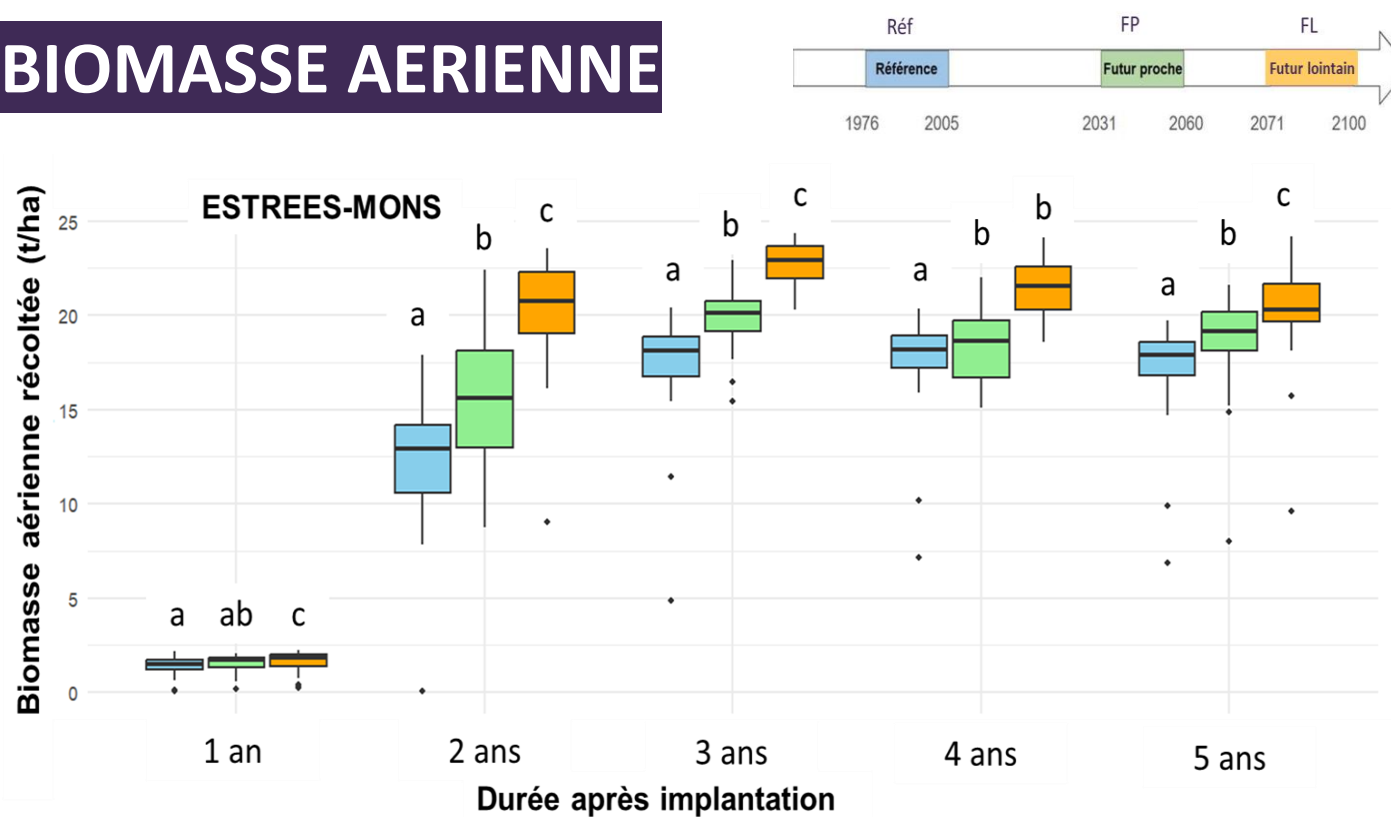
- Chaque « année » simulée (1 à 5) = un cycle de culture **indépendant**
- Conditions climatiques représentatives d'une période climatique de 30 ans
- Chaque valeur analysée = **moyenne annuelle sur 30 années climatiques**

Tests statistiques :

- ✓ Normalité : Shapiro-Wilk
 - ✓ Homogénéité des variances : Levene
 - Conditions pas toujours respectées
- ⇒ Test non paramétrique de **Kruskal-Wallis**

Sur les cycles de 20 ans : Une ou deux années climatiques (moyenne) et IC 95%

BIOMASSE AERIENNE



Distribution de la biomasse aérienne exploitable (masecnp) en t MS/ha sur les 5 premières années de culture après implantation ($p < 0,05$, test post-hoc de Dunn).

Évolution FL – Réf (%)	Hazebrouck	Estrées-Mons	Soissons
Biomasse aérienne récoltable à <u>5 ans</u> masecnp (t MS/ha)	+19 %	+14 %	+17 %

↗ **production de biomasse** en FL (/réf) pour toutes les localités sur les 5 premières années

- Conditions favorables à la photosynthèse
 - Allongement période de croissance (↘ nb jours de gel)
 - Effet fertilisant du CO_2
 - ↗ RG annuel

Biomasse aérienne en année 5 pour la période de référence = **18 t MS/ha** pour les 3 localités

BIOMASSE AERIENNE



Variable	Site	Réf	FP	FL	Δ %
Moyenne de la biomasse aérienne récoltable sur 20 ans masecnp (t MS/ha)	Hazebrouck	14,5	14,3	14,4	-1 %
	Estrées-Mons	14,3	14,2	13,8	- 3%
	Soissons	14,0	14,1	13,9	- 1 %

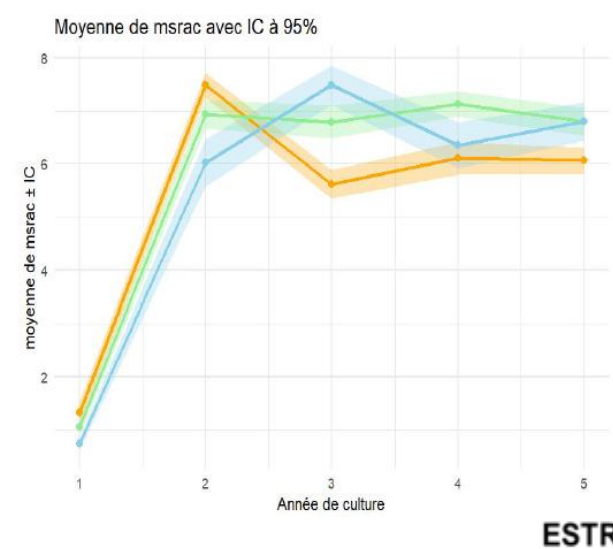
- ↗ de la **variabilité interannuelle des rendements** en FL (/réf) pour toutes les localités
- Gradient nord>sud
- Légère ↘ du **rendement moyenné** sur 20 ans FL < Réf

Tendance stable voire défavorable du CC à long terme sur l'ensemble cycle de 20 ans ?

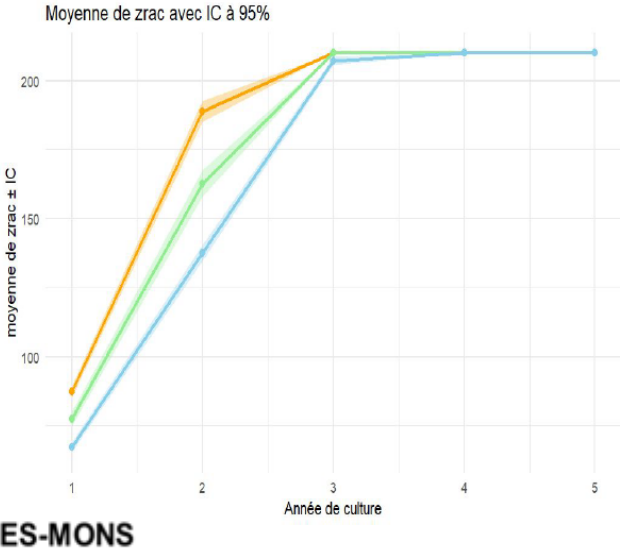
Simplification avec seulement 2 cycles complets donc moyenne de 1 à 2 années climatiques seulement : effet aléa climatique potentiellement + marqué



BIOMASSE SOUTERRAINE



Évolution de la moyenne et des indices de confiance à 95 % de la biomasse racinaire active (*msrac*) simulées en t/ha



Évolution de la moyenne et des indices de confiance à 95 % de la profondeur maximale du système racinaire (*zrac*) simulées en cm

Évolution FL – Réf (%)		Hazebrouck	Estrées-Mons	Soissons
Biomasse souterraine à <u>5 ans</u> msrac (t MS/ha)		-12 %	-8 %	-18 %
Profondeur maximale du système souterrain Zrac (cm)	à 2 ans	+39 %	+41 %	+38 %
	à partir de 5 ans	= atteint « obstarac »		

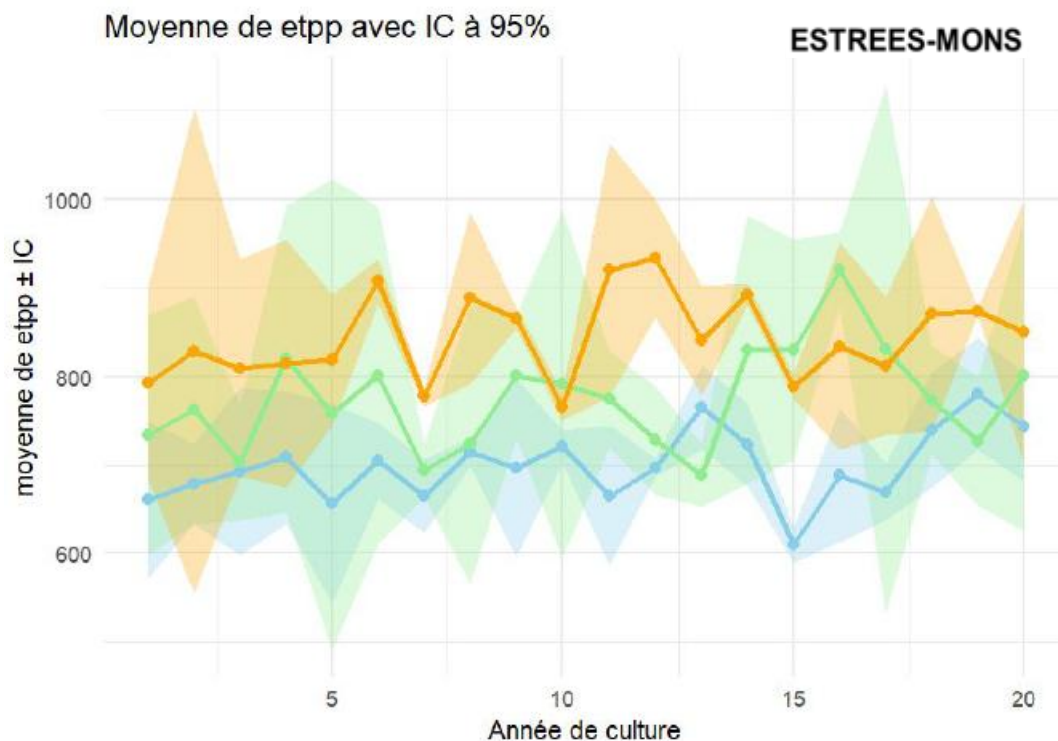
- **Accélération de l’exploration racinaire** en FL (/réf) pour toutes les localités mais prof. max =
 - Pic de biomasse souterraine atteint en année 2 (FL) – puis diminution sur 20 ans (variabilité interannuelle)
 - **Biomasse souterraine totale** ↘ (*diff significative entre FL et réf à 5 ans et à 20 ans*)
- Profondeur racinaire maximale atteinte plus rapidement → paramètre drivé par les °Cj dans STICS
 - Biomasse souterraine en diminution en FL → stratégie de croissance orientée vers l’aérien ? (*Rojas-Botero et al., 2023*)

INDICATEURS HYDRIQUES



- **Indice de stress hydrique** > 0,9 dans toutes les modalités
- **ETR/ETM** > 0,9 dans toutes les modalités

Absence de contrainte hydrique



Évolution de la moyenne et des indices de confiance à 95 % de l'évapotranspiration potentielle du couvert (etpp) simulée sur 2 cycles complets de 20 ans de culture par période.

Variable	Site	Réf	FP	FL	Δ %
Evapotranspiration potentielle de la plante etpp (mm)	Hazebrouck	663	717	787	+19 %
	Estrées-Mons	699	775	845	+21 %
	Soissons	686	756	831	+21 %

➡ Pourtant, on note une ↗ **globale de l'ETPP** en FL (/réf)

- Quid de l'évapotranspiration ?
- Disponibilité en eau qui reste favorable (RU)?

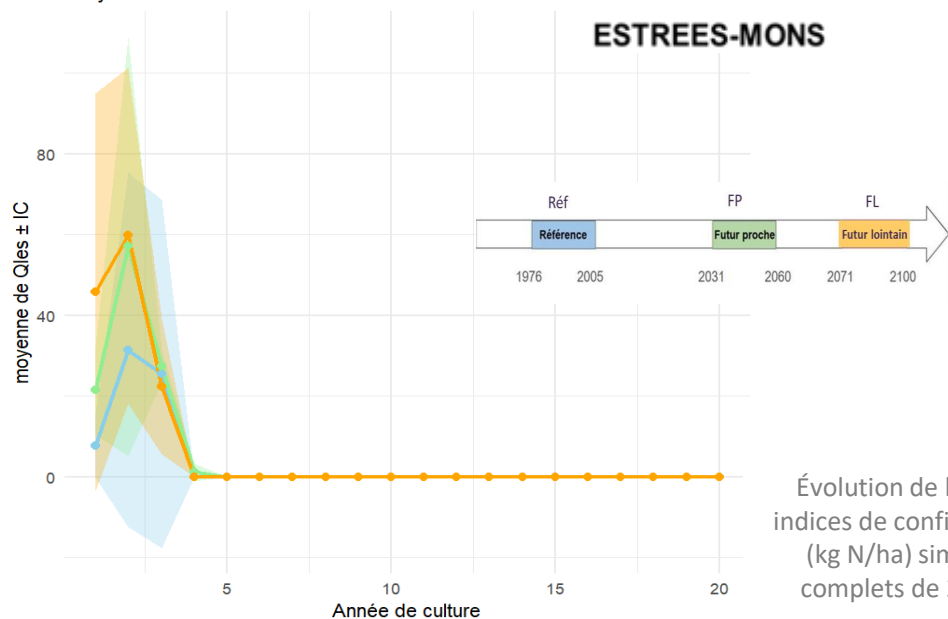
INDICATEURS AZOTÉS

INN – pour toutes les localités :

- À 5 ans : élevé (>0,80) : pas de contrainte azotée visible et légèrement + élevé en FL
- A 20 ans : diminution de inns, davantage en FL et forte variabilité interannuelle en FL

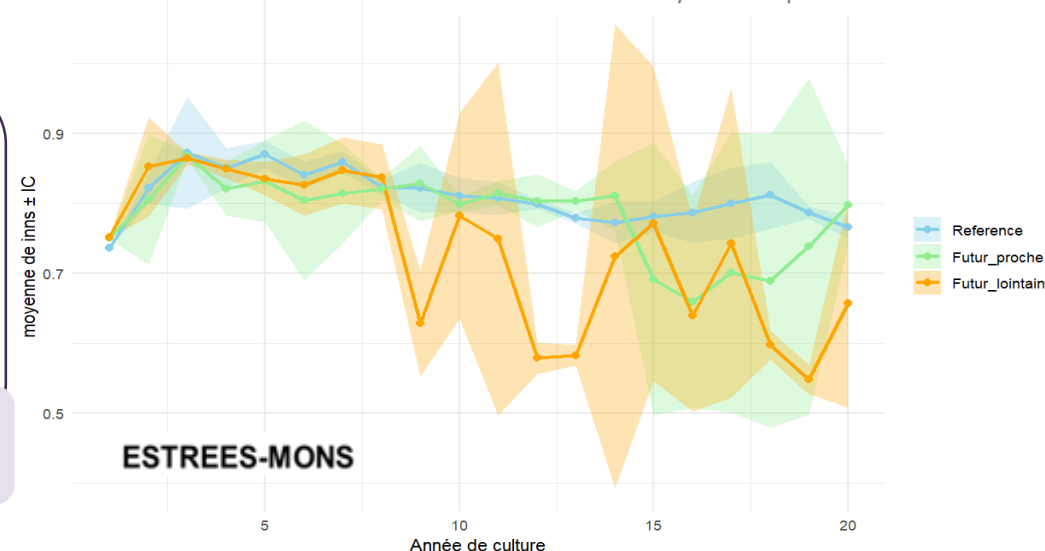
Potentiels stress azotés en FL selon les années

Moyenne de Qles avec IC à 95%



Moyenne de inns avec IC à 95%

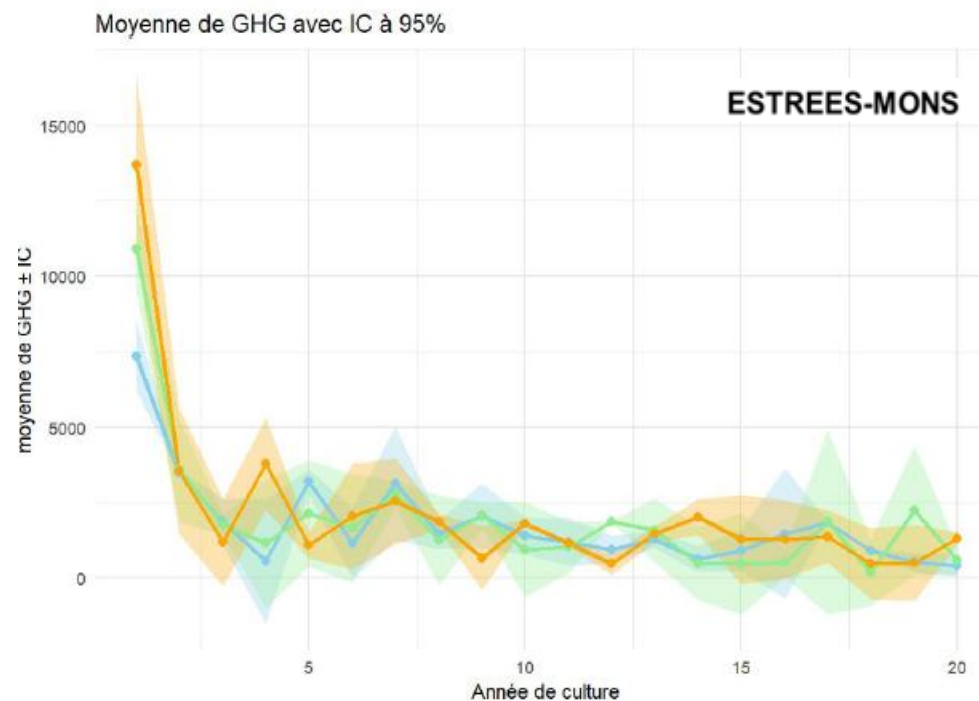
Évolution de la moyenne et des indices de confiance à 95 % inns simulée sur 2 cycles complets de 20 ans de culture.



Pour toutes les localités :

- Pic de lessivage à 2 ans (+ en FP et FL)
- Mais ensuite sur le reste du cycle : pertes globalement nulles, peu importe la période climatique et le lieu
- À 2 ans : reliquat azoté du précédent cultural qui n'est pas capturé par le couvert en A1 car très peu développé ?
- On conserve l'effet bénéfique du miscanthus sur la limitation du lessivage grâce à la couverture perm. et le système racinaire dense

BILAN GES



Évolution de la moyenne et des indices de confiance à 95 % des émissions annuelles de gaz à effet de serre (GHG) simulées en kg eq. CO₂ /ha sur 2 cycles complets de 20 ans de culture

Variable	Site	Réf	FP	FL	Δ %
Emissions de gaz à effet de serre moyennes sur les 20 ans du cycle GHG (t eq. CO ₂ /ha/an)	Hazebrouck	1,97	2,06	2,29	+17%
	Estrées-Mons	1,79	1,96	2,17	+22%
	Soissons	1,80	1,97	2,17	+20%

Qem_N₂O → GHG

- Des émissions plus importantes durant la 1^{ère} année du cycle et plus importantes en FL (/réf)
- Gradient nord-sud ?
- Puis ↘ et stables sur le reste du cycle de 20 ans : = entre périodes

- Plus d'émissions de N₂O en climat + « chaud » : stimulation de la vie microbienne
- A long terme, le CC ne semble pas impacter significativement le bilan GHG (exclusion faite de l'année 1)

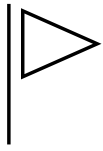


- **Valeurs semblent élevées (Qem_N20)**

Comparaison : 0,8 à 3 t eq. CO₂/ha/an pour un maïs fertilisé en climat tempéré

LIMITES ET PERSPECTIVES

1/2



Limite du nombre d'outputs analysés et pertinence des choix



Creuser d'autres indicateurs : notamment sur les **services écosystémiques**

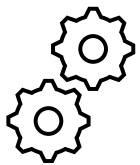


Un seul type de sol avec une forte RU

Étape 1 pour isoler l'effet climat mais conditions non limitantes (sous-estimation stress, surestimation rendements dans le futur) peu réalistes



Étape suivante du travail : intégrer d'**autres types de sols** → faire varier déjà la RU



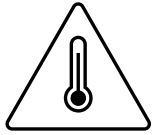
Compréhension des composantes et mécanismes



Analyse des formalismes
Matrices de corrélation : « disséquer » l'effet climat

LIMITES ET PERSPECTIVES

2/2



Choix d'un modèle climatique trop médian + analyse sur 30 ans qui permet la représentativité mais qui lisse les aléas extrêmes



Creuser une année + critique : voir comment le miscanthus réagit dans le modèle, notamment sur le stress hydrique + sur le cycle de 20 ans ?



Limite d'utiliser un modèle en conditions de CC : quels impacts sur la modification des processus physiologiques avec effet combiné T°, P et CO₂ ?



Complémentarité avec les expérimentations (Ecotron) : comparaison des résultats

CONCLUSION

- Rendements légèrement impactés (+) à CT et (-) à LT par le CC d'ici la fin du siècle
- Services globalement maintenus
- ↗ de la variabilité interannuelle
- Conditions peu stressantes, notamment en termes de stress hydrique 
- Pas de différences extrêmement marquées entre les 3 localités
- Principale suite du travail :
 - Simulations pour différents types de sol (conditions limitantes)

Merci pour votre attention !

Pour en savoir plus :

- Site internet : <https://mistigation.hub.inrae.fr>