

EXPLORER LE PASSÉ POUR MIEUX ANTICIPER LE FUTUR : ANALYSE DES IMPACTS D'ALÉAS CLIMATIQUES SUR LA PRODUCTION FOURRAGÈRE DU GRAND OUEST DE 2003 À 2022

Résumé

Cet article explore l'impact d'aléas climatiques sur la production d'herbe et de maïs fourrage pour la zone du Grand Ouest regroupant la Bretagne et les Pays de Loire. Des données climatiques et de productions fourragères de 2003 à 2022 font l'objet d'analyses statistiques afin d'identifier les années correspondant à des « étés secs » et des « printemps peu poussant et étés secs ». Les rendements agrégés de ces années indiquent des pertes annuelles de l'ordre de -14% à -32% en prairie et de -11% à -22% en maïs fourrage selon les zones. L'analyse croisée de données climatiques et fourragères permet de mieux comprendre l'interaction climat-plante à l'échelle des six zones fourragères du Grand Ouest et de souligner les points forts et points de vulnérabilités de chaque zone. Les résultats de cette étude ne permettent pas de prédire les évolutions de rendements fourragers causées par le changement climatique en cours mais proposent des références locales précises pour les filières ruminants afin d'anticiper deux types aléas climatiques de plus en plus fréquents.

Summary

Explore the past to better anticipate the future : analysis of the impacts of climate hazards on forage production in the West of France between 2003 and 2022

This paper explores the impact of climate hazards on grass and silage maize production for the West of France, namely Brittany and Pays de la Loire. Climate data and forage production data between 2003 and 2022 are analysed to identify years presenting “dry summers” and “low-growth springs and dry summers”. Aggregated yields show annual losses going from -14% to -32% for grasslands and from -11% to -22% for maize silage depending on areas. Crossed analysis of climatic and forage data improves the understanding of the climate-plant interaction at the level of the six forage areas of West of France and points out strengths and vulnerabilities of each area. Results do not predict the evolution of forage production in the West of France under climate change but propose solid local references for the ruminant livestock sector to anticipate two types of climate hazards becoming more frequent.

Article accepté pour publication le 29 juillet 2024.

Auteurs

B. Godoc¹, P. Mariat¹, F. Guillois², E. Fruchet³, B. Possémé², G. Dufour³, P. Pierre¹, J.C. Huchon³, B. Couilleau³, P. Le Cœur², A. Madrid¹, F. Launay¹

¹Institut de l'Elevage (Idele), 8 route de Monvoisin, 35650 Le Rheu, ²Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, ³Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de la Loire

Auteur correspondant:

GODOC Brendan, brendan.godoc@idele.fr

Mots clés

Aléa climatique, sécheresse, prairie, production fourragère, maïs ensilage, changement climatique.

Key words

Climate hazard, drought, grassland, forage production, maize silage, climate change.

Références de l'article

B. GODOC, P. MARIAT, F. GUILLOIS, E. FRUCHET, B. POSSÉMÉ, G. DUFOUR, P. PIERRE, J.C. HUCHON, B. COUILLEAU, P. LE CŒUR, A. MADRID, F. LAUNAY, (2024). Explorer le passé pour mieux anticiper le futur : analyse des impacts d'aléas climatiques sur la production fourragère du Grand Ouest de 2003 à 2022, *Fourrages* 259, 5-19.

Introduction

Les climats océaniques francs et altérés présents dans les régions Bretagne et Pays de la Loire (que nous désignons par Grand Ouest dans cette étude) sont propices à la production de fourrages pour les élevages de bovins (Rouquette et Pflimlin 1995, Peyraud *et al.*, 2009). En effet l'assolement de ces deux régions est composé de 41% de prairies et 16% de fourrages annuels en 2020 (Agreste, 2022a, 2022b). Toutefois, le changement climatique en cours impacte la stabilité de production de fourrages dans ce territoire. Les modèles climatiques issus du CMIP-5¹ du GIEC² indiquent pour la zone Grand Ouest une augmentation des températures sur l'ensemble de l'année, une baisse des précipitations en été et une hausse en hiver (Amiot *et al.*, 2022 ; Bonnardot *et al.*, 2023). Le bilan hydrique sera ainsi de plus en plus déficitaire en période estivale du fait d'une évapotranspiration en hausse et un régime de pluies estivales en baisse. Cette évolution du climat du Grand Ouest impactera la répartition de la croissance des prairies et la variabilité des rendements du maïs fourrage et des prairies (Ruget *et al.*, 2013 ; Moreau et Madrid, 2018a, 2018b ; Moreau *et al.*, 2020).

Ces dernières années ont été marquées par une hausse de la fréquence des sécheresses agronomiques, qui peuvent être définies comme une période durant laquelle la réserve utile est inférieure à 20% de la capacité au champ, le point de flétrissement (Moreau et Madrid, 2018a). Si les éleveurs bovins bretons semblaient peu préoccupés par le changement climatique avant les années 2010 (Vertès, 2011), à la différence des Pays de Loire, les aléas climatiques survenus ces dix dernières années ont pu déstabiliser l'équilibre fourrager d'un grand nombre d'exploitations bovines (INOSYS, 2020). L'année 2022, année la plus chaude enregistrée en France (Météo France, 2023), fut marquante jusque dans le département du Finistère où des dérogations d'achat de fourrages non-bio ont été demandées en élevage sous label agriculture biologique (Paysan Breton, 2022). Face à ces aléas climatiques qui peuvent être définis par un écart franc d'un phénomène météorologique à la normale (Eldin, 1989) et dont la fréquence augmentera avec la hausse des températures mondiales (IPCC, 2021), il paraît important pour le monde du conseil en élevage de s'équiper de références chiffrées sur leurs impacts pour les principaux fourrages.

Bien que l'approche par modélisation à partir de données climatiques projetées soit privilégiée dans la littérature lorsqu'il s'agit d'estimer les impacts du changement climatique sur les fourrages (Graux *et al.*, 2013), cette approche fait face à certaines limites. Couplés à des données climatiques journalières projetées pour le futur, les modèles mécanistes tels que STICS (Brisson *et al.*, 1998) permettent de prendre en considération des paramètres clés pour estimer l'impact d'un climat sur le développement d'une plante fourragère (la teneur en CO₂ de l'air, le type de sol, le stress thermique et hydrique). Cependant, si ces modèles permettent de dégager des tendances sur le long terme, ils sont toutefois sensibles aux paramètres du sol renseignés et aux modes d'exploitations

(Ruget *et al.*, 2006) et perfectibles dans la prise en compte de la mortalité liée au manque d'eau et/ou aux fortes températures. Le modèle STICS utilisé pour les prairies était limité à la simulation d'un type de graminées, celles du type B (Cruz *et al.*, 2010) représentés par exemple par la fétuque élevée et le dactyle. Graux *et al.*, (2020) ont élargi à une plante de type A (ray-grass anglais) et amélioré plusieurs fonctions du modèle, qui reste néanmoins limité (pas de prairies bi ou plurispécifiques, avec légumineuses ; modélisation des flux d'azote perfectible). Par ailleurs, l'utilisation de ces modèles de culture pour la projection des rendements dans le futur dépendent de données climatiques dont les tendances en précipitations affichent une grande incertitude (Soubeyroux *et al.*, 2020 ; Bonnardot *et al.*, 2023) et dont les prédictions d'augmentation de températures pour la France sont supérieures dans les dernières données disponibles à ce qu'elles étaient dans les jeux de simulations précédents (Ribes *et al.*, 2022). C'est pourquoi cette étude fait l'hypothèse que capitaliser les impacts des aléas climatiques du passé représente une analyse complémentaire essentielle pour fournir et analyser des références récentes, plus simple d'un point de vue méthodologique et appropriée pour une utilisation en conseil en élevage centré sur une vision court-terme du changement climatique.

La littérature paraît, à notre connaissance, faible sur cette acquisition de références à partir du passé. En plus du numéro 250 de *Fourrages* qui valorise des données de terrain sur la pérennité des prairies, nous pouvons citer le travail de Lemaire et Pflimlin (2007) qui proposent une synthèse pour les années de sécheresses 1976 et 2003 à partir d'enquêtes de groupements, de données comptables et des Réseaux d'Élevage. Devun *et al.* (2013) font également le point sur les fourrages enregistrés dans les exploitations des Réseaux d'Élevage de 2000 à 2011. Le manque de données de terrain entraîne un manque de recul sur l'impact agronomique de ces événements extrêmes.

Dans le but de doter les conseillers en filière ruminants du Grand Ouest de références pour anticiper les risques de pertes liées aux aléas des décennies futures, notre travail a consisté à identifier parmi les 20 dernières années, 2003-2022, celles marquées par des aléas sur la production de fourrages pour en agréger les rendements pour analyser les variations de rendements et proposer des références. Les données de fermes du dispositif INOSYS – Réseaux d'élevage et des observatoires de la pousse de l'herbe des Chambres Régionales d'Agriculture ont été utilisées pour construire ces références. Le recours au travail d'expertise de conseillers fourragers, a permis de combler les parties manquantes de ces relevés concernant la croissance des prairies.

Trois objectifs ont guidé notre travail : proposer dans un premier temps une méthodologie pour identifier objectivement deux types d'années-aléas à partir de données climatiques et agronomiques observées ; estimer dans un second temps les impacts de ces deux années-aléas sur la courbe de croissance des prairies et sur

¹ Cinquième phase du projet d'intercomparaison des modèles couplés (Coupled model intercomparison project)

² Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

les rendements de maïs fourrage pour six zones du Grand Ouest ; et enfin explorer l'interaction climat-rendement pour la culture du maïs fourrage dans ces six zones.

Méthode

Zonage

Le nouveau zonage créé dans cette étude a pour objectif de proposer des unités cartographiques pertinentes pour le conseil en élevage concernant les références de productions fourragères liées à des conditions pédoclimatiques diverses sur les régions Bretagne et Pays de la Loire. Afin d'aboutir à un zonage transrégional et unique pour toute l'année, il a été décidé de ne pas repartir des zonages issus des travaux associant les Chambres d'Agricultures et Météo-France et utilisés pour la communication des suivis hebdomadaires de pousse de l'herbe (Météo France, 2006 ; CRA PDL, 2012). En effet, en Bretagne le zonage pour la gestion de la pousse de l'herbe est double : un zonage au printemps et un en été, tous les deux constitués de trois zones. Le zonage ligérien est le même pour l'ensemble de l'année et est composé de 3 zones. Ces deux zonages en revanche ne prennent pas en compte le contexte pédologique. Ainsi, il a été décidé de partir du travail d'expertise réalisé par Hentgen (1982) portant sur une cartographie nationale de 228 régions fourragères homogènes du point de vue des modes d'exploitation et des niveaux de production. Cette cartographie a par ailleurs été reprise dans l'observatoire ISOP (Ruget *et al.*, 2006) pour la statistique agricole avec une mise à jour des pratiques basées sur des enquêtes plus récentes (SCEES, 2000). Une vingtaine de régions fourragères décrivent les différentes zones d'isopotential fourrager de Bretagne et Pays de la Loire. Ces régions fourragères ont été regroupées en six zones selon le zonage agro-climatique produit sur ces deux régions par Amiot *et al.* (2023).

Un résultat du zonage est présenté en Figure 1. Des hachurages permettent une certaine souplesse dans la délimitation des zones pour l'utilisateur final. Toutefois, c'est le regroupement des régions fourragères ISOP d'Hentgen (1982) qui prévaut dans les calculs de cette étude sans prise en compte des hachurages (Figure 2).

Choix des années-aléas

Une «année-aléa» est définie dans cette étude comme une année fourragère du 1er janvier au 31 décembre durant laquelle un aléa climatique ou des aléas climatiques pénalisent la production des fourrages. Ces aléas climatiques sont donc étudiés sous l'angle d'une année entière pour prendre en considération les effets rémanents de certains aléas (e.g. été sec) et pour intégrer ces pertes de fourrages dans des bilans fourragers à l'échelle de l'année dans une démarche de conseil.

Deux années climatiques ont été définies :

L'année-aléa «été sec». Il s'agit d'une année dont l'été météorologique (du 1er juin au 31 août) est anormalement sec, entraînant un arrêt ou un ralentissement marqué de la pousse de l'herbe et une baisse des rendements en maïs.

L'année aléa «printemps peu poussant et été sec». Il s'agit d'une année dont le printemps météorologique (du 1er mars au 31 mai) ne rassemble pas les conditions nécessaires pour une croissance des prairies proche de la normale, soit à cause d'un manque de précipitations soit du fait de températures fraîches ou d'un vent asséchant venant du Nord-Est. La pousse de l'herbe du printemps en est donc impactée. A cela s'ajoute un été sec et chaud, lors duquel les rendements en maïs fourrage et la pousse de l'herbe se retrouvent pénalisés.

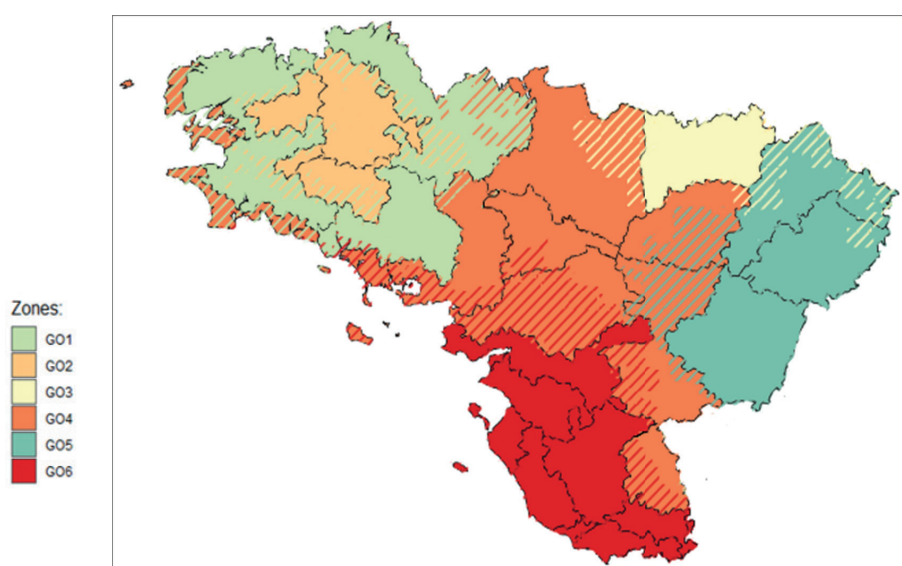


FIGURE 1 : Zonage du Grand Ouest (GO) proposé pour l'étude. Adapté de Hentgen (1982) et Amiot *et al.* (2023)
FIGURE 1 : Areas used in the study for West of France. Adapted from Hentgen (1982) and Amiot *et al.* (2023)

Données mobilisées pour identifier les années-aléas dans le passé

Trois sources de données sont mobilisées dans cette étude. Les données météorologiques journalières à une maille de 25km sur le Grand Ouest sont issues de la base de données Agri4Cast de 1990 à 2022 (Commission Européenne, 2023). Ces différents points météo sont agrégés à l'échelle des zones. Les données de pousse de l'herbe hebdomadaire sur la Bretagne et les Pays-de-la-Loire proviennent des suivis réalisés par les Chambres d'Agriculture de 2003 à 2022. Ces croissances en kilogramme de matière sèche (MS) par hectare et par jour sont issues de mesures de biomasse hebdomadaires réalisées à l'aide d'herbomètres et de niveaux de densités qui n'ont pas fait l'objet d'une homogénéisation entre les deux régions. Toutefois, ces relevés ne couvrent pas l'ensemble de l'année : les hivers et les étés sont rarement mesurés. C'est pourquoi l'expertise de conseillers fourragers locaux dans chaque zone a permis d'extrapoler les niveaux de croissance des courbes médianes présentées dans les résultats. La figure 2 cartographie la localisation des données de pousse de l'herbe.

Enfin, les données de rendements de maïs ensilage sont issues des exploitations de ruminants bretonnes et ligériennes qui sont ou ont été suivies dans le cadre du dispositif INOSYS Réseaux d'élevage résultant du partenariat entre l'Institut de l'Élevage et les Chambres d'agriculture (Charroin et al, 2005). Ont été considérées uniquement les données de rendements de maïs non-irrigué, c'est pour cette raison qu'une zone vide subsiste dans l'Est du Maine et Loire (Figure 3).

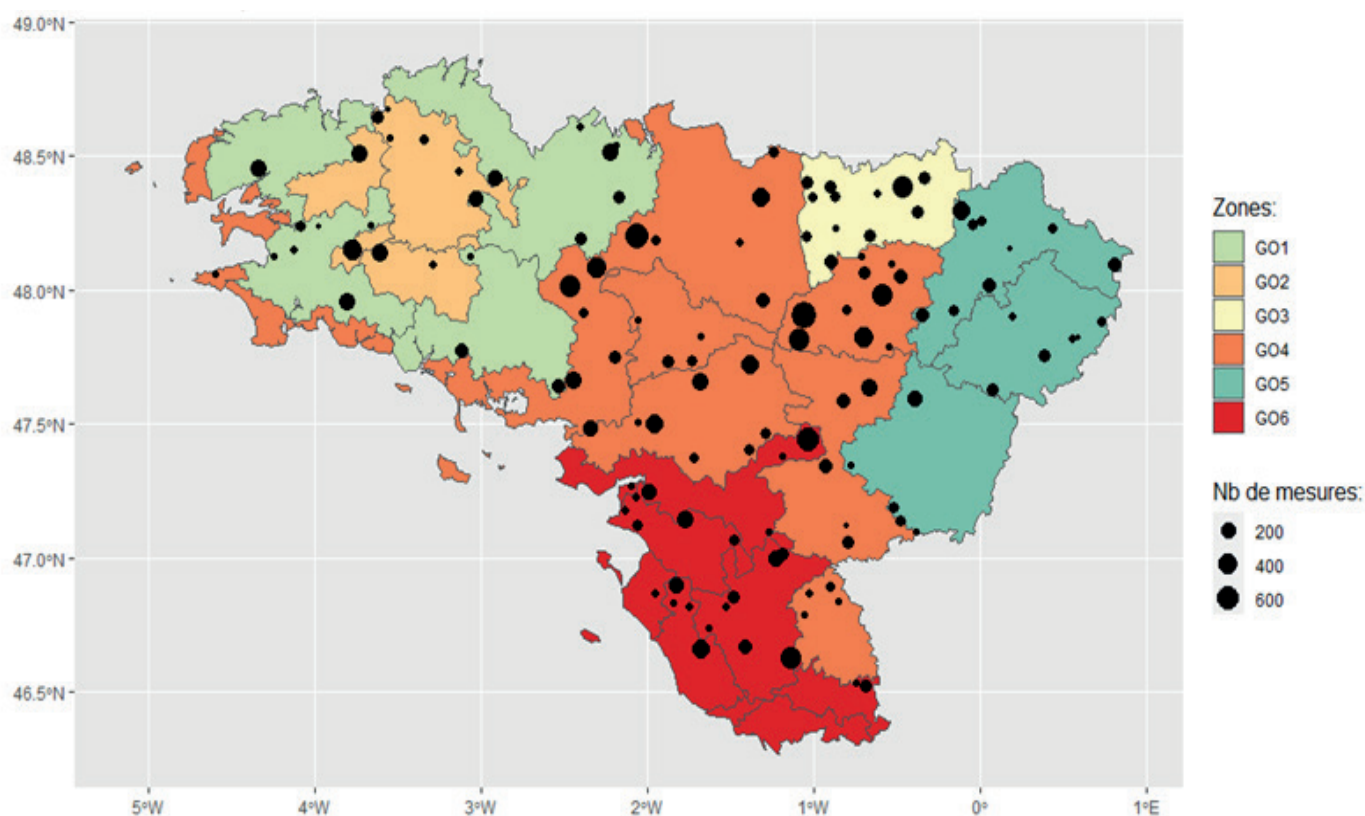


FIGURE 2 : Localisation des sites de mesures des observatoires de pousse de l'herbe des Chambres Régionales d'Agriculture de Bretagne et de Pays de la Loire (2003-2022)

FIGURE 2: Localisation of the measured sites in the Chambers of Agriculture's grass growth observatory (2003-2022)

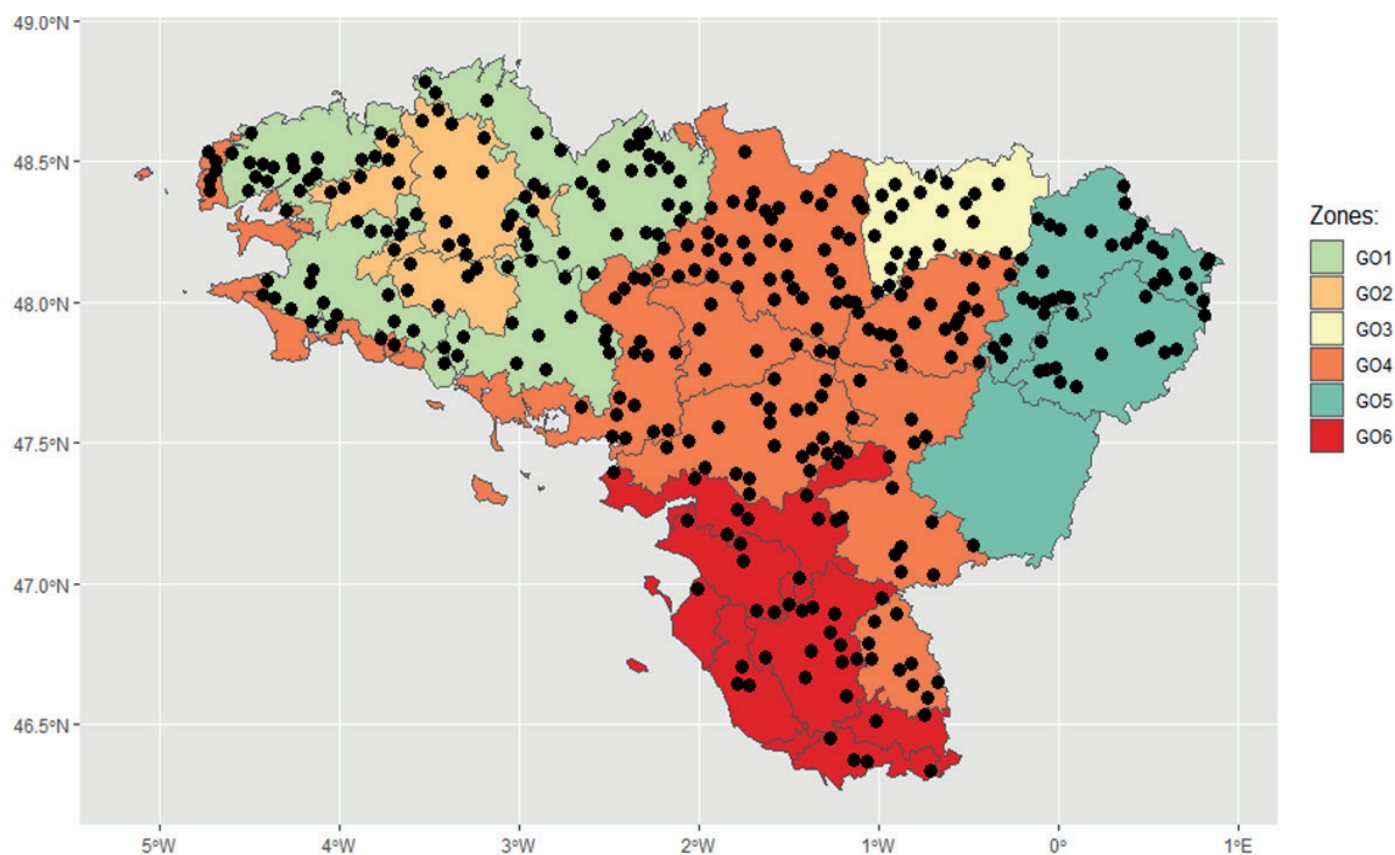


FIGURE 3 : Localisation des sites de mesures des rendements de maïs fourrage non-irrigué issus du dispositif INOSYS (2003-2022)
 FIGURE 3: Localisation of the measured sites for silage maize yields from the INOSYS network (2003-2022)

Identification des « années-aléas » par analyse statistique

L'identification des aléas climatiques dans le passé ne pouvant se baser sur la mémoire subjective de groupes d'éleveurs ou de conseillers, la méthode retenue est de faire « parler les données » en ayant recours à une analyse en composante principale (ACP) pour chaque zone et pour chaque année-aléa. L'objectif est de résumer au maximum l'information caractérisant chaque campagne fourragère et de visualiser cette information autour de deux axes auto-construits par l'information contenue dans le jeu de données et la proximité des variables et individus (Husson, 2009). Cette visualisation des données nous permet ensuite, par l'intermédiaire d'une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH), de dissocier le groupe d'années qui correspond le plus à l'aléa climatique visé. Les analyses sont effectuées sur R avec les fonctions du package FactoMineR (Lê et al., 2008).

L'utilisation conjointe de données climatiques et de données de rendements a été motivée par la volonté de bien caractériser les années dont les rendements sont impactés par la météo et seulement par la météo. Certaines années paraissent relativement chaudes et sèches mais les rendements ne sont pas pour autant pénalisés car il y a pu y avoir des pluies au bon stade de développement, ou bien les conditions réelles de l'état des sols sont difficilement modélisables par un bilan hydrique basé sur l'évapotranspiration potentielle. Ainsi, les années se positionnent les unes par rapport aux autres sur des données climatiques et de rendements pour se rapprocher au mieux du vécu. Le tableau 1

présente les variables sélectionnées pour les trois ACP réalisées sur les six zones de l'étude. Le choix de ne pas utiliser de données de croissances observées en été pour caractériser les étés secs a été motivé par le manque de données sur cette période. La réserve utile fixée à 80mm constitue un choix arbitraire du fait de l'absence de données sur les sols dont les rendements sont observés dans cette étude. Considérant que la réserve utile moyenne des régions fourragères du Grand Ouest se situe entre 100 et 150mm, il nous a semblé que le seuil de 80mm marquait suffisamment le point de flétrissement pour identifier des problèmes de sécheresses agronomiques lors d'une année.

Résultats

Courbes de croissance médiane

Les courbes de croissances médianes sur la période 2003-2022 sont présentées en figure 4. Dans le Grand Ouest, les profils de pousse de l'herbe au cours de l'année diffèrent grandement entre zones. On peut distinguer les zones plus humides (GO1, GO2 et GO3) qui maintiennent leurs niveaux de croissance au-dessus de 15kgMS/ha/j durant l'été. En comparaison, les zones plus séchantes (GO4, GO5 et GO6) présentent un ralentissement marqué voire un arrêt de la croissance d'herbe en zone GO5. Les courbes moyennes non représentées ici diffèrent légèrement des courbes médianes car influencées par des valeurs extrêmes. Ainsi, on observe une différence de 500 kg de MS entre les rendements annuels d'une courbe moyenne et d'une courbe médiane.

TABLEAU 1: Variables sélectionnées pour l'analyse statistique des deux ACP
TABLE 1: Selected variables for the statistical analysis of the two sets of PCA

Eté Sec	Printemps peu poussant et été sec
Rendement de maïs ensilage moyen de la zone	Rendement de maïs ensilage moyen de la zone
Nombre de jours où une réserve utile de 80mm est vide du 1er juin au 31 août ¹	Croissance moyenne hebdomadaire de la pousse de l'herbe entre la semaine 5 (1 février) et la semaine 24 (10 juin)

1 Bilan hydrique en « double réservoir » : une réserve facilement utilisable de 30mm et une réserve profonde de 50mm (Météo France, 2006)

Années identifiées

Les années identifiées à travers des analyses statiques conduites zone par zone sont présentées dans le tableau 2. Au-delà des années-aléas obtenues, il est intéressant de se pencher sur les graphiques des analyses portant sur les 20 années. L'ensemble des graphiques des ACP et CAH obtenus sont disponibles en annexe. L'exemple de la zone GO1 (zone bretonne intermédiaire) est repris ci-dessous en figure 5. Le graphique des individus, à gauche, propose la meilleure visualisation possible des différentes années en positionnant celles-ci selon deux axes qui maximisent la variabilité présente dans les données. Ces deux axes sont influencés par les 3 variables actives dans cette ACP, représentées sur le cercle des corrélations à droite. Les clusters

regroupés par l'analyse en CAH rassemblent les années proches sur le graphique des individus. Ainsi, pour cette zone les années 2003 et 2022 affichent des caractéristiques communes : des rendements faibles en maïs, un Pour l'année-aléa «printemps peu poussant été sec», l'exemple de la zone GO1 est présenté en figure 6. Les quatre variables actives dans cette ACP sont diagonalement opposées deux par deux. Aucune corrélation n'existe entre deux variables dès lors que leurs flèches forment un angle de 90 degrés. Ainsi, une année connaissant un mauvais printemps, d'un point de vue des sécheresses et rendements, ne signifie pas que l'été sera également mauvais. Les flèches opposées indiquent des variables négativement corrélées. Sans surprise, un rendement maïs mauvais est négativement corrélé au nombre de jours où une réserve utile de 80mm est vide.

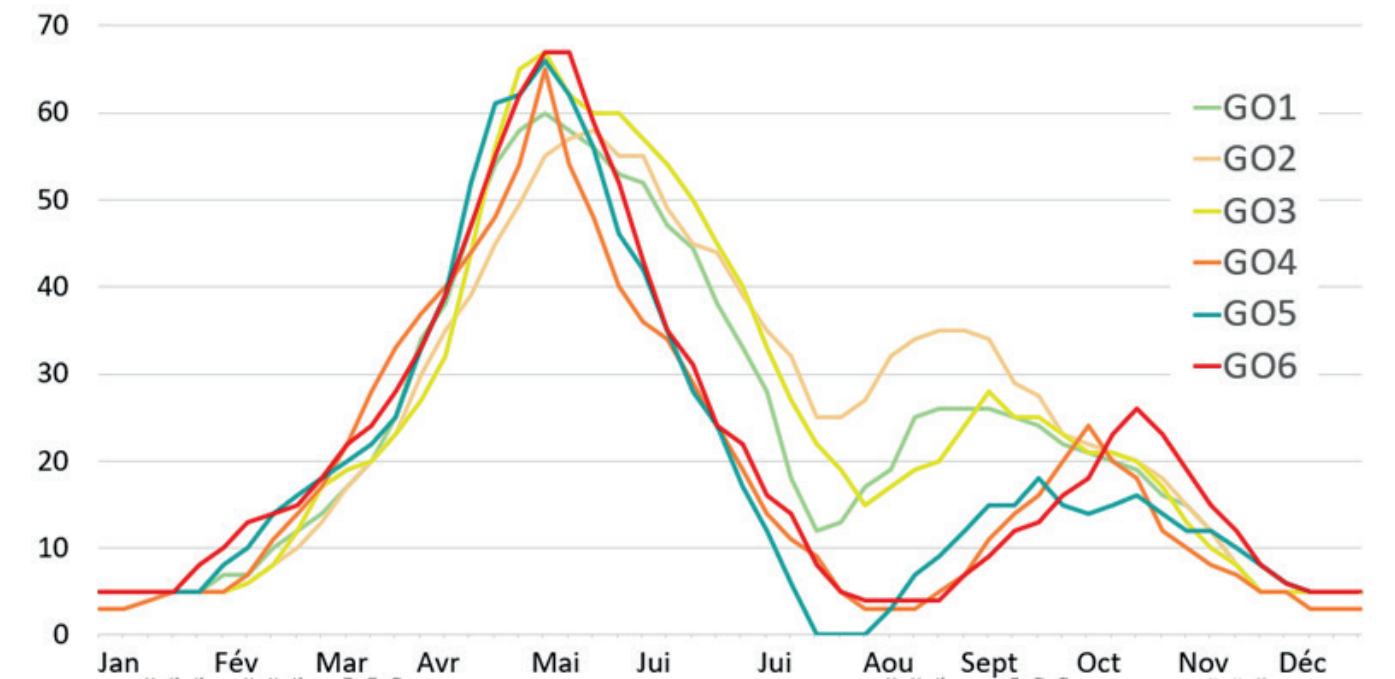


FIGURE 4 : Courbes de croissances médianes (2003-2022) pour les six zones en kg de MS/ha/jour
Figure 3: Median grass growth curves (2003-2022) for the six areas in kg of DM/ha/day

TABLEAU 2 : Résultats des années-aléas identifiées
TABLE 2: Results of the identified years

	Été sec	Printemps été peu repoussant - été sec
GO1	2003-2022	2003-2010-2011-2013-2016-2022
GO2	2003-2022	2003-2010-2011-2022
GO3	2003-2005-2006-2010-2018-2020-2022	2010-2011-2020-2022
GO4	2003-2005-2006-2010-2019-2022	2010-2011-2020-2022
GO5	2016-2020-2022	2003-2010-2011-2016-2017-2019-2020-2022
GO6	2003-2005-2006-2010-2022	2003-2010-2011-2022

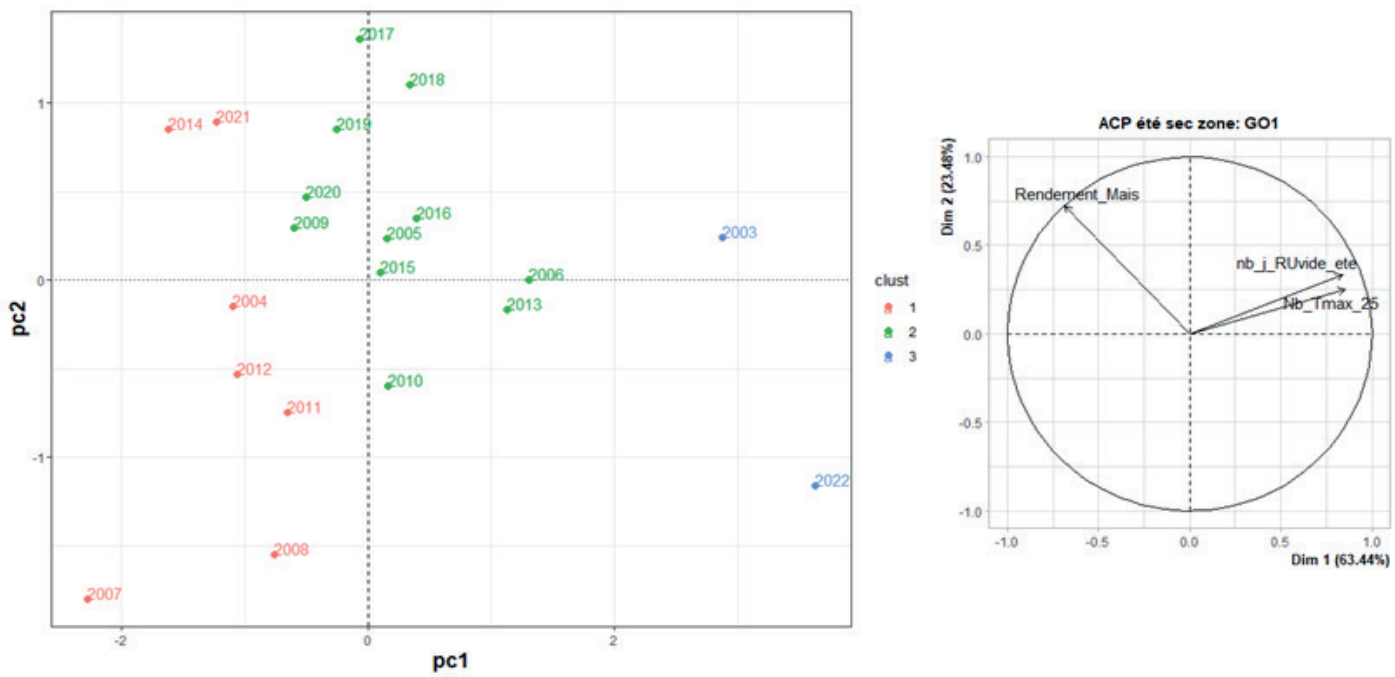


FIGURE 5 : Résultats ACP « été sec » pour la zone GO1
FIGURE 5: PCA results for « dry summer » for the GO1 area

Impacts des aléas climatiques sur la production des prairies temporaires

Les courbes de croissances médianes des années identifiées comme « années-aléas » sont comparées dans la figure 7 pour chaque zone à la courbe de croissance médiane des 20 années présentes dans l'échantillon. Classiquement, les années-aléas présentent des profils de pousse de l'herbe dégradés sur les saisons concernées. Dans les zones les humides, GO1, GO2 et GO3, les années-aléas ressortant comme « printemps peu poussant - été sec » semblent correspondre à des printemps ralentis par un déficit de pousse sur la première partie du printemps.

Le tableau 3 rend compte des rendements bruts d'herbe pâturée sur la période de 2003 à 2022 et des pourcentages de baisse dans chaque zone. Les zones les plus humides, GO2 et GO3, moins exposées aux sécheresses, affichent des pertes de rendements les plus élevées sur les deux aléas du fait de niveaux de croissance en été normalement bien au-dessus de la croissance nulle. Les zones relativement plus sèches, telles que GO4, GO5 et GO6, subissent des sécheresses de manière structurelle, leurs rendements sont donc moins diminués proportionnellement. En moyenne, sur les six zones, sans pondération de surface en herbe, un été sec réduit de 19% les rendements annuels des prairies pâturées et le cumul d'un printemps peu poussant et d'un été sec réduit de 26% les rendements annuels des prairies pâturées. On peut noter par ailleurs que l'implantation de dérobées en

interculture et l'augmentation des surfaces en prairies limitent les périodes de sol nu, ce qui limite le risque d'érosion et augmente l'albedo des surfaces qui n'est pas mesuré ici mais contribue ainsi à l'atténuation du changement climatique (Mischler *et al.*, 2024).

Impacts des aléas climatiques sur la production de maïs ensilage

L'agrégation des rendements de maïs ensilage des années identifiées comme correspondantes aux années-aléas permet le chiffrage des pertes moyennes (Tableau 4).

Le jeu de données permet d'explorer les liens entre climat et rendements du maïs fourrage sur la saison estivale afin de dégager les différences entre zones. Les rendements sont donc croisés avec les précipitations (Figure 8) et la température journalière moyenne (Figure 9) sur la période de l'été météorologique (i.e. :1er juin et 31 août).

Discussions

Analyse des résultats

Les années à aléas climatiques impactant la production fourragère, obtenues par analyse statistique, (tableau 2) témoignent de deux choses. Premièrement et sans surprise, la météo d'une année n'est pas généralisable pour l'ensemble du Grand Ouest. Chaque zone est exposée différemment aux conditions climatiques

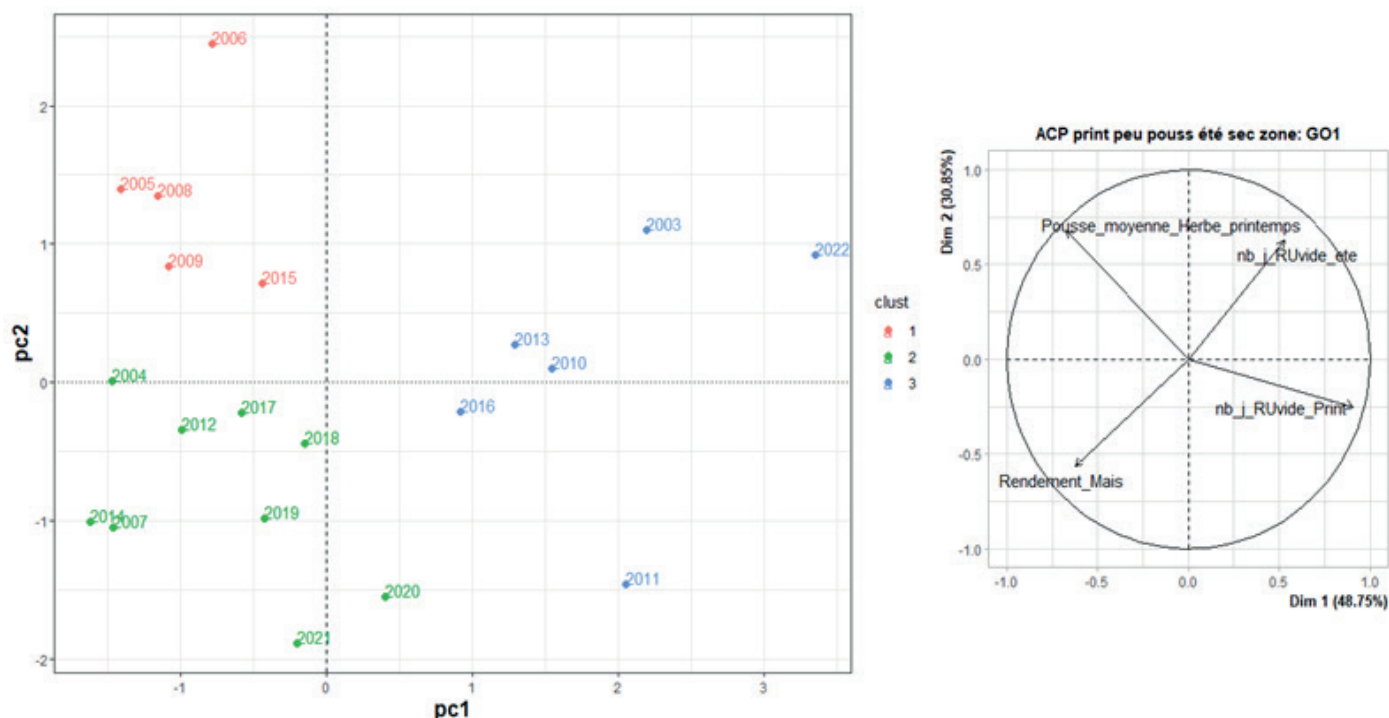


FIGURE 6 : Résultats ACP « printemps peu poussant - été sec » pour la zone GO1
FIGURE 6 : PCA results for « low-growth spring and dry summer » for the GO1 area

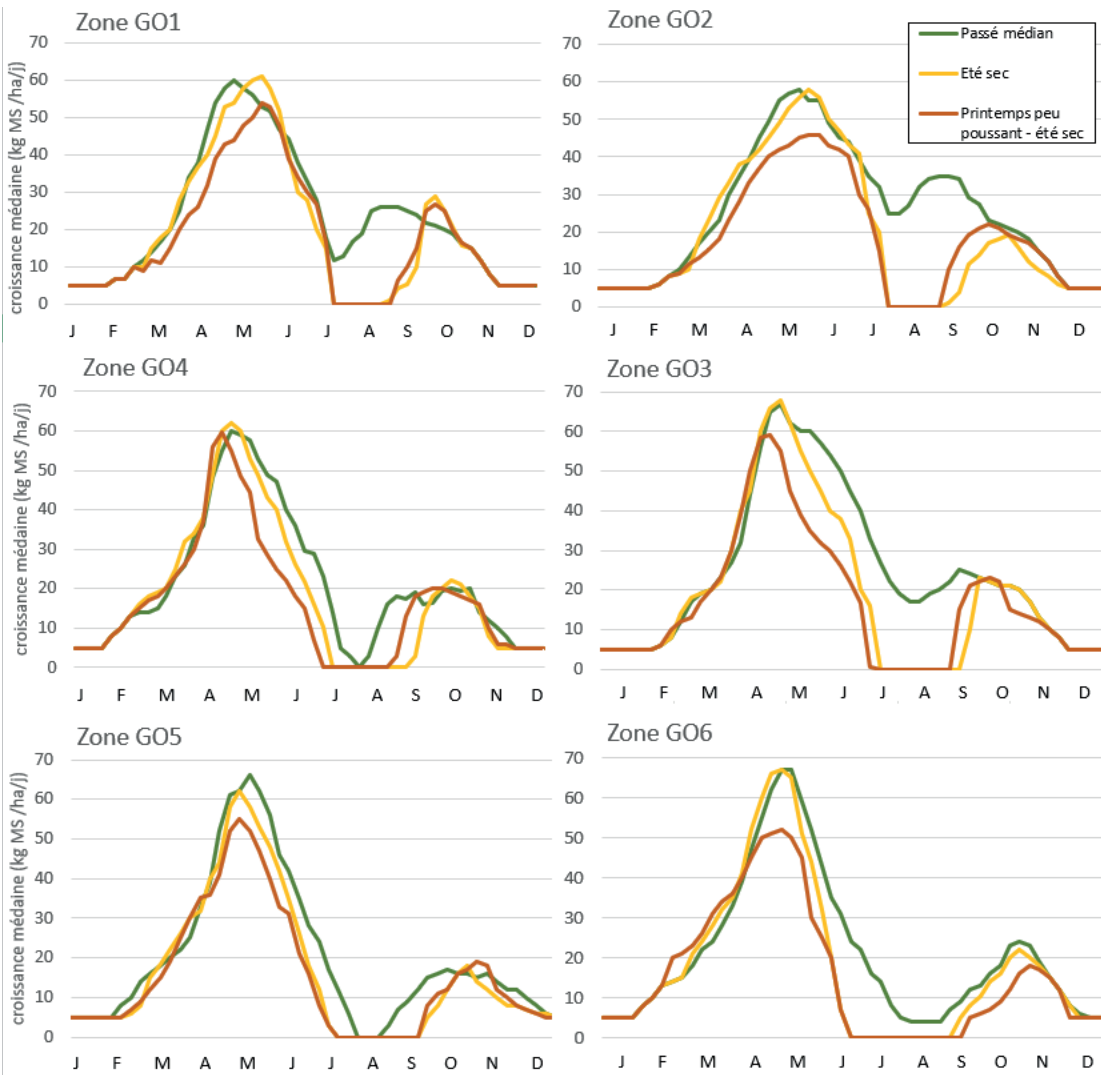


FIGURE 7: Courbes de croissances médiane du passé (2003-2022), des années-aléas «été sec» et des années-aléas «printemps peu poussant été sec» en kg de MS/ha/jour
FIGURE 7: Median grass growth curves for the past (2003-2022), for «dry summer» years and «low-growth spring and dry summer» years in kg of DM/ha/day

TABLEAU 3 : Résultats évolution des rendements annuels bruts d'herbe pâturée (tMS/ha) sur le passé médian et selon les deux années-aléas
TABLE 3: Results in annual gross grazed grass yields (tDM/ha) over the median past and for « dry summer » years and « low-growth spring and dry summer » years

	Rendements annuels médians (2003-2022)	Été sec (Δ)	Printemps peu poussant - été sec (Δ)
GO1	8,6	7,2 (-17%)	6,5 (-24%)
GO2	9,2	6,9 (-25%)	6,4 (-31%)
GO3	9,0	7,0 (-22%)	6,1 (-32%)
GO4	7,7	6,6 (-14%)	6,0 (-22%)
GO5	7,1	5,8 (-18%)	5,5 (-23%)
GO6	7,6	6,4 (-16%)	5,6 (-26%)

d'une année. Deuxièmement, si les années-aléas «été sec» sont clairement identifiées et facilement interprétables (e.g. 2003 et 2022), les années-aléas «printemps peu poussant – été sec» le sont moins. Les rendements moyens de maïs fourrage dans ces zones sur ces années sont étonnamment supérieurs aux rendements des «années-été sec». Ces années paraissent être plutôt des clusters d'années qui représentent collectivement l'année-aléa théorique «printemps peu poussant – été sec» à la fois composé d'années aux étés secs et d'années aux printemps peu poussants. En clair, le Grand Ouest n'a pas encore connu d'année catastrophe notable cumulant un mauvais printemps et un mauvais été même si les années 2010, 2011, 2016, 2020 et 2022 semblent se rapprocher de cette année-aléa et permettent parmi d'autres de construire les références recherchées pour les zones. Ainsi les pertes de rendements maïs des années «printemps peu poussant et été sec» (tableau 4) sont à interpréter avec précaution car elles ne sont pas construites uniquement d'années où l'été fut sec au point d'avoir impacté les rendements maïs mais également «printemps peu-poussant» succédé de conditions estivales dans la normale. Une piste de travail pour expliquer davantage les rendements de maïs ensilage serait d'inclure un indicateur sur les conditions autour du semis et de la levée. Plus de complexité sur les niveaux de réserves utiles en lien avec les sols de chaque zone et des parcelles dont sont issus les rendements aurait permis d'affiner les résultats sur les années-aléas identifiées.

Du point de vue des pertes de production en herbe impliquées (tableau 3), il semblerait que les pourcentages de baisse soient cohérents en tendance avec les bilans fourragers déficitaires mesurés ces années-là. L'année aléa «printemps peu poussant été sec» affiche des pertes de rendements très fortes. Ces années affectent tous types de systèmes fourragers mais plus particulièrement les systèmes herbagers reposant sur le pâturage et jouissant de moins de flexibilité que ceux en polyculture-élevage (Lemaire et Pfimlin, 2007). Les résultats de notre analyse sont complémentaires aux analyses pluriannuelles récentes menées dans le Grand Ouest (Lemoine *et al.*, 2021 et Vertès *et al.*, 2022) qui établissent des références sur l'évolution de la flore des prairies temporaires sur 5 ans et l'impact d'un été sec sur celle-ci. Si les croissances d'automne ont pu être reconstituées à partir des données collectées et de l'expertise des conseillers fourragers, cette saison n'a pas fait l'objet d'analyse spécifique dans notre étude. Or, la capacité de rebond des prairies après un été sec n'est plus à démontrer malgré des différences entre espèces et variétés (Durand et Bloor, 2022). Par ailleurs, il convient de préciser que les rendements annuels des prairies correspondent à la totalité de la biomasse produite sur l'année. Cette production brute n'est pas en totalité récoltable du fait des pertes au champ et pâturable qu'au mieux à hauteur de 80-85% de la quantité disponible (Moreau *et al.*, 2014).

Sur le maïs ensilage, les pertes de rendements sont cohérentes par rapport aux déficits fourragers calculés suite aux étés secs par des conseillers fourragers de la zone. Les niveaux de pertes sont très forts pour ces années-là au regard des coefficients de variation. A

titre d'exemple, si la moyenne du rendement maïs ensilage en zone GO1 dans notre jeu de données de 20 ans se situe à 13,1tMS/ha avec un écart-type fluctuant entre -9% et +9% de cette valeur, une année été sec implique un écart à la moyenne de -19%. Ainsi, l'originalité de cette étude est de mettre en avant le lot d'années extrêmes qui déstabilisent un système au-delà de la variabilité connue du maïs. Ce type de pertes peut provoquer de grandes difficultés économiques. Un simple calcul permet de préconiser la constitution de stocks couvrant : les besoins du troupeau en maïs + 11% à 22% selon les zones pour couvrir la perte possible en années-aléas «été sec» + 8% de pertes entre le silo et l'animal (Moreau *et al.*, 2014). Ainsi, un atelier bovin situé en zone GO5 doit planifier son assolement en maïs ou ajuster ses rations de façon à couvrir 130% des besoins en maïs de son troupeau (ou à l'inverse ajuster ses effectifs en fonction de la sole en maïs) afin de faire face à un aléa de type été-sec.

Classiquement, le maïs étant une céréale de printemps, ses rendements dépendent fortement des conditions climatiques de l'été bien que les conditions et les dates de semis au printemps soient aussi clés. Comme indiqué en figure 8, ils sont fortement et positivement corrélés aux précipitations dans les zones relativement sèches (GO4, GO5 et GO6). En outre, les coefficients de détermination sont élevés pour ces 3 zones, avec jusqu'à 79% de la variabilité des rendements qui sont prédictibles par cette simple variable pour la zone GO4. A l'inverse, dans les zones plus humides (GO1, GO2 et GO3) les cumuls estivaux assurent la majeure partie du temps les besoins de la plante. Ces zones sont donc moins influencées par la variabilité des précipitations même si le coefficient de corrélation est significativement supérieur à zéro pour GO1 et GO3, c'est-à-dire qu'une tendance est notable. Cependant, si les précipitations ne sont pas déterminantes, les températures le sont. Les températures journalières moyennes sur l'été dans les deux zones bretonnes sont fortement corrélées aux niveaux de rendements de ces zones, de manière non-linéaire : les rendements profitent d'étés plus chauds jusqu'à une certaine température moyenne (17,5°C) au-delà de laquelle ils peuvent être impactés. Les quatre autres zones affichent des corrélations significativement négatives avec cette variable. Toutefois, il convient de noter qu'un lien indirect est vraisemblablement à l'œuvre derrière cette corrélation puisque des étés chauds entraînent de forts niveaux d'évapotranspiration donc du stress hydrique pour la plante.

En somme, bien que le maïs possède un système biochimique très efficace fonctionnant jusqu'à 35°C (Carpentier et Cabon, 2011), ses rendements dépendent grandement des conditions estivales pour lesquelles les projections climatiques sont défavorables et ce de manière robuste pour l'Ouest de la France (Gutiérrez *et al.*, 2021). Contrairement aux prairies qui peuvent se rattraper sur l'automne à la suite d'un été sec, le maïs subit les conditions climatiques sur une période de végétation bien plus courte et la seule intervention en cours de campagne reste l'irrigation d'appoint (Lorgeou *et al.*, 2007).

Ces dernières années, les aléas climatiques n'ont pas remis en

TABLEAU 4 : Résultats évolution des rendements maïs fourrage selon les deux années-aléas
TABLE 4: Results in silage maize yields for past and selected years

	Nb moyen d'exploitations par an	Rendement moyen passé	Coefficient de variation (e.t./ moy.)	Été sec (Δ)	Printemps peu poussant - été sec (Δ)
GO1	26	13,1	9%	10,6 (-19%)	11,9 (-9%)
GO2	7	13,6	12%	11,0 (-19%)	11,9 (-12%)
GO3	7	13,2	10%	11,8 (-11%)	12,9 (-3%)
GO4	51	12,1	12%	10,5 (-14%)	11,2 (-8%)
GO5	16	11,0	14%	8,6 (-22%)	10,0 (-9%)
GO6	10	11,1	14%	9,1 (-18%)	9,8 (-12%)

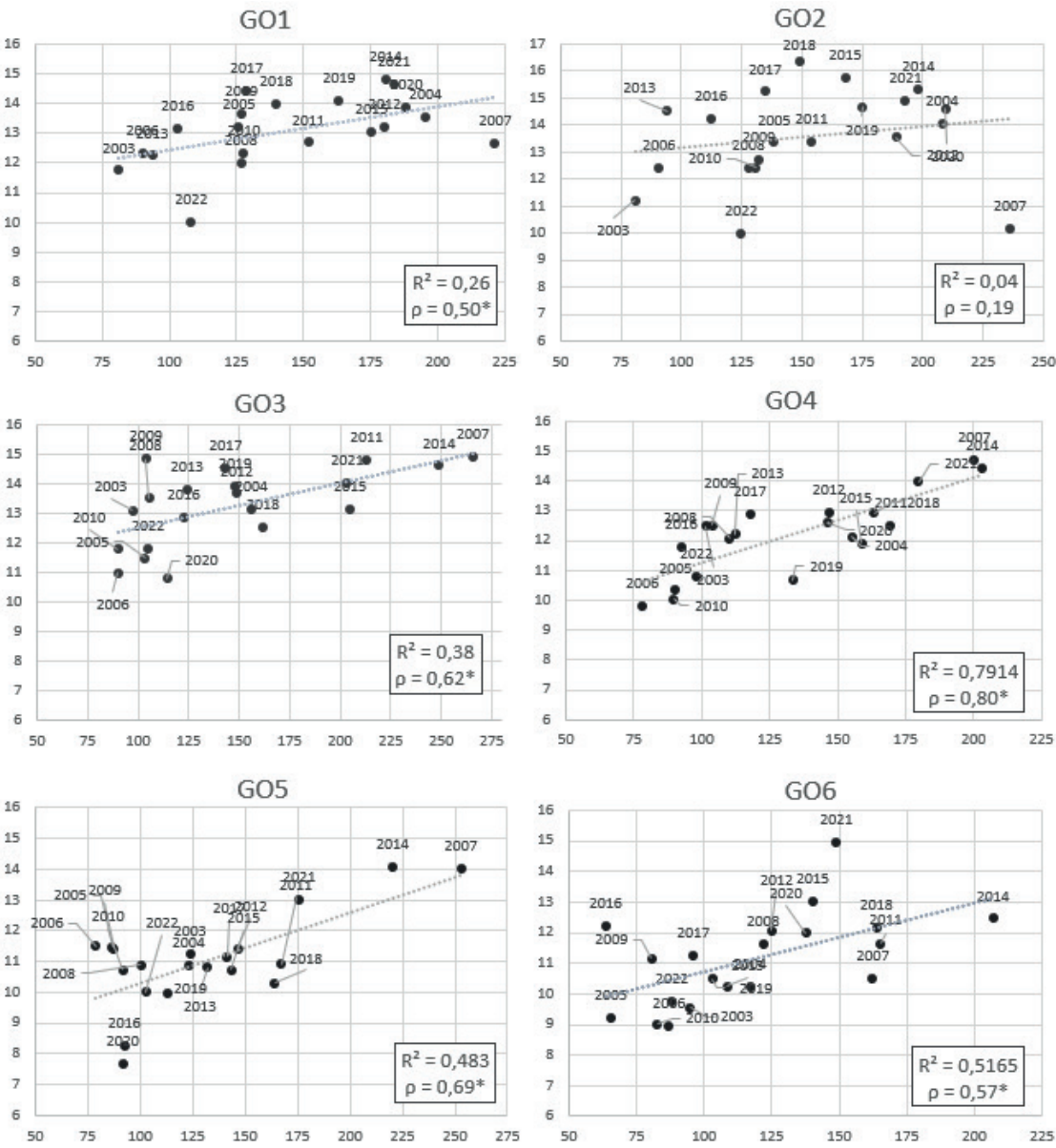


FIGURE 8 : Lien entre précipitations cumulées du 1er juin au 31 août (x) et rendements maïs fourrage (y) avec R^2 = coefficient de détermination de la courbe de tendance et p = coefficient de corrélation (* si valeur- p < 0.05)
FIGURE 8: Link between rainfall between the 1st of june and 31st of august (x) and silage maize yields (y) with R^2 = coefficient of determination of the regression line and p = coefficient of correlation (* for p-value < 0.05)

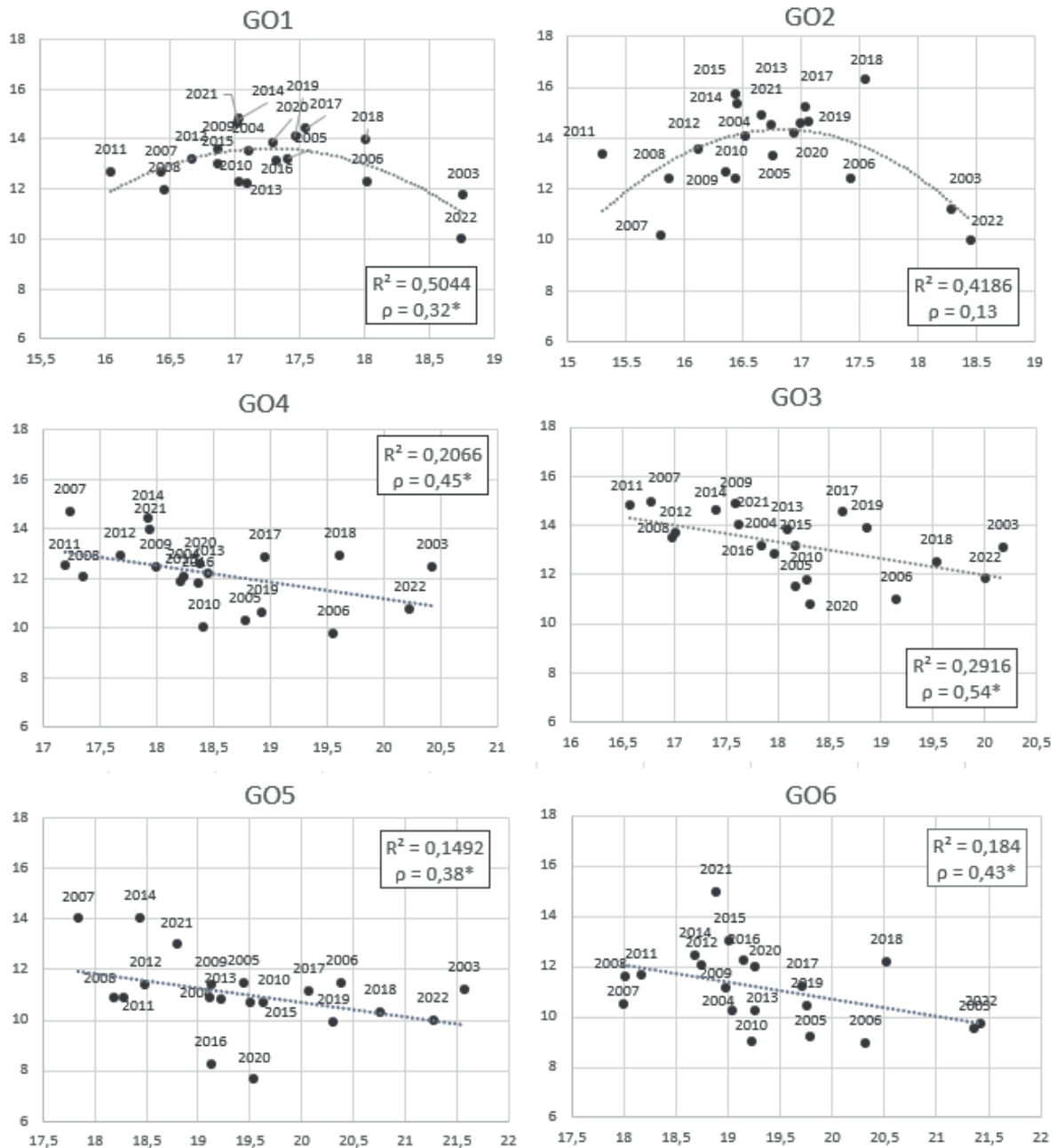


FIGURE 9 : Lien entre température journalière moyenne entre le 1er juin et le 31 août (x) et rendements maïs fourrage (y) avec R^2 = coefficient de détermination de la courbe de tendance et ρ = coefficient de corrélation (* si valeur- $p < 0.05$)

FIGURE 9: Link between daily mean temperature between the 1st of June and 31st of August (x) and silage maize yields (y) with R^2 = coefficient of determination of the regression line and ρ = coefficient of correlation (* for p -value < 0.05)

cause la bonne complémentarité maïs-herbe dans les systèmes fourragers du Grand Ouest mais des ajustements techniques ont été nécessaires : autour du chargement, des stocks de sécurité, des dates de semis, de l'intérêt (ou pas si compétition accrue pour l'eau) des dérobés avant maïs, des types d'espèce prairiales semées, voire du recours à l'irrigation ou à l'achat de maïs irrigué dans les zones GO5 et GO6. Puisque les conditions météorologiques du printemps ne sont actuellement nullement corrélées à celles de l'été comme redémontré dans cette étude, miser sur les deux saisons pour réaliser des stocks demeure une option viable. Les éleveurs d'herbivores sont par essence habitués à composer avec

la variabilité météorologique, annuelle et interannuelle. Cependant, l'augmentation de la fréquence des étés secs et les éventuels «printemps peu poussant été sec» dont les impacts sont lourds invitent à poursuivre la diversification des fourrages cultivés. Les mélanges céréales protéagineux immatures permettent d'assurer des rendements corrects au printemps (Le Tallec, 2018) à combiner avec une interculture estivale ou une implantation de prairie (Daveau *et al.*, 2020). La betterave fourragère représente une sécurité face aux sécheresses estivales étant capable d'attendre les précipitations d'automne pour constituer de bons rendements valorisables en stock ou au pâturage (Straëbler et Le

Gall, 1998 ; Carré, 2018) et dont on rappelle par ailleurs l'intérêt environnemental en succession prairie-betterave (Morvan *et al.*, 2000). Ces deux fourrages sont des exemples des nombreuses voies de diversification fourragère documentées dans les revues spéciales de *Fourrages* de 2007, 2018 et 2020.

Limites de l'étude

Un obstacle méthodologique important est le manque de données exhaustives et fiables en production de fourrages. Cet obstacle limite la validation des résultats par comparaison avec d'autres sources. Les fourrages produits dans le Grand Ouest sont pour la quasi-totalité consommés sur les exploitations dans lesquelles ils sont cultivés. Ils échappent ainsi à un suivi précis de la statistique agricole bien que des rendements annuels existent à l'échelle départementale basés sur l'estimation concernant le maïs fourrage et basés sur la simulation concernant les prairies. L'historique des cartes ISOP propose à l'échelle de la région fourragère de Hentgen (1982) des niveaux de production relatifs à la moyenne de la période 1989-2018 mais avec des versions de STICS différentes. Les données de ces cartes ne sont pas accessibles en ligne ce qui nous prive d'une comparaison statistique en recomposant les zones proposées dans l'étude. Les observatoires de pousse de l'herbe des Chambres d'Agriculture et les données collectées en ferme dans le cadre du dispositif INOSYS-Réseaux d'élevage constituent une première base solide sur laquelle repose notre analyse. En outre, cette analyse souligne l'importance d'harmoniser les méthodologies entre régions et années (densité, herbomètres) ainsi que de monter en précision sur la typologie des prairies suivies et de leurs fertilisations au-delà des fermes expérimentales dans le but mieux valoriser les connaissances sur ce sujet majeur.

Les références issues de cette étude n'ont pas la capacité de prédire l'évolution de la production de fourrages d'ici la fin du siècle dans un contexte de changement climatique. En effet, plusieurs éléments sont à considérer. Concernant les prairies, la hausse des niveaux de croissance des prairies en hiver, fin automne et début de printemps est un résultat mis en avant par la littérature sur le Grand Ouest (Moreau et Madrid, 2018a, 2018b ; Moreau *et al.*, 2020a, 2020c). Aussi, l'augmentation des concentrations en CO₂ est positivement corrélée à l'augmentation des rendements dans la mesure où cela favorise la photosynthèse et réduit la transpiration des plantes (Durand *et al.*, 2013). Ce mécanisme à l'œuvre est déterminant pour décrire l'évolution des rendements au cours du 21^e siècle (Rugé *et al.*, 2013). Concernant le maïs fourrage, outre les progrès variétaux importants sur cette espèce pouvant influencer positivement les rendements (Lorgeou *et al.*, 2007), un climat plus chaud risque d'augmenter la pression des ravageurs ou de pathogènes influençant les rendements à la baisse (Shazhad *et al.*, 2020).

D'autres aléas climatiques affectant les fourrages n'ont pas été étudiés par manque de données. Peuvent être cités, les printemps humides qui réduisent l'accès au pâturage et les fenêtres pour

des récoltes précoces (e.g. 2018, 2024), retardent les récoltes de dérobées et peuvent doublement pénaliser le rendement du maïs fourrage suivant en cas d'été sec. Les fins d'automne humides retardent ou rendent impossibles les semis des cultures d'hiver (e.g. 2019, 2023). Les automnes secs et chauds privent les systèmes de pâturage de regains et rendent aléatoires les semis de prairies (e.g. 2017). Par ailleurs, la qualité des fourrages est un élément majeur pour des animaux à fort besoin (vaches laitières en lactation ou animaux à l'engraissement), qui peut être négativement impactée pour le maïs lors d'un stress hydrique ou thermique durant le stade de fécondation ou de remplissage du grain (Carpentier et Cabon, 2011). De même pour les pâturages ou fauches de prairies lorsque des précipitations trop abondantes et régulières durant le printemps conduisent à dépasser le stade début d'épiaison et à récolter à des taux d'humidité trop hauts entraînant une mauvaise conservation en voie sèche ou humide (Baumont *et al.*, 2009).

Conclusion

Cette étude propose une méthodologie originale, ne reposant pas sur des seuils fixes dans le temps et par zone afin d'identifier dans le passé les années-aléas qui ont impacté la production de fourrages pour deux régions : la Bretagne et les Pays de la Loire. Les analyses statistiques permettent une lecture nouvelle et objective sur les années fourragères vécues ces 20 dernières années dans le Grand Ouest. Dans le but d'aller plus loin sur les projections climatiques proposés par les modèles pour le Grand Ouest, les résultats des ACP permettraient de récupérer des seuils par zone, cette fois-ci rigides, dans le but de calculer la fréquence de ce type d'années-aléas dans le futur.

L'agrégation des rendements des années identifiées constituent de nouvelles références pour le conseil en élevage, en collectif ou en individuel. L'exploration des aléas climatiques dans un passé proche est une manière de prendre du recul sur le potentiel et la vulnérabilité de chaque zone du Grand Ouest face aux aléas climatiques ainsi que de donner des pistes de pertes en production dues à des aléas climatiques de plus en plus fréquents. Cette anticipation peut se traduire en calcul de stocks de sécurité nécessaires pour encaisser une année ou le cumul de deux années difficiles. Pour ouvrir de nouvelles perspectives de travail, bien que le passé ne prédise pas l'avenir, la série de données pourrait aussi proposer, au-delà de l'approche annuelle à -11 ou -22%, le stock minimal et suffisant qui a permis de traverser l'ensemble de la période sans décapitaliser et qui de fait tiendrait compte de l'enchaînement des années caractérisées.

Cette analyse invite également à progresser dans la collecte des données. Si l'analyse des rendements d'herbe fauchée en première et deuxième coupe au printemps élargit les connaissances sur les potentiels et la variabilité des rendements de printemps (Devun *et al.*, 2013), l'accent doit être porté sur les prairies pâturées tel que réalisé dans les observatoires de pousse de l'herbe en France. Cette méthode s'émancipe du compromis recherché en fauche

entre qualité et quantité sous la contrainte des fenêtres météo rendant l'analyse pluriannuelle complexe. Une piste d'amélioration est donc un suivi plus régulier des croissances en été, à l'automne et en hiver pour mieux prendre en compte les évolutions du climat sur la production des prairies.

Remerciements

Les auteurs de cette étude remercient les financeurs des projets Climatveg et Fermadapt, l'ADEME, la région Bretagne et région Pays de la Loire, les pôles Végépolys Valley et Valorial ainsi que les conseillers et éleveurs qui contribuent et ont contribué aux dispositifs INOSYS Réseaux d'élevage et aux Observatoires de la pousse de l'herbe des deux régions.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agreste (2022a) Fiche territoriale synthétique RA 2020 « Pays de la Loire ». Ministère de l'Agriculture et de l'alimentation. Accessible en ligne : https://draaf.pays-de-la-loire.agriculture.gouv.fr/IMG/html/fts_ra2020_pays_de_la_loire_cle0eae1f-1.html#annexe-sources [dernier accès le 20/10/2023]
- Agreste (2022b) Fiche territoriale synthétique RA 2020 « Bretagne ». Ministère de l'Agriculture et de l'alimentation. Accessible en ligne : <https://draaf.bretagne.agriculture.gouv.fr/les-fiches-territoriales-special-recensement-agricole-2020-france-la-bretagne-a2612.html> [dernier accès le 20/10/2023]
- Amiot, L., Bonnardot, V., Dubreuil, V. (2022). Le changement climatique en Bretagne et Pays de la Loire, programme CLIMATVEG, 10p
- Amiot, L., Dubreuil, V., Colnard, E., Ligneau, L., Bonnardot, V. (2023). Méthode de zonage agroclimatique en Bretagne et Pays de la Loire. 36e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie., Jul 2023, Bucarest (Roumanie), Roumanie. pp.21-24.
- Baumont, R., Aufrère, J., & Meschy, F. (2009). La valeur alimentaire des fourrages : Rôle des pratiques de culture, de récolte et de conservation. *Fourrages* (198), 153-173.
- Bonnardot V., Robine-Körmendi E., Tissot C., Quénot H., 2023 : Evaluation de la sensibilité des modèles climatiques de DRIAS sur les régions Bretagne et Pays de Loire (France). In Actes du 36ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Bucarest, Juillet 2023. pp33-36.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.-H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.-M., Meynard, J.-M., Delécolle, R. (1998). STICS: A generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18(5-6), 311-346.
- Charroin T., Palazon R., Madeline Y., Guillaumin A., Tchakerian E., (2005). «Le système d'information des Réseaux d'Elevage français sur l'approche globale de l'exploitation. Intérêt et enjeux dans une perspective de prise en compte de la durabilité ». *Rencontres Recherches Ruminants* 12, 335-338.
- Carpentier, B., & Cabon, G. (2011). Le maïs fourrage: élaboration du rendement et de la qualité, récolte et conservation : Récolte et valorisation des fourrages conservés: Les clés de la réussite. 1ère partie. *Fourrages* (205), 11-23.
- Carré A., 2018. La betterave fourragère : modalités de sa valorisation au pâturage. *Fourrages* n°234. 81-85.
- Cruz P., Theau J.P., Lecloux E., Jouany C., Duru M. (2010) : "Typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes : une classification multitraits", *Fourrages*, 401, 11-17.
- CRA PDL (2012). Référentiel de production des prairies en Pays de la Loire. Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de la Loire. 8 pages
- Eldin M. (1989). Du risque de sécheresse au risque de mauvaise récolte : un effort de clarification des concepts.... Le risque en agriculture. Marseille : IRD Editions, p.19-23 ISBN : 9782709925020
- Daveau B., Fortin J., Guibert S., Duchêne D., (2020). Planter des prairies sous couvert : des itinéraires techniques innovants pour s'adapter aux aléas météorologiques. *Fourrages* 244, 77-86
- Delaby, L., & Peyraud, J. (2009). Valoriser les fourrages de l'exploitation pour produire du lait. *Fourrages*, 198(198), 191-210.
- Devun J., Moreau J.-C., Lherm M., Mosnier C. (2013) : "Variabilité interannuelle des productions fourragères de 2000 à 2011. Analyse par région à partir d'observations en fermes", *Fourrages*, 215, 221-230.
- Durand, J., Lorgeou, J., Picon-Cochard, C., & Volaire, F. (2013). Ecophysiologie de la réponse et de l'adaptation des plantes fourragères et prairiales au changement climatique. *Fourrages*, (214), 111-118
- Durand J.L., Bloor J.M.G., (2022). « Influence des aléas ponctuels sur la pérennité et la productivité des prairies », *Fourrages* 250, 79-88
- Faidherbe L., Hasnaoui N., Deborde I., Morineau J., Lusson J.M. (2007) : "Pistes d'adaptations à la sécheresse des systèmes d'élevage bovin économes basés sur le pâturage", *Fourrages*, 191, 297-310.
- Gutiérrez, J.M., et al. (2021). Atlas. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. Disponible en ligne : <http://interactive-atlas.ipcc.ch/> [dernier accès le 21/11/2023]
- Graux, A., Moreau, J., Raynal, H., Ruget, F., Carrère, P., Faverdin, P., & Hill, D. (2013). Adaptation des systèmes d'élevage bovins au changement climatique: Intérêts, limites et perspectives des approches de modélisation. *Fourrages*, (215), 231-240.
- Graux, A.-I., Resmond, R., Casellas, E., Delaby, L., Faverdin, P., Le Bas, C., Ripoche, D., Ruget, F., Théron, O., Vertès, F., Peyraud J.-L., (2020). High-resolution assessment of French grassland dry matter and nitrogen yields, *European Journal of Agronomy*, 112
- Husson, F. (2009). Analyse de données avec R. Presses universitaires de Rennes.
- INOSYS (2020). Les exploitations laitières de l'ouest face aux aléas climatiques. Institut de l'Elevage. Collection Théma. 4 pages.
- IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.
- Lê S, Josse J, Husson F (2008). "FactoMineR: A Package for Multivariate Analysis." *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1-18.
- Le Tallec G. (2018) : «Mélanges Céréales - Protéagineux Immatures : quelles espèces choisir, pour quelle place dans la rotation ?», *Fourrages*, 233, 7-14.
- Lemaire G., Pfimlin A. (2007). Les sécheresses passées et à venir : quels impacts et quelles adaptations pour les systèmes fourragers ? *Fourrages*, 190, 163-180.
- Lemoine C., Surault F., Poilane A., Cliquet J., Gastal F., (2021). « Dynamique floristique, production et valeur alimentaire de prairies du nord Deux-Sèvres gérées en pâturage tournant dynamique », *Fourrages*, 246, 51-66
- Lorgeou, J., Battégay, S., & Pelletier, P. (2007). Adaptations à la sécheresse par

- les choix techniques de conduite des cultures pour les prairies et le maïs. *Fourrages*, (190), 207-221.
- Météo France (2006). Zonage météorologique pour la gestion de la pousse de l'herbe en Bretagne. Action Pâturage Plus Météo France. 22 pages.
- Météo France (2023). Bilan climatique de l'année 2022. Météo France. Accessible en ligne : https://meteofrance.fr/sites/meteofrance.fr/files/files/editorial/Bilan_climatique_definitif_2022_130123.pdf [Dernier accès le 17/11/2023]
- Moreau, J.-C., et al. (2014). Optimiser le potentiel productif des prairies. Collec-tion Guide méthodologique. Casdar PraiCoS. Institut de l'Elevage. Paris. 103 pages
- Moreau J.-C. et Madrid A., (2018a). Adaptation des élevages laitiers au chan-gement climatique : résultats de l'étude Climalait pour le Sud de l'Ille et Vilaine, Idele, CNIEL, 17 pages <https://idele.fr/climalait/publications>
- Moreau J.-C. et Madrid A., (2018b) : Adaptation des élevages laitiers au chan-gement climatique : résultats de l'étude Climalait pour la zone des Mauges, Idele, CNIEL, 19 pages <https://idele.fr/climalait/publications>
- Moreau J.-C., Madrid A., Lecarme M. (2020a). Adaptation des élevages laitiers au changement climatique : résultats de l'étude Climalait pour le Pays de Morlaix, Idele, CNIEL, 17 pages <https://idele.fr/climalait/publications>
- Moreau J.-C., Madrid A., Brun, T. & Ruget, F. (2020b). Dans les filières bovines, apprivoiser le changement climatique La méthode déployée dans le cadre de Climalait et Climaviande. *Fourrages*, 244, 9-18.
- Moreau, J.-C., Madrid, A., Cornette, B., Dufour, G. (2020c). Climaviande : La zone des Essarts, dans le Nord-Est de la Vendée, avec des Charo-laises, Idele, Interbev, 22 pages. Accessible en ligne : https://idele.fr/acimel/publications/detail-article?tx_atolidelecontenus_publicationde-tail%5Baction%5D=showArticle&tx_atolidelecontenus_publicationde-tail%5Bcontroller%5D=Detail&tx_atolidelecontenus_
- Morvan, T., Alard, V., Ruiz, L. (2000). Intérêt environnemental de la betterave fourragère, *Fourrages*, 163, 315-322
- Paysan Breton (2022). Dérogation possible sur les fourrages en bio. Publié le 20 octobre 2022. <https://www.paysan-breton.fr/2022/10/derogation-possible-sur-les-fourrages-en-bio/>
- Peyraud, J., Le Gall, A., Delaby, L., Faverdin, P., Brunschwig, P., & Caillaud, D. (2009). Quels systèmes fourragers et quels types de vaches laitières de-main ? *Fourrages*, 197, 47-70.
- Ribes, A., Boé, J., Qasmi, S., Dubuisson, B., Douville, H., & Terray, L. (2022). An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint. *Earth System Dynamics*, 13(4), 1397-1415.
- Rouquette, J.L., Pflimlin, A. (1995) : "Les grandes régions d'élevage : proposition de zonage pour la France", symp. int. sur la nutrition des herbivores, INRA, Clermont-Ferrand.
- Ruget, F., Novak, S., & Granger, S. (2006). Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée. *Fourrages*, (186), 241-256.
- Ruget, F., Durand, J., Ripoche, D., Graux, A., Bernard, F., Lacroix, B., & Moreau, J. (2013). Impacts des changements climatiques sur les productions de four-rages (prairies, luzerne, maïs): Variabilité selon les régions et les saisons. *Fourrages*, 214, 99-109.
- SCEES (2000) : Les prairies en 1998, Agreste, Chiffres et données Agriculture, 128, 73 p.
- Soubeyroux J.-M., Bernus L., Corre L., Drouin A., Dubuisson B., Etchevers P., Gouget V., Josse P., Kerdoncuff M., Samacoits R. & Tocquer F. (2020). Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la Mé-tropole. Météo France, 98 pages www.drias-climat.fr
- Shahzad, A., Ullah, S., Dar, A. A., Sardar, M. F., Mehmood, T., Tufail, M. A., Sha-koor, A., & Haris, M. (2021). Nexus on climate change : Agriculture and possible solution to cope future climate change stresses. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(12), 14211-14232.
- Straëbler, M., & Le Gall, A. (1998). Luzerne, sorgho et betterave : Trois cultures fourragères sécurisantes en conditions sèches ou froides. *Fourrages*, 156, 573-587.
- Vertes F., Leon A.S., Aussems E., Van Tilbeurgh V., Thenail C. (2011). Place du changement climatique parmi les facteurs d'adaptation des systèmes four-ragers dans les élevages laitiers du grand ouest de la France. *Renc. Rech. Ruminants*, 18
- Vertès F., Gastal F., Delaby L., Delagarde R., Dieulot R., Falaise D., Woiltock A., Pierre P., (2022). « Trajectoires et déterminants de la pérennité de prairies semées dans le Grand-Ouest de la France ». *Fourrages* 250, 25-38