

CONSÉQUENCES ÉNERGÉTIQUES, ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTALES DE L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DE SYSTÈMES FOURRAGERS BOVINS LAIT DU GRAND OUEST

Résumé

Comment évolue l'empreinte carbone des systèmes laitiers du Grand Ouest quand ils s'adaptent au changement climatique ? Comment évoluent leur consommation d'énergie et leurs charges de mécanisation et d'alimentation ?

Cette étude explore les conséquences de l'adaptation au changement climatique de six systèmes laitiers du Grand Ouest projetés dans un climat de 2041-2060. Par une approche participative impliquant six groupes d'éleveurs laitiers de Bretagne et des Pays de la Loire, six systèmes fourragers adaptés à un nouveau climat ont été coconstruits en utilisant le jeu sérieux Rami Fourrager®. Les impacts du climat futur sur les fourrages ont été simulés à partir de données climatiques issues du portail DRIAS et du simulateur de cultures STICS. Le module informatique du Rami Fourrager® a permis de modéliser deux systèmes, le système initial proposé et le système coconçu adapté à un nouveau climat. Les adaptations indiquent toutes une diminution du chargement apparent et une diversification fourragère pour résister deux années de suite aux rendements médians de 50% des années les plus sèches sur 2041-2060. La diversification entraîne la plupart du temps une hausse de la consommation de carburant évaluée via l'outil Mécaflash®. Les coûts des systèmes d'alimentation adaptés au climat futur sont, par conséquent, souvent supérieurs à ceux des systèmes basés sur le climat de 1981-2000. L'empreinte carbone du lait produit, estimée par l'outil CAP'2ER® Niveau 1, s'améliore en revanche grâce à l'optimisation technique des systèmes et de la conduite du troupeau. Ces résultats démontrent la synergie possible entre les défis de l'adaptation au changement climatique et de son atténuation en élevage laitier mais soulignent le risque de hausse d'achat de carburant et des coûts de production lorsqu'un système diversifie sa production fourragère.

Summary

On the economic, energetic and environmental consequences when adaptating dairy forage systems to climate change in West of France

This article explores the consequences of adaptation to climate change of six dairy cattle systems in West of France. Using participatory approach with six groups of dairy farmers in Brittany and the Pays de la Loire region, adaptation pathways of diverse systems have been co-designed with the serious game Forage Rummy®. Impacts of future climate on forages were simulated using climate data from the DRIAS platform and using STICS model. Choices upon forages, ley compositions and herd management were made to ensure the balance between year-round forage production and animal feeding requirements with the support of a computerized model. This model allowed the comparisons between initial systems and adapted co-designed systems. The six resulting systems all have reduced livestock density and diversified their forage production to overcome two consecutive years with median yields of 50% of the driest years over 2041-2060. Diversification implies most of the time higher fuel consumption which was estimated the Mécaflash® tool. Cost of the feeding systems adapted to climate change are often higher than initial systems based on past climate. Milk carbon footprints, estimated through CAP'2ER Level1, decrease due to technical optimization of feed plan and herd management. Although strategies to adapt dairy farming systems to climate change may lead to higher costs of production with maintained production level, results suggest that there might be a synergy between adaptation and mitigation in the studied context.

Article accepté pour publication le 01 mars 2024. Corrigé le 26/11/2025

Auteurs

B. Godoc¹, E. Castellan¹, M. Lebrun², J.-C. Huchon³, C. Sarazin³, C. Francesetti⁴, O. Linclau⁵, I. Joffet⁶, G. Leborgne⁷, A. Madrid¹

¹Institut de l'Elevage (Idele), 8 route de Monvoisin, 35650 Le Rheu, ²FRCUMA,

³Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de la Loire, ⁴CIVAM AD 53, ⁵GAB44,

⁶CEDAPA, ⁷ADAGE

Auteur correspondant:

GODOC Brendan, brendan.godoc@idele.fr

Mots clés

Vache laitière, aléa climatique, émissions de gaz à effet de serre, analyse du cycle de vie, empreinte carbone, coût du système d'alimentation, carburant.

Key words

Dairy farming, climate hazard, greenhouse gas emissions, life cycle assessment, carbon footprint, feeding system cost, fuel.

Références de l'article

LEBRUN M., SARAZIN C., FRANCESETTI C., LINCLAU O., JOFFET I., LEBORGNE G., MADRID A., (2024). Conséquences énergétiques, économiques et environnementales de l'adaptation au changement climatique de systèmes fourragers bovins lait du Grand Ouest *Fourrages* 258, 5-16.

Introduction

Les régions Bretagne et Pays de la Loire représentent 36% du cheptel français de vaches laitières (Agreste, 2023). Or, si ces régions bénéficient d'un climat océanique profitable à la production de fourrages, les effets du changement climatique impactent désormais l'équilibre des systèmes fourragers des exploitations bovines laitières. Les aléas climatiques survenus ces dernières années préfigurent les projections à long-terme pour la production fourragère de la zone (Ruget *et al.*, 2013 ; Moreau et Madrid, 2018a, 2018b ; Moreau *et al.*, 2020). Bien que les éleveurs bovins du Grand Ouest ne semblaient pas inquiets au sujet du changement climatique avant 2010 (Vertes *et al.* 2011) et que l'influence de l'océan Atlantique atténue le changement climatique dans ces régions, les projections des modèles climatiques pour le Grand Ouest indiquent une « méditerranéisation » du climat (Amiot *et al.*, 2022) : moins de précipitations en été et des températures plus élevées sur l'ensemble de l'année.

Dans le même temps, l'élevage bovin est responsable de 49 % des émissions brutes (i.e. sans prise en compte du stockage carbone par les prairies et les haies) de gaz à effet de serre (GES) du secteur de l'agriculture, soit 9,3 % à l'échelle nationale (CITEPA, 2022). La filière laitière s'est engagée à diminuer les émissions de gaz à effet de serre par litre de lait sortie d'usine de 17 % entre 2015 et 2025 (CNIEL, 2020). Ainsi, tout en devant s'adapter aux conséquences du changement climatique, les éleveurs laitiers doivent mettre en œuvre des pratiques pour atténuer leur contribution à ce phénomène dont ils sont eux-mêmes victimes.

En outre, les exploitations bovines laitières font face à des difficultés économiques importantes, marquées par des résultats courants bas et volatiles (Chatellier *et al.*, 2020). Le secteur laitier de la Bretagne et des Pays de la Loire évolue dans un contexte de forte compétition internationale et ne peut pas se démarquer sur le marché par des produits d'appellation d'origine contrôlée tels qu'en Normandie ou en zone de montagnes. Au-delà des surcoûts économiques imposés par un aléa climatique ponctuel, tels que l'achat de fourrages, de concentrés ou la baisse de production laitière due à une vague de chaleur, le changement climatique semble éroder structurellement le contexte fourrager avantageux dont disposait le secteur laitier du Grand Ouest (INOSYS, 2020). Si les rendements de maïs fourrager simulés dans les programmes Climalait et Climaviande pour les zones de Vendée, des Mauges, du Finistère Nord et du Sud-Ille-et-Vilaine continuent de progresser en moyenne (Moreau et Madrid, 2018a, 2018b ; Moreau *et al.*, 2020a, 2020c), ils sont marqués par une forte variabilité en quantité et qualité fourragère car hautement sensibles aux précipitations estivales. Le rendement des prairies progresserait légèrement à l'échelle de l'année mais la répartition saisonnière de la biomasse évoluerait fortement, avec une fréquence accrue des sécheresses en été et fin printemps ainsi que plus de production en automne, hiver, printemps bien que les conditions d'accès aux prairies resteraient inchangées.

Il apparaît important de s'assurer que les stratégies (combinaisons de leviers) d'adaptation au changement climatique ne conduisent pas à des effets indésirables sur les durabilités économique, sociale et environnementale des élevages laitiers, autrement dit à des « maladaptions » (Barnett et O'Neill, 2010). L'objectif de cette étude est d'explorer le lien entre les notions d'adaptation et d'atténuation à l'échelle d'une exploitation bovine laitière du Grand Ouest et de mesurer également les conséquences technico-économiques de l'adaptation au changement climatique. Pour ce faire, six ateliers de co-construction ont été réalisés dans le cadre des projets de recherche Climatveg et Fermadapt avec l'aide du Rami Fourrager® afin de s'assurer de la cohérence technique des systèmes coconstruits par les éleveurs. Cette étude rend compte de leurs résultats. L'utilisation d'une approche participative couplée à des simulations avec l'outil d'analyse en cycle de vie CAP'2ER (Institut de l'Elevage, 2022) et à une méthode de calcul des coûts de production (Institut de l'Elevage, 2020) est détaillée dans cet article. Le volet travail est abordé au travers du nombre d'heures de tracteur par an estimé par l'outil Mécaflash®.

Premièrement, l'article présente les ateliers de Rami Fourrager® et propose une méthodologie pour évaluer les conséquences environnementales et technico-économiques d'une évolution de système fourrager. Deuxièmement, cette méthodologie est illustrée par les adaptations proposées par six groupes d'éleveurs à travers le Rami Fourrager®. Les résultats de cette évaluation englobent des aspects techniques mais aussi les émissions de gaz à effet de serre, le stockage carbone et le coût du système d'alimentation.

Méthode

Approche participative pour les choix de leviers d'adaptation

L'évolution des systèmes fourragers et les choix de leviers d'adaptation pour faire face au nouveau climat du Grand Ouest ont été simulés par une approche collective basée sur l'outil Rami Fourrager® (Martin *et al.*, 2012). Au début des années 2010, pointant l'incertitude croissante pesant sur le contexte de l'élevage, l'INRA et l'Institut de l'Elevage ont codéveloppé un outil d'animation pour permettre aux conseillers agricoles et éleveurs de coconstruire autour d'un jeu de plateau des systèmes fourragers adaptés à des changements internes ou externes (changement climatique, passage en agriculture biologique, transition agroécologique...). Ce jeu sérieux permet de représenter un système fourrager dans le but de concevoir de nouveaux systèmes ou d'adapter un système à une contrainte. Ce jeu repose sur un plateau et un ensemble d'éléments (baguettes fourrages, cartes représentant le type d'animal ou d'aliment) qui matérialisent à l'échelle d'une année la production de fourrages et les besoins du troupeau selon les rations décrites par les cartes du jeu. Le groupe d'éleveurs s'appuie sur ces éléments pour échanger sur les pratiques et leviers à mettre en place pour atteindre les objectifs donnés.

Ceux-ci peuvent être variés : maintenir la production animale quel que soit l'aléa climatique, explorer des changements radicaux de système ou optimiser le système pour en améliorer la durabilité sur les plans social, environnemental et économique. En parallèle du plateau de jeu servant de support à la discussion et aux choix pris, un module informatique sur Excel® permet une évaluation technique du système coconstruit au cours de la partie. Le suivi des stocks au cours de l'année ainsi que la production des prairies pâturées, fauchées, et des autres fourrages peuvent ainsi être contrôlés tout au long de la partie. La cohérence des rations est vérifiée par le recouvrement des besoins alimentaires à partir de références INRA (2007).

Six ateliers de Rami Fourrager® ont été menés dans le cadre des projets Climatveg et Fermadapt en Bretagne et Pays de la Loire avec des éleveurs de bovins lait, mobilisés sur la base du volontariat par les organismes de développement partenaires des deux projets. Les différents groupes d'éleveurs et d'éleveuses qui existaient déjà antérieurement au projet se répartissent sur cinq des huit départements des deux régions, dans des secteurs à forte densité d'exploitations bovines laitières (figure 1). La partie de Rami Fourrager® se positionnait en troisième rencontre d'un parcours collectif amenant à réfléchir à l'adaptation des systèmes fourragers au changement climatique dans leurs zones.

Elaboration des baguettes fourrages à partir de résultats de modélisation

La modélisation est une approche largement utilisée dans la littérature pour étudier les conséquences du changement climatique sur les fourrages (Graux et al., 2013). Les modèles de cultures permettent de produire des références de productions de fourrages adaptées au pédoclimat du groupe d'éleveurs présent.

Les baguettes fourrages des six parties de Rami Fourrager®, qui correspondent chacune à la production d'un type de couvert fourrager sur 13 périodes de 28 jours dans l'année, sont construites à partir des simulations issues du modèle STICS pour la prairie (Brisson et al., 2003). STICS (Simulateur multi-disciplinaire pour les Cultures Standard) est un modèle de culture qui simule la croissance et le développement de multiples cultures, au pas de temps journalier, à partir des données climatiques journalières, des itinéraires techniques pratiqués et de paramètres descriptifs du sol. Les baguettes fourrages de chaque partie de Rami fourrager® reposent donc sur le sol majoritaire de la zone issu de la BDGSF (INRA, 2018) et des itinéraires techniques (fertilisation, dates de fauches) représentatifs des pratiques du groupe d'éleveurs et choisis en amont avec le conseiller. Les données climatiques journalières de notre étude correspondent à la série de données climatiques CNRM-CMC5-Aladin63 pour le scénario RCP 8.5 pour les points correspondant aux groupes d'éleveurs disponibles sur la plateforme DRIAS (Soubeyroux et al., 2020). Le scénario dit sans politique publique a été privilégié pour être au plus proche de la trajectoire du climat actuel et « se préparer au pire ». Les baguettes fourrages du « système initial » correspondent aux simulations effectuées avec les années 1981-2000 de la série de données. Le choix de ces deux décennies a été motivé par la volonté de marquer la différence avec le climat futur. Afin de se projeter sur un horizon relativement proche et avec des impacts climatiques marqués, les baguettes fourrages avec lesquelles les éleveurs ont ensuite dû composer, correspondent aux dix années avec les étés les plus secs parmi celles de l'horizon 2041-2060. Les croissances médianes issues de STICS pour ces années ont ainsi été reprises pour la création des baguettes prairies. Un exemple est présenté en figure 2.

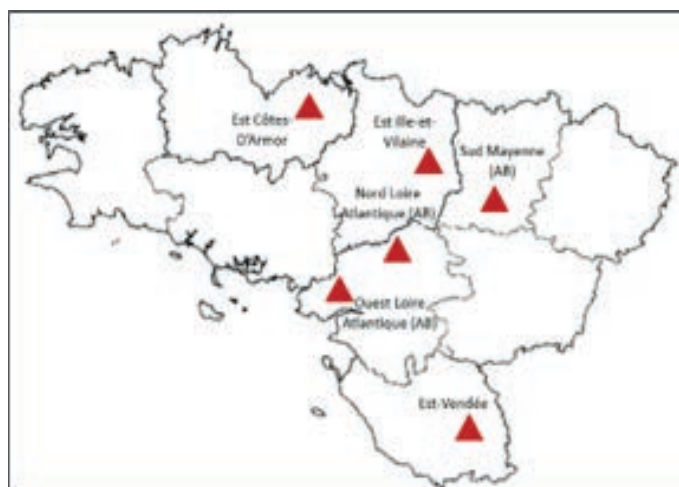


FIGURE 1 : Localisation des six groupes d'éleveurs en Bretagne et Pays de la Loire
FIGURE 1 : Localisation of the six groups of dairy farmers in the Brittany and Pays de la Loire regions



FIGURE 2 : Résultats des simulations STICS pour la prairie, pour le groupe « Est-Côte d'Armor » (secteur Lamballe-Dinan) croissance médiane en kgMS/ha/j

FIGURE 2 : Grass growth STICS results for the East-Côtes d'Armor group (Lamballe-Dinan sector). Median growth in kgDM/ha/d

Estimation de l'empreinte carbone

Les émissions de gaz à effet de serre de chaque « système initial » et chaque « système adapté » ont été estimées par l'outil CAP'2ER® de Niveau 1 (Institut de l'Elevage, 2022). Ce modèle d'analyse en cycle de vie est une approche simplifiée d'évaluation environnementale à l'échelle de l'atelier lait et repose sur une base de données de facteurs d'émissions par intrant et la saisie de 35 données d'élevages. Ces dernières concernent les effectifs, les surfaces et les intrants principalement. Pour simplifier la collecte des données en ferme, certaines données sont standardisées et de ce fait le modèle peut ne pas être sensible à certains changements de pratiques, par exemple un changement de type de bâtiment pour les génisses ou une modification de nature de concentré en dehors du tourteau de soja. L'outil CAP'2ER® a été choisi dans le but de bénéficier de facteurs d'émissions actualisés et d'être en phase avec les références techniques de la filière laitière concernant les émissions de gaz à effet de serre et de stockage carbone. Des forfaits de stockages ou déstockages additionnels et annuels sont attribués par type de surface à partir des valeurs proposées par Dollé *et al.* (2013) : un hectare de prairie non retournée stocke 570 kg de carbone (C)/ha/an, un hectare de prairie en rotation (rotation moyenne : 5 ans de prairies et 3 ans de cultures) stocke 80 kg C/ha/an, un hectare de culture annuelle déstocke 160 kg C/ha/an. Les quantités d'effluents produits ont été reprises de la description des cas-types INOSYS afin de renseigner CAP'2ER® au prorata du nombre de jours de présence en bâtiment pour les différents lots d'animaux.

Estimation de la consommation de carburants et des frais de mécanisation

L'outil Mécaflash® de la Fédération Régionale des CUMA de l'Ouest a été utilisé pour estimer la consommation de carburant et les frais de mécanisation de chaque « système initial » et chaque

« système adapté ». S'appuyant sur des références par opération culturale, l'outil calcule les repères optimisés en charges de mécanisation, heures de tracteur et consommations de carburant. À partir de l'assolement, des modes de récolte avec les quantités récoltées, des effluents épandus et de la distribution de paille et de fourrages, le calculateur propose le détail des coûts optimaux par poste de mécanisation. Un nombre d'heures correspondant aux « heures tracteur cour de ferme » est aussi ajouté afin de prendre en compte certaines activités difficilement imputables à un poste comptable, par exemple : le déplacement d'abreuvoir, la manutention d'outils ou d'intrants autour des bâtiments, etc... Ce nombre d'heures est fixé proportionnellement à la taille de la surface fourragère principale (SFP) ou de la surface agricole utile (SAU). Concernant le volet carburant, l'outil fournit la consommation optimale et le coût qu'elle représente. Il est possible de faire évoluer le prix du carburant selon le contexte et les objectifs de la simulation. Les consommations de carburants sont calculées selon deux échelles, à l'échelle de la SFP pour l'approche économique de l'étude, et à l'échelle de la SAU pour l'analyse environnementale intégrée à CAP'2ER.

Estimation du coût du système d'alimentation

Les simulations économiques pour chaque système « initial » et « adapté » au changement climatique se résument au calcul du coût du système d'alimentation défini par la méthodologie d'INOSYS Réseaux d'Elevage (Institut de l'Elevage, 2020) :

Coût du système d'alimentation =

Alimentation achetée (achats d'aliments concentrés et de fourrages, frais d'estive et de mise en pension)

+ Approvisionnement des surfaces (engrais, semences, produits de traitement, petit matériel de récolte)

+ Charges de mécanisation (travaux par tiers, carburants et lubrifiants, entretien et amortissement du matériel)

+ Foncier (fermage, mises à disposition et frais du foncier, amortissement des améliorations foncières)

Pour le poste aliment acheté, les prix des intrants sont issus des référentiels INOSYS pour la création de cas-types et de références locales pour l'année de conjoncture 2022 pour les aliments achetés et cédés de l'atelier grandes cultures à l'atelier lait. Le poste approvisionnement des surfaces est calculé à partir de l'assolement et des références de production PEREL (Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire, 2015) pour prendre en compte les coûts des semences, de la fertilisation, du chaulage, et de produits phytosanitaires pour chaque type de prairies et de fourrages et dont les niveaux sont mis à jour suivant l'IPAMPA¹. Les charges de mécanisation optimisées sont calculées par l'outil Mécaflash® à partir d'itinéraires culturaux standards, des quantités de fourrages récoltés, distribués et des quantités d'effluents épandus. Enfin, il est important de noter que le poste foncier n'est simulé qu'à travers

¹ Indice des prix d'achat des moyens de production agricole (IPAMPA)

un fermage moyen issu des cas-types INOSYS Pays de la Loire et omet donc les frais du foncier ou amortissements des améliorations foncières qui peuvent être non-négligeables si le système décide de valoriser plus le pâturage en améliorant les chemins d'accès.

Ainsi par souci de simplification, ces simulations ne prennent pas en compte les charges de structure liées au bâtiment et à la main d'œuvre, qui peuvent également évoluer lorsque des leviers d'adaptation sont mis en place sur un système. Dans le but de comparer toutes choses égales par ailleurs, il a été décidé d'appliquer la même conjoncture de prix dans le « système initial » que dans le « système adapté » au changement climatique.

Résultats

Systèmes fourragers initiaux

Les systèmes fourragers proposés pour démarrer les parties de Rami Fourrager® ont été choisis pour être représentatifs des exploitations de chaque groupe. Ces systèmes initiaux sont largement inspirés des cas-types INOSYS Réseaux d'élevage, même si certains ajustements ont été faits en début de partie pour correspondre davantage aux pratiques du groupe. Trois groupes sur cinq ont décidé de travailler sur un système en agriculture biologique. Le tableau 1 synthétise quelques indicateurs clés des « systèmes initiaux ».

Evolution des systèmes fourragers

Le tableau 2 présente le panel de leviers sélectionnés par les groupes pour être intégrés aux systèmes initiaux. Si certains groupes ont choisi de réduire les besoins en jouant sur le taux de renouvellement et l'âge au premier vêlage, l'ensemble des groupes a décidé de maintenir le niveau de production laitière initial. Cet objectif n'était en rien imposé par l'atelier mais reflète la volonté des groupes de maintenir une production à laquelle ils sont attachés et de conserver un produit brut convenable, permettant d'assumer un niveau d'annuités pour un jeune éleveur qui finirait sa carrière en 2050.

La baisse du niveau de chargement est marquée sur l'ensemble des groupes. Cette baisse résulte d'une augmentation des surfaces fourragères au détriment des surfaces en grandes cultures et/ou d'une baisse des effectifs de génisses de renouvellement. La baisse du taux de renouvellement s'est avérée être un levier efficace pour baisser les besoins de fourrages du troupeau et fut souvent au cœur d'intéressants débats : si une partie des éleveurs tient à garder une grande marge de sécurité en cas de problèmes sanitaires ou bien cherche une plus-value en élevant et vendant des génisses, d'autres voient les génisses comme un lot d'ajustement et visent des taux de renouvellement de l'ordre de 15 voire 10 %. Réduire l'âge au premier vêlage (APV) est aussi un levier débattu et utilisé dans 3 des 6 groupes (tableau 2).

TABLEAU 1 : Description des systèmes initiaux
TABLE 1 : Description of the initial systems

	Est Vendée	Ouest Loire-Atlantique (AB)	Nord Loire-Atlantique (AB)	Sud Mayenne (AB)	Est Ile-et-Vilaine	Est Côtes d'Armor
SFP (ha)	65	125	105	80	38	70
% de maïs dans la SFP	40	17	11	0	18	14
Surfaces en prairies permanentes non-labourables (ha)	7	15	10	12	11	10
Autres surfaces	26 ha de céréales à paille	21 ha de méteil grain auto-consommé	15 ha de méteil grain auto-consommé	9 ha de méteil grain auto-consommé	7 ha de triticale auto-consommé	10 ha de triticale auto-consommé
Nombre de vaches laitières	73	94	78	62	34	60
Niveau de production par vache et par an	8 000	7 000	7 000	5 000	6 000	6 000
Consommation de concentrés (g./l. de lait)	170	126	101	81	124	124
Taux de renouvellement	30%	30%	26%	27%	32%	28%
Age au 1er vêlage (mois)	29	29	29	29	29	29

TABLEAU 2 : Evolution technique des systèmes fourragers des 6 groupes d'éleveurs

TABLE 2 : Grass growth STICS results for the East-Côtes d'Armor group (Lamballe-Dinan sector). Median growth in kgDM/ha/d

	Est-Vendée	Ouest Loire-Atlantique - AB	Nord Loire-Atlantique - AB	Sud-Mayenne - AB	Est Ile-et-Vilaine	Est-Côtes d'Armor
Caractéristiques du système initial	71% de SFP sur SAU 40% de maïs sur SFP	86% de SFP sur SAU 17% de maïs	87% de SFP sur SAU 11% de maïs	90% de SFP sur SAU 100% en herbe	84% de SFP sur SAU 18% de maïs	87,5% de SFP sur SAU 14% de maïs
Leviers choisis :	PME ¹ , prairies sous couvert de MCPI, augmenter le pâturage, moins de céréales, MCPI ² ou RGI avant maïs, RGH-TV ³ fauché	PME, MCPI, réduction du taux de renouvellement et de l'APV ⁴ , RGH-TV fauché	PME, dérobé colza fourrager, MCPI, dérobé estival, RGH-TV fauché	Vêlage groupé en automne, ensilage de méteil grain, augmenter le pâturage au printemps/hiver	Réduction du tx de renou. et de l'APV, arrêt du triticales, MPCl devant maïs ou sorgho, luzerne, PME, RGH-TV	Arrêter le blé, betterave fourragère, luzerne, PME
Nouvelles caractéristiques du système adapté au climat projeté :	88% de SFP sur SAU 32% de maïs sur SFP	86% de SFP sur SAU 20% de maïs sur SFP	92% de SFP sur SAU 11% de maïs sur SFP	93% de SFP sur SAU 100% herbe	96% de SFP sur SAU 12% de maïs sur SFP	100% de la SAU en SFP 13% de maïs sur SFP
Evolution du chargement apparent (UGB/ha SFP) :	1,9 → 1,5	1,2 → 1,1	1,15 → 1,10	1,1 → 1,0	1,2 → 1,0	1,45 → 1,15
Evolution production de lait :	Toujours 584 000l	Toujours 625 000l	Toujours 519 000l	Toujours 295 000l	Toujours 310 000l	Toujours 204 000l

1 Prairies multi-espèces

2 Mélange céréales protéagineux immatures

3 Ray-grass hybride-trèfle violet

4 Age au premier vêlage

Les leviers d'adaptation mobilisés reposent souvent sur la diversification, tant au niveau des ressources fourragères que de la composition des prairies. Les prairies multi-espèces remplacent quasi-systématiquement l'association ray-grass anglais et trèfle blanc, les prairies de fauche sont intensifiées par des mélanges ray-grass hybride et trèfle violet (RGH-TV) ou de la luzerne. La culture de maïs est maintenue sur tous les systèmes en possédant à l'initial car si la baisse de rendement imposée était sévère, de l'ordre de 20 %, cette culture assure au moins 8 ou 9 tMS/ha de fourrage de qualité pour la production laitière.

Evolution des performances énergétiques

En conséquence des évolutions techniques décrites dans le tableau 2, les estimations de consommation de carburant de chaque système fourrager exprimées aux 1000 litres de lait vendus augmentent sur chacun des systèmes (tableau 3). En moyenne, pour livrer 1000 litres de lait, les systèmes initiaux consommaient 19,7 litres de carburant, avec un minimum de 18,1 litres pour l'Est Ile-et-Vilaine et un maximum 21,8 litres pour l'Est Côtes d'Armor. Il convient de souligner qu'il s'agit du carburant utilisé

sur l'exploitation et non en amont pour la production d'intrants consommés sur l'atelier. Le système vendéen par exemple, basé à 40% sur le maïs ensilage en surface fourragère, achète plus de correcteur azoté ayant nécessité du carburant pour être produit et transporté. Après adaptation au climat imposé, c'est en moyenne 21,8 litres de carburant qu'il faut pour vendre 1000l. de lait, soit une hausse de 11 % de carburant. Cette hausse varie entre 7,9% et 16,8% en fonction des stratégies fourragères mises en place.

Quatre systèmes sur six observent une hausse de la consommation de carburant par hectare de SFP et par hectare de SAU du fait des stratégies d'adaptation choisies et des évolutions de l'assolement. Si de manière générale les ateliers nécessitent plus d'hectares de SFP pour assurer les besoins du troupeau, les dérobés et prairies à courte durée avec de nombreuses fauches (luzerne, RGH-TV) sont consommateurs en carburant. De ce fait, les consommations de carburant ramenées par hectare de SFP augmentent. Exprimée à l'hectare de SAU, l'augmentation est atténuée car plus diluée mais reste non négligeable au regard de la baisse du produit grandes cultures.

L'extensification du système Est-Vendée explique la baisse de consommation de carburant sur ce système (tableau 3).

Les heures de tracteur estimées à l'échelle de l'atelier lait augmentent en moyenne de 9,4 % avec de fortes disparités : entre 2,1 % d'augmentation pour le groupe Ouest Loire-Atlantique et 25,5 % le groupe Est Ile-et-Vilaine. Si les heures de tracteur ne peuvent pas représenter à elles seules la charge de travail sur une exploitation, la tendance indique une hausse certaine et une complexification du travail avec une diversité de ressources fourragères à piloter.

Age au premier vêlage

Quatre groupes sur six observent une augmentation des coûts du système d'alimentation (tableau 4). Les groupes qui n'observent pas cette hausse ont fait le pari qu'ils pouvaient réduire fortement les concentrés achetés au regard des nouveaux plans d'alimentation. C'est le cas du groupe d'Est-Vendée qui réduit considérablement la part du maïs dans l'assolement et l'alimentation du troupeau. La forte baisse du poste « aliments achetés » compense largement la hausse des postes « approvisionnement des surfaces », « mécanisation » et « foncier ». Ce système améliore donc sa performance économique sous condition de garder la même production laitière à 8000 litres de lait par vache laitière et donc un produit brut équivalent. Les éleveurs du groupe Est-Côtes d'Armor ont également revu à la baisse les concentrés distribués dans la ration tout en gardant les mêmes objectifs de production laitière considérant que le système initial achetait trop de concentrés de production.

Deux postes affichent des hausses marquées sur l'ensemble des systèmes simulés. Les charges de mécanisation ont augmenté de 12,50€/1000L, ce qui représente une hausse de 14%.

Cette hausse est supérieure à celle de la consommation de carburant puisqu'elle inclut les frais de réparation, pneus, lubrifiants et amortissement du matériel qui ne sont pas strictement proportionnels aux heures de tracteur ou aux dépenses de carburant. Aussi, les charges d'approvisionnement des surfaces ont augmenté de 9€/1000L, ce qui représente une hausse de 37%. L'achat de semences explique largement cette hausse. Le poste foncier augmente avec le nombre d'hectares de SFP.

Enfin, d'autres postes sortant du périmètre du coût du système d'alimentation n'ont pas fait l'objet d'estimations mais sont importants à considérer. Les systèmes initiaux détenaient des surfaces en céréales ou méteil produisant de la paille en marge de leurs surfaces fourragères. La conversion de ces surfaces en fourrages implique l'achat de paille à l'extérieur. Evoquant la réduction du cheptel bovin à l'Ouest, les éleveurs des groupes n'étaient pas inquiétés pour s'assurer un approvisionnement en paille. La litière bois plaquette fut aussi évoquée en substitut partiel de la paille. Si le produit issu de la vente de lait est maintenu, les revenus issus de la vente de céréales sont souvent sacrifiés pour assurer la production de fourrages. Ce coût d'opportunité sur l'atelier grandes cultures est à additionner à la hausse du coût de production de l'atelier lait pour estimer l'équilibre de l'exploitation entière. Enfin, la réduction du nombre de génisses élevées réduit les frais d'élevage (vétérinaire, litière...) et le temps de travail mais sont à mettre en face d'une baisse du produit viande de l'atelier lait (moins de réformes). Le croisement avec des races à viande en ayant recours à des semences sexées est une pratique discutée dans les groupes qui contribue à améliorer ce délicat équilibre coûts-bénéfices du taux de renouvellement.

TABLEAU 3 : Evolution des consommations de carburants et heures tracteurs (calcul Mécaflash®)
TABLE 3 : Changes in fuel consumption and hours of tractors (Mécaflash® results)

	Est-Vendée	Ouest Loire-Atlantique - AB	Nord Loire-Atlantique - AB	Sud-Mayenne - AB	Est Ile-et-Vilaine	Est-Côtes d'Armor
Consommation carburant de la SFP/1000 litres corrigés livrés :	18,3 → 20,3 +11,5 %	20,1 → 21,9 +8,8%	19,3 → 21,2 +10,2%	20,5 → 22,09 +7,9%	18,1 → 21,2 +16,8%	21,8 → 24,2 +11,3%
Conso carburant atelier lait l/ha SFP :	166 → 149 -10,2%	102 → 111 +8,8%	96 → 101 +5,2%	75 → 78 +4,0%	93 → 96 +3,2%	93 → 93 -
Consommation carburant exploitation l/ha SAU :	149 → 144 -3,4%	101 → 109 +7,9%	96 → 101 +5,2%	77 → 79 +2,6%	95 → 97 +2,1%	94 → 93 -1,1 %
Heures de tracteurs échelle atelier lait h/an	1164 → 1224 +5,1% +60h	1464 → 1495 +2,1% +31h	1187 → 1274 +7,3% +87h	786 → 804 +2,3% +32h	420 → 527 +25,5% +107h	787 → 897 +14,0% +110h

TABLEAU 4 : Evolution des coûts du systèmes d'alimentation
TABLE 4 : Changes in fodder system costs

	Est-Vendée	Ouest Loire-Atlantique - AB	Nord Loire-Atlantique - AB	Sud-Mayenne - AB	Est Ile-et-Vilaine	Est-Côtes d'Armor
Coût du système d'alim €/1000l - dont :						
> Mécanisation	216€ → 209€ -3,2%	261€ → 279€ +6,9%	223€ → 232€ +4,0%	198€ → 219€ +13,4%	195€ → 234€ +20,0%	206€ → 205€ -
> Appro surfaces	86 → 96 29 → 38 85 → 56	93 → 101 21 → 31 119 → 119	90 → 99 18 → 26 86 → 78	96 → 103 14 → 16 50 → 60	86 → 106 29 → 40 53 → 57	84 → 94 31 → 42 63 → 38
> Alim. Achetés (dont auto-cons)	15 → 19	28 → 28	28 → 30	38 → 39	27 → 31	27 → 31
> Foncier						
Remarques autres postes :	Achat de paille + baisse du produit des grandes cultures	Moins de génisses Achat de paille Moins de vaches de réformes	Achat de paille	Moins de génisses Achat de paille Moins de vaches de réformes	Moins de génisses Achat de paille + baisse du produit des grandes cultures Moins de vaches de réformes	Achat de paille + baisse du produit des grandes cultures

Evolution des performances environnementales

Les résultats des estimations CAP'2ER® du système initial et du système adapté de chaque groupe sont présentées dans le tableau 5. Sur les six systèmes, cinq observent une baisse de leurs émissions de GES par litre de lait corrigé. La baisse la plus forte concerne le système Est Vendée, largement expliquée par la baisse du nombre de jours en bâtiment et la réduction des achats de tourteaux de soja. Le système Est Ile-et-Vilaine affiche également une forte baisse des émissions, expliquée par moins d'animaux improductifs (génisses) pour un même niveau de production laitière et le passage d'un tourteau de soja au poids carbone lourd à un tourteau de colza plus local et ne contribuant pas à la déforestation. Les autres baisses de 3% ou 6% sont non négligeables pour des exploitations bovines laitières qui s'engagent souvent sur des objectifs de cet ordre pour les crédits carbone. Le stockage carbone n'évolue pas ou bien est à la hausse en fonction des modifications d'assolement et de la conversion de surfaces de cultures en prairies. L'introduction de prairies à la place de grandes cultures contribue à plus de séquestration additionnelle de carbone dans les sols par an. Cependant, la diversification fourragère par le biais de prairies de courtes durées (3 ans), de dérobés ou d'ensilage de MCPI ne participe pas à cette compensation des émissions de gaz à effet de serre.

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).

Discussions

Sur la méthode

La chaîne de modèles et de calculs dans le but d'étudier le lien entre adaptation et atténuation en filière laitière semble pertinente et pragmatique pour inclure des éleveurs laitiers dans cette démarche de recherche. Cependant, des améliorations sont nécessaires pour affiner les estimations successives qui reposent sur de nombreuses hypothèses et approximations. C'est pourquoi les tendances de cette étude sont à retenir au-delà des valeurs absolues et des analyses de sensibilité ou des évolutions croisées paraissent importantes pour consolider ces premiers résultats.

Sur le volet atténuation, l'analyse en cycle de vie des parties de Rami Fourrager® par le niveau 1 de CAP'2ER® permet des estimations d'émissions suffisamment précises pour l'exercice sur une ferme non-réelle. Cependant, le passage au niveau 2 de l'outil permettrait entre autres une meilleure prise en compte de la nature des concentrés en dehors du tourteau de soja. Aussi, la marge de progrès est importante concernant les estimations de séquestration de carbone dans les sols des systèmes étudiés dans un nouveau contexte climatique. Les modifications d'assolement et donc de rotations ainsi que la diversification des prairies incitent à étudier plus finement les conséquences sur la séquestration de carbone organique dans les sols que la simple application de forfaits par hectare et par type de couvert réalisée dans CAP'2ER® Niveau 1. L'amélioration récente des équations du modèle STICS sur ce sujet est une piste prometteuse pour explorer à l'avenir le lien entre adaptation et atténuation en élevage laitier (Brun-Lafleur *et al.*, 2022).

TABLEAU 5 : Evolution des performances environnementales (résultats CAP'2ER Niveau 1)
TABLE 5 : Changes in environmental results (CAP'2ER® Level 1 results)

	Est-Vendée	Ouest Loire-Atlantique - AB	Nord Loire-Atlantique - AB	Sud-Mayenne - AB	Est Ile-et-Vilaine	Est-Côtes d'Armor
Emissions de GES en kg CO2-eq/l. lait corr: Stockage C en kg CO2-eq/l. lait corr:	1,07 → 0,91 -15%	0,93 → 0,90 -3%	0,88 → 0,89 -	1,02 → 0,99 -3%	1,10 → 0,98 -11%	1,11 → 1,04 -6%
Stockage C en kg CO2-eq/l. lait corr:	0,05 → 0,06 +2%	0,11 → 0,11 -	0,11 → 0,11 -	0,19 → 0,19 -	0,18 → 0,21 +16%	0,16 → 0,16 -1"
Principaux facteurs de réduction de l'empreinte C.	Plus de pâturage, moins d'achats de tourteaux de soja	Réduction de l'âge au 1er vêlage et du taux de renouvellement, hausse du carburant	Hausse de la consommation de carburant	Réduction de l'âge au 1er vêlage (mais plus d'achat de concentrés)	Réduction de l'âge au 1er vêlage et du tx de renouvellement, passage de ttx de soja à ttx de colza Réduction de l'âge au 1er vêlage et du tx de renouvellement, passage de ttx de soja à ttx de colza	Moins d'achats de tourteaux de soja, des prairies à la place du blé (fertilisé)

Sur le volet adaptation au changement climatique, les estimations de rendements basés sur l'année 2022 et sur le modèle STICS à partir de données climatiques projetées nous paraissent satisfaisantes au regard de l'incertitude des modèles climatiques. Le changement climatique est un phénomène global et complexe dont les conséquences locales demeurent encore difficiles à prédire avec précision et certitude. Bien que les modèles climatiques et de descente d'échelle produisent des tendances communes pour le Grand Ouest, il est important de souligner le niveau d'incertitude de ces tendances en particulier concernant les précipitations pour l'Europe de l'Ouest (Bonnardot *et al.*, 2023 ; Gutiérrez *et al.*, 2020). En outre, cette étude repose sur un jeu de données du modèle CNRM-Aladin63 issu de l'exercice CMIP-5² (Soubeyroux *et al.*, 2020) antérieur aux dernières simulations du CMIP-6. Par conséquent, il a été décidé dans cette étude de marquer l'exercice climatique en sélectionnant les 10 années les plus sèches de la double décennie 2041-2060. Ainsi l'exercice pourrait paraître trop pessimiste et consister davantage à s'adapter à un aléa climatique du futur lié à une sécheresse estivale plus ou moins précoce, ou prolongée sur l'automne, plutôt qu'un climat moyen futur. Toutefois, l'année 2022 a servi de repère pour estimer l'impact du climat sur les rendements des cultures non-modélisées durant la préparation de la partie. Or, les températures de l'été 2022 pourraient correspondre à celles d'un été normal en France en milieu de siècle, sauf en cas de réduction massive et

immédiate des émissions de gaz à effet de serre (Météo France, 2022). L'adaptation au changement climatique est un processus qui s'étale dans le temps, au fil des aléas. Marquer ainsi les climats projetés sur des systèmes initiaux nous semble pertinent.

Bien qu'elle omette les potentielles évolutions de charges de structure, l'approche économique reposant sur un budget partiel centré sur le coût du système d'alimentation nous semble être le bon niveau de complexité pour aborder les conséquences économiques des évolutions de systèmes fourragers. Des améliorations sont possibles sur l'actualisation des référentiels techniques mobilisés dans les calculs économiques. Toutefois, l'exercice largement basé sur Mécaflash® pour les consommations de carburant et les charges de mécanisation paraît robuste et suffisamment fin pour entrevoir les effets d'une combinaison de leviers fourragers. A l'avenir, des analyses plus complètes sur les cas-types INOSYS permettraient d'élargir à l'échelle des résultats économiques d'une exploitation (avec la prise en compte de l'impact sur l'atelier culture).

Une limite de cette étude est le manque de représentativité des systèmes fourragers. Les résultats proposés concernent majoritairement les systèmes où le maïs ne dépasse pas 32% de la SFP. Or, la part moyenne de maïs dans la SFP des systèmes laitiers du Grand Ouest est de 38% pour les Pays de la Loire et 40% pour la Bretagne. Il existe un biais important et récurrent dans les approches participatives : les participants sont choisis sur la base du volontariat et sont dans une démarche d'optimisation

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

de leur système d'un point de vue technico-économique et environnemental. Enfin, les systèmes initiaux, inspirés des cas-types, sont optimisés au niveau de leur conduite et achats d'intrants. Les marges d'optimisation sont donc vraisemblablement plus importantes pour les exploitations du Grand Ouest.

Sur les résultats

Les calculs de performances des « systèmes initiaux » et des « systèmes adaptés » pointent pour la filière laitière du Grand Ouest un résultat négatif de la mise en place de leviers d'adaptation sur les coûts de production et les heures de travail et un résultat positif sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

La diversification des systèmes choisie par les éleveurs lors des parties de Rami Fourrager® entraîne un recours accru au pétrole et à la mécanisation. Les associations de courte durée RGH-TV, la luzerne, ainsi que les MCPI sont des solutions agronomiques d'intérêt qui nécessitent des implantations plus fréquentes et des chantiers de récoltes consommateurs en carburant. En outre, l'augmentation des surfaces nécessaires en fourrages pour alimenter un même troupeau entraîne également une augmentation de l'énergie utilisée pour les exploiter. Les jours de pâturage perdus en été ne sont pas toujours compensés par les opportunités du pâturage en fin d'automne, hiver et début de printemps. Cette étude souligne le coût énergétique de l'adaptation au changement climatique. Ce résultat est à prendre au sérieux pour la filière laitière du Grand Ouest qui n'échappera pas aux conséquences de la raréfaction des ressources fossiles à l'échelle globale. De la même manière, sur le volet économique, les résultats indiquent une nette augmentation des coûts du système d'alimentation. Ces résultats apportent des éléments chiffrés aux suspicions d'augmentation de coûts formulées dans la littérature (Noury *et al.*, 2013 ; Moreau *et al.*, 2020b). La réduction des achats de concentrés, le pâturage hivernal, la baisse du nombre de génisses ou l'avancement de l'âge au premier vêlage peuvent compenser en partie cette augmentation des charges. Toutefois, les charges de structure pour adapter le bâtiment aux fortes chaleurs ou pour améliorer les chemins d'accès au pâturage n'ont pas fait l'objet de simulations mais alourdissent également le coût économique du changement climatique qui devra être porté par les acteurs de la filière laitière et les consommateurs.

Au regard du lien entre l'adaptation au changement climatique et son atténuation, cette étude suggère qu'il est possible d'adapter les systèmes laitiers tout en réduisant leurs émissions de gaz à effet de serre. En effet, le méthane issu de la fermentation entérique représente en moyenne 50% des émissions de gaz à effet de serre d'un élevage laitier (Dollé *et al.*, 2013) et des leviers peuvent être actionnés pour les limiter, dont la réduction du nombre de génisses élevées pour le renouvellement et de l'âge au premier vêlage. Ces deux leviers expliquent en grande partie les observations du tableau 4. L'optimisation des achats de concentrés et de la fertilisation sont aussi responsables des baisses observées. Sur ce point, il semble que toutes les parties de Rami Fourrager® furent finalement des

exercices d'optimisation de systèmes en place sous une nouvelle contrainte climatique. L'adaptation au changement climatique est un défi qui oblige à optimiser l'utilisation des ressources (eau, sol, lumière, nutriments, intrants) et minimiser leurs pertes tout en maintenant une production. Cette logique nous semble sous-jacente au lien positif entre adaptation et atténuation trouvé ici mais qui demande à être testé dans d'autres contextes et sur d'autres systèmes.

Les éleveurs et éleveuses des groupes ont été satisfaits d'observer la cohérence technique et environnementale des systèmes coconstruits. Le calcul permet de conforter leurs choix de leviers et de pratiques à mettre en place pour maintenir les objectifs de production malgré des aléas climatiques de plus en plus nombreux et intenses. Les éleveurs ont noté que ces leviers d'adaptation étaient progressivement inclus dans leur exploitation. Les conséquences sur les chiffres technico-économiques des nouveaux systèmes étaient déjà discutées et prédites par les participants lors des séances de Rami Fourrager®. Les résultats sur les aspects économiques inquiètent mais sont à relativiser par rapport au coût de la non-adaptation (non estimé ici). Par ailleurs, la hausse du temps de travail et sa complexification semblent être les points majeurs qui freinent la mise en place de leviers sur les systèmes des éleveurs impliqués. Il s'agit même par moments d'un aspect critique qui pousse à réduire la production laitière en cas d'années sèches plutôt que complexifier le système pour maintenir la production même lorsque la conjoncture laitière semble positive.

Conclusion

Cette étude explore les conséquences de l'adaptation au changement climatique de six élevages laitiers types du Grand Ouest. La comparaison multicritère des résultats des systèmes initiaux et des systèmes adaptés propose plusieurs tendances claires quant à la durabilité des systèmes laitiers étudiés : la consommation de carburant, les heures de tracteurs et les coûts du système d'alimentation augmentent, dans le même temps les émissions de gaz à effet de serre semblent baisser.

Maintenir une production laitière en 2050 dans le Grand Ouest signifie réduire le chargement apparent du système en diminuant les besoins du troupeau par le taux de renouvellement et/ou l'âge au premier vêlage ou en augmentant la surface fourragère, et en même temps diversifier les ressources fourragères. Le coût économique de l'adaptation, qui est à comparer à celui de la non-adaptation (non abordé dans cette étude), devra faire l'objet de futures études pour le préciser bien qu'il soit d'ores et déjà indirectement observable dans les coûts de production des dernières années. Ce surcoût pour les éleveurs devra faire l'objet d'une répartition sur l'ensemble de la filière jusqu'au consommateur, en addition de la hausse des prix des matières premières. Même si les aléas climatiques offrent l'opportunité de rationaliser les besoins du troupeau et l'achat d'intrants ou bien d'optimiser la production fourragère d'un système et donc d'en réduire la contribution au changement climatique, la hausse des coûts de production et du travail qui en découle est

le principal résultat de cette étude et un point de vigilance pour les politiques publiques et les structures de conseil en élevage. Ce type de projections et de démarche collective pourrait être mobilisé lors de l'accompagnement à l'installation de la future génération d'éleveurs et d'éleveuses.

La méthodologie proposée repose sur une succession de modèles et d'outils dont les incertitudes et hypothèses ne sont pas à négliger. Malgré ce point d'attention à considérer qui suggère l'importance d'améliorer les outils et les liens entre eux pour minimiser les biais de calcul, ce travail propose une base méthodologique originale et pragmatique qui donne des tendances sur l'orientation prise par les systèmes fourragers du Grand Ouest. Afin d'accompagner les conseillers d'élevage et les éleveurs dans la double nécessité de s'adapter et d'atténuer le phénomène du changement climatique en France, l'analyse système telle qu'abordée dans ce type d'étude mériterait d'être reproduite à l'échelle nationale sur des systèmes fourragers et des contextes pédoclimatiques contrastés.

Remerciements

Les auteurs de cette étude remercient les financeurs des projets Climatveg et Fermadapt, l'ADEME, la région Bretagne et la région Pays de la Loire, ainsi que les éleveurs et éleveuses qui ont participé aux ateliers de Rami Fourrager®.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agreste (2023). Les exploitations bovines laitières en France métropolitaine en 2020. Les dossiers. Numéro Nov.2023 N°4. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. Paris. Accessible en ligne : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Dos2304/Dossiers2023-4_BovinsLait.pdf [dernier accès le 11/12/2023]
- Amiot, L., Bonnardot, V., Dubreuil, V. (2022). Le changement climatique en Bretagne et Pays de la Loire. Programme CLIMATVEG, 10 pages
- Barnett, J. et O'Neill, S. (2010). Maladaptation. *Global Environmental Change*, 20: 211-213
- Bonnardot, V., Robine-Körmendi, E., Tissot, C., Quénel, 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., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Buissière, F., Cabidoche, Y. M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J. P., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., & Sinoquet, H. (2003). An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy* J. Agronomy, 18, 309-332.
- Brun-Lafleur, L., Graux, A.I., Klumpp, K., Martin, R., Therond, O., Vertes, F., Hélène, C. (2022). CarSolEI, a user-friendly tool to predict carbon stocks evolution in grassland-based farms. *Grassland Science in Europe*, Vol. 2. EGF. Caen.
- CITEPA (2022). Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France. Format Secten., édition 2022
- Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de la Loire (2015). Fiches PEREL : Coûts Des Fourrages. Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de la Loire, Institut de l'Elevage, FRCUMA. Accessible en ligne : <https://www.perel.autonomie-fourragere-des-elevages.fr/couts-des-fourrages/> [dernier accès le 12/12/2023]
- Chatellier V., Perrot C., Beguin E., Moraine M., Veyssset P., (2020). Compétitivité et emplois à la production dans les 430 secteurs bovins français. *INRAE Prod. Anim.*, 33, 261-282.
- CNIEL, (2020). Cinq ans après l'accord de Paris La Ferme Laitière Bas Carbone poursuit son envol pour faire de la France une terre de lait durable. Disponible en ligne : <https://presse.filiere laitiere.fr/actualites/5-ans-apres-les-accords-de-paris-la-ferme-laitiere-bas-carbone-poursuit-son-envol-pour-faire-de-la-france-uneterre-de-lait-durable-2ce3-ef05e.html> [dernier accès le 02/11/2022]
- 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
- Dolle J.B., Faverdin P., Agabriel J., Sauvant D., Klumpp K. (2013). Contribution de l'élevage bovin aux émissions de GES et au stockage de carbone selon les systèmes de production. *Fourrages* 215, 181-191
- Duru, M., Felten, B., Theau, J., Martin, G. (2012). A modelling and participatory approach for enhancing learning about adaptation of grassland-based livestock systems to climate change. *Regional Environmental Change*, 12(4), 739-750.
- Graux, A., Moreau, J., Raynal, H., Ruget, F., Carrere, 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.
- 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]

- INOSYS (2020). Les exploitations laitières de l'ouest face aux aléas climatiques. Institut de l'Elevage. Collection Théma. 4 pages.
- INRA (2007). Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeur des aliments. Tables INRA 2007. Quae Editions, Paris
- INRA (2018). Base de Données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000 version 3.2.8.0, 10/09/1998. Portail Data Inra
- Institut de L'Elevage, (2020). La Méthode Nationale De Calcul Des Coûts De Production En Élevage Herbivore - Principes Généraux et Indicateurs. Collection Théma. Idele, 10 pages
- Institut de L'Elevage, (2022). Guide simplifié de la méthodologie d'évaluation environnementale d'une exploitation agricole. Equipe CAP'2ER®. Institut de l'Elevage, 20 pages
- Martin G., Felten B., Magne M.-A., Piquet M., Sautier M., Theau J.-P., Thenard V., Duru M. (2012). Le rami fourrager : un support pour la conception de scénarios de systèmes fourragers avec des éleveurs et des conseillers. *Fourrages*, 210, 119-128
- Météo France (2022) Changement climatique : l'été 2022 et ses extrêmes météorologiques pourraient être la norme après 2050. Accessible en libre : <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/changement-climatique-lete-2022-et-ses-extremes-meteorologiques> [dernier accès le 22/01/2024]
- Mischler, P., Ceschia, E., Ferlicoq, M. (2024). L'effet de l'albédo des prairies, pour contribuer à l'atténuation du changement climatique est proche du stockage de carbone dans le sol. *Fourrages*, 257, à paraître.
- Moreau J.-C. et Madrid A., (2018a). Adaptation des élevages laitiers au changement climatique : résultats de l'étude Climalait pour le Sud de l'Ille et Vilaine, Idele, CNIEL, 17 pages. Accessible en ligne : <https://idele.fr/climalait/publications> [dernier accès le 11/12/2023]
- Moreau, J.-C. et Madrid, A., (2018b). Adaptation des élevages laitiers au changement climatique : résultats de l'étude Climalait pour la zone des Mauges, Idele, CNIEL, 19 pages. Accessible en ligne : <https://idele.fr/climalait/publications> [dernier accès le 11/12/2023]
- 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. Accessible en ligne : <https://idele.fr/climalait/publications> [dernier accès le 11/12/2023]
- 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 Charolaises, Idele, Interbev, 22 pages. Accessible en ligne : https://idele.fr/aclimel/publications/detail-article?tx_atolidelecontenus_publication-detail%5Baction%5D=showArticle&tx_atolidelecontenus_publication-detail%5Bcontroller%5D=Detail&tx_atolidelecontenus_publication-detail%5Bpublication%5D=17253&cHash=38fdc2c17203d01ecd4f-1295f4a9f06 [dernier accès le 11/12/2023]
- Noury J.-M., Fourdin S., Pauthenet Y. (2013). Systèmes d'élevage et changement climatique : perceptions d'éleveurs et stratégies d'adaptation aux aléas. *Fourrages*, 215, 211-219
- Ruget, F., Durand, J., Ripoche, D., Graux, A., Bernard, F., Lacroix, B., & Moreau, J. (2013). Impacts des changements climatiques sur les productions de fourrages (prairies, luzerne, maïs): Variabilité selon les régions et les saisons. *Fourrages*, 214, 99-109.
- Soubeyroux J.-M., Bernus L., Corre L., Drouin A., Dubuisson B., Etchevers P., Gouget V., Josse P., Kerdoncuff M., Samacois R. & Tocquer F. (2020). Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la Métropole. Météo France, 98 pages
- Vertes F., Leon A.S., Aussems E., Van Tilbeurgh V., Thenail C. (2011). Place du changement climatique parmi les facteurs d'adaptation des systèmes fourragers dans les élevages laitiers du grand ouest de la France. *Renc. Rech. Ruminants*, 18