

L'élevage de ruminants s'adaptera-t-il au changement climatique ? Impacts et leviers d'adaptation

Aurélie MADRID¹, Renée DE CRÉMOUX², Luc DELABY³, Hélène LARROQUE⁴, Sandra NOVAK⁵, Aurélie VINET⁶

¹Institut de l'Élevage, Chemin de Borde Rouge, 31320, Auzeville-Tolosane, France

²Institut de l'Élevage, Chambre d'Agriculture du Tarn, 81003, Albi, France

³PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590, Saint-Gilles, France

⁴GenPhySE, Université de Toulouse, INRAE, ENVT, 31326 Castanet-Tolosan, France

⁵INRAE, FERLUS, 86600, Lusignan, France

⁶Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, GABI, 78350, Jouy-en-Josas, France

Courriel : aurelie.madrid@idele.fr

■ L'agriculture est particulièrement vulnérable face aux conséquences du changement climatique. Choix des espèces, des modes de production, tout doit être repensé sous le prisme de l'adaptation et de l'atténuation du changement climatique. Cette synthèse fait le point sur les stratégies d'adaptation pour les élevages de ruminants, tant au niveau des animaux eux-mêmes qu'au niveau des ressources fourragères.¹

Introduction

L'agriculture fait face à la double contrainte d'être particulièrement sensible au changement climatique et de devoir diminuer son empreinte environnementale. Pour la France, les projections climatiques régionalisées (Soubeyroux *et al.*, 2020) montrent une hausse constante des températures d'ici la fin du XXI^e siècle, selon les scénarios et par rapport à 1976-2005, de +1,0 °C à +3,9 °C (valeurs médianes), et jusqu'à +4,9 °C (valeurs hautes). Ce réchauffement sera national, plus marqué en zones de montagne et avec un gradient de +1 °C entre le nord-ouest et le sud-est. Il sera accompagné d'une évolution

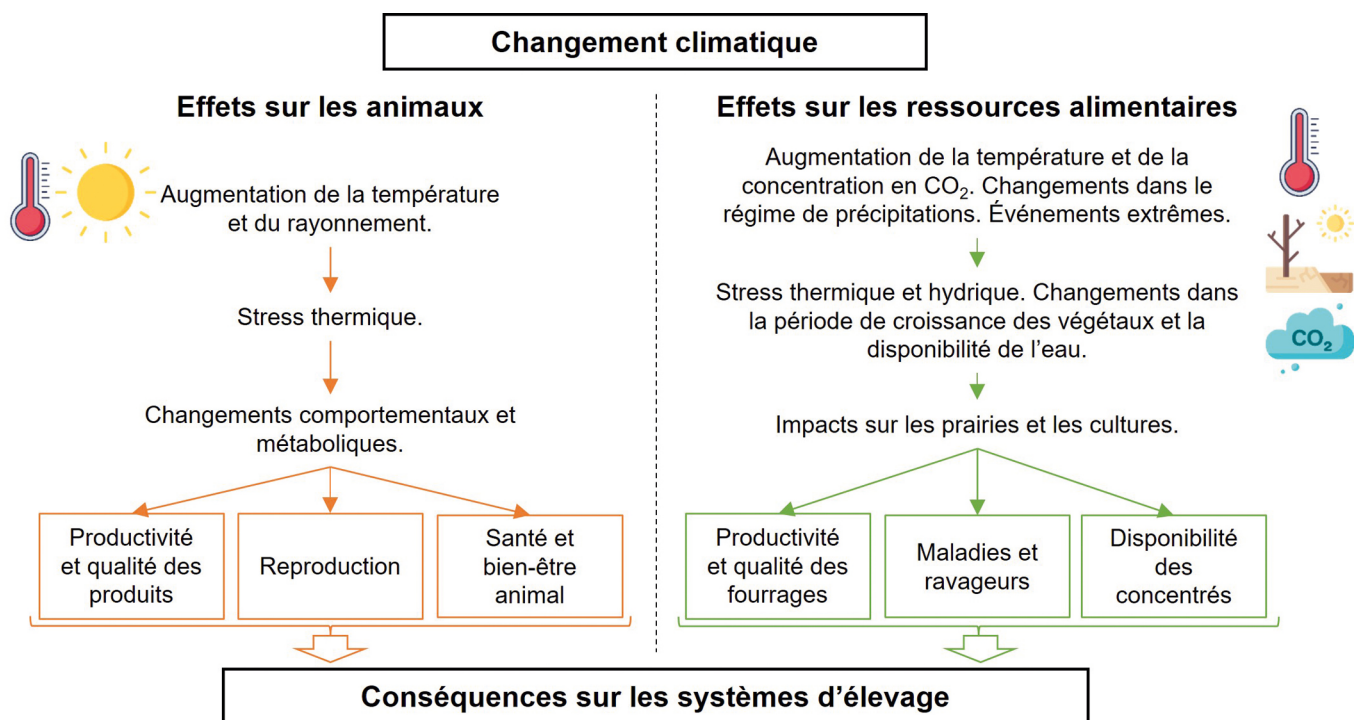
de la répartition des précipitations au cours de l'année, et d'une hausse de la fréquence d'événements extrêmes (sécheresses, inondations, canicules, fortes fluctuations interjournalières), avec une disparité régionale de ces différents impacts : par exemple, les vagues de chaleur et canicules seront exacerbées sur le pourtour méditerranéen, le couloir rhodanien et la vallée de la Garonne (Soubeyroux *et al.*, 2020).

Pour tous les ruminants, le changement climatique aura des conséquences directes mais aussi indirectes, *via* les répercussions sur leurs ressources alimentaires, la disponibilité en eau et sur le risque d'extension ou d'émergence de maladies, voire d'épizooties.

Pour les éleveurs, ces nombreux impacts nécessitent une organisation du travail différente et souvent des coûts supplémentaires. Dans une enquête menée auprès d'éleveurs du bassin charolais, Petit *et al.* (2023) soulignent le temps de travail supplémentaire requis lors d'étés secs pour l'affouragement et l'abreuvement, estimé à deux à quatre heures supplémentaires par jour. Ils rapportent en outre le stress causé par le risque de ne pas pouvoir alimenter ou abreuver ses animaux, et de façon plus générale les inquiétudes et la charge mentale que génère la multiplication des aléas climatiques.

¹ Cette synthèse a fait l'objet d'une présentation aux 27^e journées Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, les 4-5 décembre 2024 à Paris (Madrid *et al.*, 2024).

Figure 1. Conséquences du changement climatique sur les systèmes d'élevage, d'après Mullender *et al.* (2017) (illustrations : www.flaticon.com).



1. Le changement climatique impacte les systèmes d'élevage dans leur ensemble

Les impacts du changement climatique sur les systèmes d'élevage sont nombreux et concernent toutes leurs composantes (figure 1). Bien les connaître et les évaluer est une étape préalable à l'élaboration de leviers et stratégies d'adaptation des élevages.

■ 1.1. Impacts sur les animaux

L'étude de l'évolution des performances des animaux en fonction du THI (indice température-humidité), ou de la température ambiante, montre qu'il existe une variabilité de la réponse au stress de chaleur, tant sur le niveau du THI pour lequel le stress de chaleur apparaît, que sur l'intensité de la réponse à ce stress. Cette variabilité est due, entre autres facteurs, à la race, à l'acclimatation ou aux conditions de logement. Ainsi, Carabaño *et al.* (2020) ont montré, à partir des performances de production laitière, que les races ovines Lacaune (en France), Latxa et Assaf (Pays basque et Ouest de l'Espagne)

semblent plus sensibles au stress de chaleur que les races Manchega (Centre de l'Espagne) et Chios (en Grèce). En Espagne, Menéndez-Buxadera *et al.* (2012) ont estimé, pour deux races caprines locales, que le stress de chaleur conduisait à une perte de 1,9 à 3,1 % de la production annuelle de matières grasses et protéiques. En France, le stress de chaleur a un effet équivalent sur les performances de production des races bovines laitières Holstein, Montbéliarde et Normande (effet à court terme sur la production journalière de -5 à -6 % entre le THI moyen et un THI de stress thermique pour la quantité de lait, et de -9 à -12 % pour les quantités de matières grasses et protéiques) (Vinet *et al.*, 2023). Il n'en est pas de même pour les performances de reproduction pour lesquelles la race Holstein est plus pénalisée que les deux autres races par un stress de chaleur (-8 points de réussite à l'insémination en situation de stress de chaleur au moment de l'insémination vs -2 et -3 points pour les races Montbéliarde et Normande respectivement) (Vallée *et al.*, 2024). De même, l'épisode de canicule survenu en France en août 2003 a permis de mesurer l'impact de fortes chaleurs sur la fertilité après insémination de l'espèce caprine avec

une baisse significative estimée entre 9,2 et 13,1 % selon les races (Alpine vs Saanen) et majorée sur la période de canicule (de Crémoux *et al.*, 2005). Le stress de chaleur perturbe de nombreuses étapes de la reproduction des ruminants, à la fois chez les femelles et chez les mâles, avec des effets qui peuvent être visibles plusieurs jours ou mois après son occurrence.

L'impact sur les performances des animaux peut être en lien avec le niveau des interactions entre génétique et environnement climatique. Chez les ovins, les variances génétiques estimées pour les caractères de production sont pratiquement les mêmes le long de l'échelle du THI en race Manchega, alors qu'elles diminuent avec l'augmentation du THI en race Latxa (Carabaño *et al.*, 2021). Les corrélations génétiques estimées pour un même caractère entre valeurs de THI révèlent de substantielles interactions entre génotype et environnement en race Latxa, ce qui semblerait être aussi le cas en France pour la race ovine Lacaune (Astruc *et al.*, 2022). Chez les vaches laitières françaises, les interactions entre génétique et environnement climatique sont faibles mais des effets d'échelle sont tout de même observés. Ainsi, la contrainte liée

au stress de chaleur va réduire les différences entre animaux pour les caractères de production alors qu'elle va les accroître pour les caractères fonctionnels (Vinet *et al.*, 2023, 2024a).

Le stress de chaleur augmente la prévalence de nombreuses pathologies qu'elles soient métaboliques (dont les stéatoses hépatiques et les acidoses ruminales), ou infectieuses, dont les métrites ou les mammites (Bernabucci *et al.*, 2010 ; Becker *et al.*, 2020). L'augmentation de l'incidence des mammites chez la vache laitière est cohérente avec celle des cellules somatiques du lait lors de stress thermiques (Hammami *et al.*, 2013 ; Vinet *et al.*, 2023). Différentes études suggèrent un impact des fortes températures, à la fois sur la détérioration de la réponse immunitaire face aux infections, marquée en particulier par une diminution de la vitesse de recrutement cellulaire (Salama *et al.*, 2020), mais aussi sur l'exposition des animaux en raison de conditions environnementales favorables à la multiplication des agents pathogènes (Sevi & Caroprese, 2012). Ainsi, Dietrich *et al.* (2023) évoquent une augmentation des risques d'infection et d'intoxication d'origine alimentaire en relation notamment avec un accroissement des niveaux de contamination des denrées ou le recours croissant à des sources d'eau non potable en cas de raréfaction de l'eau. Selon Black et Nunn (2009), les changements climatiques et environnementaux contribuent à la propagation, l'émergence ou la réémergence de maladies animales infectieuses, parasitaires et vectorielles (Duvallat & Boireau, 2015), en raison notamment de l'évolution ou de l'extension des aires de distribution des vecteurs, des hôtes intermédiaires ou des parasites, consécutive à l'évolution des biotopes, la réduction de la durée des périodes d'inactivité vectorielle, ou la modification des zones et périodes à risque. Un rapport du Centre d'études et de prospective (2023) souligne l'impact attendu des changements climatiques sur le mouvement des animaux sauvages qui : i) se rapprochent des élevages et des habitations lors de pénuries alimentaires ou en eau, augmentant ainsi le

risque de transmission de maladies, et ii) modifient leurs migrations, amplifiant l'étendue de certaines épidémies. L'actualité sanitaire récente témoigne de la réalité de ces émergences : apparition et extension sur le territoire français de la maladie hémorragique épizootique ; atteintes des élevages par le virus de Schmallenberg et ceux de la fièvre catarrhale ovine ; cas sporadiques aux États-Unis d'infection humaine au contact de bovins atteints de grippe aviaire (H5N1) (Centers for Disease Control and Prevention, 2024). Certaines de ces maladies ont des impacts en termes de santé publique. Toutes ont des implications économiques majeures directes (impacts cliniques immédiats ou différés) ou indirectes (restriction de mouvements, lien avec les pays membres ou les pays tiers).

Enfin, le stress de chaleur peut avoir des effets à très long terme. Une expérimentation sur vaches laitières en Floride a ainsi montré que le stress de chaleur pendant la gestation de la mère avait des conséquences sur la survie à deux ans et sur la production laitière des filles à naître (Laporta *et al.*, 2020). En France métropolitaine, l'étude de l'effet de THI élevés pendant la gestation de vaches laitières ne montre que peu de conséquences sur les performances des génisses et vaches nées de ces gestations (Vinet, *et al.*, 2024b). Cependant, il est possible que des effets marqués apparaissent au-delà d'un seuil de THI encore peu ou pas rencontré en France.

■ 1.2. Impacts sur les fourrages

a. Différents paramètres climatiques impactent le développement des végétaux

Parmi les paramètres modifiés par le changement climatique, les plantes sont sensibles aux variations de température, à la disponibilité de l'eau et à la concentration en CO₂, avec d'importantes interactions entre ces trois facteurs (Soussana, 2013). Chaque espèce présente une plage de température à l'intérieur de laquelle elle peut se développer, avec une température

optimale. Ainsi, les conséquences d'une augmentation de température sont variables, selon son ampleur, la température initiale et l'espèce. Le déficit hydrique, qu'il soit occasionné par de faibles précipitations et/ou par une évapotranspiration élevée, a nécessairement un impact négatif sur la croissance des plantes. L'excès d'eau pénalise également les rendements et retarde la phénologie. La concentration en CO₂ impacte positivement la photosynthèse et réduit la transpiration au niveau des feuilles. La combinaison de ces différents paramètres et leur évolution impactent les plantes de façon différente selon leur type de métabolisme.

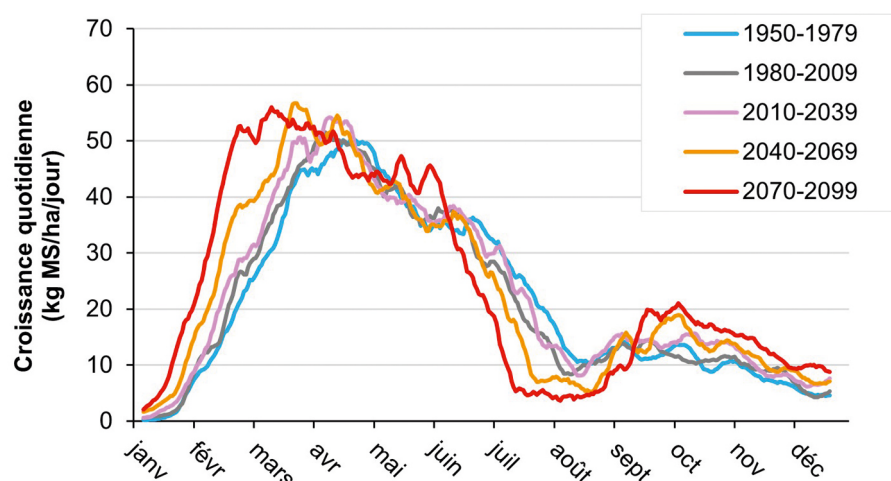
b. Une saisonnalité modifiée et des conditions d'accès qui restent variables

L'utilisation de modèles permet de simuler des variations simultanées des différents paramètres climatiques. Pour la prairie, les auteurs constatent (Moreau *et al.*, 2020b), quelle que soit la situation initiale, une déformation de la courbe de croissance de l'herbe, qui devient plus précoce au printemps et plus tardive en automne-hiver mais avec une accentuation du ralentissement voire un arrêt de la croissance estivale (figure 2).

L'analyse des données issues des modèles climatiques montre une avancée du départ en végétation au printemps plus marquée en montagne qu'en plaine (figure 3), et ce sans prendre en compte la réduction de la période d'enneigement, qui contribue également à l'allongement de la durée de végétation. Le fonctionnement des élevages de montagne, ou transhumants en montagne, qui échelonnent l'utilisation des surfaces en fonction de leurs périodes de production, devra tenir compte de ces nouvelles conditions.

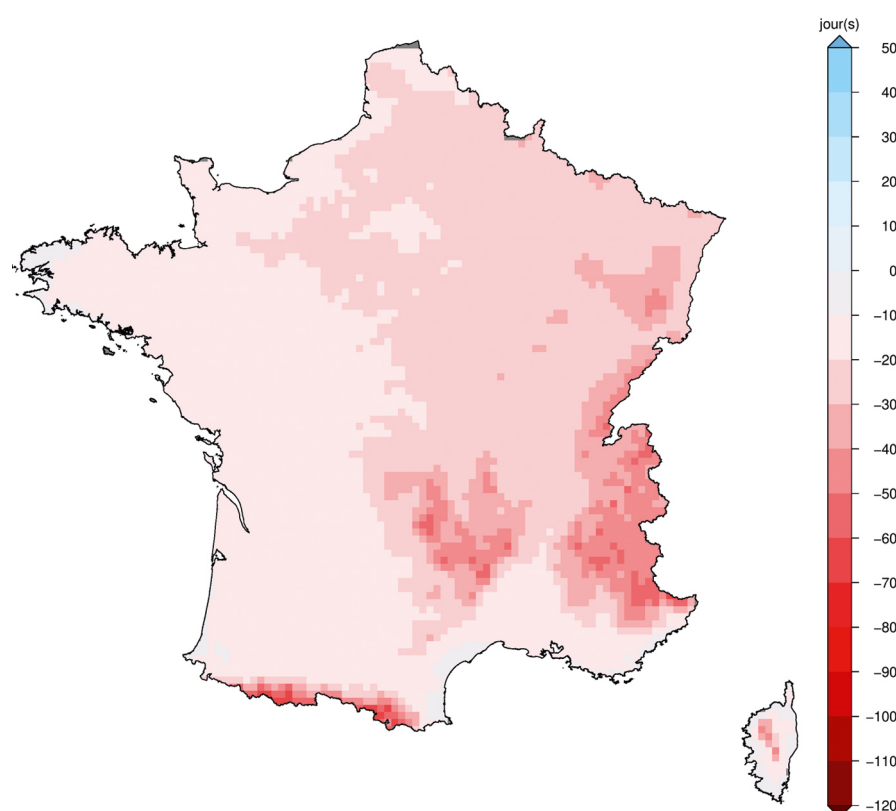
La variabilité interannuelle est importante, pour les prairies comme pour les surfaces pastorales. Les suivis du dispositif Alpagnes sentinelles (Crouzat *et al.*, 2021) mettent en évidence une diversité de comportements des milieux pastoraux face aux conditions climatiques, ainsi qu'une variabilité interannuelle moyenne de

Figure 2. Exemple d'évolution moyenne de la courbe de croissance de l'herbe, dans le Tarn.



Simulations réalisées avec STICS pour le projet Climalait (Moreau et al., 2020b).

Figure 3. Écart de la date de reprise de végétation pour la prairie, entre l'horizon 2071-2100 et 1976-2005, pour un scénario sans politique climatique (RCP 8.5).



Médiane de l'ensemble des modèles climatiques disponibles dans le jeu de données Drias-2020 (<https://drias-climat.fr>). La date de reprise en végétation est estimée par la date d'atteinte d'un cumul de 200 °C base 0 à partir du 1^{er} janvier.

l'ordre de 20 % sur la première pousse des pelouses d'alpage, avec des extrêmes à plus ou moins 50 à 60 % du niveau de production moyen. Cette variabilité est encore plus marquée sur les pelouses sèches des Préalpes méditerranéennes, remettant en question

les notions d'« année moyenne » et de « variation courante » (Dodier et al., 2023). Une expérimentation menée sur un parcours du Causse du Larzac, dans des sols superficiels à faible réserve en eau (Cardozo et al., 2024) met en évidence les effets cumulatifs

d'une succession d'années sèches : la biomasse de printemps diminue progressivement, du fait de mortalité estivale des plantes, notamment vivaces, les années précédentes.

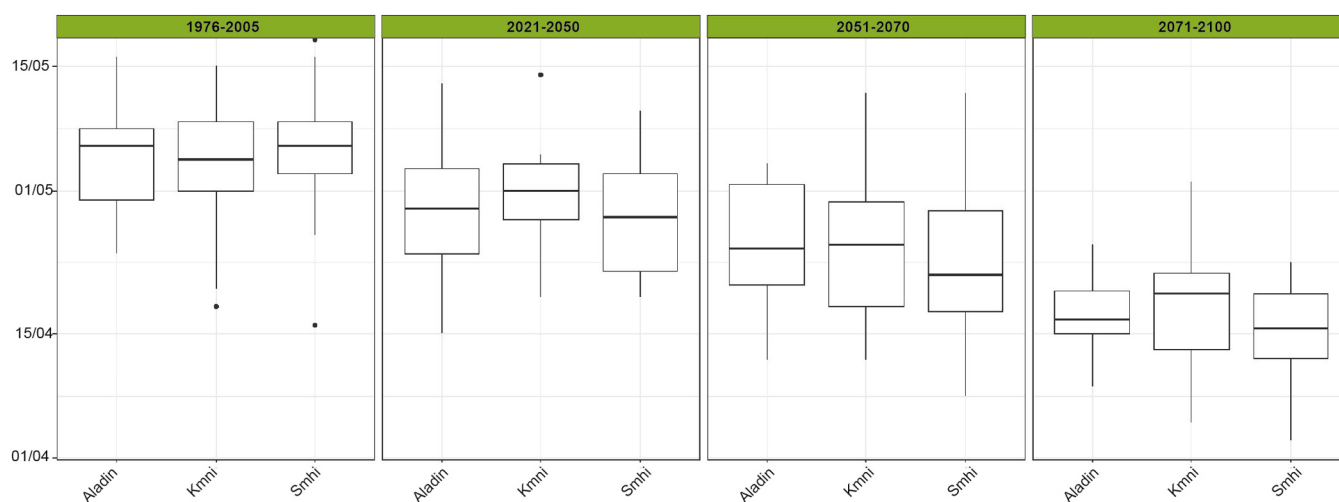
Au total sur l'année, les modèles montrent une quantité d'herbe équivalente, mais sa répartition entre les saisons change et le caractère « explosif » de la pousse de printemps tend à s'accroître, ce qui laisse présager de difficultés de gestion pour les éleveurs : augmentation des surfaces à faucher au printemps, sur une période courte pour ne pas altérer la qualité des fourrages récoltés ; dans les systèmes pâturant, besoin accru d'affouragement en été pour compenser la moindre disponibilité de l'herbe pâturable.

L'accessibilité de la ressource, liée à la portance des sols, reste cruciale pour valoriser les prairies, particulièrement lorsque la pousse de l'herbe est explosive (au printemps) ou se prolonge en arrière-saison. Des indicateurs agro-climatiques calculés à partir des données issues de modèles climatiques montrent une avancée des dates d'atteinte des stades-clés (figure 4), avec des conditions de portance variables autour de ces stades dans tous les modèles, quelle que soit la période de temps considérée (figure 5).

La qualité de l'herbe devrait également varier, avec une diminution de la teneur en azote et une augmentation de la teneur en fibres (Dellar et al., 2018), qui pourrait être compensée par une augmentation de la part de légumineuses dans les prairies multi-espèces (Dumont et al., 2015).

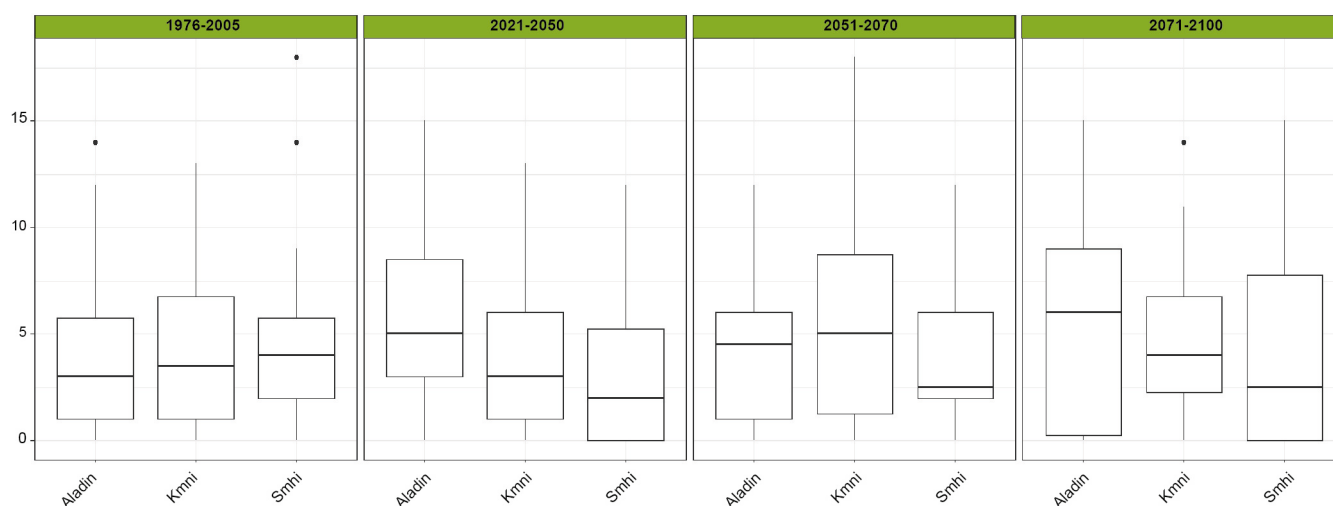
Enfin, les évolutions climatiques interagissent avec d'autres facteurs susceptibles de faire évoluer les prairies. Dans le cas des prairies permanentes, Moulin et Calanca (2021) mettent en évidence des modifications de la composition botanique dans un futur lointain, différentes selon les modes de gestion. En alpage, la composition botanique reste relativement stable jusqu'à présent, mais les adaptations de pratiques pastorales en réaction aux changements climatiques (dates et durées d'utilisation, effectifs...) vont entraîner

Figure 4. Date d'atteinte du stade « ensilage précoce », pour l'exemple de Coutances (50), pour quatre périodes de temps et trois modèles climatiques, dans le cadre du scénario RCP 8.5.



Le stade ensilage est estimé par le cumul de 700 °C en base 0 à partir du 1^{er} février.

Figure 5. Conditions de portance autour du stade « ensilage précoce », à Coutances (50), pour quatre périodes de temps et trois modèles climatiques, dans le cadre du scénario RCP 8.5.



Les conditions de portance sont évaluées dans un intervalle de 10 jours avant et 10 jours après la date d'atteinte du stade « ensilage précoce », par le nombre de jours suivant un épisode de quatre jours consécutifs sans précipitations, avec moins de 30 mm de précipitations cumulées dans les trois jours ayant précédé cet épisode de quatre jours consécutifs sans précipitations.

des évolutions de végétation (Crouzat *et al.*, 2021).

Concernant le maïs, des travaux de modélisation portant sur le maïs grain montrent qu'en Europe, à indice de précocité et dates de semis constants, les rendements en situation non irriguée seraient en baisse. Cependant, en appliquant les règles de décision habituellement suivies par les agriculteurs pour choisir leurs variétés et dates de semis, les rendements pourraient augmenter légèrement, de l'ordre de 5 % (Parent *et al.*, 2018).

2. De nombreux leviers à disposition des filières d'élevage

■ 2.1. Rechercher des animaux mieux adaptés

a. Améliorer la tolérance à la chaleur des animaux

Une des voies d'amélioration de la tolérance à la chaleur des animaux est la sélection intrarace. Elle nécessite au préalable de caractériser la réponse individuelle au stress thermique, à partir

d'indicateurs faciles à mesurer sur un grand nombre d'animaux. Les calculs d'index génétiques de tolérance à la chaleur sont donc actuellement réalisés à partir de mesures indirectes du stress de chaleur basées sur l'étude de l'évolution des performances en fonction du THI. L'idée sous-jacente est que, lorsque l'environnement devient suboptimal, les performances commencent à diminuer et ce de façon différente suivant les individus. Cette intensité de baisse des performances constitue un critère de sélection génétique d'ores et déjà utilisé en Australie (Nguyen *et al.*, 2016).

La sélection telle qu'elle est réalisée actuellement fragilisera les animaux si les objectifs de sélection n'intègrent pas une part de tolérance à la chaleur. En effet, les animaux qui ont actuellement les plus forts potentiels de production laitière seront les plus affectés par la hausse des températures (Finocchiaro *et al.*, 2005 ; Serradilla *et al.*, 2018 ; Carabaño *et al.*, 2021 ; Vinet *et al.*, 2023). Chez les vaches laitières, cette sensibilité accrue des fortes productrices affecte à la fois leur production et leur fertilité, avec une diminution des taux de conception plus prononcée lors de stress de chaleur (Vinet *et al.*, 2024a). Les prévisions sont moins pessimistes pour l'incidence des mammites puisque les animaux avec les meilleures aptitudes de résistance aux mammites actuellement seront les moins pénalisés par le stress de chaleur. Mais sans efforts de sélection supplémentaires sur ce caractère à THI élevé, les performances seront dégradées, ne serait-ce que par le seul effet direct de l'augmentation des températures sur les performances de santé.

Le croisement avec des animaux de races tropicales connues pour leur thermotolérance pourrait constituer une autre voie d'amélioration génétique de la tolérance à la chaleur (Gaughan *et al.*, 2008 ; Fedrigo *et al.*, 2021). Celle-ci aurait pour conséquence une diminution des niveaux de production probablement incompatible avec les objectifs de maintien de la taille du cheptel et de réduction de l'empreinte carbone de l'élevage. Cependant ce type de croisement pourrait s'avérer utile pour apporter, outre une meilleure tolérance à la chaleur, des aptitudes de résistance à des pathologies peu ou pas présentes actuellement en France métropolitaine mais dont la prévalence pourrait augmenter avec le changement climatique. Certains croisements pourraient être plus simples à développer, tels que les croisements entre des animaux de race Holstein et de races Jersiaise ou Brune, plus aptes à réguler leur température corporelle en cas de températures ambiantes élevées (Correa-Calderon *et al.*, 2004 ; Bryant *et al.*, 2007). Le croisement permet aussi d'introduire des mutations favorables, telle que *Slick* (qui

confère des poils courts et fins aux animaux porteurs et permet d'augmenter leur capacité de perte de chaleur corporelle), comme cela a été fait en Holstein, grâce au croisement avec la race Senepol (Dikmen *et al.*, 2014).

Enfin, certains auteurs ont évoqué l'édition du génome comme un possible levier génétique pour introduire plus rapidement des mutations conférant une meilleure tolérance à la chaleur (Laible *et al.*, 2021 ; Camargo *et al.*, 2022). Cette technologie ne peut pour le moment s'appliquer qu'à des déterminismes simples et est peu adaptée aux caractères régis par de nombreuses régions du génome, comme le sont généralement les caractères de tolérance. Par ailleurs, elle pose des problèmes éthiques, réglementaires et d'acceptabilité encore non résolus (Ducos *et al.*, 2017).

b. Améliorer les autres caractères

Pour faire face aux conséquences du changement climatique sur leur environnement, les ruminants devront aussi s'adapter en étant plus efficaces, robustes et résilients. Les ressources alimentaires devenant plus variables en quantité et qualité, les animaux devront avoir une meilleure efficacité dans la valorisation de ces ressources afin d'assurer les fonctions de production et reproduction. Pour évaluer cette efficacité, l'ingestion alimentaire est un paramètre clé (Taussat *et al.*, 2023). Plusieurs études récentes ont ainsi cherché à identifier des critères approchés d'efficacité alimentaire (Chassier *et al.*, 2022 ; Machefer *et al.*, 2023), des critères corrélés comme le niveau et la dynamique des réserves corporelles (capacité d'utilisation et de dépôt des réserves corporelles) (Macé *et al.*, 2019), ou bien encore des prédicteurs sanguins (Touitou *et al.*, 2022 ; Cantalapiedra-Hijar *et al.*, 2024).

L'autre pilier de l'adaptation des animaux est leur robustesse. Elle peut être évaluée de façon globale par la longévité fonctionnelle, c'est-à-dire par l'aptitude des animaux à retarder les réformes involontaires (non liées à un niveau de performance), ce qui permet de juger de leurs qualités d'élevage

et d'adaptation tout au long de leur carrière. En France, des évaluations génétiques de la longévité sont réalisées depuis de nombreuses années pour les bovins (Ducrocq, 2005 ; Venot *et al.*, 2013). Ces évaluations reposent sur un modèle d'analyse de survie qui considère la durée de vie productive des vaches ajustée pour leur production (production laitière ou nombre de vêlages selon la finalité de la race). En petits ruminants, des travaux sur ce critère ont été entrepris (Palhière *et al.*, 2018 ; Astruc *et al.*, 2021 ; Buisson *et al.*, 2022) et devraient aboutir rapidement à une évaluation génomique en ovins et caprins laitiers.

La génétique permet aussi d'améliorer la résistance et la résilience à certaines maladies ou pathogènes qui pourraient se développer dans l'avenir. C'est le cas par exemple de la sélection pour la résistance aux nématodes gastro-intestinaux, enjeu important pour les ruminants au regard des effets négatifs du parasitisme sur la santé et la production. Des travaux débutés en races ovines laitières des Pyrénées ont permis de démontrer la possibilité de phénotyper les jeunes mâles élites en centre d'élevage et de proposer une sélection effective sur ce caractère (Aguerre *et al.*, 2018 ; Astruc *et al.*, 2024).

■ 2.2. Protéger les animaux du stress thermique

L'amélioration des conditions de vie des animaux permet de les protéger des fortes chaleurs. Au pâturage, la présence d'arbres fait diminuer la température de 3 à 6 °C aux heures les plus chaudes de la journée (Moreau *et al.*, 2020a). En bâtiment, la réduction du rayonnement direct et indirect et l'amélioration de la ventilation (naturelle puis mécanique) sont des leviers d'atténuation du stress thermique (Capdeville & Fagoo, 2020).

Lors des épisodes de fortes chaleurs, les besoins en eau pour l'abreuvement des animaux augmentent pour assurer la thermorégulation, et plus encore quand il fait sec et que l'éleveur doit distribuer des fourrages secs en remplacement d'herbe pâturée (Boudon *et al.*, 2013).

■ 2.3. Assurer l'équilibre du système fourrager

En France, et plus largement en Europe, les systèmes d'alimentation des ruminants sont basés sur les fourrages produits sur l'exploitation, pâturés et conservés. Pour la plupart des systèmes fourragers, le couple herbe-maïs en constitue le socle, avec une partition qui varie de 0 à 100 % et inversement. Le changement climatique ne devrait pas bouleverser cet équilibre, mais va sans doute en modifier la composition et la répartition temporelle dans l'utilisation (Agabriel *et al.*, 2011).

Pour s'affranchir des aléas climatiques existants et à venir, des systèmes d'élevage, intégralement contrôlés, basés sur les cultures irriguées, les fourrages stockés, le maintien en bâtiment sans accès au pâturage, existent déjà dans certains pays du sud de l'Europe (Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, 2023). Ces systèmes basés sur un fort potentiel de production par hectare et par animal seront sans doute une option minoritaire en France, compte tenu de leurs coûts de production excessifs, de leur dépendance aux protéines et des problèmes de disponibilité et de compétition d'accès à l'eau, et sans compter leur acceptabilité fortement discutée par des citoyens militant pour une autre agriculture. Mais ces systèmes pourront localement être une réponse adaptative pour s'affranchir des incertitudes climatiques du milieu, dans les contextes où l'irrigation reste possible et le remboursement des emprunts (par exemple pour l'achat de robots de traite) élevé.

Il est probable que, dans la grande majorité des cas, l'adaptation sera moins radicale, moins dépendante de l'irrigation et basée à la fois sur la diversité des fourrages, la cohérence de leurs cycles de production en regard des périodes climatiques difficiles, l'utilisation plus importante de fourrages conservés, et la mise en adéquation de la demande alimentaire du troupeau avec la disponibilité fourragère, notamment pâturée. Enfin, dans les systèmes exclusivement basés sur la prairie, l'adaptation sera aussi opportuniste, compte tenu des alternances plus fréquentes de périodes

favorables et défavorables à la croissance de l'herbe et à la constitution de reports sur pied de qualité, pour limiter la nécessité de stocks, plus coûteux.

a. L'adaptation du système fourrager repose sur une diversité de leviers à combiner

Pour permettre une production fourragère quels que soient les aléas climatiques tout en limitant l'utilisation d'intrants tels que les engrais minéraux azotés ou l'eau d'irrigation, plusieurs stratégies peuvent être mises en place, que les systèmes soient basés sur le pâturage ou sur les stocks, et qu'ils privilégient l'herbe ou le maïs (Pottier *et al.*, 2007 ; Lemaire, 2008 ; Novak *et al.*, 2018).

La première stratégie consiste à utiliser des couverts permettant de valoriser au mieux l'eau pluviale. Les prairies pluriannuelles sont particulièrement adaptées pour cela : grâce à leur couvert déjà en place, elles peuvent démarrer rapidement leur croissance dès que les conditions hydriques redeviennent favorables. Avec l'augmentation des températures, elles pourront fournir de l'herbe plus tôt au printemps et plus tard à l'automne.

Pour les cultures annuelles, les sécheresses estivales peuvent être esquivées avec des espèces semées à l'automne et récoltées au printemps. Les méteils associant des céréales et des légumineuses sont particulièrement intéressants pour cela, et leur composition peut être adaptée aux divers types d'animaux à nourrir (Émile *et al.*, 2016). Des intercultures suivant une céréale à paille et précédant un maïs ou un sorgho (et donc les sécheresses estivales) peuvent également être utilisées comme fourrage pâturé ou récolté. Il peut s'agir de ray-grass d'Italie, espèce très productive et précocée, mais dont l'inconvénient majeur est de réduire la réserve en eau des sols pour la culture suivante (Masse & de Launay, 2018). Le trèfle violet est aussi intéressant, d'autant plus qu'il aura été semé à l'automne en même temps que le blé, car il sera déjà en place et productif dès le début d'été, après la moisson.

Contrairement à la stratégie qui consiste à esquisser les périodes défavorables, une deuxième stratégie vise à utiliser des plantes ayant mis en place des stratégies d'évitement en condition de déficit hydrique (Itier, 2008) qui leur permettent d'être plus tolérantes à la sécheresse.

Pour les prairies, il semble possible, dans une certaine mesure, de faire confiance à la plasticité des plantes et à la capacité d'adaptation phénotypique des graminées notamment pour développer des mécanismes de résistance, de protection leur permettant de repartir en situations plus favorables (Durand *et al.*, 2013 ; Durand & Bloor, 2022), en particulier après les pluies automnales. Certaines espèces ont développé un enracinement important, telles que chicorée, luzerne, dactyle, fétuque, ou peuvent arrêter leur croissance en cas de déficit hydrique prononcé et repartir dès l'arrivée des pluies (p. ex. plantain lancéolé). Certaines populations méditerranéennes ont également la capacité d'être dormantes en été, avec une croissance plus élevée en automne, hiver et début de printemps (Litrico *et al.*, 2016).

Parmi les espèces annuelles, les betteraves fourragères ont la capacité de supporter des fortes chaleurs tout en conservant une très bonne valeur énergétique, et peuvent fournir un fourrage à pâturer d'août à l'automne-hiver.

Parmi les graminées tropicales, les sorghos résistent mieux aux fortes températures que le maïs et leur croissance peut se prolonger jusqu'en octobre. La présence du gène *BMR*, améliorant la digestibilité de la lignine dans certaines variétés, les rend d'aussi bonne valeur nutritive qu'un maïs (Émile *et al.*, 2009). En revanche, le sorgho doit être semé plus tard qu'un maïs, et il sera plus sensible à un déficit en eau du sol à la fin du printemps. Les millets et le moha peuvent également être utilisés (Novak *et al.*, 2018).

Enfin, certains arbres, arbustes ou lianes, dont le feuillage est encore vert en été, voire en début d'automne, pourraient contribuer à sécuriser l'autonomie fourragère des exploitations. Selon des récentes études, la valeur

nutritive de leurs feuilles en été serait aussi bonne que celle de fourrages classiques (Novak *et al.*, 2020a).

Les aléas climatiques pouvant être de nature variée (fortes pluies, canicules, sécheresses, gel, grêle...) il est important de combiner plusieurs leviers pour sécuriser l'autonomie fourragère. Diversifier les espèces fourragères, leurs variétés, les périodes de semis et de récolte est un moyen efficace pour y arriver. Il faut cependant veiller à ce que la conduite de ces systèmes diversifiés n'en devienne pas trop complexe.

Par ailleurs, la diversification ou la flexibilité dans la gestion des couverts reste un levier important pour faire face aux aléas. Cette flexibilité est utilisée pour certaines cultures dites « à double fin » qui peuvent être récoltées en grain ou en ensilage en fonction des besoins et des conditions climatiques de l'année, comme le maïs ou les méteils.

Dans le cas des prairies, valoriser l'herbe par le pâturage en automne, en début de printemps, voire en hiver, est parfois difficile compte tenu des excès de pluviométrie, et du risque de dégradation des prairies associé au piétinement. Il importe de mettre en place des techniques de pâturage moins dommageables, telles que développées en Irlande. À titre d'exemple, le *On/Off grazing* (Kennedy *et al.*, 2009 ; Pérez-Ramírez *et al.*, 2009) qui consiste à limiter le temps d'accès des vaches laitières à la parcelle à deux à trois heures après la traite, matin et soir, sans apport de fourrages à l'auge, incite les vaches à pâturer intensément (plus de 85 % du temps d'accès) sans trop endommager la prairie.

D'autre part, la modification de la saisonnalité de la croissance de l'herbe laisse anticiper la possibilité de récoltes plus précoces des ensilages d'herbe, voire des foin, associée à une application plus précoce et parcimonieuse de la fertilisation azotée. L'augmentation de l'intensité et de la fréquence des aléas climatiques incite à prévoir également des stocks de report (notamment issus des prairies) ou sur pied. Ces derniers ne sont envisageables qu'avec des prairies riches en légumineuses pour que

la perte de qualité soit réduite (Novak *et al.*, 2018) et avec des graminées susceptibles de résister, même sans croître, aux plus fortes températures.

b. La conduite du troupeau est également à ajuster

L'adaptation des systèmes d'élevage des ruminants passe, toujours, par la recherche d'une cohérence temporelle entre l'offre et la demande alimentaire des troupeaux.

Les conséquences du changement climatique sont telles qu'une baisse de la disponibilité fourragère annuelle est souvent observée. En conséquence, une des clefs d'adaptation est de réduire le chargement global afin de mettre en cohérence les (nouvelles) potentialités du milieu avec les besoins en fourrages des troupeaux. Cette réduction du chargement peut passer par une augmentation de la surface fourragère avant d'envisager la réduction temporaire ou définitive du cheptel.

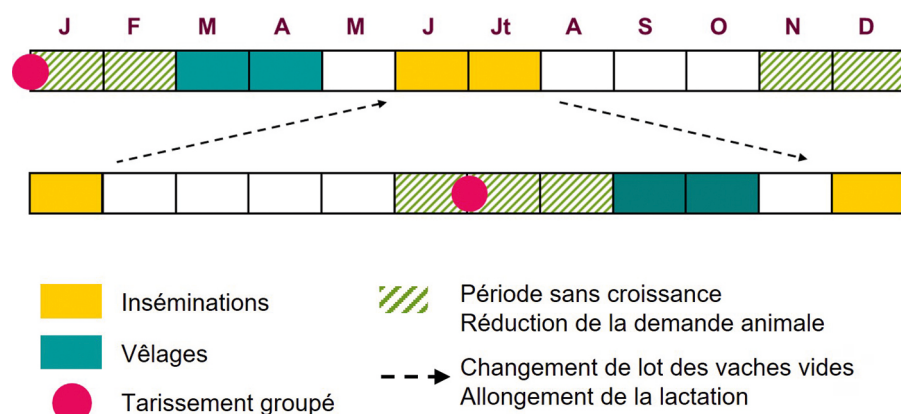
Diverses clefs d'adaptation dans la conduite des troupeaux sont disponibles et ont été décrites par Pottier *et al.* (2007). Chez les animaux non adultes, elles passent par la modulation des croissances, associée à l'alternance de périodes d'abondance et de pénurie fourragère, en mobilisant le potentiel de la croissance compensatrice. Chez les femelles de renouvellement, retarder la mise à la reproduction peut permettre de pallier une période fourragère défavorable. En système allaitant, l'application d'un sevrage plus précoce permet, grâce au tarissement, de réduire la demande alimentaire des mères et de réserver les meilleurs fourrages aux jeunes animaux sevrés.

Enfin, dans les systèmes herbagers des zones tempérées, où la pratique des naissances en fin d'hiver est recommandée pour maximiser la part de l'herbe pâturée dans la ration annuelle (Delaby & Horan, 2021), la pratique d'une double saison de vélages/agnelages, rigoureusement espacée de six mois, permet de limiter la demande alimentaire, tant en quantités qu'en qualité, aux deux saisons problématiques que sont l'hiver et l'été (figure 6). Avec des mises bas étalées sur deux mois, en mars-avril et

en septembre-octobre, et une période de tarissement stricte, la moitié du troupeau est tarie en été et en hiver. Cela permet de réduire le chargement sur la surface accessible aux animaux en lactation, et de leur réserver les meilleurs fourrages en période hivernale. Cette pratique a d'autres avantages, avec par exemple, une première mise bas possible à 18 mois en ovin ou à 30 mois en bovin, ce qui réduit la demande alimentaire des génisses ou agnelles de renouvellement, mais se heurte parfois aux besoins de l'aval de certaines filières et, pour les ovins, demande une certaine technicité dans la maîtrise de la reproduction en contre-saison.

L'équilibre du système fourrager peut ainsi être assuré en jouant sur les deux tableaux que sont l'offre fourragère et la demande animale. À cet égard, les pratiques mises en œuvre dans les systèmes d'élevage agropastoraux méditerranéens peuvent être une source d'inspiration, ces derniers étant habitués à composer avec des périodes de végétation contrastées et aléatoires, en s'appuyant sur les aptitudes physiologiques, comportementales et adaptatives des animaux : comportements alimentaires différents selon les espèces, capacité d'apprentissage au sein du troupeau, variabilité individuelle de certains caractères comme la dynamique de mobilisation et reconstitution des réserves corporelles (Lauvie *et al.*, 2024). Les pratiques et stratégies pastorales permettent aux éleveurs de valoriser et faire coïncider cette diversité animale et végétale. Ainsi, ils s'appuient sur la diversité des milieux et des végétations, pour y associer les pratiques de pâturage adaptées : dissociation de la période de pousse de l'herbe et de la période de consommation par le report sur pied, décalage de la pousse par le déprimage ou l'étêtage, gestion du pâturage par saisons pratiques avec des surfaces de base et des surfaces de sécurité utilisées lorsque la ressource n'est pas suffisante sur la surface de base ou lorsque la saison pratique se prolonge (ces surfaces de sécurité étant généralement des surfaces de base à un autre moment). La gestion du troupeau apporte des sécurités supplémentaires : mobilisation des réserves corporelles des animaux,

Figure 6. Fonctionnement d'un système bovin avec deux saisons de vêlage au printemps et en automne, permettant de limiter les besoins alimentaires lorsque la disponibilité de l'herbe est moindre, en hiver et en été.



réajustement de l'allotement ou modification du calendrier d'élevage en cours de saison (Launay *et al.*, 2013). La mobilité est également une caractéristique de ces systèmes, avec notamment la pratique de la transhumance qui permet de faire face au déficit fourrager estival en plaine... mais qui devra elle aussi s'adapter aux nouvelles conditions climatiques.

Enfin, au-delà des adaptations techniques évoquées ici, la mise en place de leviers d'adaptation repose sur l'éleveur et se fait en interaction avec ses objectifs et priorités. Ainsi, des leviers portant plus spécifiquement sur l'organisation du travail et les aspects économiques (maîtrise de l'endettement), ou plus largement sur la mise en place d'actions collectives (assurances, échanges entre agriculteurs...) sont à envisager (Rigolot *et al.*, 2019).

3. Accompagner les éleveurs et les filières : méthodes et outils pour élaborer des stratégies d'adaptation, en tenant compte des enjeux de l'atténuation

Les leviers d'adaptation disponibles pour les éleveurs sont généralement nombreux, mais pas nécessairement applicables dans tous les systèmes et parfois incompatibles entre eux. L'enjeu est alors de déterminer, pour un système d'élevage donné, les leviers les

plus pertinents et de construire une stratégie d'adaptation les combinant au mieux. Pour y parvenir, plusieurs méthodes existent, basées sur l'expérimentation, la modélisation ou l'accompagnement des acteurs. Elles nécessitent de s'intéresser également aux problématiques d'atténuation, afin d'éviter les voies d'adaptation qui auraient des conséquences environnementales néfastes.

■ 3.1. L'expérimentation système pour tester des leviers et combinaisons de leviers innovants

Expérimenter à l'échelle du système permet de concevoir et mettre en œuvre des stratégies d'adaptation utilisant des combinaisons de leviers innovants, avec une possibilité de prise de risque supérieure à ce qui pourrait être tenté par des éleveurs. Le suivi réalisé dans ce type de dispositif permet par ailleurs d'évaluer les conséquences des stratégies d'adaptation sur le long terme et à différents niveaux (technique, économique, environnemental...), et de formuler des recommandations sur la conduite du système utiles pour la transposition des résultats en élevage.

Ainsi, depuis 2013, INRAE expérimente l'adaptation d'un système bovin laitier au changement climatique dans une zone de Poitou-Charentes soumise à des sécheresses estivales récurrentes. Toute une série de leviers agroécologiques sont mis en œuvre dans un dispositif nommé OasYs, conduit sans

irrigation et avec très peu d'intrants (Novak *et al.*, 2013). L'adaptation au changement climatique est basée sur la diversification des ressources fourragères, la mise en place de deux périodes de vêlages et l'utilisation de plantes et d'animaux moins sensibles aux températures élevées. L'atténuation du changement climatique a été visée conjointement avec l'adaptation dès la conception du système, et les leviers sont organisés de manière coordonnée à l'échelle de la ferme.

Au niveau du système fourrager, les espèces prairiales et les cultures annuelles sont diversifiées à la fois sur l'assolement et au sein des parcelles (Novak *et al.*, 2018). La plantation de ligneux (haies et agroforesterie intraparcellaire) est un élément supplémentaire de cette diversification, les arbres ayant pour principale vocation de fournir du fourrage et de l'ombrage pour les vaches en été et en début d'automne, mais aussi, avec les prairies, de stocker du carbone dans les sols (Novak *et al.*, 2020b).

La stratégie d'élevage a pour objectif de valoriser le mieux possible ces ressources fourragères par le pâturage afin de limiter la consommation de foin par les tracteurs. Ainsi deux périodes de vêlage, centrées sur les périodes de pousse de l'herbe (printemps et automne), ont été mises en place. Cela permet également de s'adapter à un aléa qui affecterait la pousse de l'herbe sur l'une des deux saisons. Le troupeau est par ailleurs engagé dans un croisement rotatif à trois races (Holstein, Rouge Scandinave, Jersiaise) conduisant à des animaux rustiques qui valorisent mieux les fourrages mis en place sur le système fourrager. Le croisement avec la Jersiaise vise également à limiter l'impact des températures élevées sur la production laitière ainsi qu'à améliorer les taux de matière utile du lait et ainsi limiter la quantité d'eau transportée lors de la collecte du lait, ce qui permet de réaliser des économies de carburant.

Les résultats sont très satisfaisants, tant aux niveaux technique et économique (Novak *et al.*, 2020c) qu'environnemental (Novak *et al.*, 2022), même si tous les leviers mis en place ne sont pas encore pleinement actifs.

■ 3.2. La modélisation pour tester des leviers et combinaisons de leviers

Le recours à la modélisation permet d'évaluer non seulement les impacts du changement climatique sur les systèmes, mais également les conséquences de la mise en place de stratégies d'adaptation sur la production, l'environnement et le réchauffement climatique lorsque les modèles utilisés calculent des indicateurs environnementaux ou lorsqu'ils sont couplés à des outils d'évaluation environnementale. Les modèles agronomiques peuvent être paramétrés pour ajuster l'itinéraire technique (fertilisation, irrigation, utilisation des prairies) de façon automatique en fonction des conditions de l'année modélisée : pour les prairies, on évalue ainsi l'impact du changement climatique sur le nombre de coupes possibles et leurs dates. Ils permettent également d'évaluer certains leviers d'adaptation, en comparant différentes espèces fourragères voire des types variétaux au sein d'une même espèce. Ces résultats sur l'impact du changement climatique et la faisabilité de certains leviers peuvent ensuite servir de support pour alimenter la réflexion des acteurs des filières (Moreau *et al.*, 2020b).

D'autres modèles représentent l'animal ou le troupeau, ils permettent de simuler des adaptations portant sur la conduite d'élevage et l'alimentation. Le couplage de ces modèles aux résultats de modèles agronomiques ou les modèles multi-agents sont une piste de travail intéressante pour évaluer les conséquences des modifications de l'offre fourragère sur la production animale et simuler des stratégies d'adaptation (Lurette *et al.*, 2022 ; Graux *et al.*, 2024).

■ 3.3. Construire ces stratégies avec les éleveurs et leurs filières

De nombreux freins peuvent bloquer l'adaptation des élevages, parmi lesquels la difficulté pour l'éleveur de se projeter au-delà des événements climatiques qu'il a déjà vécus (Allart *et al.*,

2024). Dans les filières bovines, l'enchaînement d'outils et de méthodes décrit par Moreau *et al.* (2020b) a permis de donner aux acteurs des éléments sur les évolutions climatiques prévues dans leur zone et leurs conséquences sur les systèmes fourragers, afin de construire collectivement des voies d'adaptation des systèmes d'élevage. Des travaux ultérieurs ont complété cette méthode, en élevage caprin pour concevoir les rotations permettant la mise en place de ces adaptations à l'échelle du système de culture (Jost *et al.*, 2024) ou dans le Grand Ouest pour évaluer les systèmes d'élevage coconçus sur des critères économiques, environnementaux et énergétiques (Godoc *et al.*, 2024).

Plus généralement, Rigolot *et al.* (2019) ont formalisé la démarche d'accompagnement en quatre étapes : i) prendre conscience de son exposition aux aléas et percevoir les nouveaux risques pour le secteur, notamment à l'aide d'indicateurs agroclimatiques ; ii) évaluer sa sensibilité à ces aléas et risques, en mobilisant des outils spécifiques ou encore en capitalisant sur les conséquences des aléas climatiques rencontrés dans le passé récent ; iii) se projeter en concevant et évaluant des scénarios d'alternatives, à partir des outils de diagnostics ou de modèles ; iv) mettre en œuvre, suivre et évaluer les adaptations. Cette démarche est d'autant plus riche si elle se décline à l'échelle collective, favorisant ainsi les échanges de pratiques.

Conclusions et perspectives

Les changements climatiques affectent l'ensemble des écosystèmes et leurs interactions. Ces évolutions et impacts écosystémiques se déclinent à toutes les échelles, qu'il s'agisse de considérer les microbiomes du sol, des plantes et des animaux, les systèmes d'élevage et l'adaptation des pratiques et des conditions d'élevage, ou que l'on se place à une échelle territoriale en relation avec l'évolution des biotopes et le partage des ressources. Ainsi, pour pallier l'accélération du changement

climatique, plusieurs leviers d'adaptation devront être combinés et mis en synergie. Pour l'élevage de ruminants, cela concerne à la fois l'adaptation des conditions de vie pour faire face au stress thermique, en bâtiment et au pâturage (agroforesterie), et la sécurisation du système fourrager face à des aléas climatiques (sécheresse, excès d'eau, températures élevées...) plus fréquents et plus intenses. Cette sécurisation passe par une diversification des ressources fourragères, une flexibilité accrue dans leur gestion, la constitution de stocks de sécurité, et également une meilleure adéquation entre la demande alimentaire du troupeau et l'offre fourragère, avec une diminution du chargement et/ou des périodes de reproduction adaptées. L'adaptation des élevages de ruminants demande également de pouvoir sélectionner des animaux capables de faire face aux vagues de chaleur ou à de nouvelles maladies. Dans certains cas, une reconception plus profonde du système d'élevage sera nécessaire.

Cependant, certains de ces leviers d'adaptation font encore l'objet de questionnements et leur pertinence doit être envisagée sur le long terme, en lien avec les évolutions climatiques attendues. Ainsi, certaines pratiques, identifiées aujourd'hui comme des leviers d'adaptation, risquent d'être plus difficiles à mettre en œuvre demain dans un climat plus chaud et plus sec.

Sur le volet végétal, des questions de recherche demeurent, notamment pour mieux évaluer l'effet fertilisant du CO₂ en interaction avec les évolutions des autres paramètres climatiques ou, sur le plan de l'écophysiologie, pour mieux connaître les niveaux de tolérance aux stress hydrique et thermique des espèces et caractériser la diversité intraspécifique.

La sélection génétique d'animaux thermotolérants *via* l'analyse de leurs performances pose trois types de questionnements : i) la fréquence de phénotypage doit être suffisamment élevée pour permettre l'enregistrement des performances lors d'événements climatiques extrêmes : à l'avenir des dispositifs de mesures automatiques

(robots de traite, auges d'alimentation...) permettront d'affiner ce type d'analyse et de l'étendre à d'autres caractères et d'autres races ; ii) les conditions réelles d'élevage ne sont pas connues assez précisément pour rendre compte du ressenti des animaux : le développement et déploiement de capteurs d'ambiance en bâtiments ou de stations météorologiques dans les élevages devrait permettre de mieux apprécier l'environnement réel des animaux ; iii) enfin, la capacité à maintenir les performances lorsque les températures ambiantes sont élevées est un caractère complexe qui ne reflète pas uniquement la tolérance physiologique à la chaleur. Pour que les recherches sur la tolérance à la chaleur puissent être étendues à un maximum d'espèces et de races, le développement de méthodes de phénotypage simples à mettre en place, non invasives et peu onéreuses est indispensable. Les capteurs de mouvements (Islam *et al.*, 2023), l'utilisation de la vidéo couplée à l'intelligence artificielle (Shu *et al.*, 2024) ou des biomarqueurs de stress (König & May, 2019 ; Grelet *et al.*, 2022) devraient permettre de mesurer des indicateurs de bien-être animal et d'identifier précocement les signes de début de stress.

Les impacts d'un stress de chaleur à long terme, ainsi que les effets cumulatifs de plusieurs épisodes de stress sont encore mal connus, et pourraient donner lieu à de nouvelles investigations sur l'adaptation des animaux.

Dans les prochaines années les objectifs de sélection devront nécessairement évoluer pour intégrer les nouveaux caractères d'efficacité, de résilience, et de tolérance à la chaleur. Ces objectifs de sélection devront être définis en fonction de l'évolution des systèmes d'élevage, et être en adéquation avec

les attentes des éleveurs (réduction de la charge de travail notamment) et de la société en matière d'impact environnemental ou encore de bien-être animal.

Les implications en termes de santé et de bien-être animal sont multiples. L'évolution du climat oblige à revisiter l'ensemble des connaissances relatives aussi bien aux performances productives et reproductives des ruminants qu'à leurs besoins (macro et micro-nutrition, apports hydriques) dans des contextes de disponibilité des ressources et d'environnements eux-mêmes modifiés. De nouvelles recommandations dans tous les domaines de la conduite d'élevage (alimentation, logement, conditions d'accès à l'extérieur, gestion de la reproduction...) sont autant de points clés en matière de biosécurité et de bien-être.

Le changement climatique incite également à réévaluer les risques encourus en termes de santé qu'il conviendra de prendre en compte dans les approches de prévention sanitaire. Elles nécessitent à la fois réactivité et coordination de la part de l'ensemble des acteurs de la santé (chercheurs, vétérinaires, groupements de défense sanitaire, conseillers, éleveurs) pour faire remonter les observations, enregistrer, centraliser les informations, proposer et tester outils, méthodes et solutions, comme autant d'opportunités et de défis pour gagner en efficacité dans l'anticipation, la prévention et la gestion des émergences à venir.

Les systèmes d'élevage français disposent et disposeront de différents leviers pour s'adapter au changement climatique, parfois au prix de transformations radicales. Cette adaptation doit dans tous les cas s'anticiper dès maintenant car les différents leviers

n'ont pas les mêmes pas de temps pour leur mise en œuvre et l'observation de leur impact effectif. L'enjeu sera aussi de pouvoir accompagner au mieux les éleveurs sur le long terme, en lien avec les évolutions climatiques attendues et leurs conséquences. C'est l'objectif des approches en niveaux de réchauffement développées dans le dernier rapport du GIEC et, pour la France, dans la Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC) dont l'appropriation par les acteurs agricoles est à peine commencée. L'accompagnement des éleveurs devra porter sur le plan technique mais aussi social (travail...) et économique. Il demandera de multiples compétences et également de pouvoir s'appuyer sur des outils de simulation ou des expérimentations capables d'envisager des stratégies complexes permettant de prendre en compte les autres défis auxquels l'élevage et l'agriculture doivent faire face : atténuation du changement climatique, évolution de la disponibilité de l'eau, enjeux économiques... La nécessité de s'adapter ne fait aucun doute, elle aura dans la plupart des cas un coût (tout comme le fait de ne pas s'adapter), dont la prise en charge devrait être partagée par les filières et accompagnée par les politiques publiques.

Contribution des auteurs

La rédaction de cette synthèse a été coordonnée par A. Madrid avec l'appui d'A. Vinet. L'ensemble des auteurs a contribué à la réflexion générale, concernant la structure du texte et les idées majeures à développer, puis selon les compétences et connaissances, chacun des auteurs, en concertation avec les autres coauteurs concernés a rédigé les chapitres dédiés.

Références

Agabriel, J., Delaby, L., & Pottier, É. (2011). Raisonner et ajuster au mieux le besoin et l'utilisation des fourrages conservés. *Fourrages*, 205, 25-34. <https://afpf-asso.fr/article/raisonner-et-ajuster-au-mieux-le-besoin-et-l-utilisation-des-fourrages-conserves>

Aguerre, S., Jacquet, P., Brodier, H., Bournazel, J. P., Grisez, C., Prévot, F., Michot, L., Fidelle, F., Astruc, J. M., & Moreno, C. R. (2018). Resistance to gastrointestinal

nematodes in dairy sheep: Genetic variability and relevance of artificial infection of nucleus rams to select for resistant ewes on farms. *Veterinary Parasitology*, 256, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2018.04.004>

Allart, L., Joly, F., Oostvogels, V., Mosnier, C., Gross, N., Ripoll-Bosch, R., & Dumont, B. (2024). Farmers' perceptions of permanent grasslands and their intentions to adapt to climate change influence their resilience

strategy. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 39. <https://doi.org/10.1017/S1742170524000279>

Astruc, J.-M., de Boissieu, C., Buisson, D., Clément, V., de Crémoux, R., Doucet, M., Larroque, H., Palhière, I., Rupp, R., Arnal, M., Bossis, N., Coppin, S., Gautier, J.-M., Gousseau, V., Jousseins, C., Lagriffoul, G., Legris, M., Loywyck, V., Martin, P., ... Tortereau, F. (2021). RUSTIC – Vers une approche intégrée de la robustesse

des petits ruminants. *Innovations Agronomiques*, 82, 369-386. <https://doi.org/10.15454/3c2s-aw55>

Astruc, J. M., Buisson, D., Clément, V., Lagriffoul, G., Larroque, H., Legarra, A., Palhière, I., Ugarte, E., & Moreno-Romieux, C. (2022). Benefits from recent and on-going projects on adaptation and resilience in French dairy sheep and goats. In G. Hadjipavlou & C. Ligda (Eds.), *Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens. Addressing the challenges of agro-pastoral farming systems to strengthen their resilience* (Vol. 129, pp. 41-48). CIHEAM. <https://om.ciheam.org/ressources/om/pdf/a129/00008095.pdf>

Astruc, J., Fidelle, F., André, C., Grizel, C., Bordes, L., Jouffroy, S., & Jacquet, P. (2024). *Breeding for resistance to parasites in French dairy sheep: towards an increase in resilience and sustainability of sheep dairying* [Communication orale]. ICAR Annual Conference, Bled – Slovenia. https://www.icar.org/Documents/Bled-2024/PPTs/S7_2_Astruc_ICAR2024_Bled_Session7_PARASITES.pdf

Becker, C. A., Collier, R. J., & Stone, A. E. (2020). Invited review: Physiological and behavioral effects of heat stress in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 103(8), 6751-6770. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17929>

Bernabucci, U., Lacetera, N., Baumgard, L. H., Rhoads, R. P., Ronchi, B., & Nardone, A. (2010). Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants. *Animal*, 4(7), 1167-1183. <https://doi.org/10.1017/S175173111000090X>

Black, P., & Nunn, M. (2009). *Impact of climate change and environmental change on emerging and re-emerging animal diseases and animal production* [Communication]. World Organisation for Animal Health - International Committee OIE. <https://www.woah.org/app/uploads/2021/03/2009-001-013-black-f.pdf>

Boudon, A., Khelil-Arfa, H., Ménard, J.-L., Brunschwig, P., & Faverdin, P. (2013). Les besoins en eau d'abreuvement des bovins laitiers : déterminismes physiologiques et quantification. *INRA Productions Animales*, 26(3), 249-262. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2013.26.3.3153>

Bryant, J. R., López-Villalobos, N., Pryce, J. E., Holmes, C. W., & Johnson, D. L. (2007). Quantifying the effect of thermal environment on production traits in three breeds of dairy cattle in New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 50(3), 327-338. <https://doi.org/10.1080/00288230709510301>

Buisson, D., Astruc, J. M., Doutre, L., & Palhière, I. (2022). Toward a genetic evaluation for functional longevity in French dairy sheep breeds. In R. F. Veerkamp & Y. de Haas (Eds.), *Proceedings of 12th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production* (pp. 3037-3041). Brill.

Camargo, L. S. A., Saraiva, N. Z., Oliveira, C. S., Carmickle, A., Lemos, D. R., Siqueira, L. G. B., & Denicol, A. C. (2022). Perspectives of gene editing for cattle farming in tropical and subtropical regions. *Animal Reproduction*, 19(4), e20220108. <https://doi.org/10.1590/1984-3143-AR2022-0108>

Cantalapiedra-Hijar, G., Nedelkov, K., Crosson, P., & McGee, M. (2024). Some plasma biomarkers of residual feed intake in beef cattle remain consistent regardless of intake level. *Scientific Reports*, 14(1), 8540. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59253-7>

Capdeville, J., & Fagoo, B. (2020). Les solutions pour améliorer le confort thermique des animaux en été. Dans : *La ventilation des bâtiments d'élevage de ruminants* (pp. 97-116). Idele.

Carabaño, M. J., Arsenos, G., Buisson, D., Díaz, C., Hazard, D., Larroque, H., Pineda-Quiroga, C., Serrano, M., Tryantafyllidis, A., Tsartsianidou, V., Ugarte, E., & Ramon, M. (2020). *Climate resilience in dairy sheep production in Europe* [Communication]. 71st Annual Meeting of the European Association for Animal Production, Online. <https://hal.inrae.fr/hal-03197920v1>

Carabaño, M. J., Pineda-Quiroga, C., Ugarte, E., Díaz, C., & Ramón, M. (2021). Genetic basis of thermotolerance in 2 local dairy sheep populations in the Iberian Peninsula. *Journal of Dairy Science*, 104(5), 5755-5767. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19503>

Cardozo, G. A., Volaire, F., Chapon, P., Barotin, C., & Barkaoui, K. (2024). Can we identify tipping points of resilience loss in Mediterranean rangelands under increased summer drought? *Ecology*, 105(9), e4383. <https://doi.org/10.1002/ecy.4383>

Centers for Disease Control and Prevention. (2024). *Current H5N1 Bird Flu Situation in Dairy Cows*. CDC. <https://www.cdc.gov/bird-flu/situation-summary/mammals.html>

Centre d'études et de prospective. (2023). *La lutte contre les maladies animales dans le contexte du changement climatique* (Analyse no 184). Ministère de l'Agriculture et de la souveraineté alimentaire. https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Ana184/Analyse_1842302.pdf

Chassier, M., Mosnier, F., Rupp, R., Bluet, B., Bailly-Salins, A., & Palhière, I. (2022). Genetics parameters of feed efficiency in dairy goats, under commercial conditions. *Proceedings of 12th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production* (pp. 296-299). Brill. <https://hal.inrae.fr/hal-04079361>

Correa-Calderon, A., Armstrong, D., Ray, D., DeNise, S., Enns, M., & Howison, C. (2004). Thermoregulatory responses of Holstein and Brown Swiss Heat-Stressed dairy cows to two different cooling systems. *International Journal of Biometeorology*, 48(3), 142-148. <https://doi.org/10.1007/s00484-003-0194-y>

Crouzat, É., Dodier, H., Loucougaray, G., Lavorel, S., & Grigulis, K. (2021). *Effets du changement climatique sur les végétations d'alpage. Des clés pour comprendre*. INRAE LESSEM & LECA Grenoble. <https://hal.inrae.fr/hal-03789858>

de Crémoux, R., Piacère, A., & Boué, P. (2005). *Évaluation de l'incidence de la canicule de 2003 sur la fertilité après insémination en élevage caprin*. [Communication]. 12^e Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris. <https://>

journées3r.fr/wp-content/uploads/2006/11/2005_reproduction_09_decremoux-ee1.pdf

Delaby, L., & Horan, B. (2021). Améliorer l'efficacité des systèmes laitiers herbagers en milieux tempérés. *INRAE Productions Animales*, 34(3), 161-172. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.3.4870>

Dellar, M., Topp, C. F. E., Banos, G., & Wall, E. (2018). A meta-analysis on the effects of climate change on the yield and quality of European pastures. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 265, 413-420. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.06.029>

Dietrich, J., Hammerl, J.-A., Johne, A., Kappenstein, O., Loeffler, C., Nöckler, K., Rosner, B., Spielmeier, A., Szabo, I., & Richter, M. H. (2023). Impact of climate change on foodborne infections and intoxications. *Journal of Health Monitoring*, 8(Suppl. 3), 78-92. <https://doi.org/10.25646/11403>

Dikmen, S., Khan, F. A., Huson, H. J., Sonstegard, T. S., Moss, J. I., Dahl, G. E., & Hansen, P. J. (2014). The SLICK hair locus derived from Senepol cattle confers thermotolerance to intensively managed lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 97(9), 5508-5520. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8087>

Dodier, H., Garde, L., Genevet, E., Charmetant, R., & Grivel, G. (Eds.). (2023). *La Pastothèque. Référentiel des milieux du Sud de la France dans un contexte de changement climatique. Tome 1. Montagne : étages alpin, subalpin et montagnard*. Cardère éditeur.

Ducos, A., Bed'Hom, B., Acloque, H., & Pain, B. (2017). Modifications ciblées des génomes : Apports et impacts pour les espèces d'élevage. *INRA Productions Animales*, 30(1), 3-18. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2017.30.1.2226>

Ducrocq, V. (2005). An improved model for the French genetic evaluation of dairy bulls on length of productive life of their daughters. *Animal Science*, 80(3), 249-256. <https://doi.org/10.1079/ASC41720249>

Dumont, B., Andueza, D., Niderkorn, V., Lüscher, A., Porqueddu, C., & Picon-Cochard, C. (2015). A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: specificities of mountain and Mediterranean areas. *Grass and Forage Science*, 70(2), 239-254. <https://doi.org/10.1111/gfs.12169>

Durand, J.-L., & Bloor, J. M. G. (2022). *Influence des aléas ponctuels sur la pérennité et la productivité des prairies* [Communication]. Journées AFPP – Valoriser, Entretenir La Pérennité Des Prairies, Paris. <https://afpp-asso.fr/article/influence-des-aleas-ponctuels-sur-la-perennite-et-la-productivite-des-prairies>

Durand, J.-L., 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. <https://afpp-asso.fr/article/ecophysiologie-de-la-reponse-et-de-l-adaptation-des-plantes-fourrageres-et-prairiales-au-changement-climatique>

Duvallet, G., & Boireau, P. (2015). Autres maladies parasitaires à transmission vectorielle : helminthoses animales, besnoitiose bovine et paludisme. *Revue*

- Scientifique et Technique de l'OIE, 34(2), 641-649. <https://doi.org/10.20506/rst.34.2.2386>
- Émile, J.-C., Le Roy, P., Bourgoïn, F., & Al Rifai, M. (2009). *Comparaison de types de sorgho ensilés pour des vaches laitières* [Communication]. 16e Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris. <https://journées3r.fr/textes3r/20090110-comparaison-de-types-de-sorgho-ensiles-pour-des-vaches-laitieres/>
- Émile, J.-C., Coutard, J.-P., Forel, E., & Stephany, D. (2016). Développer les associations annuelles céréales protéagineuses dans les systèmes fourragers. *Fourrages*, 226, 143-151. <https://afpf-asso.fr/article/developper-les-associations-annuelles-cereales-protéagineuses-dans-les-systemes-fourragers>
- Fedriga, J. K., Báez, F., Cruz, R. S., & Viñoles, C. (2021). Heat tolerance in cows of British breeds and their crosses with bonsmara under grazing conditions. *Journal of Thermal Biology*, 102, 103118. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.103118>
- Finocchiaro, R., van Kaam, J. B. C. H. M., Portolano, B., & Misztal, I. (2005). Effect of heat stress on production of mediterranean dairy sheep. *Journal of Dairy Science*, 88(5), 1855-1864. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72860-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72860-5)
- Gaughan, J. B., Mader, T. L., Holt, S. M., & Lisle, A. (2008). A new heat load index for feedlot cattle. *Journal of Animal Science*, 86(1), 226-234. <https://doi.org/10.2527/jas.2007-0305>
- Godoc, B., Castellan, É., Lebrun, M., Huchon, J.-C., Sarazin, C., Francesetti, C., Linclau, O., Joffret, 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.
- Graux, A.-I., Casellas, E., Chabrier, P., Ferchaud, F., Puillet, L., Chambaut, H., Godoc, B., & Madrid, A. (2024). *Présentation du projet REDELAC : Résilience et durabilité des exploitations laitières de plaine face aux aléas climatiques* [Communication]. Journées AFPF – Impacts et services environnementaux des élevages : contribution des prairies et fourrages. <https://afpf-asso.fr/acte/presentation-du-projet-re-delac-resilience-et-durabilite-des-exploitations-laitieres-de-plaine-face>
- Grelet, C., Vanden Dries, V., Leblois, J., Wavreille, J., Mirabito, L., Soyeurt, H., Franceschini, S., Gengler, N., Brostaux, Y., HappyMoo Consortium, & Dehareng, F. (2022). Identification of chronic stress biomarkers in dairy cows. *Animal*, 16(5), 100502. <https://doi.org/10.1016/j.ANIMAL.2022.100502>
- Hammami, H., Bormann, J., M'hamdi, N., Montaldo, H. H., & Gengler, N. (2013). Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment. *Journal of Dairy Science*, 96(3), 1844-1855. <https://doi.org/10.3168/JDS.2012-5947>
- Islam, M. A., Lomax, S., Doughty, A. K., Islam, M. R., Thomson, P. C., & Clark, C. E. F. (2023). Revealing the diversity of internal body temperature and panting response for feedlot cattle under environmental thermal stress. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31801-7>
- Itier, B. (2008). Agriculture et sécheresse : le contexte et les enjeux. *Innovations Agronomiques*, 2, 1-8. <https://hal.science/hal-01192355>
- Jost, J., Minette, S., Vandewalle, A., & Py, V. (2024). *Co-conception, évaluation et diffusion de systèmes de cultures répondant aux enjeux du changement climatique dans les élevages caprins de Nouvelle-Aquitaine et Pays de la Loire* [Communication orale]. Les Interactions culture-élevage, leviers de résilience des agricultures face aux crises du XXIème siècle ?, Montpellier. <https://interactions-culture-elevage.colloque.inrae.fr/content/download/566/5469?version=1>
- Kennedy, E., McEvoy, M., Murphy, J. P., & O'Donovan, M. (2009). Effect of restricted access time to pasture on dairy cow milk production, grazing behavior, and dry matter intake. *Journal of Dairy Science*, 92(1), 168-176. <https://doi.org/10.3168/JDS.2008-1091>
- König, S., & May, K. (2019). Invited review: Phenotyping strategies and quantitative-genetic background of resistance, tolerance and resilience associated traits in dairy cattle. *Animal*, 13(5), 897-908. <https://doi.org/10.1017/S1751731118003208>
- Laible, G., Cole, S. A., Brophy, B., Wei, J., Leath, S., Jivanji, S., Littlejohn, M. D., & Wells, D. N. (2021). Holstein Friesian dairy cattle edited for diluted coat color as a potential adaptation to climate change. *BMC Genomics*, 22(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s12864-021-08175-z>
- Lauvie, A., Debus, N., González García, E., Grisot, P.-G., Hassoun, P., Jouven, M., Manoli, C., Ménassol, J.-B., Stark, F., & Nozières-Petit, M.-O. (2024). Contribution de l'animal à la résilience globale des systèmes : quels enseignements peut-on tirer des systèmes à composante pastorale ? [Communication]. 27^e Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris. <https://hal.inrae.fr/hal-04912412v1>
- Lemaire, G. (2008). Sécheresse et production fourragère. *Innovations Agronomiques*, 2, 107-123. <https://hal.inrae.fr/hal-02656784>
- Laporta, J., Ferreira, F. C., Ouellet, V., Dado-Senn, B., Almeida, A. K., De Vries, A., & Dahl, G. E. (2020). Late-gestation heat stress impairs daughter and granddaughter lifetime performance. *Journal of Dairy Science*, 103(8), 7555-7568. <https://doi.org/10.3168/JDS.2020-18154>
- Launay, F., Gautier, D., & Tchakérian, E. (2013). Témoignages d'adaptations aux évolutions climatiques. Enseignements des pratiques pastorales : diversité et sécurités. *Fourrages*, 214, 145-148. <https://afpf-asso.fr/article/temoignages-d-adaptations-aux-evolutions-climatiques-enseignements-des-pratiques-pastorales-diversite-et-securites>
- Litrico, I., Barkaoui, K., Barradas, A., Barre, P., Béguier, V., Birouste, M., Bristiel, P., Crespo, D., Deléglise, C., Durand, J.-L., Fernandez, L., Gastal, F., Ghesquiere, M., Godinho, B., Hernandez, P., Julier, B., Louarn, G., Meisser, M., ... Volaire, F. (2016). Utiliser les mélanges fourragers pour s'adapter au changement climatique : opportunités et défis. *Fourrages*, 225, 11-20. <https://afpf-asso.fr/article/utiliser-les-melanges-fourragers-pour-s-adapter-au-changement-climatique-opportunités-et-defis>
- Lurette, A., Douhard, F., Puillet, L., Madrid, A., Curtil, M., & Stark, F. (2022). *Modelling as a tool to explore adaptation of Mediterranean sheep farming systems to climate change*. [Communication]. 73rd Annual Meeting of the European Association for Animal Production, Portugal. <https://hal.inrae.fr/hal-03788187v1>
- Macé, T., Hazard, D., Carrière, F., Douls, S., Foulquié, D., & González-García, E. (2019). Relationships between body reserve dynamics and rearing performances in meat ewes. *Journal of Animal Science*, 97(10), 4076-4084. <https://doi.org/10.1093/jas/skz273>
- Machefer, C., Robert-Granié, C., Lagriffoul, G., Parisot, S., Allain, C., Portes, D., Astruc, J. M., Hassoun, P., & Larroque, H. (2023). Opportunities and limits of commercial farm data to study the genetic determinism of feed efficiency throughout lactation in dairy sheep. *Animal*, 17(9), 100951. <https://doi.org/10.1016/j.ANIMAL.2023.100951>
- Madrid, A., de Crémoux, R., Delaby, L., Larroque, H., Novak, S., & Vinet, A. (2024). *L'élevage de ruminants s'adaptera-t-il au changement climatique ? Impacts et leviers d'adaptation*. [Communication]. 27^e Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris. <https://hal.inrae.fr/hal-04935260v1>
- Masse, A., & de Launay, J. (2018). Intérêts technico-économiques des dérobées avant maïs au sein d'un réseau d'élevages laitiers de l'ouest de la France. *Fourrages*, 234, 107-114. <https://afpf-asso.fr/article/interets-technico-economiques-des-derobees-avant-mais-au-sein-d-un-reseau-d-elevages-laitiers-de-l-ouest-de-la-france>
- Menéndez-Buxadera, A., Molina, A., Arrebola, F., Clemente, I., & Serradilla, J. M. (2012). Genetic variation of adaptation to heat stress in two Spanish dairy goat breeds. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 129(4), 306-315. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0388.2011.00984.x>
- Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. (2023). *El sector vacuno de leche en España*. Dirección General de Producciones y Mercados Agrarios. <https://www.mapa.gob.es/dam/mapa/contenido/ganaderia/temas/produccion-y-mercados-ganaderos/sectores-ganaderos-2/vacuno-lechero/informacion-del-sector/informes-de-interes/documentacion-nueva-web/sectorvacunodelecheenes-pana.pdf>
- Moreau, J.-C., Béral, C., Hannachi, Y., Lavoyer, S., Monier, S., Novak, S., & van Lerberghe, P. (2020a). ARBELE - L'arbre dans les exploitations d'élevage herbivore : des fonctions et usages multiples. *Innovations Agronomiques*, 79, 267-279. <https://doi.org/10.15454/zrtp-av46>
- 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. <https://afpf-asso.fr/article/dans-les-filières-bovines-apprivoiser-le-changement-climatique-la-methode-deployee-dans-le-cadre-de-climalait-et-climaviande>

Moulin, T., & Calanca, P. (2021). Modélisation de la réponse des prairies permanentes aux changements climatiques. *Fourrages*, 246, 11-20. <https://afpf-asso.fr/article/modelisation-de-la-reponse-des-prairies-permanentes-aux-changements-climatiques>

Mullender, S., Zalaris, K., Pardo, G., del Prado, A., Dellar, M., Yañez-Ruiz, D., & Carabaño, M. J. (2017). Report on review of information on FP7 projects and literature on climate change and small ruminants (Deliverable No: 3.1). Isage.

Nguyen, T. T. T., Bowman, P. J., Haile-Mariam, M., Pryce, J. E., & Hayes, B. J. (2016). Genomic selection for tolerance to heat stress in Australian dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 99(4), 2849-2862. <https://doi.org/10.3168/JDS.2015-9685>

Novak, S., Delagarde, R., & Fiorelli, J.-L. (2013). Conception d'un système fourrager bioclimatique : la démarche initiée à Lusignan. *Fourrages*, 215, 241-246. <https://afpf-asso.fr/article/conception-d-un-systeme-fourrager-bioclimatique-la-demarche-initiee-a-lusignan>

Novak, S., Audebert, G., Chargelègue, F., & Émile, J.-C. (2018). Sécuriser un système laitier avec des fourrages économes en eau et en énergie fossile. *Fourrages*, 233, 27-34. <https://afpf-asso.fr/article/securiser-un-systeme-laitier-avec-des-fourrages-economes-en-eau-et-en-energie-fossile>

Novak, S., Barre, P., Delagarde, R., Mahieu, S., Niderkorn, V., & Émile, J.-C. (2020a). Composition chimique et digestibilité *in vitro* des feuilles d'arbre, d'arbuste et de liane des milieux tempérés en été. *Fourrages*, 242, 35-47. <https://afpf-asso.fr/article/composition-chimique-et-digestibilite-in-vitro-des-feuilles-d-arbre-d-arbuste-et-de-liane-des-milieux-temperes-en-ete>

Novak, S., Chargelègue, F., Chargelègue, J., Audebert, G., Liagre, F., & Fichet, S. (2020b). Premiers retours d'expérience sur les dispositifs agroforestiers intégrés dans le système laitier expérimental OasYs. *Fourrages*, 242, 71-78. <https://afpf-asso.fr/article/premiers-retours-d-experience-sur-les-dispositifs-agroforestiers-integres-dans-le-systeme-laitier-experimental-oasys>

Novak, S., Godoc, B., Chargelègue, F., Audebert, G., & Troquier, C. (2020c). Analyse technico-économique d'un système bovin laitier agroécologique adapté au changement climatique [Communication]. 25^e Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris. <https://journées3r.fr/wp-content/uploads/2021/02/changement-climatique-20200210-065.pdf>

Novak, S., Guyard, R., Chargelègue, F., Audebert, G., & Foray, S. (2022). Nitrogen use efficiency and carbon footprint of an agroecological dairy system based

on diversified resources. In L. Delaby, R. Baumont, V. Brocard, S. Lemauiel-Lavenant, S. Plantureux, F. Vertes, J.-L. Peyraud (Eds.), *Grassland Science in Europe* (Vol. 27, Grassland at the heart of circular and sustainable food systems, pp. 683-685). European Grassland Federation.

Palhière, I., Oget, C., & Rupp, R. (2018). *Functional longevity is heritable and controlled by a major gene in French dairy goats* [Communication]. 11th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Auckland. <https://hal.inrae.fr/hal-02736063v1>

Parent, B., Leclerc, M., Lacube, S., Semenov, M. A., Welcker, C., Martre, P., & Tardieu, F. (2018). Maize yields over Europe may increase in spite of climate change, with an appropriate use of the genetic variability of flowering time. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(42), 10642-10647. <https://doi.org/10.1073/pnas.1720716115>

Pérez-Ramírez, E., Peyraud, J. L., & Delagarde, R. (2009). Restricting daily time at pasture at low and high pasture allowance: Effects on pasture intake and behavioral adaptation of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 92(7), 3331-3340. <https://doi.org/10.3168/JDS.2008-1951>

Petit, S., Vergote, M.-H., Young, J., & Henrion, G. (2023). Éleveur face au changement climatique, un travail qui devient précaire. *Carnets de Géographes*, 17. <https://doi.org/10.4000/cdg.8718>

Pottier, É., Delaby, L., & Agabriel, J. (2007). Adaptations de la conduite des troupeaux bovins et ovins aux risques de sécheresse. *Fourrages*, 191, 267-284. <https://afpf-asso.fr/article/adaptations-de-la-conduite-des-troupeaux-bovins-et-ovins-aux-risques-de-secheresse>

Rigolot, C., Martin, G., & Dedieu, B. (2019). Renforcer les capacités d'adaptation des systèmes d'élevage de ruminants : cadres théoriques, leviers d'action et démarche d'accompagnement. *INRA Productions Animales*, 32(1), 1-12. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.1.2414>

Salama, A. A. K., Contreras-Jodar, A., Love, S., Mehabe, N., Such, X., & Caja, G. (2020). Milk yield, milk composition, and milk metabolomics of dairy goats intramammary-challenged with lipopolysaccharide under heat stress conditions. *Scientific Reports*, 10(1), 5055. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61900-8>

Serradilla, J. M., Carabaño, M. J., Ramón, M., Molina, A., Diaz, C., & Menéndez-Buxadera, A. (2018). Characterisation of Goats' Response to Heat Stress: Tools to Improve Heat Tolerance. In S. Kukovics (Ed.), *Goat Science*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70080>

Sevi, A., & Caroprese, M. (2012). Impact of heat stress on milk production, immunity and udder health in sheep: A critical review. *Small Ruminant Research*, 107(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/J.SMALLRUMRES.2012.07.012>

Shu, H., Bindelle, J., & Gu, X. (2024). Non-contact respiration rate measurement of multiple cows in a free-stall barn using computer vision methods. *Computers and Electronics in Agriculture*, 218, 108678. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108678>

Soubeyroux, J.-M., Bernus, S., 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 Métropole. Météo-France. <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/296>

Soussana, J.-F. (2013). Prairies et changement climatique. *Fourrages*, 215, 171-180. <https://afpf-asso.fr/revue/changement-climatique-prairies-et-systemes-fourragers-2e-partie?a=1959>

Taussat, S., Fossaert, C., Cantalapiedra-Hijar, G., Griffon, L., Martin, P., & Renand, G. (2023). Paramètres génétiques de l'efficacité alimentaire et faisabilité d'une sélection en population bovine allaitante. *INRAE Productions Animales*, 36(3), 7330. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2023.36.3.7330>

Touitou, F., Tortereau, F., Bret, L., Marty-Gasset, N., Marcon, D., & Meynadier, A. (2022). Evaluation of the Links between Lamb Feed Efficiency and Rumen and Plasma Metabolomic Data. *Metabolites*, 12(4), 304. <https://doi.org/10.3390/metabo12040304>

Vallée, R., Vinet, A., Aguerre, S., Promp, J., Cubayano, B. C. D., Mattalia, S., & Boichard, D. (2024). Les performances de production laitière et de reproduction des vaches laitières sont dégradées en cas de stress thermique [Communication]. 27^e Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris. <https://hal.science/hal-05109081v1>

Venot, E., Schneider, M.-D.-P., Miller, S., Aignel, M., Barbat, M., Ducrocq, V., & Phocas, F. (2013). New french genetic evaluations of fertility and productive life of beef cows [Communication]. 47th Congress Interbull, Nantes. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01189870>

Vinet, A., Mattalia, S., Vallée, R., Bertrand, C., Cuyabano, B. C. D., & Boichard, D. (2023). Estimation of genotype by temperature-humidity index interactions on milk production and udder health traits in Montbeliarde cows. *Genetics Selection Evolution*, 55(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s12711-023-00779-1>

Vinet, A., Mattalia, S., Vallée, R., Bertrand, C., Barbat, A., Promp, J., Cuyabano, B. C. D., & Boichard, D. (2024a). Effect of temperature-humidity index on the evolution of trade-offs between fertility and production in dairy cattle. *Genetics Selection Evolution*, 56(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s12711-024-00889-4>

Vinet, A., Fouéré, C., Cuyabano, B. C. D., Mattalia, S., Vallée, R., Barbat, A., Bertrand, C., Hoze, C., & Boichard, D. (2024b). Long-lasting effects of in utero heat stress on subsequent performances of heifers and primiparous cows. *Journal of Dairy Science*, 107(12), 11065-11077. <https://doi.org/10.3168/JDS.2024-25168>

Résumé

Les conséquences du changement climatique sur l'élevage de ruminants sont nombreuses. Elles affectent autant les animaux que les fourrages. Le stress thermique a des conséquences sur la production, la reproduction, le bien-être et la santé des animaux. Pour les prairies et fourrages, les évolutions climatiques se traduisent notamment par des modifications des périodes de production et une accentuation de la variabilité interannuelle. Les voies d'adaptation pour répondre à cette problématique sont diverses et complémentaires : adapter l'animal en améliorant sa tolérance à la chaleur et de façon générale son efficacité, sa robustesse et sa résilience ; améliorer ses conditions de vie au pâturage et en bâtiment ; et assurer l'équilibre du système fourrager en jouant sur l'offre via la diversification et la complémentarité des ressources fourragères, et la demande (les besoins des animaux) en ajustant le chargement et la conduite des troupeaux pour faire coïncider les besoins avec la saisonnalité des prairies. Des méthodes et outils existent pour aider les éleveurs à déterminer les leviers les plus adaptés à leur système, et pour les accompagner dans la construction d'une stratégie d'adaptation les combinant au mieux. Ces démarches d'adaptation nécessitent de l'anticipation et l'implication des filières dans leur ensemble.

Abstract

Will ruminant farming adapt to climate change? Impacts and levers for adaptation

Consequences of climate change for ruminant farming are numerous, from forage to animals. Heat stress has consequences on animal production, reproduction, well-being and health. For grasslands and fodder, climate change means changes in production periods and greater inter-annual variability. There are various, complementary ways of adapting to this problem: adapting the animal by improving its heat tolerance and, more generally, its efficiency, robustness and resilience; improving its living conditions on pasture and in buildings; and ensuring the balance of the forage system by influencing supply through the diversification and complementarity of forage resources, and demand (the animals' needs) by adjusting stocking levels and herd management to ensure that the needs coincide with the seasonal nature of the grasslands. Methods and tools exist to help farmers determine which levers are best suited to their system, and to support them in building an adaptation strategy that combines them as effectively as possible. These adaptation approaches require anticipation and the involvement of all those involved in research and development.

MADRID, A., DE CRÉMOUX, R., DELABY, L., LARROQUE, H., NOVAK, S., & VINET, A. (2025). L'élevage de ruminants s'adaptera-t-il au changement climatique ? Impacts et leviers d'adaptation. *INRAE Productions Animales*, 38(2), 9200.

<https://doi.org/10.20870/productions-animales.2025.38.2.9200>



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>

La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, les pages et le DOI en respectant les informations figurant ci-dessus.