

# AGRICULTURE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Impacts, adaptation et atténuation

P. Debaeke, N. Graveline, B. Lacor, S. Pellerin,  
D. Renaudeau, É. Sauquet, coord.



# Agriculture et changement climatique

## Impacts, adaptation et atténuation

Philippe Debaeke, Nina Graveline,  
Barbara Lacor, Sylvain Pellerin,  
David Renaudeau, Éric Sauquet (coordinateurs)

Éditions Quæ

## Collection Synthèses

### *Les mycotoxines*

*Connaissances actuelles et futurs enjeux*  
Oswald I., Forget F., Puel O. (Coords),  
2024, 272 p.

*Towards pesticide-free agriculture  
Research and innovations  
in a future crop protection paradigm*  
Jacquet F., Jeuffroy M.-H., Jouan J.,  
Latruffe L., Le Cadre E., Malausa T.,  
Reboud X., Huygue C. (Coords),  
2024, 224 p.

### *Épigénétique*

*Mécanismes moléculaires,  
biologie du développement  
et réponses à l'environnement*  
Jammes H., Boudry P., Maury S. (Coords),  
2024, 194 p.

*De l'arbre en ville à la forêt urbaine*  
Castagneyrol B., Muller S.,  
Paquette A. (Coords),  
2024, 188 p.

### **Pour citer cet ouvrage :**

Debaeke P., Graveline N., Lacor B., Pellerin S., Renaudeau D., Sauquet É., coord., 2025. *Agriculture et changement climatique. Impacts, adaptation et atténuation*, Versailles, éditions Quæ, 398 p., <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4012-8>.

L'édition de cet ouvrage a bénéficié du soutien financier du métaprogramme CLIMAE, de la Direction pour la science ouverte (DipSO) et des départements PHASE, Génétique animale, AQUA, AgroEcoSystem et ACT d'INRAE.

Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées sous licence CC-by-NC-ND 4.0.

Éditions Quæ  
RD 10, 78026 Versailles Cedex  
[www.quae.com](http://www.quae.com) – [www.quae-open.com](http://www.quae-open.com)

© Éditions Quæ, 2025

ISBN papier : 978-2-7592-4011-1  
ISBN epub : 978-2-7592-4013-5

ISBN PDF : 978-2-7592-4012-8  
ISSN : 1777-4624

## Chapitre 12

# Adaptation de l'élevage au changement climatique

*David Renaudeau, Jean-Christophe Bambou, Anne Collin,  
Luc Delaby, Jean-Luc Gourdine, Sylvie Lecollinet, Sandra Novak,  
Aurélie Vinet, Hélène Gilbert*

Sous l'effet des émissions anthropiques, l'augmentation de la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre s'est traduite par une hausse de la température moyenne continentale (+ 1,6 °C à l'échelle mondiale), et par une augmentation des fréquences et des amplitudes des aléas et des événements extrêmes (IPCC, 2023). Ces changements ont des conséquences déjà visibles sur les filières animales, augmentant notamment les incertitudes sur la disponibilité et sur la qualité des ressources utilisées pour alimenter les animaux, l'émergence ou la réémergence de maladies, ou générant des pertes de production durant les vagues de chaleur (voir chapitre 9). Dans les prochaines décennies, l'évolution tendancielle du climat va continuer à affecter en profondeur le secteur de l'élevage, avec des enjeux majeurs autour de sa capacité à s'adapter à cet environnement changeant, en particulier à l'occurrence d'aléas variés et interconnectés.

Pour gérer les aléas et pour adapter leurs pratiques, les éleveurs peuvent mettre en place des stratégies très diverses, qui mobilisent différents leviers biotechniques ou organisationnels. Ces stratégies couvrent un gradient d'approches allant de mesures incrémentales pour anticiper ou pour corriger les impacts du changement climatique par une extension directe des pratiques et des systèmes de production actuels, à des adaptations « transformantes » destinées à faire évoluer les systèmes en profondeur pour les rendre moins vulnérables à terme à des aléas climatiques récurrents (Leclère *et al.*, 2014). Parmi les stratégies d'adaptation incrémentales disponibles, certaines peuvent être internalisées dans le système (par exemple le changement de la conduite des animaux ou du système fourrager, la mise en place de solutions de « refroidissement », etc.) et d'autres, externalisées au niveau du territoire ou au-delà (par exemple les achats de fourrages, l'évolution des schémas génétiques des animaux, la gestion collective de l'eau ou des risques de perte de production *via* des contrats d'assurance, etc.) (Noury *et al.*, 2013). Ces différentes stratégies ne sont pas exclusives et peuvent être combinées. Compte tenu des enjeux majeurs d'adaptation et d'atténuation face au changement global, il est admis que, sur le long terme, les stratégies incrémentales seront probablement insuffisantes et devront être associées à des adaptations « transformantes », pouvant aller du changement radical des objectifs de production à une relocalisation des exploitations (Rigolot *et al.*, 2019).

Ce chapitre propose de faire la synthèse des stratégies d'adaptation actuellement disponibles ou qui pourraient l'être prochainement pour améliorer la résilience des systèmes d'élevage face au changement climatique.

## ► Adaptation des conduites générales des animaux ou des troupeaux

De nombreux leviers en lien avec les conduites d'élevage peuvent être utilisés pour atténuer les impacts du changement climatique. Ils mobilisent des adaptations de la conduite alimentaire, de la gestion de la reproduction et des modalités de logement des animaux.

### Stratégies impliquant des modifications de la gestion des ressources alimentaires des animaux

#### Adaptation du système fourrager et de la gestion des ressources

L'élevage des ruminants en France se caractérise par une autonomie alimentaire élevée (Rouillé *et al.*, 2014), essentiellement du fait qu'il repose sur la consommation de fourrages, dont la production est réalisée sur ou à proximité de l'exploitation détentrice du cheptel. Cette autonomie nécessaire à la viabilité économique de l'élevage induit une sensibilité accrue des systèmes au changement climatique. Sa conséquence la plus dommageable fait suite à la survenue de périodes de sécheresse, associées ou non à des phases de canicule : l'absence durable de pluies, notamment en période estivale, entraîne alors une baisse, voire un arrêt de la croissance des végétaux, avec pour conséquence une réduction de la disponibilité immédiate en fourrages à pâturer, ou une baisse de rendement à la récolte, quelques semaines plus tard.

Diverses options dans la gestion des ressources fourragères sont envisageables afin d'éviter ou de pallier les conséquences d'une moindre disponibilité en fourrages. Les choix d'adaptation tactiques ou stratégiques, à court ou plus long terme, vont dépendre de la fréquence de l'occurrence de l'événement climatique défavorable (Lemaire et Pflimlin, 2007; Moreau et Lorgeou, 2007). En cas d'événements peu fréquents, l'éleveur développera des solutions palliatives et avec peu d'impact sur le système d'élevage, tel que cela se pratique avec l'apport de fourrages conservés, récoltés lors de périodes favorables. À l'inverse, en cas d'événements climatiques plus fréquents, des modifications structurelles sont alors mises en œuvre, tant au niveau de l'assolement que de la conduite des troupeaux. La stratégie d'évitement consiste à récolter des fourrages avant que n'intervienne la phase critique, par exemple en période de sécheresse. C'est un des atouts des récoltes précoces d'herbe au printemps, et également des méteils (mélanges de céréales-protéagineux récoltés en plante entière, avant la maturité des grains) ensilés avant l'été (Emile *et al.*, 2016). D'autres cultures sont réputées plus résistantes aux sécheresses et aux vagues de chaleur et moins gourmandes en eau, tels la luzerne, le trèfle violet et le sorgho. Elles ne sont cependant pas exemptes de contraintes agronomiques qui empêchent leur culture dans certaines régions. Une autre pratique fréquente et facile dans le cas du maïs consiste à semer plus de surfaces que nécessaire. Cette culture à double fin (grain ou ensilage) permet de différer la décision de son orientation finale en automne, au moment de la récolte et ce, en fonction des conditions climatiques passées. Les betteraves fourragères semées au printemps et pouvant être

pâturées à partir d'août sont également une ressource fourragère d'intérêt (Novak *et al.*, 2022a). Enfin, les cultures dérobées estivales ou automnales, semées après l'ensilage des méteils ou après la récolte des céréales à paille, permettent de pallier un déficit de stocks, même si ces fourrages (moha, millet fourrager, colza, navet fourrager, ray-grass d'Italie) à pousse rapide se caractérisent parfois par des valeurs alimentaires faibles qui les destinent plutôt à des animaux aux besoins limités (Delaby *et al.*, 2022). Dans le cas des prairies, outre les légumineuses déjà citées, certaines graminées telles que la fétuque élevée ou le dactyle résistent mieux aux températures élevées que le ray-grass anglais, ce qui leur confère une capacité à reprendre leur croissance plus rapidement en cas de retour des pluies, notamment en automne. D'autres dicotylédones (chicorée, plantain), grâce à leur système racinaire particulier ou leur moindre évapotranspiration, ont également démontré leur capacité à mieux résister aux phases de sécheresse et de canicule. Ces plantes sont souvent proposées lors de l'implantation de prairies multi-espèces (Lüscher *et al.*, 2023). La présence de légumineuses, notamment le trèfle blanc dont la valeur alimentaire diminue lentement avec l'âge de repousse, permet à court terme de pratiquer le report sur pied et de valoriser plus tardivement des stocks d'herbe accumulés avant l'occurrence de la sécheresse. Enfin, les prairies, parce qu'elles sont en place toute l'année et présentent une capacité de résilience élevée, offrent des opportunités de rebond intéressantes à saisir. Le changement climatique avec ses printemps plus précoces et ses automnes plus chauds favorise la croissance de l'herbe à des périodes où classiquement la pratique du pâturage est possible. Si la portance du sol le permet, pâturer tôt au printemps et tard en automne contribue à économiser des stocks, dont l'utilité peut s'avérer précieuse à d'autres saisons moins favorables.

Lorsque des perturbations climatiques sont systématiques et répétées, des changements profonds de système fourrager deviennent nécessaires. Il importe alors d'adapter le chargement (le nombre d'animaux à nourrir par hectare de fourrages) aux années les plus risquées, les plus difficiles, afin de garantir l'autonomie fourragère de l'élevage. Outre l'effectif d'animaux, les surfaces fourragères peuvent souvent être accrues au détriment des cultures de vente, notamment les surfaces à proximité des bâtiments, accessibles au pâturage. L'ensemble des moyens et des méthodes (diversité fourragère, cultures adaptées à la sécheresse, pratiques opportunistes) décrits ci-dessus est alors à mettre en œuvre systématiquement. La diversification des espèces doit concerner idéalement à la fois les prairies et les cultures annuelles, à l'échelle de l'assolement et de la parcelle. Elle peut aller jusqu'à l'implantation d'arbres fourragers, pouvant fournir une ressource de bonne qualité en été et en début d'automne (Novak *et al.*, 2020a). Enfin, le report de stocks d'une année faste à une année de « vaches maigres » est une pratique connue de longue date, notamment dans les systèmes nécessitant la réalisation de beaucoup de stocks, peu diversifiés. Il s'agit notamment de systèmes herbagers soumis à des hivers longs (et/ou des étés très secs), comme dans les zones de montagne et de piémont qui ont l'habitude de « jouer » avec les reports de stocks d'une année sur l'autre pour gérer les incertitudes interannuelles de la productivité des prairies.

## Modification de la composition de la ration

Des stratégies visant à modifier la composition des aliments concentrés peuvent être proposées pour répondre aux besoins des éleveurs confrontés à des épisodes de fortes chaleurs. Encore peu développées en France, elles le sont beaucoup plus en Espagne et dans les autres grands bassins mondiaux de production de porcs (Brésil, Australie,

Asie du Sud-Est) soumis à de longues périodes de fortes températures. Ces stratégies permettent de lutter contre les conséquences du stress thermique sur les animaux d'élevage (désordres métaboliques et physiologiques). Il s'agit notamment de compenser la baisse d'ingestion de nutriments énergétiques et/ou protéiques en formulant des aliments densifiés en ces mêmes nutriments, afin de maintenir les apports quotidiens et les performances de production des animaux. Ainsi, chez le porc, l'augmentation de la teneur en énergie nette des aliments permet d'atténuer les effets de la chaleur pour des stades physiologiques très sensibles à la température (truie en lactation, porc en finition) (Renaudeau *et al.*, 2012). Chez la volaille, si une augmentation de la teneur en protéines des régimes n'offre que peu d'intérêts en matière de performances du poulet de chair, la stratégie visant à limiter les apports en protéines tout en optimisant l'ingéré en acides aminés relativement aux besoins des animaux soumis à la chaleur est une voie à approfondir, avec des bénéfices à la fois sur les performances des animaux et sur la réduction des rejets azotés (Collin *et al.*, 2024). Chez les ruminants, il est également recommandé de concentrer la ration en protéines et en énergie, et de réduire les apports en fourrages secs, tout en veillant à maintenir un taux suffisant en cellulose pour limiter les risques de dysfonctionnement de la physiologie ruminale.

Au cours d'une exposition à la chaleur, les réponses adaptatives mises en place pour éviter une hyperthermie (réduction de la consommation d'aliments et du métabolisme, modulation du fonctionnement des systèmes cardio-vasculaire et cardio-respiratoire, etc.) peuvent se traduire par un certain nombre de déséquilibres physiologiques qui, lorsqu'ils ne sont pas corrigés, ont des conséquences négatives sur la santé, le bien-être et les performances des animaux. Ainsi, il est par exemple nécessaire de compenser par la voie alimentaire les pertes de minéraux (potassium, sodium, magnésium, chlore) liées à l'augmentation des déperditions de chaleur par la voie latente (sudation, hyperventilation respiratoire) ou par l'excrétion urinaire, en relevant l'équilibre alimentaire anions-cations, notamment chez la vache laitière (Block, 1994) ou en ajustant le bilan électrolytique chez la volaille (Gamba *et al.*, 2015). Chez la poule pondeuse exposée à la chaleur, un déséquilibre acido-basique du sang peut apparaître, qui nécessite une attention particulière à la nutrition calcique pour limiter ses impacts sur la ponte et le risque de fractures. En condition de stress thermique, la production de composés pro-oxydants issus du métabolisme de l'oxygène utilisé pour la respiration cellulaire augmente. La capacité des défenses antioxydantes peut alors être dépassée. Ce déséquilibre de la balance oxydative (stress oxydant) est généralement accentué par la diminution des apports en antioxydants d'origine alimentaire liée à la réduction de l'ingestion des animaux d'élevage exposés à une température élevée. Le stress oxydant a des effets délétères sur le fonctionnement des cellules et des tissus à fortes demandes métaboliques et physiologiques (muscles squelettiques et cardiaques, glande mammaire, foie et cellules sanguines), qui peuvent altérer la santé et le niveau de production des animaux. Une supplémentation alimentaire en antioxydants enzymatiques (superoxyde dismutase) ou non enzymatiques (vitamines C et E, sélénium organique, glutathion, polyphénols, extraits de plantes, etc.) est assez couramment pratiquée en élevage avec une efficacité variable dont les déterminants restent encore mal connus. Compte tenu des actions synergiques entre la vitamine E et le sélénium, une supplémentation combinée de ces deux additifs peut limiter les effets négatifs d'un stress thermique chez le porc, chez la volaille et chez les ruminants laitiers (Chauhan *et al.*, 2021). D'autres additifs alimentaires (bétaine,

levures vivantes) ont également montré leur efficacité en situation de fortes chaleurs grâce à leur action osmoréglatrice ou sur le métabolisme énergétique des animaux d'élevage (Chauhan *et al.*, 2021).

Face à une perturbation sanitaire (par exemple une émergence de maladies à vecteurs) pouvant être indirectement liée à des modifications de certaines composantes du climat, l'utilisation du levier alimentaire pour augmenter la résistance des animaux aux maladies infectieuses est un axe de recherche prometteur. En effet, la réponse immunitaire contre les agents pathogènes est étroitement liée au statut nutritionnel de l'hôte, car particulièrement coûteuse en nutriments. Ainsi, certains micronutriments (vitamines et minéraux) jouent un rôle essentiel dans la régulation des réponses immunitaires. Des carences sont associées à une augmentation de la sensibilité aux maladies, et la supplémentation, à une amélioration des réponses protectrices. L'interaction entre la supplémentation en énergie et en protéines et le parasitisme gastro-intestinal est bien étudiée chez les petits ruminants. Si un impact positif de la supplémentation en nutriments fait consensus, en revanche la contribution respective de l'énergie et des protéines reste discutée (Ceï *et al.*, 2018). Les travaux conduits chez les caprins créoles de Guadeloupe montrent qu'il existe un équilibre entre la quantité et la qualité des protéines alimentaires de la ration qui permet d'améliorer la réponse des caprins créoles contre les parasites gastro-intestinaux ainsi que leurs performances de production (Cériac *et al.*, 2019).

## Modification des modalités de distribution de la ration

Au-delà de la possibilité de faire varier la composition de la ration distribuée aux animaux, l'éleveur peut également modifier le rythme et la temporalité de la distribution de la ration, voire (quand les équipements d'élevage le permettent) modifier le lieu de la distribution d'aliment ou utiliser un aliment supplémenté de manière différenciée selon la sensibilité individuelle des animaux aux fortes chaleurs. Ces stratégies sont mises en place uniquement pendant certaines périodes de l'année (périodes de sécheresse, vagues de chaleur), ce qui oblige l'éleveur à renforcer la gestion dynamique de son exploitation.

Les stratégies visant à modifier la répartition de la production de chaleur pour éviter la coïncidence d'une thermogenèse alimentaire importante avec le pic de température du milieu de journée en saison chaude ont été testées notamment chez la volaille. Ainsi la distribution d'un aliment en dehors des heures chaudes ou la limitation de l'ingestion en maintenant l'obscurité pendant ces périodes conduit à limiter l'hyperthermie et les mortalités (Francis *et al.*, 1991), mais cette stratégie appliquée à grande échelle est efficace au prix d'une diminution des performances de croissance et d'un allongement de la durée d'élevage (Picard *et al.*, 1993). Compte tenu des effets de la nature des nutriments sur l'efficacité métabolique avec laquelle les animaux vont les utiliser pour répondre à leurs besoins de production, De Basilio *et al.* (2001) montrent qu'une alimentation alternée entre un aliment riche en protéines en fin d'après-midi et un aliment riche en énergie durant le reste de la journée permet de limiter la hausse de température interne des poulets de chair en période chaude. Plus généralement, une modification du rythme d'alimentation (plus de repas pour limiter les pics de production de chaleur métabolique, distribution de la majorité de la ration très tôt le matin ou tard le soir, etc.) et/ou l'ajout d'eau dans la ration sont des techniques simples à mettre

en place les jours de forte chaleur. Chez les animaux en croissance, une réduction momentanée des apports alimentaires ou l'utilisation de fourrages de moindre qualité sont des leviers qu'il est possible de mobiliser pour aider le troupeau ou la bande d'animaux à mieux tolérer la chaleur et à réduire la mortalité (Picard *et al.*, 1993) ou pour pallier l'absence de ressources pâturées. Une fois cette période de restriction énergétique passée, les animaux peuvent mettre en place des réponses compensatrices, qui dans certaines conditions leur permettent de retrouver une trajectoire de production normale (Hoch *et al.*, 2003).

Compte tenu du surcoût lié à la modification de la composition de la ration destinée aux animaux exposés à une forte température et de la variabilité individuelle de tolérance à la chaleur au sein des troupeaux ou des bandes d'animaux, l'application des stratégies alimentaires listées plus haut pourrait être réservée uniquement aux animaux les plus sensibles, en mobilisant les principes de l'alimentation individualisée de précision. Même si elles sont prometteuses, ces approches ont été peu investiguées (Santos *et al.*, 2018) et restent pour l'instant compliquées à mettre en place en élevage pour des raisons pratiques (détection des animaux «sensibles», disponibilité des équipements pour distribuer les aliments, etc.).

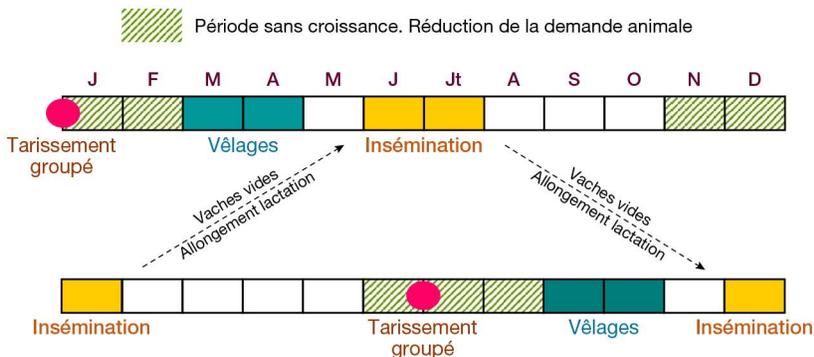
## Gestion des apports en eau

L'eau est le principal constituant corporel et demeure indispensable pour le transport des nutriments, pour la synthèse des produits animaux (viande, œufs et lait) et pour l'élimination des déchets de l'organisme *via* l'urine. Elle est essentielle au contrôle de la température interne en facilitant le transport de la chaleur des parties internes vers la surface corporelle et le refroidissement par l'évaporation sudorale et respiratoire. L'eau consommée par les animaux d'élevage est principalement apportée par l'alimentation (par les concentrés ou les fourrages) et l'eau de boisson. Une bonne gestion de l'abreuvement des animaux exposés à de fortes chaleurs est donc cruciale. À titre d'exemple, une vache laitière peut consommer entre 50 et 100 litres d'eau par jour, voire 150 litres lorsqu'il fait très chaud. En pratique, il est donc nécessaire de prévoir suffisamment de points d'eau dans les bâtiments d'élevage comme au pâturage pour que tous les animaux puissent boire sans compétition excessive et pour limiter les facteurs qui pourraient limiter la consommation d'eau (mauvaise qualité sanitaire, température trop élevée, etc.). Contrairement à la consommation d'aliments, les quantités d'eau bues augmentent en condition de stress thermique et, par conséquent, une supplémentation de l'eau avec des électrolytes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) ou des molécules fonctionnelles (antioxydants, osmolytes, acides aminés) peut donc s'avérer une stratégie efficace pour aider les animaux exposés momentanément à une forte chaleur. Ce type de solutions disponibles sur le terrain existe et leur efficacité a été objectivée principalement en volaille. Ainsi, en volaille de chair, l'ajout d'électrolytes ou d'un mélange de bêtaïne et de vitamine C permet d'atténuer les effets de la chaleur sur la croissance des animaux (Shin *et al.*, 2019; Elshafaei *et al.*, 2020).

## Stratégies impliquant des modifications dans la gestion du troupeau

Les ajustements dans la conduite du troupeau pour s'adapter aux conséquences du réchauffement climatique sont des leviers principalement utilisés en élevage de ruminants. Réduire la demande alimentaire animale en période de pénurie fourragère

associée à un événement climatique conjoncturel ou structurel est une stratégie d'adaptation qui peut être activée (Pottier *et al.*, 2007). Par exemple, pour les femelles de renouvellement, choisir de retarder la mise à la reproduction et l'âge au premier vêlage de quelques mois peut permettre de moduler les apports de fourrages en cas d'urgence climatique. En système allaitant, un sevrage avancé de quelques semaines peut être envisagé, afin de réduire la demande alimentaire des mères alors tarées, tout en réservant aux jeunes animaux sevrés les meilleurs fourrages, voire de l'aliment concentré. Les systèmes herbagers, qui cherchent à maximiser la part d'herbe pâturée dans la ration annuelle des animaux, trouvent leur cohérence au travers de la pratique des vêlages ou des agnelages groupés au printemps (Delaby et Horan, 2021), afin de synchroniser la demande alimentaire du troupeau avec la croissance de l'herbe en zones de climat tempéré. Dans les régions caractérisées par une sécheresse estivale récurrente, la double saison de vêlages espacés de six mois permet de réduire la demande alimentaire lors des saisons de pénuries fourragères que sont l'hiver et l'été (figure 12.1). La pratique rigoureuse d'une double saison de reproduction de deux mois (en juin et juillet, et en décembre et janvier) et le tarissement systématique de toutes les vaches d'un même groupe le même jour (début janvier et début juillet), permettent d'avoir la moitié du troupeau avec de moindres besoins, réduisant ainsi de moitié le chargement sur la surface accessible au pâturage en été et permettant de réserver les meilleurs fourrages aux seules vaches en lactation en hiver. Cette pratique présente également d'autres avantages notables. Elle permet un premier vêlage à l'âge de 30 mois (contre 24 mois), ce qui réduit la pression sur les besoins alimentaires des génisses. Elle permet le « recyclage » de quelques vaches non gestantes intéressantes à conserver, par l'allongement de la durée de la lactation. Elle répartit mieux les pointes de travail sur l'année et surtout réduit le temps d'astreinte de traite durant quatre mois de l'année, à des périodes socialement intéressantes.



**Figure 12.1.** Chronologie des diverses étapes de la double saison de vêlage.

La modification de la gestion de la conduite des animaux permet aussi de réduire le risque sanitaire qui pourrait être accru à cause du changement climatique. Ce type d'approche est bien documenté pour la prévention des infestations par les nématodes gastro-intestinaux. Depuis les années 1970, des études suggèrent que le pâturage mixte (association d'espèces animales différentes) présente des avantages à la fois en matière de santé individuelle, de performances de production, ainsi que de production globale par unité de surface (Hoste *et al.*, 2023). Cette stratégie repose sur le tropisme

sélectif des parasites pour leurs hôtes, impliquant l'hypothèse d'un effet de dilution, où une espèce animale ingère des parasites incapables de l'infester. De plus, une meilleure utilisation des ressources fourragères et un impact positif sur le développement de la flore et de la biodiversité des pâturages en général sont souvent associés en plus à une réduction de la charge parasitaire, en particulier pour les petits ruminants. De la même manière, le pâturage tournant ou en rotation recommande une période de pâturage d'une semaine sur une parcelle et un retour des animaux sur cette même parcelle après 25 à 30 jours. Ce délai est basé sur le cycle de vie des parasites pour réduire le risque de recontamination, et pour permettre également d'optimiser la gestion de la ressource en herbe de l'exploitation (production fourragère et valeur nutritionnelle). Ainsi, en zone tropicale humide, l'association de jeunes brebis et chèvres sevrées avec des bovins a montré un grand potentiel pour réduire le parasitisme gastro-intestinal et pour améliorer la production individuelle et par hectare (Mahieu, 2013). Par ailleurs, des combinaisons entre pâturages mixtes et tournants réduisent durablement la pression parasitaire chez les jeunes chevreux.

La modification de la conduite générale des troupeaux est beaucoup plus compliquée à mettre en œuvre dans les systèmes d'élevage porcins et avicoles, où les animaux sont élevés au sein de bâtiments (fermés ou non) et gérés en lots ou en bandes. Ce type de conduite est associé à un fonctionnement en «tout plein, tout vide», qui consiste à remplir en une seule fois un bâtiment (ou une salle d'un bâtiment) avec des animaux au même stade physiologique (que l'on nomme lot ou bande), à les gérer de manière identique, puis à les retirer tous ensemble. Calés sur des cycles biologiques des animaux relativement courts par rapport à ceux des ruminants, ces lots sont espacés de quelques semaines au plus (typiquement une à huit semaines en fonction des productions). Dans ce type d'élevage, le revenu de l'éleveur est fortement lié à sa capacité à maximiser l'utilisation de ses bâtiments et toute modification de la conduite ayant des impacts importants sur l'ensemble de l'élevage; seuls des impacts du changement climatique potentiellement très forts seront pris en considération (voir partie suivante).

## **Stratégies impliquant des modifications des conditions de logement des animaux**

Les animaux d'élevage peuvent être exposés à un stress thermique, qu'ils aient accès à l'extérieur ou qu'ils soient logés dans des bâtiments d'élevage. À l'extérieur, les radiations solaires directes ou indirectes et leurs conséquences sur la température ambiante vont modifier la température ressentie par les animaux. En période estivale et en particulier pendant les heures les plus chaudes de la journée, la présence d'ombrages naturels (haies, arbres) ou artificiels (ombrières) permet de réduire l'exposition directe au soleil et de diminuer le risque d'hyperthermie chez la vache laitière (Nielsen et Wredle, 2023). Dans les systèmes de productions de volaille labels ou biologiques avec un accès au plein air, l'agencement des parcours, les espaces aménagés avec des arbres, des haies et des bosquets ont un rôle crucial dans le maintien d'un microclimat autour du bâtiment, mais également dans la fourniture d'ombre aux animaux (Chiron *et al.*, 2022).

En bâtiment, la température ressentie par les animaux dépend de facteurs liés à l'animal (poids, stade physiologique, niveau de production), à son micro-environnement bioclimatique (température, humidité, vitesse de l'air, etc.) et aux conditions de logement (densité animale, type de sol, orientation du bâtiment, isolation de la toiture, etc.).

Les bâtiments d'élevage jouent donc un rôle primordial sur les performances techniques et économiques des exploitations, sur le bien-être des animaux et sur les conditions de travail des éleveurs. En France, le parc des bâtiments d'élevage est vieillissant, surtout dans certaines filières : selon les chiffres de la dernière enquête Agreste (2015), l'âge moyen des bâtiments d'élevage de porcs était de vingt-deux ans (Bertin et Ramonet, 2016) et plus de 40% des élevages bovins comptaient une dernière construction ou une rénovation datant de plus de vingt ans. Les futurs bâtiments d'élevage devront prendre en compte de multiples enjeux parfois contradictoires (agrandissement des cheptels animaux, amélioration des conditions de travail, du bien-être des animaux et de la biosécurité, réduction des empreintes environnementales locales et globales et du risque climatique, etc.). Ainsi, la gestion des conditions de logement des animaux d'élevage face au changement climatique est devenue une préoccupation majeure pour les éleveurs. Par exemple, l'évolution des conditions climatiques (fortes chaleurs, fortes sécheresses) contraint de plus en plus les éleveurs de bovins laitiers ou allaitants à rentrer leur troupeau l'été afin de les protéger des fortes températures, mais également à les alimenter avec des fourrages conservés pour pallier le déficit de productivité des prairies. Par conséquent, les bâtiments doivent donc être conçus aujourd'hui non seulement pour protéger les animaux des intempéries hivernales, mais aussi pour constituer une zone de confort en période chaude. Pour cela, de nouveaux paramètres sont à prendre en compte dans leur conception et dans leur aménagement.

L'utilisation de matériaux clairs pour la construction des bâtiments permet de réfléchir les rayons du soleil et de limiter le réchauffement des bâtiments (Amand *et al.*, 2004). Lorsque la température extérieure est élevée, une ventilation efficace est cruciale pour évacuer l'air chaud (lié à la chaleur sensible produite par les animaux et aux rayonnements sur les murs et les toits du bâtiment), l'humidité (liée à la production de chaleur latente des animaux et à l'utilisation de systèmes de refroidissement) et pour renouveler l'air vicié par les gaz produits par les animaux ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  et  $\text{NH}_3$ ). Dans la plupart des filières animales, les bâtiments d'élevage possèdent des systèmes de ventilation naturelle ou mécanique. Dans des systèmes ouverts ou semi-ouverts, l'implantation des bâtiments doit être réfléchi pour bénéficier d'un vent traversant et pour maximiser la ventilation naturelle, mais également pour éviter un risque de rayonnement direct du soleil sur les animaux ou sur les zones d'abreuvement ou d'alimentation (Fournel *et al.*, 2017). En situation de fortes chaleurs, l'ajout de ventilateurs mécaniques ou de brasseurs d'air permet d'augmenter le renouvellement et la vitesse de l'air pour faciliter la dissipation de chaleur par les animaux. Les bâtiments fermés disposent tous de systèmes de ventilation mécaniques qui sont pilotés pour réguler la vitesse des ventilateurs, le renouvellement de l'air, la température et l'humidité, voire d'autres paramètres environnementaux en fonction des besoins des animaux et des conditions météorologiques extérieures. En pratique, plus la température extérieure augmente, plus l'écart entre la température intérieure et la température extérieure tend à diminuer. Dans ces conditions, le seul renouvellement de l'air ne suffit plus à maintenir une température compatible avec les besoins des animaux, avec des conséquences négatives sur leur bien-être, sur leur santé et sur leur performance. Ces effets sont accentués lorsque la densité animale devient importante, notamment en fin de phase d'engraissement chez le porc ou chez la volaille (Amand *et al.*, 2004). Dans ce cas, il est nécessaire de prévoir un dispositif permettant de refroidir l'air intérieur ou l'air entrant dans le bâtiment.

Le refroidissement adiabatique de l'air (à bilan énergétique favorable) est une stratégie abordable et efficace pour réduire la température ressentie par les animaux. Le principe général est basé sur la conversion de l'énergie thermique de l'air présente, sous forme de chaleur sensible en chaleur latente. Dans le bâtiment d'élevage, l'utilisation de ce type de système de refroidissement basé sur l'évaporation d'eau permet d'abaisser la température de l'air du bâtiment (brumisation) ou de la surface de l'animal (goutte-à-goutte, aspersion) (Liang *et al.*, 2020). L'installation et l'utilisation de filtres humides (*pad cooling*) dans les bâtiments neufs ou en rénovation sont très efficaces, notamment au cours des périodes les plus chaudes de la journée pour écrêter les pics de chaleur (Renaudeau *et al.*, 2012). Cependant, l'ensemble de ces systèmes consomme des quantités importantes d'eau, estimées à 3,13 millions de mètres cubes par an aux États-Unis pour les élevages de poulets de chair selon Liang *et al.* (2020). En élevages avicoles, les dispositifs de refroidissement par aspersion permettent de réduire de 66 % la consommation d'eau par rapport au *pad cooling*, tout en réduisant efficacement le stress thermique ressenti par les animaux (Liang *et al.*, 2020). En revanche, l'utilisation de tels systèmes requiert une gestion fine du taux de renouvellement et de la vitesse de l'air pour maximiser l'efficacité de refroidissement tout en maîtrisant l'hygrométrie afin de ne pas détériorer la qualité de l'air ou de la litière.

L'intensité et la direction des échanges de chaleur entre l'animal et son environnement (air ambiant, sol, mur ou autres congénères) sont déterminées principalement par le gradient de température entre ces deux compartiments (Renaudeau *et al.*, 2012). En situation de stress thermique, une quantité importante de la chaleur produite par les animaux peut être dissipée par conduction par un contact direct entre l'animal et le sol, si celui-ci a une bonne conductivité thermique ou s'il a été artificiellement refroidi. Bien que peu développée en France, la création d'une zone disposant d'un sol refroidi permet d'améliorer les pertes de chaleur par conduction, le confort et les performances des animaux élevés au Brésil en situation de fortes chaleurs (Silva *et al.*, 2009).

Enfin, quand cela est techniquement et économiquement possible, la réduction du nombre d'animaux par unité de surface en fin d'engraissement (Abudabos *et al.*, 2013) ou lors du transport (Shynkaruk *et al.*, 2023) est une stratégie efficace qui permet d'améliorer nettement le confort thermique des animaux et d'abaisser la surmortalité liée à la chaleur.

## ► Stratégies d'adaptation basées sur le levier génétique

Le levier génétique, en privilégiant la reproduction des animaux ayant les meilleurs potentiels d'adaptation, présente l'avantage de faire évoluer de façon pérenne les caractéristiques d'une population. La sélection des reproducteurs a été mise en place de façon organisée dans les populations d'élevage depuis les années 1960, avec d'abord des objectifs de productivité puis une diversification avec l'intégration d'indicateurs de qualité des produits, de santé, de longévité, etc., pour répondre aux évolutions des systèmes d'élevage (Ducos *et al.*, 2021). Plus récemment, la possibilité d'intégrer des indicateurs de la capacité d'adaptation des animaux aux conditions du changement climatique est étudiée avec deux défis importants : savoir prédire les nouvelles conditions d'élevage qui seront offertes aux animaux dans les années et les décennies à venir, mais qui ne sont pas observées actuellement et sont amenées à évoluer, et définir des critères et des stratégies de sélection qui correspondent à ces nouvelles

situations. Le premier défi a été évoqué dans le chapitre 9. Le second défi est abordé dans cette section, en distinguant des stratégies qui améliorent la réponse des animaux aux nouvelles conditions environnementales, et des stratégies qui font évoluer plus globalement les schémas de sélection, c'est-à-dire l'organisation des populations en sélection et de leurs liens avec l'ensemble des populations de production.

## Améliorer l'adaptation des animaux aux effets du changement climatique : quels caractères sélectionner ?

### Cibler les indicateurs physiologiques de stress thermique

Chez les animaux d'élevage, la tolérance aux températures ambiantes élevées a pour partie des fondements génétiques (Renaudeau *et al.*, 2012). De nombreuses études ont comparé la variabilité des réponses des animaux au sein d'une même espèce aux stress thermiques aigus ou chroniques. Un animal tolérant à la chaleur est un animal capable de maintenir sa température corporelle dans des limites physiologiquement acceptables lorsque la température ambiante est élevée. Ce maintien dépend de la capacité de l'animal à équilibrer la thermogenèse et la dissipation de la chaleur. Les mesures qui permettent d'identifier les animaux tolérants à la chaleur sont des indicateurs directs (température corporelle) ou indirects (fréquence respiratoire, fréquence cardiaque, transpiration) de ce phénomène. Elles sont associées à des différences génétiques entre populations, que l'on peut lier à des fréquences alléliques différentes établies à la suite de pressions environnementales différentes. On observe aussi des variabilités intrapopulations, avec des héritabilités faibles à modérées de ces indicateurs, par exemple chez le porc (Gourdine *et al.*, 2021). La tolérance à la chaleur est un caractère polygénique. Les rares exemples de gènes à effet majeur sur la réponse à la chaleur sont liés à des caractéristiques anatomiques qui généralement favorisent la dissipation de chaleur, comme le gène « *slick hair* » chez le bovin (Ortiz-Colón *et al.*, 2018) et les gènes « cou nu » et « frisé » chez la volaille (Nawab *et al.*, 2018). Des études récentes ont cherché de façon plus générique des régions génomiques associées à des réponses à la chaleur, qui permettraient d'envisager la sélection pour une meilleure tolérance à la chaleur avec des approches de sélection génomique (Worku *et al.*, 2023).

### Cibler les indicateurs d'une meilleure valorisation des ressources alimentaires

La quantité, la qualité et la variabilité des ressources alimentaires disponibles pour les animaux d'élevage sont d'ores et déjà affectées par les effets du changement climatique (voir chapitre 9). La première stratégie de sélection des animaux pour répondre à ces variations est de poursuivre l'amélioration de leur efficacité ou efficacité alimentaire (capacité à transformer les matières premières utilisées en alimentation en viande, lait ou œufs). À titre d'exemple, la quantité d'aliments nécessaire à la production d'un kilogramme de viande de porc a été réduite de 30 % depuis les années 1970. Dans les filières monogastriques (volailles, porcins), ces progrès importants sont expliqués à la fois par la sélection génétique, mais également par des améliorations des conduites d'élevage (biosécurité et conduites alimentaires). Dans l'ensemble des filières, ces progrès génétiques ont été réalisés avec des aliments généralement très digestibles

et distribués de manière non limitante, optimisés pour répondre aux besoins des animaux, même dans les filières de ruminants. Si les animaux actuels sont efficaces pour utiliser des rations alimentaires équilibrées ou très digestibles, leur capacité à bien valoriser des aliments de moindre qualité reste à déterminer. Cela nécessite d'évaluer si la nature de la ration affecte non seulement l'efficacité des animaux en valeur absolue, mais surtout leur classement, c'est-à-dire s'il existe des interactions « génétique × aliment » qui affecteraient l'efficacité alimentaire. Des relations génétiques hétérogènes (plutôt élevées entre les mesures effectuées sur les mâles nourris avec un aliment concentré, et faibles avec les mesures réalisées chez les femelles nourries avec des fourrages; Taussat *et al.*, 2023) entre les efficacités alimentaires mesurées à différents stades et dans différentes conditions chez des bovins allaitants ont été rapportées, ce qui suggère que les caractères d'efficacité diffèrent en fonction de l'aliment dans cette filière. Chez les monogastriques, peu d'interactions sont mises en évidence, par exemple pour des porcs nourris avec des aliments conventionnels ou contenant plus de fibres, mais formulés pour couvrir leurs besoins nutritionnels (Déru *et al.*, 2020). En complément de ces stratégies de sélection de l'efficacité globale, il est possible de cibler des fonctions biologiques stimulées par les nouveaux types d'aliments, telles que la digestibilité et l'efficacité d'utilisation des acides aminés, mais également des fonctions biologiques stimulées par des disponibilités variables de ressources alimentaires de qualité, telles que la capacité à constituer des réserves corporelles en période d'abondance pour les mobiliser quand les ressources deviennent limitantes, et les reconstituer ensuite. Ces nouvelles approches nécessitent de mettre au point des indicateurs mesurables en élevage. Parmi ces nouveaux indicateurs, citons par exemple l'utilisation de l'information du microbiote ruminal ou intestinal, qui contribue à la valorisation de la ration en complément des capacités propres de l'animal, grâce au concept récent de sélection basée sur l'holobionte (meilleure combinaison [animal × microbiotes]). Cependant, si le lien entre la variabilité du microbiote digestif et la variabilité des fonctions digestives a été démontré chez les bovins (Roehe *et al.*, 2016), chez le porc (Déru *et al.*, 2022) et la volaille (Mignon-Grasteau *et al.*, 2015), sa contribution à l'efficacité globale reste marginale par rapport à d'autres facteurs, et la façon de l'utiliser en sélection pour améliorer les caractères demande de stabiliser les modèles qui prédisent les liens entre microbiotes et performances, comme illustré récemment chez le porc (Calle-García *et al.*, 2023).

Enfin, dans les conditions nouvelles du changement climatique, il peut être proposé de faire évoluer la notion d'efficacité alimentaire : historiquement, elle a été sélectionnée comme la capacité de l'animal à maximiser la production par unité de ressources. Cela a amené à sélectionner des animaux plus exigeants (augmentation de la densité en acides aminés par unité d'énergie, par exemple) et aux besoins d'entretien accrus (animaux de plus grand format). Si les ressources alimentaires deviennent limitantes (absence de pâturage en été, disponibilité limitée en ressources alimentaires denses en énergie ou en protéines), de nouveaux critères d'efficacité sous contrainte ou ciblant un nutriment donné pourraient émerger, conduisant à une réorientation du profil des animaux. Il a par exemple été montré que des animaux en croissance peuvent être sélectionnés en régime alimentaire restreint pour une meilleure efficacité en maximisant la vitesse de croissance sous cette contrainte (Drouilhet *et al.*, 2016), conduisant à des réponses à la sélection différentes d'une sélection avec accès *ad libitum* à l'alimentation.

## Cibler les indicateurs d'une meilleure adaptation à des pressions sanitaires grandissantes

Par ailleurs, le changement climatique s'accompagne de l'émergence de nouvelles maladies et modifie la prévalence de certains agents pathogènes déjà présents (voir chapitre 9). Des modifications dans l'abondance, la saisonnalité et la répartition spatiale de certains parasites, agents pathogènes ou de leurs vecteurs (tiques, moustiques) sont déjà attribuables au changement climatique (Baylis, 2017; Erazo *et al.*, 2024). La sélection d'animaux résistants à ces pathologies et l'organisation des troupeaux pour contrôler leur propagation sont donc nécessaires (Phocas *et al.*, 2016). Cependant, si une base génétique existe pour la résistance à la majorité des agents pathogènes, il est souvent difficile de trouver une mesure de résistance individuelle aux maladies qui soit utilisable en sélection, car leur mesure s'appuie sur des « challenges infectieux » (Bishop et Woolliams, 2014). Il arrive que des déterminants génétiques majeurs soient identifiés et permettent la sélection grâce à la connaissance du statut de sensibilité ou de résistance des animaux à sélectionner, comme pour la tremblante (Elsen *et al.*, 1997), le syndrome dysgénésique et respiratoire du porcelet ou SDRP (Zhang *et al.*, 2020), et la coccidiose (Pinard-van der Laan *et al.*, 2009). Dans les autres cas, la mise en œuvre de sélections en routine passe généralement par l'utilisation d'indicateurs peu spécifiques, mais faciles d'accès en élevage, tels que les comptages de cellules du lait, utilisés comme indicateurs de mammites chez les ruminants laitiers, ou les comptages d'œufs dans les fèces pour les infestations parasitaires. Il est cependant difficile de cibler conjointement de multiples agents pathogènes, la sélection pour la réponse à un premier agent pathogène ne garantissant pas nécessairement des réponses favorables corrélées pour les réponses à d'autres agents pathogènes (Pinard-van der Laan *et al.*, 2009). Il a alors été proposé de sélectionner pour la résistance non spécifique aux maladies, en utilisant les enregistrements de syndromes en élevage. La notation la plus simple revient alors à un critère binaire (0 : malade ou mort; 1 : sain) à un instant  $t$ . Ce critère est héritable dans différentes populations (Lenoir *et al.*, 2022), mais demande un minimum de pression en agents pathogènes sur les animaux. Cette approche permet *a priori* de consolider la capacité générale des animaux à répondre à des agents pathogènes. Dans le contexte de changement climatique qui voit l'arrivée de nouveaux agents pathogènes dans les régions d'élevage, sélectionner pour ces réponses génériques pourrait être une option à privilégier. De plus, depuis quelques années, la gestion de certaines pathologies, en particulier celles associées au parasitisme dans les systèmes pâturés, a évolué d'une logique d'élimination des parasites et d'augmentation de la résistance par sélection vers une logique de construction d'équilibres soutenables hôtes-parasites (Hoste *et al.*, 2023). Le développement de modèles épidémiogénétiques *in silico* permet alors d'évaluer les meilleures combinaisons de stratégies de sélection, de gestion des pâturages et de composition des troupeaux (Saccareau *et al.*, 2016). Ces stratégies de sélection doivent être associées à d'autres approches, afin de limiter la pression en agents pathogènes et les risques d'émergence, par le biais de stratégies de gestion intégrée de la santé et d'une approche One Health, mais aussi des réseaux de surveillance vétérinaires et d'alerte.

## Cibler les indicateurs d'une amélioration de la robustesse générale des animaux

Chez les animaux d'élevage, le concept générique de robustesse fait généralement référence à la capacité d'un animal à exprimer son potentiel de production dans une

gamme d'environnements variés sans compromettre ses performances, sa santé et son bien-être. Une absence de robustesse peut impliquer des reclassements des animaux ou des populations en fonction de l'environnement : il s'agit d'interactions « génotype × environnement » (plasticité) (Rovelli *et al.*, 2020). Selon la nature et l'importance de ces interactions, des efforts différents sont consacrés à la gestion génétique des populations ou à l'amélioration et au contrôle des environnements d'élevage. Cependant, la difficulté majeure de la sélection pour la robustesse réside dans la nécessité, très demandeuse en données connectées génétiquement entre ces environnements (Knap et Su, 2008), d'estimer précisément le potentiel génétique des individus dans un gradient d'environnements plus ou moins bien caractérisés. Une autre approche consiste à essayer de capter ces différences de robustesse entre animaux à partir de l'hétérogénéité des performances répétées d'un animal au cours de sa carrière : on s'attend à ce qu'un animal robuste ait des performances très similaires d'une répétition à l'autre, alors qu'un animal moins robuste verra ses performances varier de façon plus importante. Cela correspondrait par exemple à un animal dont la température corporelle varie peu en fonction de la température ambiante, ou d'une femelle qui maintient sa production laitière quand les ressources alimentaires se raréfient en été. Des modèles statistiques spécialisés sont disponibles pour capter une variabilité génétique de ces réponses, comme les modèles dits de canalisation (Bodin *et al.*, 2010) et les modèles analysant les trajectoires de données longitudinales (Le *et al.*, 2022). Ces approches peuvent s'appliquer à des enregistrements de routine des niveaux de production, de reproduction, de santé et de bien-être obtenus chez des animaux exposés à des températures variées, ou chroniquement élevées, ce qui affranchit du besoin d'enregistrements spécifiques de réponses d'adaptation. Cependant, les mécanismes biologiques impliqués dans le maintien de différentes fonctions (croissance, reproduction, santé, etc.) sont mal connus, et leurs liens restent à décrire (Ravagnolo *et al.*, 2000). La généralité des réponses face à différents défis n'est donc pas validée, même si certaines études suggèrent des relations favorables entre les réponses à des stress spécifiques et la résilience générale. Il est donc important de considérer plusieurs indicateurs de diminution des performances en situation de températures extrêmes simultanément (Vinet *et al.*, 2024).

## Améliorer l'adaptation des animaux aux effets du changement climatique : quelles évolutions des schémas de sélection actuels ?

Pour l'amélioration des populations d'élevage, une fois les indicateurs d'intérêt identifiés, il est possible, en privilégiant la reproduction des individus qui apporteront des caractéristiques favorables à la population, de sélectionner pour une meilleure adaptation de la population. Cette stratégie est très efficace quand le caractère cible est facile à mesurer, disponible sur beaucoup d'animaux et héritable, ou que des gènes majeurs sont connus et que le génotypage permet d'orienter l'évolution de leur fréquence dans la population. Dans la majorité des filières animales, les schémas de sélection s'appuient sur des index de sélection qui intègrent conjointement des caractères de production, des caractères fonctionnels et de santé, dans des stratégies de sélection multicaractères (par exemple dans la filière porcine ; Bidanel *et al.*, 2020). Cela permet d'ajuster les pondérations de tous les caractères à sélectionner en fonction de leurs covariances génétiques, pour assurer que les progrès réalisés sur certains n'entraînent pas la détérioration des autres. Pour intégrer les objectifs d'adaptation des animaux

aux effets du changement climatique, cette approche devra être maintenue, car il a été montré chez la plupart des espèces que les animaux les plus producteurs sont généralement les plus sensibles à des températures élevées, certainement en lien avec des productions de chaleur métaboliques accrues qui pourraient limiter leur capacité à faire face à des vagues de chaleur (voir chapitre 9).

La majorité des stratégies de sélection actuelles repose sur l'amélioration de la performance de la population par la sélection d'individus qui ont le meilleur potentiel génétique individuel. Il a été proposé qu'au-delà des caractéristiques individuelles il existe une capacité génétique des individus à contribuer à l'adaptation du groupe, qui pourrait être sélectionnée pour favoriser les comportements de coopération. L'application à la sélection des espèces d'élevage est envisagée par la mise en œuvre de modèles génétiques dits à effets indirects : la valeur d'un individu est la somme de son effet individuel sur sa propre performance, et de son effet sur celle des autres individus du groupe (par exemple, Marjanovic *et al.*, 2018). Ce concept pourrait être étendu à la mise en place de troupeaux hétérogènes, dans lesquels les aptitudes des animaux seraient complémentaires entre troupeaux ou entre espèces, permettant par exemple de valoriser des ressources alimentaires différentes dans l'année ou de limiter la propagation d'agents pathogènes. Si de telles approches émergent sur le terrain chez les plantes, qui s'appuient généralement sur des lignées génétiquement homogènes, leur validation et leur déploiement en sélection animale, où les populations ont une variabilité intrinsèque élevée, demandent des développements méthodologiques encore importants.

Finalement, des stratégies sont aussi envisagées pour préparer précocement l'animal à des conditions altérées d'élevage par une acclimation précoce (Loyau *et al.*, 2015) et un établissement de marques épigénétiques (David *et al.*, 2019). Un animal à fort potentiel pourrait ainsi être mieux préparé aux conditions stressantes qu'il rencontrera. Une baisse de mortalité chez les poulets qui ont été soumis à des températures d'incubation des œufs élevées et cycliques a ainsi été observée quand ils sont ensuite soumis à la chaleur. Néanmoins ces opérations doivent cibler des fenêtres de développement particulières pour ne pas avoir d'effets contraires (Serviento *et al.*, 2020). Il est à noter que les modifications ainsi induites peuvent être transmises sur plusieurs générations mais sont potentiellement réversibles, comme cela a été montré chez les mammifères (Laporta *et al.*, 2024) et chez la caille (Vitorino Carvalho *et al.*, 2023). Les mécanismes impliqués sont en partie épigénétiques, et modifient l'expression future du génome des animaux ainsi préacclimatés.

## ► Stratégies de lutte contre l'émergence ou la réémergence de nouvelles maladies

Les hausses de température associées au changement climatique auront à la fois des impacts directs (croissance accélérée d'agents pathogènes, augmentation de l'aire de distribution d'arthropodes vecteurs d'agents pathogènes, par exemple) et indirects (modification des habitats et des migrations d'animaux sauvages, pouvant favoriser les contacts entre la faune sauvage et les animaux d'élevage) sur la circulation et la propagation des agents pathogènes en élevage (voir chapitre 9). Ces impacts seront très hétérogènes d'une région à l'autre, car ils dépendent des variations et des aléas climatiques locaux d'une part et des caractéristiques des systèmes de production sur un territoire donné (modes d'élevage, mesures de surveillance, de prévention, de

biosécurité et de gestion des risques). On conçoit aisément que, pour des agents pathogènes ayant pour réservoir les animaux d'élevage comme le virus de la fièvre catarrhale ovine, les régions d'élevages intensifs et de grande taille favoriseront des émergences de plus grande ampleur, aux conséquences sanitaires et économiques majeures. Dans un tel contexte, il apparaît donc central de consolider et d'adapter les réseaux et les outils de surveillance et de gestion aux enjeux du changement climatique aux échelons globaux, nationaux, mais également territoriaux : des stratégies flexibles et intégrées, s'appuyant sur un partenariat régional fort et relevant d'une approche One Health, autoriseront un partage efficace d'informations, une anticipation des risques, un diagnostic précoce, une gestion et une prévention rapide en cas de foyers (disponibilité de plans d'urgence, recourant à différentes mesures comme l'encadrement des mouvements d'animaux domestiques, la vaccination, etc.). Le réseau collaboratif CaribVet<sup>48</sup> créé en 2006 dans la région des Caraïbes illustre très bien ce concept : il appuie les capacités de surveillance nationale de trente-quatre territoires caribéens et le développement d'une stratégie régionale en santé animale, pour une meilleure anticipation des risques émergents (influenza aviaire et peste porcine africaine actuellement).

L'épidémiosurveillance occupe une place prépondérante dans la lutte contre les maladies animales, car elle permet une détection des émergences, une intervention sur les phases précoces de transmission et un suivi de l'évolution des maladies et des agents pathogènes. Le caractère transfrontalier des émergences et des épizooties encourage à renforcer les outils d'épidémiosurveillance et de veille sanitaire internationale, qui sont coordonnés en France par la plateforme d'Épidémiologie en santé animale<sup>49</sup> (ESA). La plateforme ESA, en fédérant les acteurs nationaux du sanitaire et en appuyant les politiques publiques pour le déploiement de systèmes de surveillance plus efficaces, joue un rôle essentiel depuis 2011 dans le suivi des épizooties animales (exemple avec le virus Schmallenberg; Dominguez *et al.*, 2014). D'autres plateformes récemment développées peuvent appuyer la détection des épizooties chez l'animal de façon non spécifique, comme Padi-Web au travers de la collecte automatique d'actualités sur les maladies animales à partir du Web (Valentin *et al.*, 2023). Des priorisations et des cartographies des risques d'émergence en matière de maladies animales, tenant compte des enjeux climatiques locaux et des caractéristiques du système alimentaire, ont été générées tant au niveau national<sup>50</sup> qu'international (Carlson *et al.*, 2022). La détection et le contrôle rapides des agents pathogènes émergents nécessiteront par ailleurs un suivi précis de l'identité, de la carte génétique et des capacités d'évolution des agents pathogènes par les laboratoires experts (laboratoires de référence); un diagnostic précis et rapide au chevet de l'animal et le développement de nouvelles stratégies de vaccination (vaccins de nouvelle génération comme les vaccins à ARNm, vaccins dits Diva permettant de différencier les animaux vaccinés de ceux naturellement infectés, etc.) devront être soutenus (Hobbs *et al.*, 2021; de Pinho Favaro *et al.*, 2022).

Il est important dans le même temps de promouvoir la recherche pour consolider les connaissances sur les cycles épidémiologiques des maladies, pour identifier les futurs agents pathogènes émergents à l'interface faune sauvage-faune domestique (veille écologique) et pour modéliser plus finement l'impact du changement climatique sur

48. <https://www.caribvet.net/fr>

49. <https://www.plateforme-esa.fr/fr>

50. <https://www.anses.fr/fr/system/files/SANT-Ra-Rechauffementclimatique.pdf>

l'émergence des maladies en élevages, avec l'ambition d'améliorer notre capacité à prévoir les futures menaces, exacerbées par le changement climatique, pour la santé animale. Le développement de l'éducation sanitaire du grand public ainsi que les sciences citoyennes mobilisant les non-scientifiques autour des enjeux des maladies émergentes (par exemple celui des vecteurs de maladies, comme les tiques<sup>51</sup>) permettront de mieux appréhender les verrous culturels, organisationnels et autres, associés au déploiement des mesures de gestion et d'augmenter l'efficacité de la maîtrise du risque sanitaire.

## ► Vers une reconception des systèmes d'élevage pour répondre aux enjeux du changement climatique

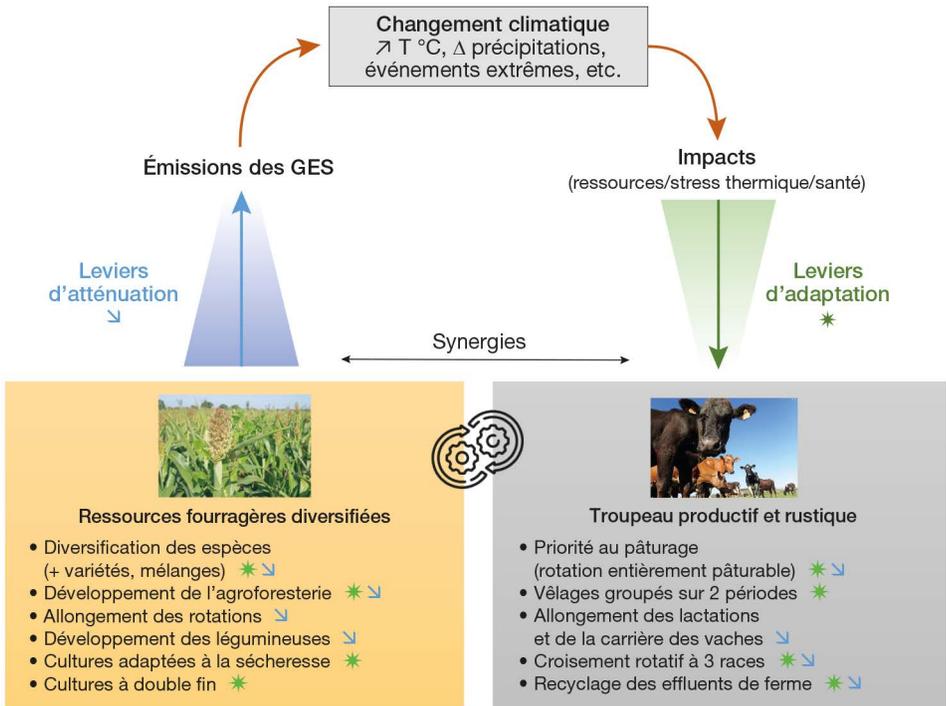
À court terme, l'utilisation de leviers d'adaptation «incrémentaux» basés sur la modification d'un élément du système d'élevage (par exemple la gestion de l'alimentation, les conditions de logement des animaux, l'amélioration des schémas de sélection génétique) permet assez souvent d'apporter des solutions immédiates pour réduire les impacts des aléas climatiques sur les systèmes de production animale actuels. En revanche, sur le long terme, ils peuvent dans certains cas entrer en contradiction avec les mesures d'atténuation et s'avérer insuffisants pour réduire la vulnérabilité des exploitations face aux enjeux futurs du changement climatique. Face à ces enjeux, des stratégies en rupture («transformationnelles») avec les solutions actuelles doivent être envisagées. Rigolot *et al.* (2019) distinguent deux modalités d'adaptation transformationnelle, selon qu'elles impliquent une reconception des systèmes d'élevage ou des stratégies d'adaptation territoriales pouvant aller jusqu'à une relocalisation des activités d'élevage.

La reconception des systèmes d'élevage passe par une mobilisation combinée de différents types de leviers internes à l'exploitation (la gestion du troupeau, des ressources et du travail) pour tendre vers plus de flexibilité opérationnelle (plus grande marge de manœuvre) et plus de résilience vis-à-vis des aléas d'origine climatique. Elle implique des changements importants de paradigme, notamment sur la notion de diversité, qui dans ce cas devient un levier et un atout pour sécuriser les exploitations au lieu d'être vue plutôt comme une source de travail supplémentaire, voire un risque de perte de revenus dans les systèmes d'élevage dit «conventionnels». En pratique, cette diversité permet à l'éleveur de «ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier» et doit être construite dans l'ensemble des composantes du système d'élevage pour laisser la possibilité à l'éleveur de redéfinir ou d'ajuster la stratégie de conduite du troupeau et des cultures selon les aléas. Compte tenu du fort lien au sol de la majorité des élevages de ruminants, la reconception du système est probablement plus «facile» à imaginer dans ces filières que dans les filières monogastriques (porc, volaille). Cette reconception implique souvent un changement radical de pratiques avec la construction progressive d'une nouvelle cohérence systémique (Rigolot *et al.*, 2019). En pratique, la mise en œuvre de ce type de démarche reste complexe et demeure probablement toujours perçue comme risquée pour les éleveurs.

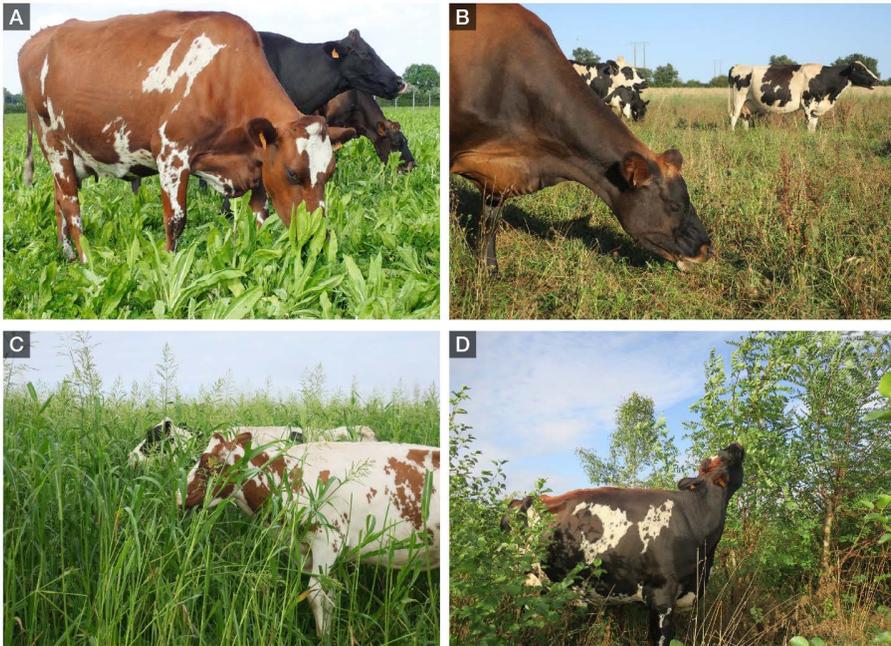
Depuis 2013, INRAE expérimente en grandeur nature l'impact de la reconception d'un système bovin laitier dans une zone classiquement soumise à des sécheresses estivales (Poitou-Charentes). Le dispositif OasYs est conduit sans irrigation et avec très peu d'intrants (figures 12.2 et 12.3). Il teste de manière imbriquée toute une série de

51. <https://www.citique.fr/>

leviers agroécologiques d'adaptation et d'atténuation au changement climatique, que ce soit au niveau du système fourrager ou du système d'élevage (Novak *et al.*, 2013). Dans OasYs, l'adaptation au changement climatique est basée sur la diversification des ressources fourragères, sur la mise en place de deux périodes de vêlage et sur l'utilisation de plantes et d'animaux moins sensibles aux températures élevées. Les leviers d'atténuation reposent sur le développement du pâturage et des légumineuses pour économiser les intrants consommateurs d'énergie fossile, sur le stockage de carbone dans les sols par les prairies et les arbres, et sur la limitation des périodes où les animaux sont improductifs pour réduire la production de méthane par litre de lait sur toute la carrière des animaux. Au niveau du système fourrager, les espèces sont diversifiées à la fois sur l'assolement et au sein des parcelles (Novak *et al.*, 2018). Les prairies associent diverses graminées, légumineuses et dicotylédones, avec des espèces et des variétés différentes pour chacune d'entre elles, de manière à avoir un large panel de précocités et d'aptitudes à pousser aux différentes saisons et sous des conditions climatiques variées. Des cultures annuelles prennent le relais des prairies afin d'allonger la saison de pâturage, avec par exemple des betteraves fourragères, du sorgho multicoupe ou du méteil. Afin de diversifier les stocks, les fourrages conservés comportent, en plus de l'herbe, du sorgho monocoupe, du maïs et des méteils. Le sorgho et le méteil sont à double fin et peuvent être pâturés ou récoltés selon les conditions climatiques de l'année. Des plantations de ligneux sont un élément supplémentaire de cette diversification fourragère. La stratégie d'élevage a pour objectif de valoriser le mieux possible ces ressources fourragères (y compris les arbres) par le pâturage. Ainsi, deux périodes de vêlage, centrées



**Figure 12.2.** Représentation schématique de l'ensemble des leviers d'adaptation et d'atténuation mis en place dans le dispositif OasYs (INRAE Lusignan).



**Figure 12.3.** Illustrations en lien avec le dispositif OasYs.

A : vaches croisées avec des robes de différentes couleurs, pâturant une prairie riche en chicorée au printemps. B : vaches pâturant une prairie riche en légumineuses conservées en stock sur pied en été. C : vaches pâturant un couvert de sorgho multicolore en été. D : vaches pâturant un arbre fourrager (robinier) en été sur une parcelle agroforestière.

sur les périodes de pousse de l'herbe (printemps et automne), ont été mises en place afin de bénéficier d'une alimentation abondante et de bonne qualité lorsque les besoins des animaux sont les plus élevés. Cela permet également de s'adapter à un aléa qui affecterait la pousse de l'herbe sur l'une des deux saisons. Les lactations ont été allongées à seize mois pour diminuer les périodes improductives et pour améliorer la reproduction des animaux. Enfin, depuis juin 2013, le troupeau est engagé dans un croisement rotatif à trois races (Holstein, rouge scandinave, jersiaise) afin de disposer de vaches laitières plus rustiques, avec de bonnes capacités de production et de reproduction, et bien adaptées au pâturage. Le croisement avec la jersiaise vise en outre à améliorer les taux de matière utile du lait, mais aussi à limiter l'impact des températures élevées sur la production laitière. Les résultats sont très satisfaisants, tant aux niveaux technique et économique (Novak *et al.*, 2020b) qu'environnemental (Novak *et al.*, 2022b), même si tous les leviers mis en place ne sont pas encore pleinement actifs.

## ► Dispositifs permettant une prise en charge collective des risques

En complément de mesures mises en place par l'éleveur pour s'adapter ou pour rendre son système de production plus résilient aux conséquences du changement climatique (« autoassurance »), une partie de la gestion du risque climatique peut être mutualisée. Une gestion territoriale de l'eau avec la création de retenues de substitution pour irriguer

les cultures utilisées localement en alimentation animale est un exemple de stratégies pour mutualiser le risque de sécheresse. L'utilisation de dispositifs assurantiels pour sécuriser et pour limiter les pertes de revenus lors des années marquées par de forts aléas climatiques est également une option possible. Généralement, les sinistres liés à l'impact d'événements extrêmes sur les infrastructures de l'élevage et leurs conséquences directes ou indirectes sur le revenu de l'éleveur sont couverts par l'assurance multirisque agricole. L'éleveur peut également souscrire une assurance pour couvrir le risque de surmortalité dans son troupeau. Si une surmortalité liée à un coup de chaleur dans les bâtiments est prise en charge, celle consécutive à une maladie contagieuse ne l'est pas toujours. Aujourd'hui, moins de 10% des éleveurs ont souscrit une assurance qui couvre la mortalité des troupeaux (données Pacifica, compagnie d'assurances dommages du groupe Crédit agricole, communication personnelle). Depuis début 2023, la réforme de l'assurance récolte a été mise en place pour remplacer le régime des calamités agricoles et l'offre assurantielle proposée dès 2005, tous deux jugés peu adaptés par rapport à la forte inflation des risques climatiques. Ce nouveau système crée une protection plus universelle pour les agriculteurs face aux risques climatiques, qu'ils choisissent de s'assurer ou non. Il est basé sur le partage du risque entre la solidarité nationale, les compagnies d'assurances privées et les agriculteurs, avec des taux d'intervention indexés sur les taux de pertes de production. L'assurance « prairie » couvre les pertes (liées à la sécheresse ou aux inondations) quantitatives de production d'herbe sur pied destinée à l'alimentation des animaux, mais pas l'incapacité de récolter ou de pâturer ni les pertes de qualité de l'herbe. Au-delà de 20% de déficit de pousse d'herbe, l'éleveur qui a souscrit une assurance « prairie » voit une partie de ses pertes prise en charge d'abord par son assurance puis par l'État, si le déficit de production d'herbe est supérieur à 30%. L'État incite fortement les éleveurs à souscrire une assurance en proposant un abaissement de la franchise minimum (20% contre 30%) et en subventionnant à hauteur de 70% le montant de la prime d'assurance. Cela permet à un éleveur d'assurer ses prairies à un coût raisonnable (environ 10 €/ha, aides déduites ; données Pacifica, communication personnelle). Actuellement, environ 8 à 10% de la surface agricole (SAU) implantée en prairie est assurée en France (contre environ 1% avant la réforme), et l'objectif est d'atteindre 30% des surfaces assurées en 2030. Dans le futur, l'amélioration du taux de pénétration de ces produits assurantiels passera d'abord par une meilleure sensibilisation des éleveurs aux conséquences du changement climatique, notamment dans les régions qui sont peu affectées jusqu'à présent, mais également par l'acceptation par l'ensemble des acteurs (éleveurs, syndicats, etc.) de l'indice établi à partir de données satellitaires pour calculer les variations de la production de biomasse.

## ► Conclusion

Au vu de l'augmentation de la fréquence et de la gravité des phénomènes météorologiques extrêmes et des autres aléas climatiques, l'adaptation des élevages aux conséquences du changement climatique est un défi majeur pour l'avenir des filières animales. Elle implique de prendre conscience des aléas et des risques auxquels les éleveurs sont actuellement exposés ou le seront à l'avenir (voir chapitre 9), et d'intégrer ces éléments dans des stratégies globales pour planifier l'adaptation, tout en travaillant sur l'atténuation et sur la durabilité économique des exploitations agricoles.

Pour répondre à ces défis, il est nécessaire d'adopter des approches intégrées et holistiques, combinant plusieurs leviers et échelles, allant de l'échelle individuelle

de l'animal à celle du territoire et en gérant les synergies ou les antagonismes entre ces différents niveaux d'organisation. À long terme, les stratégies «incrémentales» pourraient ne pas suffire, et des adaptations «transformantes» pourraient s'avérer nécessaires, allant jusqu'à des changements radicaux des systèmes ou des objectifs de production, voire par la relocalisation des exploitations dans des territoires moins touchés par le changement climatique ou qui permettent une meilleure réassociation entre les systèmes de culture et d'élevage. Sur ce point, l'expérimentation dans le dispositif d'OasYs montre que la conception de ce type de système innovant est possible. Par ailleurs, le changement climatique peut, dans certains cas, offrir de nouvelles opportunités, par exemple la possibilité de relocaliser des élevages de ruminants dans des zones où l'allongement de la durée du pâturage pourrait être favorisé par un adoucissement des températures.

Bien que ce chapitre se concentre sur les stratégies d'adaptation pour contrer les effets à court et long terme du changement climatique, il ne traite pas en profondeur des synergies, des complémentarités ou des antagonismes avec la nécessité de réduire les émissions nettes de gaz à effet de serre de l'élevage ou de mieux préserver et partager l'utilisation de l'eau entre tous les acteurs du territoire. Cela souligne ainsi le besoin d'une part de travaux complémentaires pour renforcer le soutien aux décisions politiques, et d'autre part de gestion visant à atteindre les objectifs d'adaptation et d'atténuation du changement climatique, et à éviter la maladaptation et la malatténuation.

## ► Références

- Abudabos A.M., Samara E.M., Hussein E.O.S., Al-Ghadi M.a.Q., Al-Atiyat R.M., 2013. Impacts of stocking density on the performance and welfare of broiler chickens, *Italian Journal of Animal Science*, 12, e11, <https://doi.org/10.4081/ijas.2013.e11>.
- Amand G., Aubert C., Bourdette C., Bouvarel I., Chevalier D., Dusantier A. *et al.*, 2004. La prévention du coup de chaleur en aviculture, *Sciences & Techniques Avicoles, La revue scientifique de l'aviculture*, hors-série, mai 2004, 64 p.
- Baylis M., 2017. Potential impact of climate change on emerging vector-borne and other infections in the UK, *Environmental Health*, 16, 112, <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0326-1>.
- Bertin C., Ramonet Y., 2016. État des lieux des bâtiments d'élevage de porcs en Bretagne chez les naisseurs-engraisseurs en 2015, *Journées de la recherche porcine*, 48, 1-6.
- Bidanel J.P., Silalahi P., Tribout T., Canario L., Ducos A., Garreau H. *et al.*, 2020. Cinquante années d'amélioration génétique du porc en France : bilan et perspectives, *INRAE Productions Animales*, 33, 1-16, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2020.33.1.3092>.
- Bishop S.C., Woolliams J.A., 2014. Genomics and disease resistance studies in livestock, *Livestock Science*, 166, 190-198, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.04.034>.
- Block E., 1994. Manipulation of dietary cation-anion difference on nutritionally related production diseases, productivity, and metabolic responses of dairy cows, *Journal of Dairy Science*, 77, 1437-1450, [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(94\)77082-x](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(94)77082-x).
- Bodin L., Bolet G., Garcia M., Garreau H., Larzul C., David I., 2010. Robustesse et canalisation : vision de généticiens, *INRAE Productions Animales*, 23, 11-22, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2010.23.1.3281>.
- Calle-García J., Ramayo-Caldas Y., Zingaretti L.M., Quintanilla R., Ballester M., Pérez-Enciso M., 2023. On the holobiont 'predictome' of immunocompetence in pigs, *Genetics Selection Evolution*, 55, 29, <https://doi.org/10.1186/s12711-023-00803-4>.
- Carlson C.J., Albery G.F., Merow C., Trisos C.H., Zipfel C.M., Eskew E.A. *et al.*, 2022. Climate change increases cross-species viral transmission risk, *Nature*, 607, 555-562, <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04788-w>.

- Ceï W., Salah N., Alexandre G., Bambou J.C., Archimède H., 2018. Impact of energy and protein on the gastro-intestinal parasitism of small ruminants: A meta-analysis, *Livestock Science*, 212, 34-44, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.03.015>.
- Cériac S., Durbant P., Godard X., Barbier C., Feuillet D., Félicité Y. *et al.*, 2019. Effect of the nutritional status of Creole goats on the density-dependent prolificacy of *Haemonchus contortus*, *Veterinary Parasitology*, 276, 108973, <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2019.108973>.
- Chauhan S.S., Rashamol V.P., Bagath M., Sejian V., Dunshea F.R., 2021. Impacts of heat stress on immune responses and oxidative stress in farm animals and nutritional strategies for amelioration, *International Journal of Biometeorology*, 65, 1231-1244, <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02083-3>.
- Chiron G., Marion P., Lesgourgues M., Méda B., Fortun-Lamothe L., Liagre F. *et al.*, 2022. Bouquet – Une méthode pour évaluer les services rendus par les ateliers de volailles plein-air, *Innovations Agronomiques*, 85, 31-46, <https://doi.org/10.17180/ciag-2022-vol85-art03>.
- Collin A., Coustham V., Tona J.K., Tesseraud S., Mignon-Grasteau S., Méda B. *et al.*, (2024). Face au changement climatique, quelles stratégies d'atténuation et d'adaptation pour les productions avicoles?, *INRAE Productions Animales*, 37(1), 8069, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2024.37.1.8069>.
- David S.-A., Vitorino Carvalho A., Gimonet C., Brionne A., Hennequet-Antier C., Piégu B. *et al.*, 2019. Thermal manipulation during embryogenesis impacts H3K4me3 and H3K27me3 histone marks in chicken hypothalamus, *Frontiers in Genetics*, 10, 1207, <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.01207>.
- De Basilio V., Vilarino M., Yahav S., Picard M., 2001. Early age thermal conditioning and a dual feeding program for male broilers challenged by heat stress, *Poultry Science*, 80, 29-36, <https://doi.org/10.1093/ps/80.1.29>.
- Delaby L., Horan B., 2021. Improved efficiency in temperate grass based dairy systems, *INRAE Production Animales*, 34, 161-172, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.3.4870>.
- Delaby L., Dozias D., Leurent-Colette S., 2022. Le tour du moha en 80 jours, 3R – Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, 26, 174, <http://journees3r.fr/sipip.php?article5022>.
- De Pinho Favaro M.T., Atienza-Garriga J., Martínez-Torró C., Parladé E., Vázquez E., Corchero J.L. *et al.*, 2022. Recombinant vaccines in 2022: a perspective from the cell factory, *Microbial Cell Factories*, 21, 203, <https://doi.org/10.1186/s12934-022-01929-8>.
- Déru V., Bouquet A., Hassenfratz C., Blanchet B., Carillier-Jacquin C., Gilbert H., 2020. Impact of a high-fibre diet on genetic parameters of production traits in growing pigs, *Animal*, 14, 2236-2245, <https://doi.org/10.1017/S1751731120001275>.
- Déru V., Tiezzi F., Carillier-Jacquin C., Blanchet B., Cauquil L., Zemb O. *et al.*, 2022. Gut microbiota and host genetics contribute to the phenotypic variation of digestive and feed efficiency traits in growing pigs fed a conventional and a high fiber diet, *Genetics Selection Evolution*, 54, 55, <https://doi.org/10.1186/s12711-022-00742-6>.
- Dominguez M., Gache K., Touratier A., Perrin J.-B., Fediaevsky A., Collin E. *et al.*, 2014. Spread and impact of the Schmallenberg virus epidemic in France in 2012-2013, *BMC Veterinary Research*, 10, 248, <https://doi.org/10.1186/s12917-014-0248-x>.
- Drouilhet L., Achard C.S., Zemb O., Molette C., Gidenne T., Larzul C. *et al.*, 2016. Direct and correlated responses to selection in two lines of rabbits selected for feed efficiency under ad libitum and restricted feeding: I. Production traits and gut microbiota characteristics, *Journal of Animal Science*, 94, 38-48, <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9402>.
- Ducos A., Douhard F., Savietto D., Sautier M., Fillon V., Gunia M. *et al.*, 2021. Contributions de la génétique animale à la transition agroécologique des systèmes d'élevage, *INRAE Productions Animales*, 34, 79-96, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.2.4773>.
- Elsen J.M., Barillet F., Vu Tien Khang J., Schelcher F., Amigues Y., Laplanche J.L. *et al.*, 1997. Génétique de la sensibilité à la tremblante ovine : recherches en cours et perspectives, *INRAE Productions Animales*, 10, 133-140, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.1997.10.2.3989>.
- Elshafaei H.E., Rashed R.R., Goma A.A., El-Kazaz S.E., Kerr M.J., Smith M. *et al.*, 2020. Use of water electrolyte supplementation for three days prior to processing helps alleviate the consequences of a severe thermal challenge on performance in meat chickens, *Livestock Science*, 242, 104260, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104260>.

- Emile J.C., Coutard J.-P., Forel E., Stephany D., 2016. Développer les associations annuelles céréales-protéagineux dans les systèmes fourragers, *Fourrages*, 226, 143-151.
- Erazo D., Grant L., Ghisbain G., Marini G., Colón-González F.J., Wint W. *et al.*, 2024. Contribution of climate change to the spatial expansion of West Nile virus in Europe, *Nature Communications*, 15, 1196, <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45290-3>.
- Fournel S., Ouellet V., Charbonneau É., 2017. Practices for alleviating heat stress of dairy cows in humid continental climates: A literature review, *Animals (MDPI)*, 7, 35, <https://doi.org/10.3390/ani7050037>.
- Francis C.A., Macleod M.G., Anderson J.E.M., 1991. Alleviation of acute heat stress by food withdrawal or darkness, *British Poultry Science*, 32, 219-225, <https://doi.org/10.1080/00071669108417343>.
- Gamba J.P., Rodrigues M.M., Garcia Neto M., Perri S.H.V., Faria Júnior M.J.d.A., Pinto M.F., 2015. The strategic application of electrolyte balance to minimize heat stress in broilers, *Brazilian Journal of Poultry Science*, 17, 237-246, <https://doi.org/10.1590/1516-635x1702237-246>.
- Gourdine J.-L., Rauw W.M., Gilbert H., Pouillet N., 2021. The Genetics of thermoregulation in pigs: A review, *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 770480, <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.770480>.
- Hobbs E.C., Colling A., Gurung R.B., Allen J., 2021. The potential of diagnostic point-of-care tests (POCTs) for infectious and zoonotic animal diseases in developing countries: Technical, regulatory and sociocultural considerations, *Transboundary and Emerging Diseases*, 68, 1835-1849, <https://doi.org/10.1111/tbed.13880>.
- Hoch T., Begon C., Cassar-Malek I., Picard B., Savary-Auzeloux I., 2003. Mécanismes et conséquences de la croissance compensatrice chez les ruminants, *INRAE Productions Animales*, 16, 49-59, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2003.16.1.3644>.
- Hoste H., Ravinet N., Chartier C., Marie-Magdeleine C., Bambou J.-C., Bonneau M. *et al.*, 2023. Réduction d'usage et alternatives aux antiparasitaires en élevage des ruminants, *INRAE Productions Animales*, 35, 327-344, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2022.35.4.7333>.
- IPCC, 2023. Summary for Policymakers, in *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Genève, Suisse, p. 1-34, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>.
- Knap P.W., Su G., 2008. Genotype by environment interaction for litter size in pigs as quantified by reaction norms analysis, *Animal*, 2, 1742-1747, <https://doi.org/10.1017/s1751731108003145>.
- Laporta J., Khatib H., Zachut M., 2024. Review: Phenotypic and molecular evidence of inter- and trans-generational effects of heat stress in livestock mammals and humans, *Animal*, 101121, <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101121>.
- Le V., Rohmer T., David I., 2022. Impact of environmental disturbances on estimated genetic parameters and breeding values for growth traits in pigs, *Animal*, 16, 100496, <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100496>.
- Leclère D., Havlík P., Fuss S., Schmid E., Mosnier A., Walsh B. *et al.*, 2014. Climate change induced transformations of agricultural systems: insights from a global model, *Environmental Research Letters*, 9, 124018, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124018>.
- Lemaire G., Pflimlin A., 2007. Les sécheresses passées et à venir : quels impacts et quelles adaptations pour les systèmes fourragers ?, *Fourrages*, 190, 163-180.
- Lenoir G., Flatres-Grall L., Friggens N.C., David I., 2022. Robustness scores in fattening pigs based on routinely collected phenotypes: determination and genetic parameters, *Journal of Animal Science*, 100, 157, <https://doi.org/10.1093/jas/skac157>.
- Liang Y., Tabler G.T., Dridi S., 2020. Sprinkler technology improves broiler production sustainability: From stress alleviation to water usage conservation: A mini review, *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 544814, <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.544814>.
- Loyau T., Bedrani L., Berri C., Métayer-Coustard S., Praud C., Coustham V. *et al.*, 2015. Cyclic variations in incubation conditions induce adaptive responses to later heat exposure in chickens: a review, *Animal*, 9, 76-85, <https://doi.org/10.1017/s1751731114001931>.
- Lüscher A., Barkaoui K., Finn J.A., Suter D., Suter M., Volaire F., 2023. Utilisation de la diversité végétale pour réduire la vulnérabilité et accroître la résilience à la sécheresse des prairies productives permanentes et semées, *Fourrages*, 253, 61-74.

- Mahieu M., 2013. Effects of stocking rates on gastrointestinal nematode infection levels in a goat/cattle rotational stocking system, *Veterinary Parasitology*, 198, 136-144, <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2013.08.029>.
- Marjanovic J., Mulder H.A., Rönnegård L., Bijma P., 2018. Modelling the co-evolution of indirect genetic effects and inherited variability, *Heredity*, 121, 631-647, <https://doi.org/10.1038/s41437-018-0068-z>.
- Mignon-Grasteau S., Narcy A., Rideau N., Chantry-Darmon C., Boscher M.-Y., Sellier N. *et al.*, 2015. Impact of selection for digestive efficiency on microbiota composition in the chicken, *PLoS ONE*, 10, e0135488, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135488>.
- Moreau J.C., Lorgeou J., 2007. Premiers éléments de prospective sur les conséquences des changements climatiques : impacts sur les prairies, le maïs et les systèmes fourragers, *Fourrages*, 191, 285-295.
- Nawab A., Ibtisham F., Li G., Kieser B., Wu J., Liu W. *et al.*, 2018. Heat stress in poultry production: Mitigation strategies to overcome the future challenges facing the global poultry industry, *Journal of Thermal Biology*, 78, 131-139, <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.08.010>.
- Nielsen P.P., Wredle E., 2023. How does the provision of shade during grazing affect heat stress experienced by dairy cows in Sweden?, *Animals (MDPI)*, 3, 3823, <https://doi.org/10.3390/ani13243823>.
- 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.
- Novak S., Delagarde R., Fiorelli J.-L., 2013. Conception d'un système fourrager bioclimatique : la démarche initiée à Lusignan, *Fourrages*, 215, 241-246.
- Novak S., Audebert G., Chargelegue F., Emile J.C., 2018. Sécuriser un système laitier avec des fourrages économes en eau et en énergie fossile, *Fourrages*, 233, 27-34.
- Novak S., Barre P., Delagarde R., Mahieu S., Niderkorn V., Emile 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.
- Novak S., Godoc B., Chargelegue F., Audebert G., Troquier C., 2020b. Analyse technico-économique d'un système bovin laitier agroécologique adapté au changement climatique, 3R – Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, 25, 4 p.
- Novak S., Didiot C., Bourgoïn F., Guyard R., Chargelegue F., Audebert G. *et al.*, 2022a. Variability of multispecies grasslands production in a diversified agroecological dairy system, in Delaby L. *et al.* (Eds), *Proceedings of the 29<sup>th</sup> EGF Meeting "Grassland at the heart of circular and sustainable food systems*, Grassland Science in Europe, 27, p. 451-453, Wageningen Academic Publishers.
- Novak S., Guyard R., Chargelegue F., Audebert G., Foray S., 2022b. Nitrogen use efficiency and carbon footprint of an agroecological dairy system based on diversified resources, in Delaby L. *et al.* (Eds), *Proceedings of the 29<sup>th</sup> EGF Meeting "Grassland at the heart of circular and sustainable food systems*, Grassland Science in Europe, 27, p. 683-685, Wageningen Academic Publishers.
- Ortiz-Colón G., Fain S.J., Parés I.K., Curbelo-Rodríguez J., Jiménez-Cabán E., Pagán-Morales M. *et al.*, 2018. Assessing climate vulnerabilities and adaptive strategies for resilient beef and dairy operations in the tropics, *Climatic Change*, 146, 47-58, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-017-2110-1>.
- Phocas F., Belloc C., Bidanel J., Delaby L., Dourmad J.Y., Dumont B. *et al.*, 2016. Review: Towards the agroecological management of ruminants, pigs and poultry through the development of sustainable breeding programmes. II. Breeding strategies, *Animal*, 10, 1760-1769, <https://doi.org/10.1017/s1751731116001051>.
- Picard M., Sauveur B., Fenardji F., Angulo I., Mongin P., 1993. Ajustements technico-économiques possibles de l'alimentation des volailles dans les pays chauds, *Inra Productions Animales*, 6, 87-103, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.1993.6.2.4191>.
- Pinard-van der Laan M.-H., Bed'hom B., Coville J.-L., Pitel F., Feve K., Leroux S. *et al.*, 2009. Microsatellite mapping of QTLs affecting resistance to coccidiosis (*Eimeria tenella*) in a Fayoumi × White Leghorn cross, *BMC Genomics*, 10, 31, <https://doi.org/10.1186/1471-2164-10-31>.

- Pottier E., Delaby L., Agabriel J., 2007. Adaptations of the management of cattle herds and of sheep flocks to the risks of drought/Adaptations de la conduite des troupeaux bovins et ovins aux risques de sécheresse, *Fourrages*, 191, 267-284.
- Ravagnolo O., Misztal I., Hoogenboom G., 2000. Genetic component of heat stress in dairy cattle, development of heat index function, *Journal of Dairy Science*, 83, 2120-2125, [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(00\)75094-6](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(00)75094-6).
- Renaudeau D., Collin A., Yahav S., de Basilio V., Gourdine J.L., Collier R.J., 2012. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production, *Animal*, 6, 707-728, <https://doi.org/10.1017/s1751731111002448>.
- 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, *INRAE Productions Animales*, 32, 1-12, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.1.2414>.
- Roehe R., Dewhurst R.J., Duthie C.-A., Rooke J.A., McKain N., Ross D.W. *et al.*, 2016. Bovine host genetic variation influences rumen microbial methane production with best selection criterion for low methane emitting and efficiently feed converting hosts based on metagenomic gene abundance, *PLOS Genetics*, 12, e1005846, <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1005846>.
- Rouillé B., Devun J., Brunschwig P., 2014. L'autonomie alimentaire des élevages bovins français, *OCL*, 21, D404, <https://doi.org/10.1051/oc/2014017>.
- Rovelli G., Ceccobelli S., Perini F., Demir E., Mastrangelo S., Conte G. *et al.*, 2020. The genetics of phenotypic plasticity in livestock in the era of climate change: a review, *Italian Journal of Animal Science*, 19, 997-1014, <https://doi.org/10.1080/1828051X.2020.1809540>.
- Saccareau M., Moreno C.R., Kyriazakis I., Faivre R., Bishop S.C., 2016. Modelling gastrointestinal parasitism infection in a sheep flock over two reproductive seasons: in silico exploration and sensitivity analysis, *Parasitology*, 143, 1509-1531, <https://doi.org/10.1017/s0031182016000871>.
- Santos L.S.D., Pomar C., Campos P., da Silva W.C., Gobi J.P., Veira A.M. *et al.*, 2018. Precision feeding strategy for growing pigs under heat stress conditions, *Journal of Animal Science*, 96, 4789-4801, <https://doi.org/10.1093/jas/sky343>.
- Serviento A.M., Labussière E., Castex M., Renaudeau D., 2020. Effect of heat stress and feeding management on growth performance and physiological responses of finishing pigs, *Journal of Animal Science*, 98, 1-15, <https://doi.org/10.1093/jas/skaa387>.
- Shin J.-S., Um K.-H., Park H.-J., Choi Y.-S., Lee H.-S., Park B.-S., 2019. Effect of betaine and ascorbic acid in drinking water on growth performance and blood biomarkers in meat ducks exposed to heat stress, *South African Journal of Animal Science*, 49, 417-423, <https://doi.org/10.4314/sajas.v49i3.2>.
- Shynkaruk T., Long K., LeBlanc C., Schwean-Lardner K., 2023. Impact of stocking density on the welfare and productivity of broiler chickens reared to 34 d of age, *Journal of Applied Poultry Research*, 32, 100344, <https://doi.org/10.1016/j.japr.2023.100344>.
- Silva B.A.N., Oliveira R.F.M., Donzele J.L., Fernandes H.C., Lima A.L., Renaudeau D. *et al.*, 2009. Effect of floor cooling and dietary amino acids content on performance and behaviour of lactating primiparous sows during summer, *Livestock Science*, 120, 25-34, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2008.04.015>.
- 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 Charolaise. Dossier : Efficience alimentaire des bovins allaitants, *INRAE Productions Animales*, 36, 7330, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2023.36.3.7330>.
- Valentin S., Boudoua B., Sewalk K., Arınc N., Roche M., Lancelot R. *et al.*, 2023. Dissemination of information in event-based surveillance, a case study of Avian Influenza, *PLoS ONE*, 18, e0285341, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285341>.
- Vinet A., Mattalia S., Vallée R., Bertrand C., Barbat A., Promp J. *et al.*, 2024. Effect of temperature-humidity index on the evolution of trade-offs between fertility and production in dairy cattle, *Genetics Selection Evolution*, 56, 23, <https://doi.org/10.1186/s12711-024-00889-4>.
- Vitorino Carvalho A., Hennequet-Antier C., Rouger R., Delaveau J., Bordeau T., Crochet S. *et al.*, 2023. Thermal conditioning of quail embryos has transgenerational and reversible long-term effects, *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 14, 124, <https://doi.org/10.1186/s40104-023-00924-2>.

Worku D., Hussen J., De Matteis G., Schusser B., Alhussien M.N., 2023. Candidate genes associated with heat stress and breeding strategies to relieve its effects in dairy cattle: a deeper insight into the genetic architecture and immune response to heat stress, *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1151241, <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1151241>.

Zhang C., Thekkoot D., Kemp B., Dekkers J., Plastow G., 2020. 154 A genetic marker for PRRS resistance has no adverse effect on economically important traits in pigs, *Journal of Animal Science*, 98, 145-145, <https://doi.org/10.1093/jas/skaa054.254>.