

Résilience : Quelles sont ses composantes clés et comment les appréhender

FRIGGENS N.C. (1), ITHURBIDE M. (2), DE LA TORRE A. (3), PIRES J. (3), RUPP R. (4)

(1) PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590 Saint-Gilles, France

(2) GABI, INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78350 Jouy-en-Josas, France

(3) Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, UMR Herbivores, 63122 Saint-Genès-Champagnelle, France.

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

RESUME

La résilience d'un animal, ici définie comme étant sa capacité à faire face à des perturbations dans son environnement, est un caractère de plus en plus important dans un contexte de transition agroécologique. Toutes choses égales par ailleurs, l'animal qui est résilient réduit le risque d'échec aux aléas environnementaux et de fait aura une meilleure longévité qu'un animal qui n'est pas, ou peu, résilient. Les composantes clés de la résilience sont l'amplitude de la réponse de l'animal à une perturbation et la vitesse de récupération après la perturbation, leurs quantifications nécessitent des mesures répétées. Cet aspect temporel de la résilience impose l'utilisation de capteurs en ferme ou d'expériences spécifiques pour collecter des données longitudinales, ainsi que des modèles statistiques adaptés pour les analyser. Les modèles utilisés pour quantifier ces composantes vont du purement « data-driven », c'est-à-dire sans a priori, aux modèles qui supposent une forme de courbe de référence. Le choix de modèle à utiliser dépend, d'une part, de s'il est raisonnable de supposer une forme fixe pour la courbe non-perturbée et, d'autre part, de la fréquence des mesures par rapport à la durée des perturbations (plus les perturbations sont longues plus les méthodes « data-driven » ont tendance à sous-estimer l'amplitude de la réponse). De plus, la résilience repose sur des multiples mécanismes sous-jacents : la mesure d'un caractère unique ne peut quantifier à elle seule la résilience animale. Néanmoins, les progrès récents dans l'étude de la résilience sont très prometteurs pour le développement d'indicateurs de résilience applicables.

Resilience: What are its key components and how do we approach them?

FRIGGENS N.C. (1), ITHURBIDE M. (2), DE LA TORRE A. (3), PIRES J. (3), RUPP R. (4)

(1) PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590 Saint-Gilles, France

SUMMARY

In the context of agroecology animal resilience, here defined as the ability to cope with environmental perturbations, is a trait of increasing importance. Because of its reduced risk of failing to overcome environmental perturbations, a resilient animal will live longer than one that is not resilient, all other things being equal. The key components of resilience are the amplitude of response to a perturbation and the rate of recovery post perturbation, quantifying these components requires time-series measures. This temporal aspect of resilience implies use of automated measuring technologies or dedicated experiments with repeated measures. It also implies time-series statistics to extract the key components. The models used to quantify resilience range from purely data-driven statistical models to « hard-function » models that assume a priori a fixed form of reference curve. The choice of model to use depends upon whether a fixed form is justified and also on the measurement frequency relative to the duration of the perturbation (data-driven models tend to underestimate amplitudes of longer perturbations). Further, since resilience is an emergent property of multiple underlying mechanisms there is no single measure that adequately captures resilience. Nevertheless, recent advances in studying resilience show great promise for developing applicable resilience proxies.

INTRODUCTION

La résilience d'un animal est ici définie comme étant sa capacité à faire face à des perturbations dans son environnement. Ces perturbations peuvent être de différente nature, impactant l'animal avec des défis divers : thermiques (chaud ou froid), sanitaires, nutritionnels, hydriques, ou même comportementaux. Aujourd'hui, et encore plus à l'avenir, les animaux d'élevage devront faire face à de plus en plus de perturbations, en raison d'une part de l'augmentation de la fréquence des aléas climatiques et, d'autre part, de la transition vers l'agroécologie. Pour les ruminants, les systèmes agroécologiques font une large part à la valorisation de l'herbe et sont donc des systèmes plus soumis à des aléas climatiques qui impactent directement la qualité et la disponibilité de la ressource herbagère pâturée ou conservée. Les ruminants conduits à l'herbe sont donc plus soumis à des

perturbations et se doivent d'être résilients pour se maintenir.

Nous proposons une vision de la résilience comme étant une « élasticité physiologique ». C'est-à-dire qu'une perturbation « déforme » l'élastique physiologique de l'animal qui revient à son état initial après la perturbation. La **Figure 1** illustre ce phénomène en s'appuyant sur deux exemples de trajectoires de mesures physiologiques avant, pendant, et après perturbation pour des chèvres face à un challenge nutritionnel et pour des truites face à un challenge de confinement. C'est cette élasticité physiologique qui permet à l'animal de surmonter la perturbation.

Autrement dit, l'animal qui est résilient réduit le risque d'échec aux aléas environnementaux et de fait (toutes choses égales par ailleurs) aura une meilleure longévité qu'un animal qui n'est pas, ou peu, résilient. Les

animaux avec une bonne résilience existent aujourd'hui dans nos élevages. Ce sont des animaux « anonymes », ceux qui passent sous le radar, qui n'attirent pas l'attention de l'éleveur. Ces animaux sont fortement appréciés par les éleveurs (sondages projet GenTORE, www.gentore.eu, et dans d'autres études). De plus, des animaux avec une meilleure longévité devraient contribuer positivement à la durabilité de l'élevage, via une diminution des coûts économiques et environnementaux liée au renouvellement du cheptel,

à la maturation des jeunes, et aux soins dans la vie adulte (Rostellato *et al.*, 2021). Néanmoins la capacité de résilience des animaux de diverses espèces d'élevage a été érodée par la sélection en faveur de niveaux de production élevés (Rauw, 1998). Le niveau de production reste défavorablement corrélé avec la résilience chez les bovins (Poppe *et al.*, 2020, Brito *et al.*, 2021), bien que de telles observations semblent moins systématiques en petits ruminants (Mucha *et al.*, 2022).

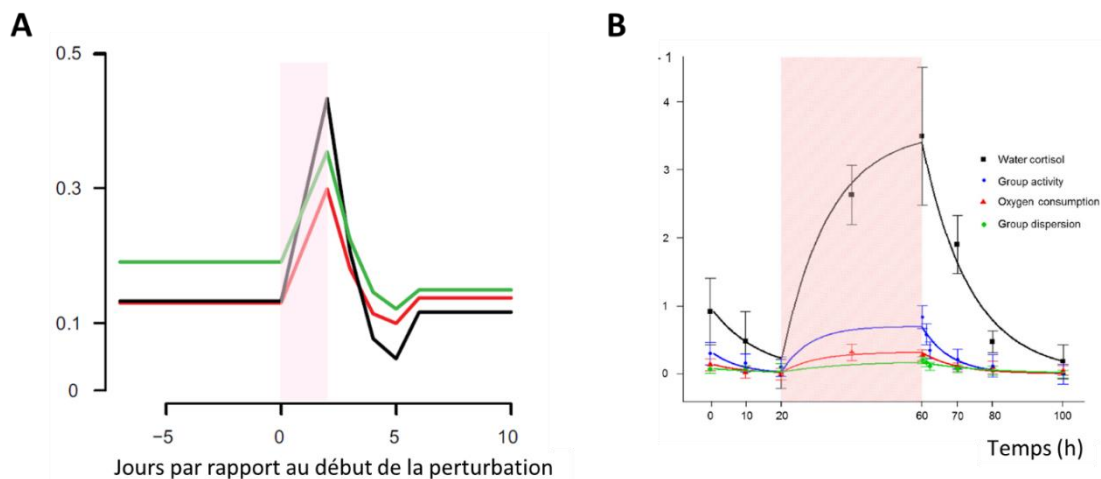


Figure 1: Deux exemples de réponse et de récupération suite à une perturbation environnementale. Les périodes de perturbation (ou challenge) sont indiquées en rose. L'exemple A montre trois profils différents de réponse de la concentration d'isocitrate (mmol/L) dans le lait de chèvre soumises une perturbation nutritionnelle de 2 jours (voir Ben Abdelkrim *et al.* 2023 doi.org/10.1016/j.animal.2023.100727). L'exemple B montre deux mesures physiologiques et deux mesures comportementales (exprimées en "fold-change") chez la truite arc-en-ciel lors d'un challenge de confinement de 2 heures (voir Sadoul *et al.* 2015 [doi:10.1371/journal.pone.0137333](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137333)). Dans les deux exemples, les courbes de réponse sont des courbes lissées.

Concernant la nature des perturbations environnementales, deux précisions sont à apporter. Premièrement, nous parlons bien de perturbations externes, de changements dans l'environnement, et pas des stress physiologiques internes comme par exemple ceux liés à la parturition chez les ruminants. En effet, ces derniers demandent certes une réorganisation physiologique mais ils relèvent plus des mécanismes « anticipés » ou préprogrammés (expression génétique dans le temps) dans la carrière de l'animal que de réponses à des aléas externes. Des conditions sub-optimales peuvent cependant impacter les trajectoires des animaux pendant ces périodes clés : problèmes métaboliques, fonctions non productives et reproduction impactées. Les changements de stades physiologiques ont un rôle dans le déploiement de la résilience puisqu'ils peuvent changer la susceptibilité, ou la « perception du challenge », aux perturbations environnementales. Ainsi, Bjerre-Harpoth *et al.* (2012) ont montré que l'amplitude de réponse à une même perturbation nutritionnelle était impactée par le stade de lactation.

La seconde chose concernant la nature des perturbations environnementales est leur durée. Le mot perturbation suppose des changements de courte durée. La résilience, vue comme une élasticité avec un retour à l'état d'avant perturbation, n'implique pas une

réorganisation des fonctions vitales, ce qui est nécessaire quand il y a une dégradation de la qualité de l'environnement qui perdure dans le temps. Une telle réorganisation relève de la robustesse plutôt que de la résilience (Blanc *et al.*, 2013, Friggens *et al.*, 2017). En considérant la comparaison résilience versus robustesse, un parallèle peut être fait avec la comparaison homéostasie versus homéorhèse. Les travaux théoriques qui ont mené à la proposition d'indicateurs de résilience basés sur les variations des performances utilisent cette notion d'homéostasie avec un retour à un point initial qui lui-même peut être différent en fonction des stades physiologiques (Scheffer *et al.*, 2018).

1.COMPOSANTES CLES DE LA RESILIENCE

Les composantes clés de la résilience sont l'amplitude de la réponse de l'animal à une perturbation et la vitesse de récupération après la perturbation. Les exemples dans la **Figure 1** montrent bien l'évolution des variables mesurées pendant que l'animal subit la perturbation, et illustrent ces deux composantes de la résilience. Comme la **Figure 2** le montre, il existe différentes méthodes pour quantifier l'amplitude de la réponse et la vitesse de récupération.

Dans tous les cas l'hypothèse est que des différences entre animaux dans ces composantes clés révèlent des différences de résilience pour le caractère mesuré (par exemple les paramètres indiqués dans la **Figure 3**). Quand on mesure plusieurs caractères sur le même animal pendant la même perturbation, il est très vite évident que les différents caractères ne réagissent pas tous de la même façon. Chaque caractère reflète une différente facette de la réponse adaptative de l'animal, la résilience de l'animal est alors une combinaison de

ces différentes facettes. Ceci est bien démontré dans l'étude de Ben Abelkrim *et al* (2023) et Ithurbide *et al.* 2023 (**Figure 4**) où différents types de profils de réponse/récupération émergent d'une analyse multivariée de plusieurs métabolites face à une perturbation nutritionnelle. En fait, la résilience repose sur des multiples mécanismes sous-jacents : la mesure d'un caractère unique ne peut quantifier la résilience animale.

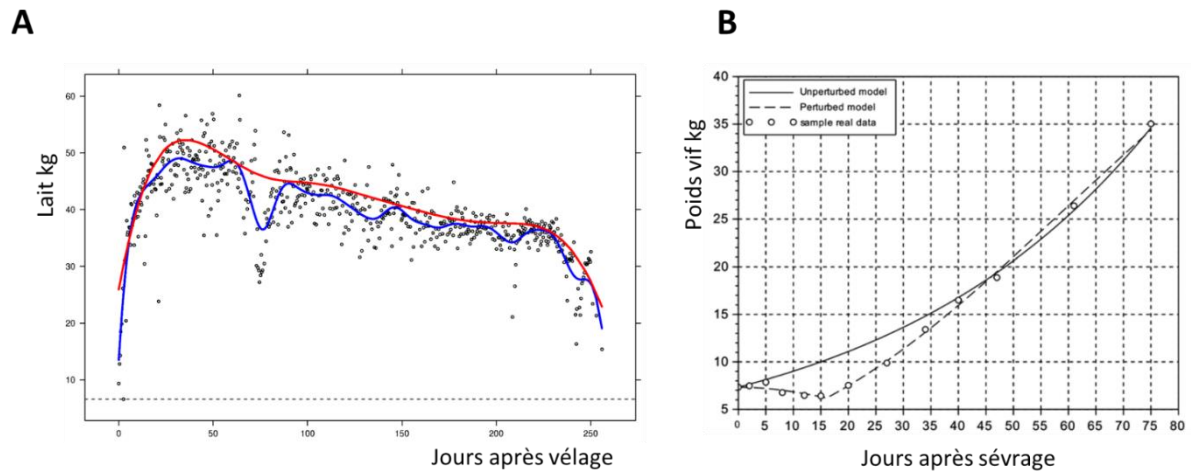


Figure 2: Deux exemples de type de lissage de cinétique de données pour quantifier des réponses aux perturbations. L'exemple A utilise un lissage "data-driven" chez la vache laitière, la courbe de référence en rouge est un lissage des données sans a priori (Codrea *et al.*, 2011). L'exemple B suppose une forme fixe de courbe non-perturbée, ici un Gompertz, qui sert de référence par rapport à la déviation de trajectoire tracée par la ligne en pointillé chez le porc en croissance (Revilla *et al.*, 2019).

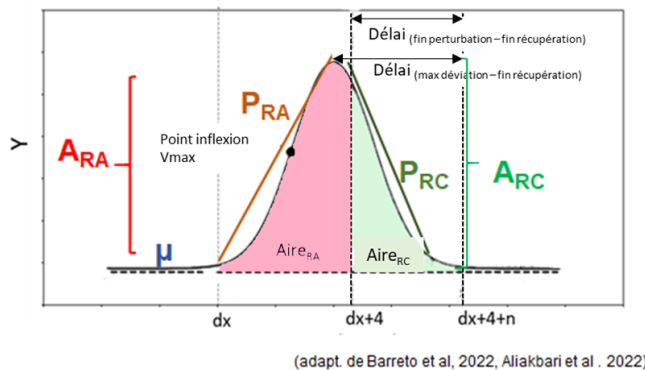


Figure 3: Quelques indicateurs pour décrire les réponses animales au cours d'une phase de perturbation (en rose) et de récupération (en vert) par des modèles de type B-spline ou piecewise.
 μ : niveau initial pré-perturbation, A_{RA} : amplitude de réponse au cours de la perturbation, P_{RA} : pente de la réponse mesurée au cours de la perturbation, P_{RC} : pente de la réponse mesurée au cours de la récupération, A_{RC} : amplitude de la réponse au cours de la récupération, Aire sous la courbe durant la perturbation et durant la phase de récupération.

2. DE LA DONNÉE AU PHÉNOTYPE, UNE APPROCHE TECHNIQUE

2.1. LA MESURE

La résilience étant définie comme la capacité d'un animal à s'adapter et à se rétablir après des perturbations au fil du temps, comprendre les mécanismes physiologiques sous-jacents à la résilience nécessite des mesures répétées. Cet aspect temporel de la résilience impose l'utilisation de capteurs en ferme ou d'expériences spécifiques pour collecter des données longitudinales, ainsi que des modèles statistiques adaptés pour les analyser. L'importance des mesures répétées dans le temps pour caractériser les mécanismes de résilience et établir de nouveaux indicateurs de résilience est désormais largement acceptée (Colditz et Hine 2016; Scheffer *et al.* 2018). Le développement récent de capteurs (d'activité et de comportement) permet de collecter des données en ferme via des systèmes de traite, des accéléromètres, des enregistrements de consommation d'aliments et d'eau, du poids corporel ou des vidéos (Deng *et al.* 2020; Post *et al.* 2020; Yoshioka, Ito et Tanimoto 2010; Ratsimbazafindranahaka *et al.* 2022). Il permet également l'accès à des données à grande échelle provenant de différents types de fermes.

L'étude de la résilience d'un animal nécessite l'observation de ses mécanismes en réponse à des perturbations environnementales courtes. Par conséquent, deux options peuvent être envisagées : (i) imposer le même défi à un groupe d'animaux ou (ii) détecter des perturbations environnementales naturelles pour étudier les réponses individuelles. La première option a l'avantage d'être facilement interprétable et permet l'exploration de nouveaux phénotypes non couramment mesurés en ferme. Cependant, la difficulté de mise en œuvre de ces expériences limite généralement le nombre d'animaux inclus, réduisant potentiellement la puissance des études.

D'un autre côté, la détection rétrospective de perturbations non enregistrées est loin d'être triviale. Elle repose sur une surveillance fréquente des performances des animaux (comme la production de lait ou la croissance), qui doit être contextualisée par rapport à une estimation de la trajectoire théorique de performance non perturbée de l'individu afin de mesurer les écarts (Codrea, Hojsgaard et Friggens 2011; Garcia-Baccino *et al.* 2021; M. Poppe *et al.* 2020 ; De La Torre *et al.*, 2022 ou Aliakbari *et al.*, 2022).

2.2 LE MODÈLE

La littérature a récemment proposé plusieurs modèles pour étudier la résilience animale. Certains modèles fournissent une interprétation très intuitive des résultats en termes de résilience. Par exemple, Sadoul *et al.* (2015) ont utilisé un modèle basé sur un ressort et un amortisseur (modèle de Kelvin-Voigt) pour simuler les réponses dynamiques des animaux face à un défi aigu. Les deux paramètres caractérisant le ressort et l'amortisseur peuvent être interprétés comme la rigidité et la résistance au changement du système, fournissant des idées intuitives sur la résilience. Friggens *et al.* (2016) ont découpé les différentes étapes de la réponse

(pré-défi, défi et période de récupération) en utilisant un modèle segmenté appliqué aux profils temporels des métabolites et hormones plasmatiques lors d'un défi de sous-alimentation de courte durée. Ce modèle supposait une forme spécifique pour la réponse : une valeur plateau avant le défi, une pente linéaire pendant le défi, et une fonction quadratique pour la récupération post-défi. L'inconvénient de ces approches est qu'elles nécessitent de fortes hypothèses sur la forme de la trajectoire de déviation de performance. Les modèles utilisent pour quantifier l'amplitude de la réponse et la vitesse de récupération vont du purement « data-driven », c'est-à-dire sans a priori, aux modèles qui supposent une forme de courbe sous-jacente comme par exemple une fonction de Gompertz pour la croissance (Revilla *et al.*, 2019) illustrée dans la **Figure 2**. Le choix de modèle à utiliser dépend, d'une part, de s'il est raisonnable de supposer une forme fixe pour la courbe non-perturbée et, d'autre part, de la fréquence des mesures par rapport à la durée des perturbations (plus les perturbations sont longues plus les méthodes « data-driven » ont tendance à sous-estimer l'amplitude de la réponse). Lors de l'exploration initiale de nouveaux phénotypes, il peut être préférable de limiter autant que possible le nombre d'hypothèses formulées.

Scheffer *et al.* (2018) ont proposé plusieurs mesures générales de résilience. Un système non résilient est décrit comme un système en équilibre instable, avec des fluctuations plus grandes et plus lentes, résultant en une haute variance et une forte autocorrélation temporelle. Poppe *et al.* (2020) ont appliqué cette approche pour explorer les courbes de lactation chez les vaches laitières. Ils ont trouvé que la variance des courbes de lactation était modérément héritable, et une variance plus faible était génétiquement associée à divers résultats positifs, notamment une meilleure santé de la mamelle, une plus grande longévité, une incidence réduite de cétose, une fertilité améliorée et une meilleure note d'état corporel (NEC).

Si la modélisation d'une seule série temporelle soulève plusieurs questions, l'intégration multivariée des données longitudinales présente un défi statistique. Cependant, les mécanismes biologiques complexes sous-jacents à la résilience soulignent l'importance d'une approche multivariée. Plusieurs articles ont abordé les aspects longitudinaux multivariés en deux phases (Ben Abdelkrim *et al.* 2021; Friggens *et al.* 2016). Tout d'abord, une modélisation longitudinale univariée a été appliquée à chaque série temporelle, aboutissant à quelques résumés scalaires des trajectoires (tels que l'intensité et la durée de la perturbation, par exemple). Ensuite, une méthode de réduction dimensionnelle factorielle a été employée pour faciliter la modélisation multivariée en capturant la corrélation entre différentes variables. Ithurbide *et al.* (2023) ont utilisé une approche similaire en modélisant la tendance temporelle simultanée de 14 concentrations de métabolites du lait lors d'un défi de sous-alimentation de deux jours. La première phase du modèle était basée sur une ACP fonctionnelle appliquée à chaque métabolite. Un clustering non supervisé a ensuite mis en évidence trois types de réponses métaboliques qui se sont avérées appartenir à des chèvres ayant une survie différente en ferme.

Cette approche a permis de montrer un lien entre la résilience et une réponse métabolique complexe sans aucune hypothèse concernant la forme des profils de métabolites du lait (**Figure 4**).

2.3. VALIDATION DES INDICATEURS DE RESILIENCE

Le constat que la résilience est un caractère complexe complique les choses pour la mise en œuvre de mesures validées : nous n'avons pas de mesures de référence directe de la résilience. Ainsi Friggens *et al.* (2022) ont souligné la nécessité de mesures de référence basées sur les conséquences attendues à long terme d'une bonne résilience pour valider de nouveaux indicateurs de résilience. La longévité fonctionnelle, définie comme la durée de vie d'un

animal de ferme excluant l'abattage pour des raisons de performance et de gestion de la ferme, est souvent considérée comme le meilleur indicateur unique de résilience et de robustesse. En effet, elle reflète la capacité d'un animal à se remettre des perturbations environnementales successivement rencontrées au fil du temps (Friggens *et al.* 2017). La longévité fonctionnelle a ainsi été utilisée dans la littérature comme mesure de référence de la résilience pour valider de nouveaux indicateurs (M. Poppe *et al.* 2020; Ithurbide *et al.* 2022; 2023). D'autres mesures de référence de la résilience ont été explorées. Poppe *et al.* (2022) ont utilisé des traits de santé (ex. mammites et boiteries), la fertilité et la note d'état corporel pour valider les indicateurs de résilience. Adriaens *et al.* (2020) ont classé les vaches pour la résilience

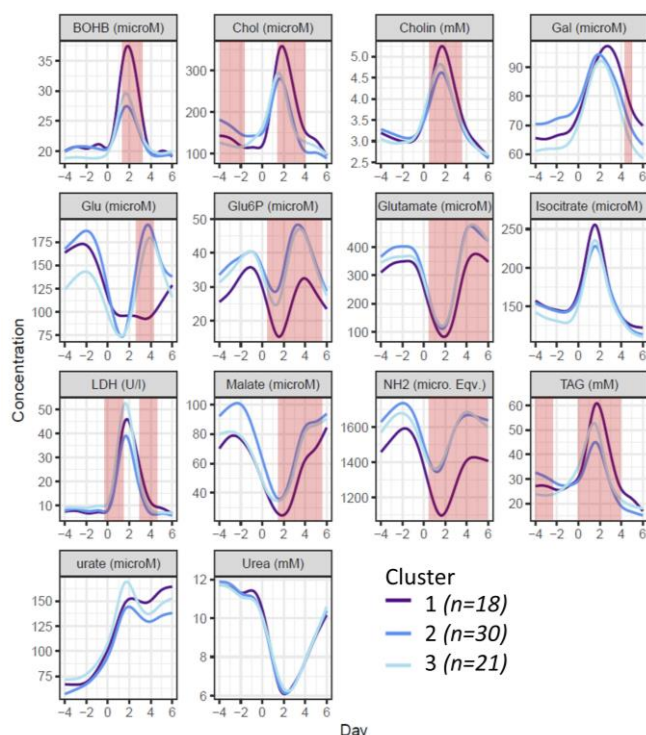


Figure 4. Courbes de treize métabolites du lait et d'une enzyme au sein de 3 groupes identifiés par regroupement non supervisé chez 138 chèvres lors d'un challenge de sous-alimentation de 2 jours (méthode et pipeline d'analyse développé par Ithurbide *et al.* 2023).

La zone rouge indique la période pendant laquelle les variables sont significativement différentes entre les groupes (test de permutation, valeur critique de 5 %). Figure adaptée depuis Ithurbide *et al.* 2023. en calculant un score individuel basé sur plusieurs facteurs : le nombre de vêlages, la production laitière sur 305 jours, l'âge au premier vêlage, les intervalles entre les vêlages, et les jours en lait au moment de l'abattage, en tenant compte de l'ensemble de la carrière de l'animal. Il est intéressant de noter que ce classement n'était cohérent que dans un troupeau donné ce qui reflète l'impact d'autres traits que la résilience sur la longévité, notamment des règles de réforme de l'éleveur. Comme la longévité fonctionnelle, différents benchmarks de résilience basés sur la performance animale à long terme sont

significativement influencés par la gestion de la ferme, ce qui inclut le niveau d'exposition aux variations météorologiques et aux maladies infectieuses. Par conséquent, ces benchmarks ne peuvent pas être directement utilisés pour comparer la résilience d'animaux de troupeaux différents. Bien que ces benchmarks soient nécessaires pour valider de nouveaux indicateurs de résilience, des indicateurs de résilience décrivant des composants plus sous-jacents, tels que les caractéristiques physiologiques ou métaboliques, peuvent être moins affectés par le contexte de l'élevage. Cette approche pourrait ouvrir la voie à une sélection génétique plus efficace pour des animaux résilients.

3.COMMENT APPREHENDER LA RESILIENCE D'UN POINT DE VUE BIOLOGIQUE

Le phénotypage de la résilience est souvent basé sur des phénotypes de production (production de lait, gain de poids) parce qu'ils présentent un intérêt économique

direct et qu'ils sont plus couramment mesurés. Les phénotypes de production résultent de mécanismes physiologiques sous-jacents qui permettent des adaptations à court terme (homéostasie) et à long terme (homéorhèse). Les animaux ont été sélectionnés pour donner la priorité aux fonctions productives ; par conséquent, les mécanismes physiologiques qui se mettent en marche sous-tendent les fonctions prioritaires (par exemple, la mobilisation des réserves corporelles, l'utilisation de nutriments glucogènes pour soutenir la lactation et la réponse immunitaire). En conséquence, il se peut qu'il n'y ait pas de réponse perceptible de la production à une épreuve donnée, ou qu'il y ait un décalage entre la perturbation et ses effets visibles sur les phénotypes de production. C'est pourquoi les analyses longitudinales des indicateurs métaboliques peuvent être plus sensibles aux perturbations, bien qu'elles ne soient peut-être utilisables que dans un cadre de recherche avec un nombre d'animaux relativement limité. Il peut s'agir de mesures telles que les métabolites du sang et du lait, les hormones sanguines, qui donnent un aperçu des mécanismes permettant à l'animal de maintenir sa production en cas de perturbation. Par conséquent, un animal qui maintient une production laitière élevée peut présenter des variations plus importantes des indicateurs de mobilisation des réserves corporelles dans le plasma et le lait, par rapport à un animal dont la production laitière est plus faible pendant la perturbation (Pires *et al*, 2022).

Le couplage de la production et des phénotypes métaboliques ou physiologiques pour caractériser les différents composants de la résilience a été utilisé pour établir des typologies de réponse à un type de perturbation donné (Aliakbari *et al*, 2022 ; Barreto-mendes *et al*, 2022). Ces analyses multivariées peuvent également permettre d'identifier les processus métaboliques les plus cruciaux pour le maintien des phénotypes d'intérêt lorsque les animaux sont confrontés à des perturbations. Dans des modèles de restriction alimentaire, nous avons étudié la relation entre production laitière en début de lactation et les variations d'indicateurs plasmatiques reflétant les réponses des vaches ayant un potentiel laitier différent (Holstein et Montbéliarde). La production de lait corrigée de l'énergie est la variable la plus répétable lorsque les restrictions alimentaires de courtes durées s'enchaînent (4 restrictions de 4 jours à 50% des besoins théoriques). Le potentiel laitier semble ainsi être le principal moteur des réponses des vaches aux restrictions alimentaires de courte durée : les vaches présentant un fort potentiel laitier avant perturbation sont restées les plus productives lors de l'enchaînement des restrictions alimentaires. Ceci a été également observé chez vaches allaitantes Charolaise et des vaches d'aptitude mixte Parda de Montaña. (De La Torre *et al* ; 2022 ; Orquera-Arguero *et al*, 2022 ; Pires *et al*, 2022),

En outre, nous avons montré que des vaches présentant des potentiels laitiers contrastés (Holstein, Montbéliarde, Charolaise) peuvent partager des profils adaptatifs communs (c-à-d. une diminution de la production de lait, maintien de la production en mobilisant les réserves, etc) en réponse à un challenge nutritionnel expérimental (Barreto-mendes *et al*, 2022).

Cependant, le regroupement à l'aide d'indicateurs de production et de métabolites plasmatiques a révélé que 50 % des vaches changeaient de typologie de réponse à un enchaînement de restrictions alimentaires, ce qui indique une modification de la résilience lors de perturbations successives : la perturbation précédente pouvant influencer la réponse de l'animal aux perturbations suivantes (De la Torre *et al*, 2022 ; Barreto-mendes *et al*, 2023). De plus, l'historique nutritionnel des individus et leur stade physiologique peuvent influencer également leurs réponses. Par exemple, le stade physiologique des vaches (début ou milieu de lactation), leur niveau de réserves corporelles (vaches maigres ou grasses), la parité détermineront la priorisation des fonctions entre production de lait, capacité à mobiliser et métaboliser les réserves corporelles (Bjerre-Harpøth 2012, Pires *et al* 2013 ; Roche *et al*, 2013).

4. LES PERSPECTIVES

Les projets européens GenTORE (www.gentore.eu) et Smarter (<https://smarterproject.eu/>) ont permis des avancées importantes, chez les ruminants, sur l'élaboration de nouveaux indicateurs de résilience, la caractérisation des mécanismes sous-jacents, ou encore la modélisation dynamique et temporelle des réponses animales. Mais il reste quelques défis importants à relever avant de déployer à grande échelle l'utilisation de tels indicateurs pour la gestion et la sélection des animaux.

Garcia-Baccino *et al* (2021) ont présenté une approche basée sur des données pour estimer la probabilité de l'existence de perturbations environnementales non enregistrées et d'évaluer le déterminisme génétique de la résilience à de tels événements. Ils ont montré que l'on pouvait ainsi caractériser et sélectionner la résilience, dans la mesure où le caractère cible est mesuré à très haute fréquence. L'approche est assez similaire aux travaux de Poppe *et al*. (2020) qui proposent d'exploiter les données répétées de caractères zootechniques connus (et disponibles à grande échelle), notamment la variance des productions laitières. Par ailleurs, l'identification de biomarqueurs dans le lait, héréditaires (Ithurbide 2023), et qui pourraient être prédits à grande échelle à partir des spectres infra-rouge (Mir) ouvre la voie à une application en sélection, portant sur des indicateurs biologiques plus ciblés sur la résilience métabolique. De même, le monitoring de l'activité, du poids ou l'imagerie 3D qui se déploient sur le terrain offrent des perspectives similaires.

Ces indicateurs individuels peuvent être utiles pour la gestion des animaux dans les élevages avec par exemple l'identification précoce des animaux malades, la prévention des risques d'échec à la reproduction ou la gestion des réformes. Ce champ d'application est appelé à se développer dans les années à venir.

Dans des conditions de terrain (sans épreuve contrôlée ou connue), ces méthodes capturent des écarts à des trajectoires cibles et proposent ces écarts comme indicateurs individuels de résilience pour les études quantitatives et la sélection génétique. On ne sait toutefois pas dans quelle mesure ces indicateurs

peuvent discriminer les différents types de réponse de résilience, et en particulier entre les individus qui ne subissent aucune perturbation ou qui ne se remettent jamais d'une perturbation. Dans les méthodes proposées, la trajectoire cible doit généralement être estimée, et les stress doivent affecter les indicateurs sur une courte durée. Dans le cas contraire, on ne sait pas comment ces différentes approches affectent la valeur des indicateurs de résilience.

De même, en élevage, les informations sur la nature des perturbations sont souvent inconnues. Or, il est encore peu documenté, si les réponses à différents types de perturbations (stress thermique, nutritionnel ou infectieux) sont indépendantes, corrélées positivement ou si des antagonismes existent. Cela nécessite d'explorer les possibles compromis entre ces réponses, et de décomposer les mécanismes clés de la résilience pour choisir les bonnes combinaisons de biomarqueurs et indicateurs statistiques pour répondre aux enjeux de demain.

Par ailleurs, il existe peu de données sur la manière dont la capacité de l'animal à faire face à ces perturbations interagit avec d'autres caractéristiques faisant l'objet d'une sélection (production, reproduction, efficacité alimentaire...).

Le défi pour l'élevage est de prévoir et de gérer ces compromis et synergies afin d'améliorer la capacité des animaux à faire face à un large éventail de stress environnementaux et de réaliser leur durée de vie productive, en bonne santé, et à long terme. Dans cette optique, des approches de modélisation mathématiques tels que les modèles d'allocation des ressources (Bouquet *et al.*, 2024) pourront être utiles afin d'explorer une diversité de perturbations, leurs conséquences à long terme, et des possibilités de gestion à l'échelle de l'animal, du troupeau et de la population.

Les expérimentations citées dans les travaux INRAE ont été réalisées dans les UE de Bourges et Herbipole, et dans l'IE de MoSAR à Grignon (INRAE). Ces travaux ont bénéficié des financements du programme de recherche et d'innovation H2020 de l'UE (SMARTER et GENTORE) et d'APISGENE (ACTIVEGOAT et RESILAIT).

Adriaens, I., N. C. Friggens, W. Ouweltjes, H. Scott, B. Aernouts, et J. Statham. 2020. J. Dairy Sci. 103 (8): 7155–71.

Aliakbari, A., J. Pires, F. Blanc, L. Barreto Mendes, I. Ortigues Marty, I. Cassar-Malek, et A. de La Torre. 2022. In *Annual Meeting of the European Federation of Animal Science*, 28:701. Porto, Portugal : EAAP.

Barreto Mendes, L., J. Pires, A. Aliakbari, I. Ortigues-Marty, I. Cassar-Malek, F. Blanc, et A. De La Torre. 2022. Animal - Science Proceedings 13 (3): 496–98.

Barreto Mendes, L., J. Pires, A. De La Torre, I. Ortigues-Marty, I. Cassar-Malek et F. Blanc, 2023. Feed efficiency relates to the ability of supporting lactation in dairy cows facing feed restriction. In *Annual Meeting of the European Federation of Animal Science*, 29 : 336, Lyon, France : EAAP

Ben Abdelkrim, A., M. Ithurbide, T. Larsen, P. Schmidely, et N. C. Friggens. 2023. Animal, February, 100727.

Ben Abdelkrim, A., T. Tribout, O. Martin, D. Boichard, V. Ducrocq, et N. C. Friggens. 2021. J. Dairy Sci. 104 (1): 459–70.

Bjerre-Harpøth, V., N. C. Friggens, V. M. Thorup, T. Larsen, B. M. Damgaard, K. L. Ingvarsten, et K. M. Moyes. 2012. J. Dairy Sci. 95 (5): 2362–80.

Blanc, F., O. Emilie, L. Puillet, L. Delaby, S. Ingrand, M. Tichit, et N. C. Friggens. 2013. Renc. Rech. Rum. Vol. 2013.

Bouquet, A., M. Slagboom, J. R. Thomasen, N. C. Friggens, M. Kargo, et L. Puillet. 2024. Animal 18 (1): 101035.

Brito, L. F., N. Bedere, F. Douhard, H. R. Oliveira, M. Arnal, F. Peñagaricano, A. P. Schinckel, C. F. Baes, et F. Miglior. 2021. Animal: 15 Suppl 1:100292.

Codrea, M. C., S. Hojsgaard, et N. C. Friggens. 2011. Journal of Animal Science 89:3089–98.

Colditz, I. G., et B. C. Hine. 2016. Animal Production Science 56 (12): 1961–83.

De La Torre, A., L. Barreto-Mendes, J. A. A. Pires, I. Cassar-Malek, I. Ortigues-Marty, et F. Blanc. 2022. Animal 16 (7): 100556.

Deng, Zhaoju, Henk Hogeveen, Theo J. G. M. Lam, Rik van der Tol, et Gerrit Koop. 2020. Frontiers in Veterinary Science 7:221.

Friggens, N. C., I. Adriaens, R. Boré, G. Cozzi, J. Jurquet, C. Kamphuis, F. Leiber, et al. 2022. Peer Community Journal 2.

Friggens, N. C., C. Duvaux-Ponter, M. P. Etienne, T. Mary-Huard, et P. Schmidely. 2016. J. Dairy Sci. 99 (4): 2704–18.

Friggens, N.C., F. Blanc, D. Berry, et L. Puillet. 2017. Animal 11 (May):1–15.

Garcia-Baccino, C., C. Marie-Etancelin, F. Tortereau, D. Marcon, J.L. Weisbecker, et A. Legarra. 2021. Genet Sel Evol 53, 4.

Ithurbide, M., T. Fassier, J. Pires, T. Larsen, N.C. Friggens, et R. Rupp. 2023. In Annual Meeting of the European Federation of Animal Science. Lyon, France: EAAP.

Ithurbide, M., C. Huau, I. Palhière, T. Fassier, N. C. Friggens, et R. Rupp. 2022. J. Dairy Sci. 105 (5): 4289–4300.

Ithurbide, M., H Wang, T. Fassier, Z. Li, J. Pires, T. Larsen, R. Rupp, et N. C. Friggens. 2023. J. Dairy Sci. 106 (11): 8072–86.

Mucha, S., F. Tortereau, A. Doeschl-Wilson, R. Rupp, et J. Conington. 2022. Animal 16 (3): 100456.

Orquera-Arguero, K.G., D. Villalba, M. Blanco, J. Ferrer, I. Casasús. 2022. Modelling beef cows' individual response to short nutrient restriction in different lactation stages. Animal 16 (9) 100619.

Pires, J. A. A., C. Delavaud, Y. Faulconnier, D. Pomiès, et Y. Chilliard. 2013. J. Dairy Sci. 96 (10): 6423–39.

Pires, J. a. A., T. Larsen, et C. Leroux. 2022. J. Dairy Sci. 105 (1): 201–20.

Poppe, M., R. F. Veerkamp, H. A. Mulder, et H. Hogeveen. 2022. J. Dairy Sci. 105 (10): 8158–76.

Poppe, M., R. F. Veerkamp, M. L. van Pelt, et H. A. Mulder. 2020. J. Dairy Sci. 103 (2): 1667–84.

Post, C., C. Rietz, W. Büscher, et U. Müller. 2020. Sensors (Basel, Switzerland) 20 (14).

Ratsimbazafindranahaka, MN., C. Huetz, A. Andrianarimisa, JS. Reidenberg, A. Saloma, O. Adam, et I. Charrier. 2022. PeerJ 10: e12945.

Rauw, W. M, E Kanis, E. N Noordhuizen-Stassen, et F. J Grommers. 1998. *Livestock Production Science* 56 (1): 15–33.

Revilla, M., N. C. Friggens, L. P. Broudiscou, G. Lemonnier, F. Blanc, L. Ravon, M. J. Mercat, et al. 2019. *Animal* 13 (11): 2536–46.

Roche, J.R., Jane K. Kay, NC. Friggens, J.J. Loor, et **D.P. Berry. 2013.** *The Veterinary Clinics of North America. Food Animal Practice* 29 (2): 323–36.

Rostellato, R., J. Promp, H. Leclerc, S. Mattalia, N.C. Friggens, D. Boichard, et V. Ducrocq. 2021. *J. Dairy Sci.* 104 (12): 12664–78.

Sadoul, B., O. Martin, P. Prunet, et N.C. Friggens. 2015. *PLOS ONE* 10 (August): e0137333.

Scheffer, M., J.E. Bolhuis, D. Borsboom, T.G. Buchman, S.M.W. Gijzel, D. Goulson, J.E. Kammenga. 2018. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115 (47): 11883–90.

Yoshioka, H., M. Ito, et Y. Tanimoto. 2010. *The Journal of Reproduction and Development* 56 (3): 351–55.