

CONTRIBUTION DE L'ALBÉDO DE PRAIRIES GÉRÉES, POUR CONTRIBUER À L'ATTÉNUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Résumé

L'élevage de ruminants contribue au changement climatique (CC) en raison de ses émissions de gaz à effet de serre (GES). L'occupation des sols par l'agriculture affecte le climat tant au travers de ses émissions que par des facteurs biophysiques comme en modifiant l'albédo (α) de la surface de la Terre. Les couverts prairiaux ont la possibilité d'avoir un albédo plus important que de nombreux végétaux en raison de leur capacité à couvrir davantage le sol. Ils ont ainsi un effet refroidissant sur le climat. Les travaux présentés ici, portent sur l'acquisition de données d'albédo (α) dans 7 sites expérimentaux, réalisés dans le cadre du projet Casdar Albédo-prairies. Les résultats montrent que l'effet albédo d'une prairie génère un forçage radiatif négatif de l'ordre de -8.5W/m^2 par rapport à un sol nu. Cela correspond à un effet sur le bilan d'énergie de l'ordre de $-1797\text{ kg eqCO}_2/\text{ha/an}$. Ce chiffre est comparable à la séquestration du carbone dans le sol par une prairie. L'albédo est affecté négativement par des conditions réduisant le couvert prairial : principalement les conditions climatiques (sécheresse, canicule) et de manière plus limitée par le pâturage et la fauche d'herbe à des fins de stockage du fourrage. Leur importance sera décrite et discutée et des ébauches de préconisations pour les agriculteurs seront proposées.

Summary

Albedo of managed grasslands contribution to climate change mitigation

Cattle contributes to climate change (CC) through greenhouse gases (GHG) emissions. Agricultural land use affects climate through these emissions and biophysical factors such as the albedo (α modification of the Earth's surface). Grassland has the potential to have a greater albedo than many plants because its cover more of the soil which have mostly a lower albedo level. For this reason, grassland has a cooling effect on the climate. The work presented here involves the data acquisition of albedo (α) on 7 experimental sites, carried out as part of the Casdar Albédo-Prairies project. Our results show that the albedo effect of a grassland generates a negative radiative forcing of the order of -8.5W/m^2 compared with bare soil. This corresponds to an effect on the energy balance of the order of $-1797\text{ kg eqCO}_2/\text{ha/year}$. This figure is comparable to the carbon sequestration in the soil by a meadow. Albedo is negatively affected by conditions that reduce grassland cover: mainly climatic conditions (drought, heatwave) and less by grazing and mowing. Their importance will be described and discussed, and first recommendations for farmers will be proposed.

Article accepté pour publication le 01 février 2024.

Auteurs

P. Mischler¹, E. Ceschia², M. Ferlicoq²

1 : Institut de l'Elevage, Amiens, pierre.mischler@idele.fr

2 : CESBIO, Université de Toulouse, CNES/CNRS/INRAE/IRD/UPS, Toulouse, France

Mots clés

ruminant, changement climatique, forçage radiatif, conversion en équivalent CO_2

Key words

ruminant, climate change, radiative forcing, conversion into CO_2 equivalent forcing

Pour citer cet article

Mischler P., Ceschia E., Ferlicoq M. (2024). Contribution de l'albédo de prairies gérées, pour contribuer à l'atténuation du changement climatique, *Fourrages* 257, 41-56.

Introduction

L'albédo (α) est le pourcentage de lumière solaire réfléchi par toute surface sur Terre. Sa valeur va de 0 (0 % de lumière réfléchie) à 1 (100 % réfléchie). L' α a un rôle important sur le climat planétaire car selon le pourcentage de rayonnement solaire réfléchi, il y aura plus ou moins d'énergie restituée, puis retenue dans la basse atmosphère par les gaz à effet de serre (GES), contribuant à son réchauffement ou son refroidissement. Ainsi, plus l'albédo augmente, moins il reste d'énergie pour réchauffer l'atmosphère.

Le changement climatique actuel est lié à la hausse de la teneur atmosphérique de gaz à effet de serre d'origine anthropique et se traduit par une hausse des températures à l'échelle mondiale. Les conséquences pour l'agriculture sont un accroissement d'événements météorologiques extrêmes (pluies intenses, grêle, sécheresses, canicules), et une inadaptation des modes de production agricoles à ces nouvelles conditions (Portner *et al.* 2022). L'agriculture et l'élevage, afin d'assurer leur fonction nourricière, contribuent en 2021 pour 18.6 % des émissions de GES françaises (Citepa 2023). Ils devront prendre part à la réduction des émissions de GES de -46 % d'ici 2050 par rapport à 2015 (Ministère de la transition écologique 2020) dans le cadre de la stratégie nationale bas carbone (SNBC), comme toutes les autres activités anthropiques. L'élevage de ruminants représente 60 % de ces émissions. Il valorise cependant des surfaces souvent mal adaptées aux cultures. Il fournit ainsi des leviers pouvant contribuer à l'atténuation du changement climatique : de nombreux travaux ont porté ces dernières décennies sur la séquestration du CO₂, sous forme de carbone (c) organique dans les sols grâce aux prairies, aux haies mais aussi par des techniques culturales limitant le travail du sol. Cela amène les systèmes de cultures à évoluer vers un accroissement des surfaces couvertes en permanence. Ainsi, les couverts

d'interculture et l'insertion de prairies temporaires sont des contributeurs à cette séquestration. Ils permettent respectivement un stockage additionnel dans le sol à hauteur de +114 kg eqC/ha/an et +126kg eqC/ha/an (INRA, 2019). Le passage d'une culture en prairie permet un stockage important de C les 20 premières années, puis diminue progressivement (Arrouays *et al.* 2002). L'expertise collective de l'INRAE en 2019 a estimé la capacité de stockage des systèmes de grandes cultures comprenant des prairies temporaires à +47 kgC/ha/an à et de +212 kgC/ha/an pour des prairies permanentes (INRA 2019).

C'est là où l'effet albédo intervient, lié aux propriétés des surfaces. Les sols nus ont souvent un albédo plus faible en raison de leur couleur sombre, ce qui est le résultat de la combinaison d'une texture, de son humidité et de la teneur en matière organique. Cela explique la grande gamme d'albédo observée pour les sols (figure 1). Un sol sableux aura un α supérieur à un sol limoneux, de même qu'un sol humide aura un albédo plus faible qu'un sol sec. Les végétaux eux même ont des albédos différents en fonction de leur capacité de réflexion de la lumière dans le visible et le proche infra-rouge (Itier et Parceval, 1973). Un sol sombre se réchauffe davantage qu'un couvert végétal sous l'effet de la lumière solaire. Il transfère l'énergie du soleil sous forme d'infra-rouges thermiques à grande longueur d'onde, qui sont retenus dans l'atmosphère par les gaz à effet de serre. Cela génère un forçage radiatif positif (effet réchauffant). Un couvert végétal ou un sol, dont l'albédo est plus élevé, réémet (réfléchit) davantage de lumière visible et il reste moins d'énergie au pour la transformer en chaleur (infra-rouge) : cela génère un forçage radiatif (FR) négatif, c'est-à-dire un effet refroidissant.

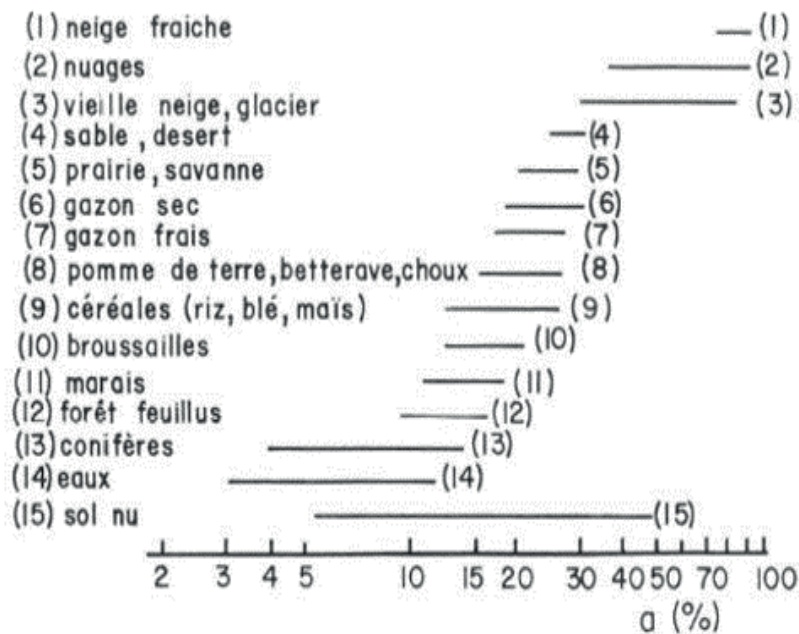


Figure 1 : albédo de diverses surfaces terrestres (source : Itier et Parceval, 1973, d'après Baumgartner, 1970)
Figure 1: albedo of various land surfaces

Plus en détail, les cultures et prairies ont généralement un α entre 0.10 et 0.30 et les forêts entre 0.05 et 0.15, les conifères ayant un albédo en tendance plus faible que les feuillus (Itier et Parceval, 1973). L'albédo d'un sol nu peut varier entre 0.05 et 0.50. Ces intervalles sont larges, car ils dépendent à la fois de la texture du sol, de son humidité et du taux de matière organique. L'albédo d'un sol peut ainsi être divisé par 2 si l'humidité massique des 2 premiers millimètres de la surface passe de 0 % à 20 % (Idso et al, 1975). De même, les sols riches en limons et argiles sont plus « sombres » que les sols sableux (Hansen, 1993). En France, l'albédo des sols se situe autour de 0.10-0.15 (Carrer et al, 2018).

Mais attention, la couleur est un indicateur médiocre : l' α se mesure entre 280 et 2500 nm, ce qui inclut la lumière visible à l'œil nu (longueur d'onde : 380 à 780 nanomètres), ainsi que le proche infra-rouge (entre 780 et 1600 nanomètres), que l'œil humain ne perçoit pas. Les végétaux nous apparaissent de couleur verte, car ils réfléchissent davantage la lumière verte (environ 550 nm), que les autres couleurs du spectre visible. Cependant l'essentiel de la lumière réfléchié par l'herbe se situe pour des longueur d'ondes plus grandes, dans le proche infra-rouge (<https://www.hukseflux.com/library/what-is-albedo>).

Les prairies couvrent le sol en permanence, leur albédo annuel est en conséquence en moyenne plus élevé que les cultures et encore plus que les sols nus (hors sols calcaires, de couleur claire). Si de nombreux travaux sur l' α existent, l'analyse bibliographique réalisée dans le projet Albédo-prairies montre que relativement peu d'études concernent les systèmes agricoles et encore moins les prairies (cf article E. Ceschia dans ce numéro de Fourrages), dont l' α plus élevé laisse pourtant envisager un effet refroidissant sur le climat.

A l'encontre de cet effet d'atténuation du CC, lors des dernières décennies les prairies ont diminué en pourcentage et en surface brute de la SAU française : -2.3 millions (M) d'ha entre 1982 et 2018, des surfaces toujours en herbe (STH), et de -2.1 M d'ha des jachères et prairies temporaires au profit des cultures (+2.6 M d'ha) et de l'artificialisation des sols (+2.4 M d'ha), ainsi que de l'afforestation (+1.4 M d'ha) (Ballet 2021). Le retourne-

ment de prairies au profit des cultures est à la fois une source de déstockage de C par minéralisation (Arrouays et al., 2002) et de diminution de l'albédo de surface puisque les sols perdent leur couverture végétale pérenne et redeviennent davantage visibles.

Le projet Casdar Albédo-prairies avait pour objectifs de caractériser la variabilité spatio-temporelle de l'albédo des prairies en France, incluant différentes modalités de gestion des prairies (pâturage et fauche, ayant un effet sur la couverture du sol) et de situations pédoclimatiques (texture et humidité du sol). Il s'agissait d'identifier et quantifier les possibilités d'augmentation d' α , dans un but d'atténuation du CC, de la parcelle jusqu'à l'échelle de territoires. Ce projet a analysé pour la première fois en France, les variations quotidiennes de l'albédo de prairies permanentes ou temporaires, situées sur un transect entre le Finistère et l'Ardèche. Les résultats présentés ici proposent une première estimation du forçage radiatif (FR) de prairies par rapport à d'autres usages du sol. Ces valeurs de FR ont été converties ensuite en équivalents CO2, pour comparer l'effet albédo à la séquestration du carbone (C) et aux émissions de GES d'exploitations agricoles.

1. Matériel et méthodes

Acquisition de données originales de dynamiques annuelles d'albédo

La méthodologie d'analyse des variation annuelles d'albédo et de leur l'impact sur le forçage radiatif des prairies a été présentée dans un précédent article de la revue *Fourrages* en septembre 2022. Le lecteur pourra s'y référer (Mischler et al. 2022), l'essentiel en est résumé ci-dessous.

Les mesures d'albédo ont été réalisées grâce à 6 albedomètres installés au-dessus de prairies permanentes ou temporaires principalement pâturées et ponctuellement fauchées pour faire du fourrage et enlever des refus. Ces prairies sont situées dans des fermes expérimentales : Trévarez (Finistère), Derval (Loire Atlantique), Thorigné (Maine et Loire), Le Mourier (Haute Vienne), Jalogny (Saône et Loire) et Le Pradel (Ardèche) et au Rheu (Ille et Vilaine, INRAE UMR-SAS).

Tableau 1 : caractéristiques des 7 prairies étudiées
Table 1: Characteristics of the 7 grasslands studied

Lieu	Trévarez	Le Rheu	Derval	Thorigné	Mourier	Jalogny	Pradel
Prairie	T	T	T	T	P	P	P
Type de Sol	Limono argileux	Limoneux	Limoneux	Limono sableux	Limono sableux	Argileux de plaine alluviale	Argileux avec cailloux
Flore	RGATB	RGA	ME	ME	ME	GD	ME
Gestion	Pâturage dominant	Pâturage dominant	Pâturage dominant	Pâturage dominant	Pâturage dominant	Pâturage unique-ment	Pâturage dominant

L'acquisition des mesures d'α et de luminosité en W/m² (albédomètre NR01, Hukseflux, positionné à 2.5 m du sol), de température (HygroVUE), de pluviométrie (mm) et d'humidité du sol (entre 0 et 12 cm (CS655, Campbell) a été réalisée chaque seconde par station de mesures pour chaque. Les données ont été ensuite moyennées à l'échelle de la journée pour l'analyse des variations d'α au cours de l'année.

$$\Delta\alpha(\%) = - \left(1 - \left(\frac{\left(\sum \frac{\alpha_{moyen}}{p} \right)}{\alpha_{-5j}} \right) \right)$$

L'albédo d'une prairie varie en fonction des conditions météorologiques et des opérations techniques (Mischler *et al.*, 2022). Nous nous intéresserons ici plus particulièrement au pâturage et à la pluie qui survient sur sol sec. Dans notre étude, une variation d'α (Δα (%)) est quantifiée à partir d'une valeur d'α de référence, qui est ici la moyenne d'albédo des 5 jours précédant l'évènement (pluie ou opération technique), α-5j/ ou aref et la moyenne de baisse d'α entre le 1er jour où survient l'évènement jusqu'au jour où l'α recouvre une valeur similaire à la valeur de référence, α-5j ± 2.5 % (seuil empirique), selon l'équation suivante (figure 2, Mischler *et al.*, 2022) :

Dans le cas où un pâturage ou une fauche surviennent avant la remontée d'albédo à son niveau initial, c'est la date du nouvel évènement qui détermine la fin de la période de variation d'α. Dans le

cas où, l'α ne baisse pas, c'est alors la valeur moyenne d'albédo de la durée du pâturage, qui sera comparée à α-5j. Cette situation se rencontre quand le chargement animal est faible ou hors période de sécheresse quand l'herbe a une croissance importante.

La diminution d'albédo est exprimée selon 3 critères : (1) le pourcentage de baisse moyenne d'α (Δα), (2) la durée ou période (p) de baisse en jours) et (3) le pourcentage de baisse cumulée d'α: il correspond, pendant la période (p), au cumul des baisses d'α quotidien (ΣΔα) : sur la figure 2, cela correspond à la surface de couleur bleue entre la courbe d'albédo mesuré et la valeur d'α-5j pendant la période p.

L'effet du pâturage sur l'α a été estimé au travers du chargement instantané de ruminants corrigé par la part d'herbe dans la ration avec les données été fournies par les fermes expérimentales . En effet, un animal qui consomme une partie de fourrage conservé (maïs, foin, ...) dans sa ration, prélèvera moins d'herbe au pâturage. Il en restera donc plus de végétation sur la parcelle que pour une alimentation avec uniquement de l'herbe sur pied. ce qui impacte différemment l'albédo de surface. Ce chargement est exprimé en UGB/ha/jour. L'humectation d'un sol sec en surface se caractérise par un assombrissement de la surface de sol, même si les tous premiers millimètres sont humidifiés (figure 3, Idso *et al.* 1975). L'albédo diminue en fonction de l'humidité croissante d'un sol humidifié par rapport à un sol sec (Parcevaux *et* Itier, 1974). Les capteurs dont sont équipées les 7 stations de mesure permettent de détecter une hausse rapide d'humidité massique quand une pluie survient sur sol sec.

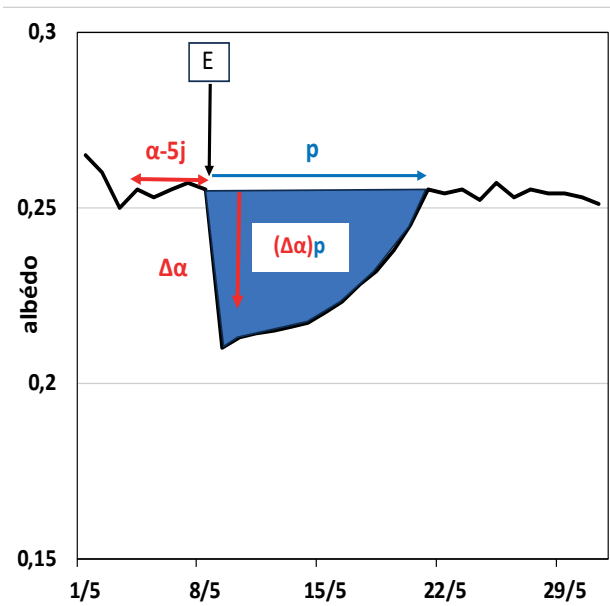


Figure 2 : Estimation d'une variation d'albédo, à la suite d'un évènement (E).
Figure 2: Estimation of a change in albedo following an event (E).

Légende : α-5j = albédo de référence, Δα = baisse d'albédo au jour j, p = période de baisse d'α pendant (n) jours, (ΣΔα)p = cumul de baisse d'albédo pendant la période p, E = évènement : fauche, pâturage, pluie.

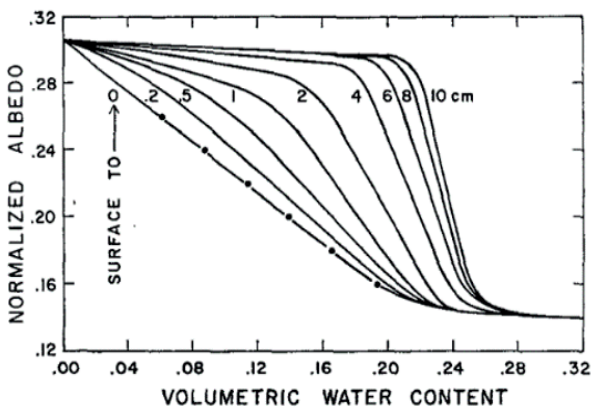


Figure 3 : albédo d'un sol selon l'humidité massique entre la surface pour 9 profondeurs allant de 0 à 10 cm (source figure : Idso *et al.* 1975)
Figure 3: Soil albedo depending on the mass humidity between the surface for 9 depths ranging from 0 to 10 cm (source figure: Idso *et al.* 1975)

L'évolution d' α , sera comme pour le pâturage estimé par rapport aux 5 jours précédant l'évènement pluvieux ($\alpha-5j$).

Analyse des données

La météorologie en 2021 et en 2022

La météorologie des années 2021 et 2022 sera décrite par des mesures issues de capteurs associés à l'albédomètre : le rayonnement solaire incident (en W/m^2), la pluviométrie (en mm de précipitations), l'humidité massique du sol sur les 12 premiers cm du sol (en %) et la température moyenne quotidienne (en $^{\circ}C$). Une comparaison des données météorologiques sera réalisée sur la base de la moyenne des écarts des 7 sites de mesure, observés chaque trimestre, entre les 2 années. Ces données météorologiques issues des fermes expérimentales seront comparées à des données de Météo France des 10 dernières années, de 2013 à 2022

Impact de l'intensité du pâturage et de la sécheresse sur les dynamiques d'albédo en 2021 et 2022

Pour suivre l'évolution de l'albédo à la suite des évènements de pâturage et à l'humectation d'un sol sec, notre étude compare deux années : 2021 (plus humide) et 2022 (plus sec). L'intensité de ces phénomènes climatiques sur la baisse cumulée d'albédo $\sum\Delta\alpha$ a été quantifiée et un test statistique (χ^2) a été réalisé pour vérifier l'effet :

- du niveau d'humidité massique du sol sur ($\sum\Delta\alpha$), à la suite d'une pluie : un sol plus sec entraîne-t-il une baisse plus importante de ($\sum\Delta\alpha$) ?
- du chargement animal instantané corrigé de la consommation de fourrages, sur l'importance de ($\sum\Delta\alpha$), à la suite d'un pâturage : un chargement plus élevé entraîne-t-il une baisse plus importante de ($\sum\Delta\alpha$) ?

Pour chaque type d'évènement (pluie, pâturage), le test porte sur le nombre d'évènements inférieurs ou supérieurs à la valeur médiane de ($\sum\Delta\alpha$), du chargement corrigé et de l'humidité du sol.

Un FR annuel a été calculé pour chacune des 7 prairies, ainsi que l'impact des évènements sur ce FR, calculé par rapport à une situation simulant leur absence : il est considéré que pendant la durée de baisse d'albédo mesurée, la valeur de référence d'albédo, $\alpha-5j$, correspond à l' α qu'on aurait théoriquement eu en l'absence d'évènements. Nous appellerons cette référence, « albédo annuel lissé » et ce lissage de la courbe correspond, en l'absence de pâturage à un témoin non pâturée. Cet écart (figure 4) sera quantifié en W/m^2 puis en $kg\ eqCO_2/ha/an$.

Analyse sur l'impact de l'albédo du sol sur le forçage radiatif de prairies : simulations

Le niveau de FR induit par l'albédo des prairies dépend de la situation de référence retenue (sol nu, culture, etc...). Une prairie comparée à un sol nu, a de ce fait un FR d'autant plus négatif que l'albédo de ce dernier est faible. Les dynamiques annuelles d'albédo des 7 sites ont été converties en FR à partir de valeurs d' α de référence du sol (α_{ref}) différentes afin d'estimer un FR pour des natures de sols différentes. Dans notre étude pour simuler l'effet de 3 types de sols de texture différente, ayant un niveau d'albédo croissant, le FR des prairies a été calculé pour des valeurs d' α de référence de 0.15, 0.20 et 0.25, simulant des sols de plus en plus clairs (réfléchissant davantage la lumière). De même, le nombre de journées où le FR est positif a été quantifié pour identifier en première approche des situations où la prairie permet, ou non, de contribuer à l'atténuation du changement climatique.

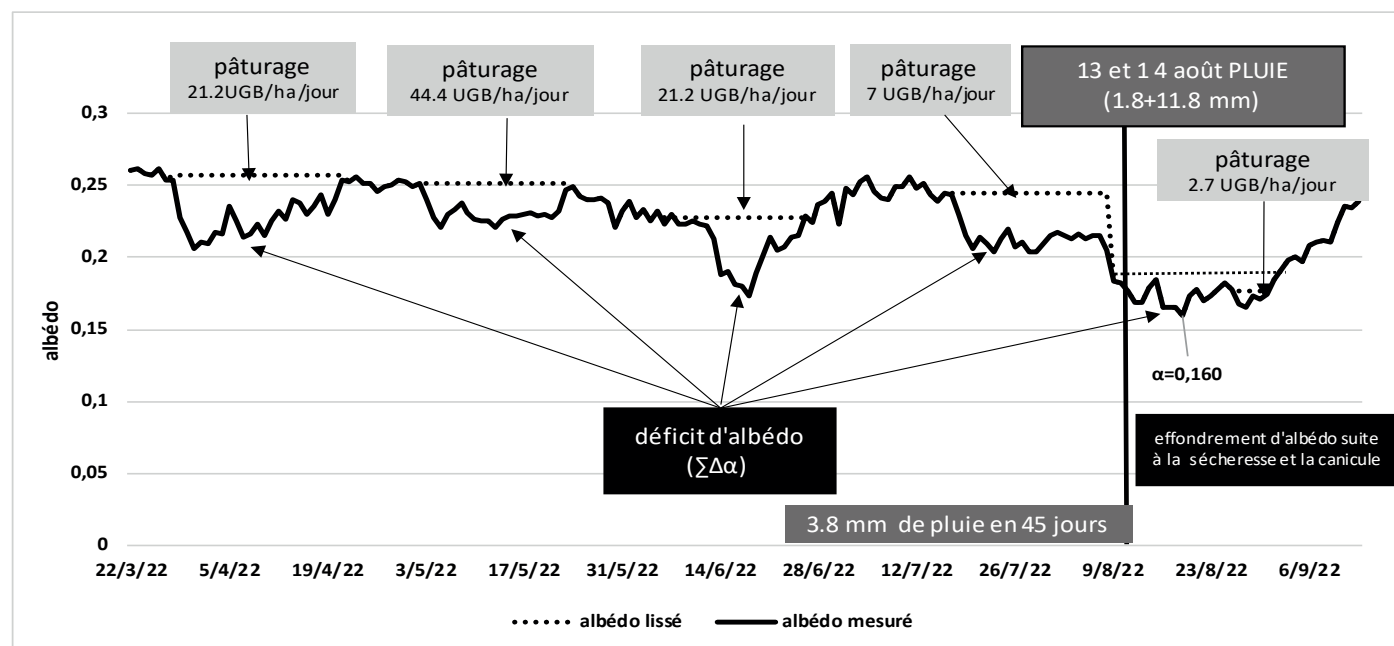


Figure 4: Example of downward variations followed by recovery following a grazing event or rain after a dry period - Trévarez- 2022

Calcul du Forçage radiatif des prairies (FR, en Watt (W)/m²) et conversion en équivalents CO₂

Le FR est calculé à partir du rayonnement solaire incident journalier (Short Wave INcident, SWIN_i, en W/m²) mesuré à la surface de la parcelle, de la transmittance atmosphérique moyenne journalière (T_{ai}) et de la différence d'albédo (Δi) (rayonnement réfléchi) entre la prairie et la référence, également au jour i (Δi = a_{prairie} - a_{ref}). Pour tenir compte de la variabilité liée à la nébulosité (nuages, brume), la transmittance atmosphérique est calculée à partir du rayonnement incident journalier divisé par le rayonnement solaire journalier au sommet de l'atmosphère (RTOA_i), calculé au jour i selon le modèle de transfert radiatif Fu-Liou (Schimel et al., 1995). L'utilisation de données quotidiennes plutôt que des valeurs moyennes permet un calcul plus précis du FR (voir article de E. Ceschia, dans ce numéro).

La référence (Δi)

La valeur d'albédo de référence, peut être par exemple, un sol nu, une culture, un couvert végétal donné (Munoz et al., 2010 et Ceschia et al, 2017 ou Sieber et al ; 2022). Comme la plupart des sols en France (hors calcisols) ont un albédo faible, compris entre 0.10 et 0.15 (Carrer, 2018), un albédo de sol nu a_{ref}=0.15 a été retenu pour réaliser les calculs de FR des prairies par rapport à un changement d'usage des sols vers une prairie, ainsi qu'un blé tendre d'hiver (a_{ref}=0.168) pour estimer le FR lié à un changement d'usage du sol d'une culture vers une prairie (Ferlicoq, 2016). Pour calculer l'effet sur le FR d'un pâturage ou d'une humectation de sol, par exemple, nous utiliserons a_{ref} = α-5j.

La conversion du FR (W/m²) en équivalents CO₂ est utilisée pour comparer l'effet Albédo aux bilans d'émissions de GES et à la séquestration du CO₂ sous forme de carbone, avec une unité commune. Notons que les principaux GES d'origine anthropiques (CO₂, du CH₄, N₂O) sont responsables d'un forçage radiatif (FR) au niveau planétaire, estimé à +2.89 W/m² depuis 1750 (Citepa, 2023).

Il existe différentes méthodes pour convertir le FR lié à l'albédo en équivalents CO₂. Une difficulté est liée à l'échelle spatio-temporelle des émissions de GES et de changement d'albédo de surface. En effet, si les émissions de GES sont locales, leur effet est global et indépendant du lieu d'émission puisqu'elles se diffusent et se dispersent dans l'atmosphère. Leur effet est généralement ramené à un horizon de temps de 100 ans, afin de tenir compte du temps de demi-vie des GES dans l'atmosphère.

Pour réaliser la conversion du FR en équivalents CO₂, nous avons mobilisé une méthode (Bright & Lund, 2021 ; Bright et al., 2016), déjà mobilisée sur des cultures, des prairies temporaires et des

couverts d'interculture (Ceschia et al , 2017 ; Djamko 2022 ; Sieber et al. 2022), afin de réaliser une comparaison de nos résultats à d'autres travaux. Bright et al., ont proposé que l'impact du changement d'albédo sur l'énergie mondiale de la Terre, soit exprimé en FR instantané moyen annuel global sur la zone affectée par le changement d'albédo par rapport à la superficie de la Terre. Notons que l'effet de l'albédo en termes de FR est plus localisé que les émissions de GES et peut être très rapide. Il dépend de l'évolution de l'état de surface (rugosité, texture, changement d'usage des sols) et ses modifications ont lieu sur un temps très court : de l'ordre de la journée à quelques semaines. Par exemple, le retournement d'une prairie temporaire par un labour a un effet qui survient à l'échelle de la journée, quant à sa croissance après semis, elle dure plusieurs semaines. Le FR est utilisé pour quantifier l'impact du changement d'albédo sur le climat moyen mondial, en termes de changement de température, c'est-à-dire le GWP (Global Warming Potential). Le GWP lié à l'albédo est calculé ici pour un horizon temporel de 100 ans pour se conformer à l'horizon de temps utilisé pour les GES. Il suppose que la mise en œuvre d'une pratique se maintienne sur cette durée.

Résultats

Deux années aux conditions météorologiques contrastées

Dans les 7 fermes expérimentales, l'année 2022, avec 13°C en moyenne, a été plus chaude de +1.6°C par rapport à 2021. Tous les sites y ont eu des températures supérieures à 2021 (de +1.2°C à Trévarez à +1.9°C au Pradel) et tous les trimestres ont été plus chauds que l'année précédente, sauf la période janvier-mars au Mourier (-0.4°C) et à Jalogny (-0.6°C) (Tableau 1).

Une analyse complémentaire de 7 stations météorologiques de Météo-France situés le plus près possible des fermes expérimentales a permis de positionner les années 2021 et 2022 par rapport aux 10 dernières années (2013 à 2022). Sur 10 ans, la température moyenne y a été de 12.6°C (écart-type (et) = 5.4). L'année 2021 était en dessous de cette moyenne (11.9°C (et = 5.4)) et selon le site, en première ou seconde place parmi les années les plus froides. 2022 a été la plus chaude (13.5°C (et = 6.1)) dans 5 stations sur 7 et la seconde la plus chaude pour les Dans les fermes expérimentales, la pluviométrie en 2022 a été inférieure en moyenne de 16 % (-123 mm) à celle de 2021. Le plus notable est le déficit de pluviométrie des 2èmes et 3èmes trimestres, de -34 % et -46 % respectivement, avec des températures supérieures respectivement de +2.1°C et +1.9°C (tableau 2) qui laissent envisager une évapotranspiration plus élevée du couvert végétal. Ces valeurs trimestrielles sont cohérentes avec les données issues de 7 stations de Météo-France qui ont en 2022 respectivement +2°C en moyenne (de +1.6 à Coray (Finistère) à +2.5°C à Mirabel (Ardèche) et un déficit pluviométrique de -134 mm en moyenne.

Tableau 2: comparaison des conditions météorologiques des années 2021 et 2022 par trimestre (moyenne des 7 fermes expérimentales)
Table 2: comparison of weather conditions in 2021 and 2022 by quarter (average for the 7 experimental farms)

Année	Rayonnement incident (W / m²)	Humidité massique du sol (%)	Cumul précipitations (mm)	Température moyenne (°C)
2021	148 (12)	31 % (8 %)	777 (116)	11.5 (0.9)
Trimestre 1	96 5 (13)	38 % (8 %)	146 (93)	6.3 (0.7)
Trimestre 2	224 (12)	27 % (9 %)	223 (21)	13.1 (1.1)
Trimestre 3	71 (10)	36 % (8 %)	222 (22)	8.4 (1.3)
2022	155 (12)	24 % (6 %)	654 (191)	13.0 (1.1)
Trimestre 1	90 (12)	37 % (9 %)	113 (42)	6.9 (1.3)
Trimestre 2	237 (13)	20 % (7 %)	147 (50)	15.2 (1.5)
Trimestre 3	231 (17)	12 % (3 %)	100 (19)	19.7 (1.7)
Trimestre 3	63 (8)	29 % (6 %)	294 (145)	10.1 (1.7)

Premier chiffre = moyenne, chiffre entre parenthèses : écart-type

Les écarts peuvent s'expliquer par les localisations différentes des stations Météo-France, de celle des capteurs positionnés avec les albédomètres.

L'été 2022 a connu une longue période avec peu de précipitations entre début-juillet et jusqu'à mi-août : selon le site expérimental, il est tombé au maximum 22 mm de pluie sur 40 jours entre début juillet et mi-août ; 6 sites sur 7 ayant une valeur de 0 à 13 mm seulement.

Concernant les humidités massiques de sol, la valeur se situe entre 0 pour un sol totalement desséché et environ 50 % pour un sol détrempé. En 2021, avec des précipitations régulières, l'humidité moyenne annuelle du sol était en moyenne de 31 % contre 25 % en 2022 (tableau 2). Les précipitations en 2022 qui ont été particulièrement faibles au second et troisième trimestre ont entraîné des valeurs moyennes d'humidité du sol respectives de 20 % et 12 %, largement inférieures à 2021 (figure 5). Au cours du troisième trimestre, la valeur minimale observée était

de 5 % d'humidité massique à Thorigné. Les prairies présentaient toutes un état de dessèchement très marqué (exemples figures 5 et 6). Ces conditions météo sont cohérentes à la fois avec les mesures des stations météo locales et en France :

- Pour les stations météo locales, les valeurs trimestrielles sont similaires aux données issues des 7 fermes expérimentales. Il a été mesuré respectivement +2°C en moyenne (de +1.6 à Coray (Finistère) à +2.5°C à Mirabel (Ardèche) et un déficit pluviométrique de -134 mm en moyenne. Les écarts peuvent s'expliquer par les localisations différentes des stations Météo-France, de celle des capteurs positionnés avec les albédomètres.
- Pour les données nationales : les températures moyennes de 2022 étaient supérieures de +1.6°C au-dessus de la normale 1981-2021, avec un cumul de précipitations déficitaire de -25 % (Météo France, 2023). L'année 2021 a connu des températures de +0.4°C au-dessus de cette normale, tandis que les précipitations étaient proches de cette normale (Météo France 2022).

Le rayonnement solaire moyen annuel est très proche entre les 2 années, les premiers, second et quatrième trimestres ont un écart



Figure 5: Parcelle du site de Thorigné, à gauche le 20/04/22, prairie bien verte ($\alpha=0.268$), à droite le 19/08/22 prairie desséchée avec du sol nu visible ($\alpha= 0.168$)
Figure 5: Plot at the Thorigné farm, left on 20/04/22, green grassland ($\alpha=0.268$), right on 19/08/22 dried grassland with bare soil visible ($\alpha= 0.168$).

Tableau 3 : test de χ^2 , effet sur l'albédo d'une pluie sur un sol « sec » en surface
Table 3: χ^2 test, effect on albedo of rain on "dry" surface soil

Nombre d'évènements d'humectation de sol [n]		Médiane de l'humidité massique du sol en %	
		Inf 12 %	Sup 12 %
Cumul de baisse d' α ($\sum \Delta \alpha$) par rapport à la référence $\alpha=5j$	Inf -65.6 %	[13]	[4]
	Sup -65.6.1 %	[3]	[12]
Signification (p)		Significatif (p=0.01)	

faible de luminosité. Seul le troisième trimestre 2022 présente plus de luminosité qu'en 2021 (+8 % à +34 % selon les sites) et s'explique par l'absence de pluies et un ciel dégagé de nuages.

Effet de la sécheresse sur l'albédo

Sécheresse, canicule et albédo ne font pas bon ménage. On observe généralement qu'une pluie qui parvient à humecter la partie superficielle du sol entraîne une baisse d'albédo indépendamment de toute opération technique. Plus largement, 32 situations de diminution d'albédo d'importance variable ont été observées à la suite d'épisodes pluvieux. En 2021, en raison de la pluviométrie plus abondante, seules 12 observations ont été recensées : la pluie sur un sol moins souvent sec y a entraîné une diminution d'albédo de -6 % pendant 10.6 jours en moyenne, soit un cumul de baisse d' α , $\sum \Delta \alpha = -132$ %. En 2022 avec la sécheresse importante et des épisodes caniculaires, 20 observations ont été recensées. L'albédo a significativement diminué: -10.9 % en moyenne pendant 29 jours, soit $\sum \Delta \alpha = -500$ %. Le tableau 3, montre que pour une humidité massique plus faible (soit < 12 %, valeur médiane de l'échantillon), le nombre d'évènements de baisse importante d'albédo ($\sum \Delta \alpha$) est très majoritaire, soit 13 évènements sur 16, de même si l'humidité du sol est supérieure à 12 % la baisse d'albédo est plus faible dans

12 cas sur 16 (significatif, p=0.01).

L'exemple du site de Trévarez (figure 4), illustre la baisse d'albédo de surface à la suite de l'arrivée de la pluie le 13/08/22 après une période sèche. Une diminution d'albédo (-12.8 % en moyenne pendant 23 jours, soit -294 % cumulé) était déjà observée à la suite d'un pâturage par 7 UGB/ha/jours ayant démarré le 22/07/22. Cette baisse a été amplifiée (-16.3 %) pendant 29 jours après la pluie du 13/08 sur une prairie desséchée et dégradée où le sol était partiellement visible (soit -473 % de cumul de baisse d' α jusqu'à la reconstitution du couvert, figure 6). Mi-août, ce sont surtout les plantes vivaces (pissenlit) restaient vertes et le ray-grass anglais présent oscillait entre touffes vertes et dessèchement. L'albédo a alors ainsi atteint la valeur la plus faible jamais observée sur cette parcelle ($\alpha = 0.160$, le 24/08)), en raison de l'assombrissement du sol.

Cette situation a aussi été observée, mais de manière plus importante dans les 6 autres sites (tableau 4). Ainsi l'effondrement de l'albédo, jusqu'au recouvrement de la situation initiale de l'albédo, a duré entre 54 jours (Le Rheu) et 77 jours (Pradel) avec des intensités plus importantes qu'à Trévarez. Le déficit cumulé d'albédo ($\sum \Delta \alpha$) allant de -825 % pour 63 jours à Jalogny à -1869 %

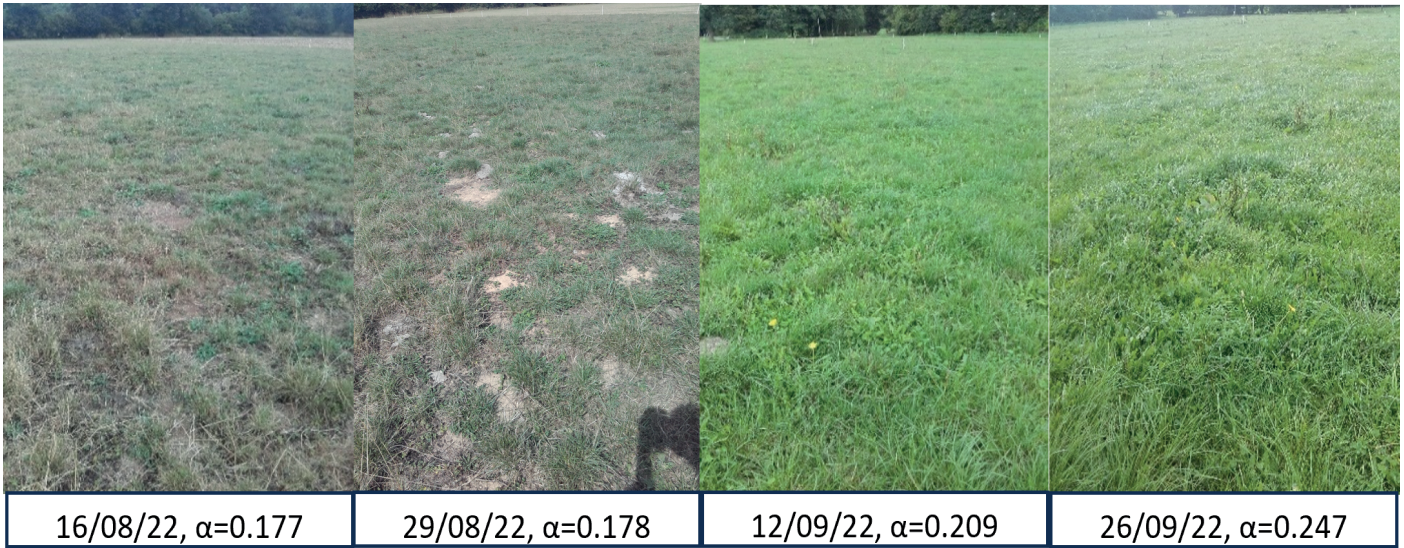


Figure 6 : test de χ^2 , effet sur l'albédo d'une pluie sur un sol « sec » en surface
Figure 6: χ^2 test, effect on albedo of rain on "dry" surface soil

Tableau 4 : impact de la sécheresse sur l'effondrement d'α de sept parcelles de prairie en août 2022.
Table 4 : Impact of drought on the collapse of α of seven grassland plots in August 2022

Site (2022)	Trévarez	Rheu	Derval	Thorigné	Mourier	Jalogny	Pradel	Moyenne
date pluie déclanchant l'effondrement d'α	13/8	14/8	14/8	14/8	14/8	14/8	14/8	13/8
α de référence (α -5j), à partir de la date de pluie déclanchant la baisse d'α	0,213	0,235	0,241	0,229	0,236	0,215	0,228	0,228
baisse maximale observée d'albédo (αmin)	0,160	0,106	0,186	0,146	0,167	0,168	0,150	0,155
date du recouvrement du niveau d'albédo	11/9	6/10	21/10	26/10	18/10	16/10	30/10	14/10
nombre total de jours de baisse d'albédo	29	54	68	73	65	63	77	61
baisse moyenne d'albédo	-16 %	-34 %	-23 %	-26 %	-22 %	-13 %	-23 %	-22 %
baisse cumulée d'albédo	-473 %	-1820 %	-1537 %	-1869 %	-1437 %	-825 %	-1763 %	-1389 %
humidité du sol (%) le 01/07/22	29 %	14 %	19 %	5 %	36 %	36 %	20 %	23 %
humidité du sol (%), 1 jour avant la pluie déclanchant l'effondrement d'albédo	7 %	7 %	6 %	4 %	7 %	7 %	12 %	7 %
précipitations (mm) entre le 01/07/22 jusqu'à date pluie déclanchante	3	0	4	13	12	7	34	10
précipitations (mm) entre date pluie déclanchante, jusqu'à recouvrement d'α	80	62	138	95	94	119	101	98
FR(α-5j) = FR de référence avant pluie (W/m²)	-14,7	-20,2	-22,6	-19,1	-21,7	-17,7	-7,3	-17,6
FR, entre la pluie déclanchante jusqu'au recouvrement d' α (W/m²)	-2,6	-2	-4,9	-2,8	-5,3	-5	-3,4	-3,7
nombre de jours avec FR> 0 W/m²	0	14	1	5	0	0	6	4

à Thorigné pendant 73 jours. Ces baisses importantes, ont été rendues possible par une proportion plus importante de sol nu en 2022 (20 %) qu'en 2021 (11 %).

De telles diminutions d'α sur une durée aussi longue entraînent une augmentation du FR de la parcelle. Bien que celui-ci reste partout négatif, il passe de -17.6W/m² entre la référence (α-5j) à -3.7W/m² en moyenne, soit une hausse de +13.9 W/m² (tableau 3). Dans 4 sites, le FR des prairies a même été ponctuellement positif l'été : 1 jour à Derval, 5 à Thorigné, 6 au Pradel et 15 jours au Rheu, où l'albédo a baissé le plus (αminimum=0.106). Au total, il y a eu 26 jours cumulés de FR>0.

Des prairies soumises à un fort stress hydrique peuvent donc passer d'un FR négatif (avec un couvert végétal et un sol desséchés) à un FR positif après un événement de précipitation où le sol s'assombrit et la végétation reste dégradée. Même si cela est resté

limité dans la durée en 2022 cela questionne la manière de préserver les prairies dans de telles circonstances afin qu'elles conservent un effet refroidissant dans un contexte climatique futur où les périodes de sécheresses risquent d'augmenter avec la hausse des températures.

L'intensité du pâturage a un effet dépressif sur l'albédo des prairies, mais...

Le pâturage diminue l'albédo d'une prairie : en moyenne, pour 48 situations , de -4.9 % (tableau 5).La baisse est la plus faible pour les chargements les plus faibles (Pradel, Jalogny) et inversement si le chargement est élevé (Mourier, Trévarez). Le coefficient de variation d'α est en tendance plus faible pour les chargements élevés : 42 % pour Trévarez (chargement 22.6 UGB/ha/jour en moyenne), que pour les chargements faible comme au Pradel où le coefficient de variation élevé, 251 % (chargement : 2.8). Cette forte variabilité,

Tableau 5 : effet du pâturage sur l'albédo des prairies des 7 sites expérimentaux (2021-2022)
Table 5: Effect of grazing on grassland albedo at the 7 experimental sites (2021-2022)

site (2021 et 2022):	Trévarez	Rheu	Derval	Thorigné	Pradel	Mourier	Jalogny	moyenne
nombre d'observations	9	2	12	6	7	9	3	48
chargement corrigé, UGB/ha/jour	22,6	5,8	12,2	9,1	2,8	16,3	3,0	12,3
albédo de référence: α-5j	0,241	0,218	0,251	0,231	0,218	0,263	0,215	0,241
coefficient de variation %	11 %	5 %	8 %	16 %	11 %	10 %	2 %	12 %
baisse moyenne d'α	-8,4 %	-7,2 %	-4,1 %	-3,9 %	-1,6 %	-6,7 %	-0,9 %	-4,9 %
coefficient de variation %	-42 %	-22 %	-122 %	-160 %	-251 %	-51 %	-290 %	-96 %
cumul de baisse d'α	-182 %	-66 %	-87 %	-128 %	-8 %	-144 %	-18 %	-104 %
coefficient de variation (%)	-55 %	-89 %	-95 %	-118 %	-335 %	-75 %	-210 %	-103 %

Tableau 6 : test de χ^2 effet sur le chargement instantané ou de l'humidité au sol au moment du pâturage sur le cumul de baisse d'albédo
Table 6 : χ^2 test for the effect of instantaneous stocking or soil moisture at the time of grazing on the cumulative reduction in albedo.

Nombre d'évènements de pâturage [n]		Médiane du chargement instantané (Charg.) en UGB/ha/j*		Médiane de l'humidité massique du sol en % (Hsol)	
		Inf 9.54	Sup 9.54	Inf 29 %	Sup 29 %
Cumul de baisse d' α ($\Sigma\Delta\alpha$) par rapport à la référence α -5j	Inf -65.6 %	[6]	[18]	[15]	[9]
	Sup -65.6.1 %	[18]	[6]	[10]	[14]
Signification (p)		Significatif (p=0.01)		Non significatif (p =0.1)	

Inf = inférieur, sup = supérieur, * corrigé du % d'herbe dans la ration, p = probabilité ; les seuils inf / sup correspondent à la médiane du critère pour les 32 évènements.

traduit probablement une faible pression de prélèvement d'herbe dont l'impact sur l'albédo est réduit, contrairement aux chargements plus élevés. Cette tendance se retrouve également avec la baisse cumulée d'albédo.

Ces diminutions plus importantes d'albédo pour les chargements les plus élevés sont significatives (test de χ^2 , $p=0.01$), tandis que le niveau d'humidité du sol des 5 jours précédant le pâturage n'a pas d'effet significatif (tableau 6).

Le coefficient de détermination entre chargement instantané corrigé et la baisse cumulée d'albédo pour 2021 et 2022 semble assez faible : $r^2=0.30$ (figure 7), cette tendance est cependant significative (figure 7).

Conversion en forçage radiatif (Watt/m²) et en équivalents CO² de l'albédo des prairies et de l'effet des fauches, pâtures et pluie après une période sèche.

Le forçage radiatif de chaque prairie a été calculé à partir de leurs dynamiques annuelles d'albédo. Ensuite, une estimation du cumul annuel de l'effet des pâturages sur l'albédo et le FR a été réalisé. Pour simplifier les calculs et considérer toutes les opérations

techniques qui prélèvent l'herbe des parcelles, nous y avons inclus les 4 évènements de fauche recensés (2 à Trévarez et 1 au Rheu en 2021 et 1 au Mourier en 2022). L'effet des périodes sèches suivies de l'humectation du sol sur le FR a été quantifié de la même manière. La baisse d'albédo a été calculée en considérant qu'en l'absence d'évènement, l'albédo (figure 4) aurait été égal à l'albédo de référence (α -5j).

Par rapport à un sol nu de référence ($\alpha_{\text{annuel}}=0.15$), le FR moyen annuel des 7 prairies est de - 8.65 W/m² en 2021 et de -8.29 W/m² en 2022 , où l'albédo moyen annuel des prairies est un peu plus faible : 0.225 contre 0.232 (tableau 6). Notons que si cet écart n'est pas significatif en moyenne entre les 2 années, il l'est cependant entre août et octobre de ces deux années en raison de la dégradation des prairies (figures 5, 6) à cause de la forte sécheresse de 2022 en raison de l'effondrement de l'albédo à partir de mi-août 2022. La conversion en équivalents CO², aboutit respectivement à -1836 kg eqCO2/ha/an et -1759 kgeqCO²/ha/an en année plus sèche. Les écarts entre sites peuvent être de l'ordre du tiers : ainsi en 2021 le FR du Mourier était de -11.13W/ m² (soit -2362 kg eqCO²/ha/an), grâce à son albédo le plus élevé (0.252), au contraire de Jalogny ($\alpha=0.218$, le plus faible, -7.45 W/ m² et -1581 kgeqCO²/ha/an). Ces écarts se retrouvent en 2022 (tableau 7).

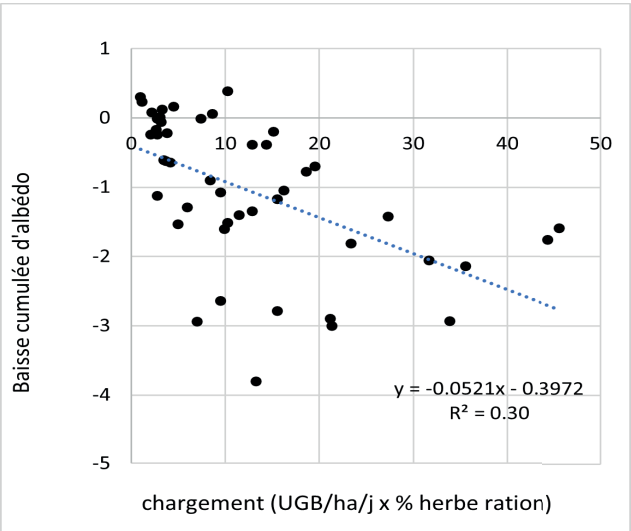


Figure 7 : baisse cumulée d'albédo ($\Sigma\Delta\alpha$) selon le chargement instantané corrigé de la part d'herbe dans l'alimentation des animaux -2021-22, $n=48$, $F=19.5$, $p=0.0001$
Figure 7: Cumulative decrease in albedo ($\Sigma\Delta\alpha$) according to instantaneous stocking corrected for the proportion of grass in the animals' diet -2021-22, $n=48$, $F=19.5$, $p=0.0001$

Tableau 7 : impact de l'humectation du sol et du pâturage sur le FR des prairies exprimé en W/m² et en kg équivalents CO2/ha/ an
Table 7 : Impact of soil moistening and grazing on the RF of grasslands expressed in W/m² and kg CO2 equivalent/ha/year

Du 01/01 au 31/12/21	Trévarez	Rheu	Derval	Thorigné	Mourier	Jalogny	Pradel	Moyenne
α moyen annuel mesuré	0,241	0,222	0,247	0,226	0,252	0,218	0,221	0,232
FR (W/m²) mesuré	-8,02	-7,63	-10,18	-7,68	-11,13	-7,45	-8,47	-8,65
kg eq CO2/ha/an mesuré	-1702	-1619	-2160	-1630	-2362	-1581	-1797	-1836
Effet de la pluie après période sèche sur le FR								
α moyen annuel lissé	0,241	0,222	0,247	0,226	0,252	0,218	0,225	0,233
FR (W/m²) lissé	-8,02	-7,63	-10,18	-7,72	-11,17	-7,45	-8,85	-8,72
FR (W/m²) Mesuré-Lissé	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,38	0,06
kg eq CO2/ha/an effet humectation	0	0	0	8	8	0	81	14
Effet pâturage et fauche sur le FR								
α moyen annuel lissé	0,250	0,224	0,250	0,229	0,260	0,219	0,221	0,236
FR (W/m²) lissé	-8,97	-7,89	-10,65	-7,98	-11,96	-7,61	-8,46	-9,07
FR (W/m²) Mesuré-Lissé	0,95	0,26	0,47	0,29	0,83	0,16	-0,01	0,42
kg eq CO2/ha/an effet fauche/pâturage	202	55	100	62	176	34	-2	89

Du 01/01 au 31/12/22	Trévarez	Le Rheu	Derval	Thorigné	Mourier	Jalogny	Pradel	Moyenne
α moyen annuel mesuré	0,230	0,213	0,239	0,226	0,239	0,212	0,216	0,225
FR (W/m²) mesuré	-7,47	-6,78	-9,12	-7,87	-10,68	-7,45	-8,69	-7,38
kg eq CO2/ha/an mesuré	-1585	-1439	-1935	-1670	-2266	-1581	-1844	-1566
Effet de la pluie après période sèche sur le FR								
α moyen annuel lissé	0,233	0,222	0,247	0,238	0,248	0,217	0,230	0,234
FR (W/m²) lissé	-7,75	-7,78	-9,97	-9,02	-11,77	-7,92	-10,33	-9,22
FR (W/m²) Mesuré-Lissé	0,28	1,00	0,85	1,15	1,09	0,47	1,64	0,93
kg eq CO2/ha/an effet humectation	59	212	172	244	231	100	348	195
Effet pâturage et fauche sur le FR								
α moyen annuel lissé	0,239	0,216	0,243	0,226	0,239	0,212	0,216	0,227
FR (W/m²) lissé	-8,50	-7,05	-9,73	-8,30	-10,39	-7,45	-8,78	-7,63
FR (W/m²) Mesuré-Lissé	1,04	0,27	0,62	0,43	-0,28	0,00	0,09	0,25
kg eq CO2/ha/an effet fauche/pâturage	221	117	132	91	59	0	19	53

Lorsqu'on compare l'albédo d'une prairie avec une surface cultivée en blé, culture la plus importante en surface en France avec 4.2 millions d'hectares (Agreste 2021). Le blé couvre le sol une partie de l'année et laisse moins longtemps le sol nu visible (α annuel=0.168), le FR de la prairie est un peu plus élevé que celui d'un sol nu, tout en restant négatif . La valeur moyenne du FR des prairies est de -1445 kg eqCO²/ha /an en 2021 (FR=-6.81 W/m², au lieu de -8.65 pour αsol annuel=0.15) et -1326 kgeqCO²/ha/ an en 2022 (FR=-6.25 W/m², au lieu de -8.29). Cette comparaison de la prairie avec le blé est plus proche de la réalité de l'usage des sols, qui ne sont jamais nus toute l'année. Cela pose aussi la question de la référence d'albédo à retenir pour le calcul du FR :

si comparer une prairie à un sol nu en permanence permet une comparaison à d'autres travaux (Ferlicoq, 2016, Sieber 2022) cela présente un intérêt plus limité pour estimer son FR par rapport à d'autres systèmes ou pratiques agricoles : il faudra donc définir une référence d'usage des sols plus proche d'une occupation réaliste de ceux-ci, par exemple, l'assolement moyen d'une exploitation, d'une petite région agricole, ou au-delà.

Entre les sites, les écarts de FR, s'expliquent en grande partie par l'albédo local (Tableau 3) : il est plus élevé au Mourier, Derval et Trévarez (α>0.23) et plus faible au Rheu, au Pradel et Jalogny (α<0.22) et intermédiaire à Thorigné. Ce classement pourrait pour une partie s'expliquer par une pousse d'herbe plus (α élevé) ou

moins (α faible) importante et probablement par l'albédo du sol de chaque parcelle approché par l'albédo minimum observé (tableau 4). En effet en août 2022, en raison de la dégradation des prairies, le sol était davantage visible comme l'attestent les photographies prises à ce moment-là, avec l'albédo le plus faible jamais mesuré et qui pourrait être proche de celui du sol nu (tableau 3).

Impact du pâturage sur le FR de la prairie :

Sur l'ensemble des opérations techniques, 32 évènements de pâturage et 3 de fauche pour de l'enrubannage, ont été observées en 2021. Ces évènements ont généré en moyenne un FR positif mais non significatif ($p=0.05$) de $+0.42 \text{ W/m}^2$ ($+89 \text{ kg eqCO}_2/\text{ha/an}$) par rapport à une prairie sans évènements agricole. Dans le cas du Pradel la valeur est proche de 0 avec le chargement animal le plus faible, tandis que la parcelle de Trévarez génère un FR significatif de $+0.95$ ($+202 \text{ kg eqCO}_2/\text{ha/an}$) avec le chargement le plus élevé, puisque le prélèvement plus important d'herbe par les vaches réduit davantage l'albédo.

En 2022, avec moins d'herbe disponible en raison de la sécheresse, il n'y a eu sur l'ensemble que 16 pâturages. Le FR positif est plus faible qu'en 2021 de $+0.25 \text{ W/m}^2$ en moyenne soit $+53 \text{ kg eqCO}_2/\text{ha/an}$. Cette valeur presque deux fois plus faible s'explique essentiellement par un nombre de pâturages divisé par deux, en raison d'une moindre pousse de l'herbe.

Impact de l'assombrissement du sol par la pluie sur le FR de la prairie :

En 2021, la pluie régulière a limité l'importance de l'effet humectation du sol sur l'albédo, celui-ci étant en moyenne plus humide. L'herbe a aussi davantage couvert le sol grâce à de bonnes conditions de croissance, comme l'attestent les photographies prises toutes les 2 semaines : 11 % de sol visible de mai à juillet

en moyenne contre 20 % en 2022 (hors site du Rheu où nous ne disposons pas de photos). Il n'y a eu que 12 situations d'humectation observées en 2021, contre 20 en 2022.

Nous avons ici aussi calculé l'écart entre l'albédo mesuré et l'albédo annuel « lissé » (α_{-5j}). Ainsi, en 2022 les périodes de sécheresse ont induit un FR positif significatif dans les 7 prairies ($p = 0.05$) estimé à $+0.93 \text{ W/m}^2$ (soit $+195.1 \text{ kg eqCO}_2/\text{ha/an}$, tableau 7), par rapport à $+0.06 \text{ W/m}^2$ en 2021. Les valeurs extrêmes vont de $+0.28 \text{ W/m}^2$ (Trévarez, 24 jours sans pluie en juillet-août si l'on considère les périodes d'au moins 10 jours sans précipitations) à $+1.64 \text{ W/m}^2$ (Pradel, 142 jours cumulés de périodes de plus de 10 jours sans pluie, entre avril et la mi-août). En 2021, année humide en France, seule la parcelle du Pradel a généré un FR positif, étant donné qu'il y a eu plus de périodes sèches en raison du climat quasi-méditerranéen plus chaud et sec : $+0.38 \text{ W/m}^2$ en 2021. Pour les autres sites, le FR est proche de 0.

Quel albédo du sol pour une expression maximale de son effet sur le FR?

L'albédo de référence auquel on compare une prairie, conditionne la valeur du FR de celle-ci. S'il est inférieur à l'albédo de la prairie, elle aura un $\text{FR} < 0$ (effet refroidissant) et inversement (effet réchauffant). Pour estimer la capacité « refroidissante » d'une prairie selon un niveau d'albédo du sol nous avons testé un gradient croissant d'albédo du sol, pour analyser l'effet de recouvrement du sol par le couvert prairial sur le FR. Le sol le plus sombre retenu ici ($\alpha_{\text{ref}}=0.15$) correspond à la référence utilisée ici pour le calcul du FR de la prairie, représentatif de nombreux sols en France. Puis des valeurs supérieures $\alpha=0.20$ et $\alpha=0.25$ ont été utilisés pour simuler des sols plus clairs (tableau 8).

En 2021 comme en 2022, le FR des prairies augmente avec la valeur de l' α de référence. Cela s'explique par l'écart d'albédo du

Tableau 8 : FR des prairies selon un niveau croissant d'albédo du sol ($\alpha_{\text{ref}}=0.15 - 0.20 - 0.25$)
Table 8 : RF of grasslands according to increasing level of soil albedo ($\alpha_{\text{ref}}=0.15 - 0.20 - 0.25$)

2021	Trévarez	Le Rheu	Derval	Thorigné	Mourier	Jalogny	Pradel	Moyenne	kg eqCO ₂ /ha/an
α moyen annuel	0,241	0,222	0,247	0,226	0,252	0,218	0,221	0,232	
Rayonnement incident/24h	148	159	173	159	172	162	186	166	
FR prairie, si $\alpha_{\text{sol}}=0.15$	-8,0	-7,6	-10,2	-7,7	-11,1	-7,5	-8,5	-8,7	-1846
FR prairie, si $\alpha_{\text{sol}}=0.20$	-3,8	-2,8	-4,9	-2,9	-5,7	-2,4	-2,3	-3,5	-743
FR prairie, si $\alpha_{\text{sol}}=0.25$	0,3	2,0	0,4	1,9	-0,3	2,6	3,9	1,6	340

2022	Trévarez	Le Rheu	Derval	Thorigné	Mourier	Jalogny	Pradel	Moyenne	kg eqCO ₂ /ha/an
α moyen annuel	0,230	0,213	0,239	0,226	0,239	0,212	0,216	0,225	
Rayonnement incident/24h	167	171	171	168	183	178	196	176	
FR prairie, si $\alpha_{\text{sol}}=0.15$	-7,5	-6,8	-9,1	-7,9	-10,7	-7,4	-8,7	-8,3	-1761
FR prairie, si $\alpha_{\text{sol}}=0.20$	-2,7	-1,3	-3,7	-2,6	-4,5	-0,2	-2,0	-2,4	-509
FR prairie, si $\alpha_{\text{sol}}=0.25$	2,0	4,1	1,7	2,7	1,6	0,7	4,8	2,5	531

sol qui se réduit avec celui de la prairie. Ainsi, en 2021, le FR passe ainsi de -8.7 W/m^2 en moyenne pour $\alpha=0.15$ à un FR positif : $+1.6 \text{ W/m}^2$ en moyenne pour $\alpha=0.25$. Seul le Mourier conserve dans cette simulation un FR légèrement négatif en raison de l' α élevé de la prairie. En 2022, la tendance du FR est la même avec le même gradient d'albédo de référence (-8.3 à $+2.5 \text{ W/m}^2$). Un albédo du sol élevé, limite donc l'intérêt de recouvrement des plantes prairiales en termes d'impact sur le FR.

Avec un $\alpha_{\text{ref}}=0.25$ pour le sol, le nombre de jours dénombré où le FR est positif (la prairie a alors un effet réchauffant), augmente par rapport à des sols où l'albédo est plus faible. Par exemple en 2022 pour un $\alpha_{\text{sol}}=0.25$ il y a entre 223 et 358 jours avec un FR positif selon le site prairial. Ce nombre de jours passe de 33 à 108 jours si $\alpha_{\text{sol}} = 0.20$, à seulement 0 à 15 jours si $\alpha_{\text{sol}} = 0.15$ (figure 8). En 2021, la tendance est identique mais avec moins de journées où le FR est positif, car en moyenne l'albédo des prairies était un peu plus élevé ($\alpha=0.232$ en 2021, contre $\alpha=0.225$ en 2021). Par exemple pour $\alpha=0.25$, il y a seulement 267 jours avec un $\text{FR}>0$ en 2021 contre 286 jours en 2022.

Discussion

Les prairies permanentes ou temporaires étudiées génèrent un FR négatif en 2021 et en 2022. Le FR moyen des 2 années est de -8.5 W/m^2 par rapport à un sol nu et de -6.5 W/m^2 par rapport à un blé qui réfléchit davantage la lumière. La conversion en équivalents CO_2 correspond à un « retrait » en termes de bilan d'énergie de -1797 et de $-1385 \text{ kg eqCO}_2/\text{ha/an}$ respectivement. Une conver-

sion en équivalent carbone (C) donne respectivement -490 à $-378 \text{ kg eqC/ha/an}$. Ces valeurs sont comparables au stockage de carbone d'une prairie permanente qui remplace une terre labourée (Arrouays et al. 2002, INRA 2019), cela est permis en France par des sols dont l'albédo est plus faible que l'herbe (0.10 à 0.15) (Carrier et al, 2018).

La valeur de FR de -8.5 W/m^2 calculée ici est comparable à celles de prairies temporaires étudiées en Suède , -10.2 W/m^2 ($\alpha_{\text{ref}}=0.134$) (tableau 9, Sieber et al. 2022). Les prairies ont un effet refroidissant plus important que des cultures de vente telles que des cultures d'hiver comme le blé ou le colza (Sieber et al. 2022, Ferlicoq, 2016) et davantage que le maïs (Ferlicoq 2016). Cela signifie qu'un système d'élevage avec des ruminants, renforce sa capacité d'atténuation du CC d'une part par la séquestration de carbone, en privilégiant le développement des surfaces d'herbe à la place de cultures fourragères et d'autre part par l'effet de l'albédo. Toutefois notre référence sol ayant un albédo un peu plus élevé que dans l'étude de Sieber et al. 2022, elle défavorise légèrement l'effet refroidissant des prairies françaises.

Les prairies ont donc grâce à l'effet important de l'albédo, la possibilité d'être un levier pour les systèmes d'élevage de ruminants pour contribuer à l'atténuation du changement climatique, en plus de leur capacité à séquestrer du carbone. Cependant, cet effet peut être transitoirement réduit dans le cas de prairies soumises à des conditions de sécheresse défavorables à son développement, ou à des prélèvements importants d'herbe par fauche où pâturage pour l'alimentation des ruminants.

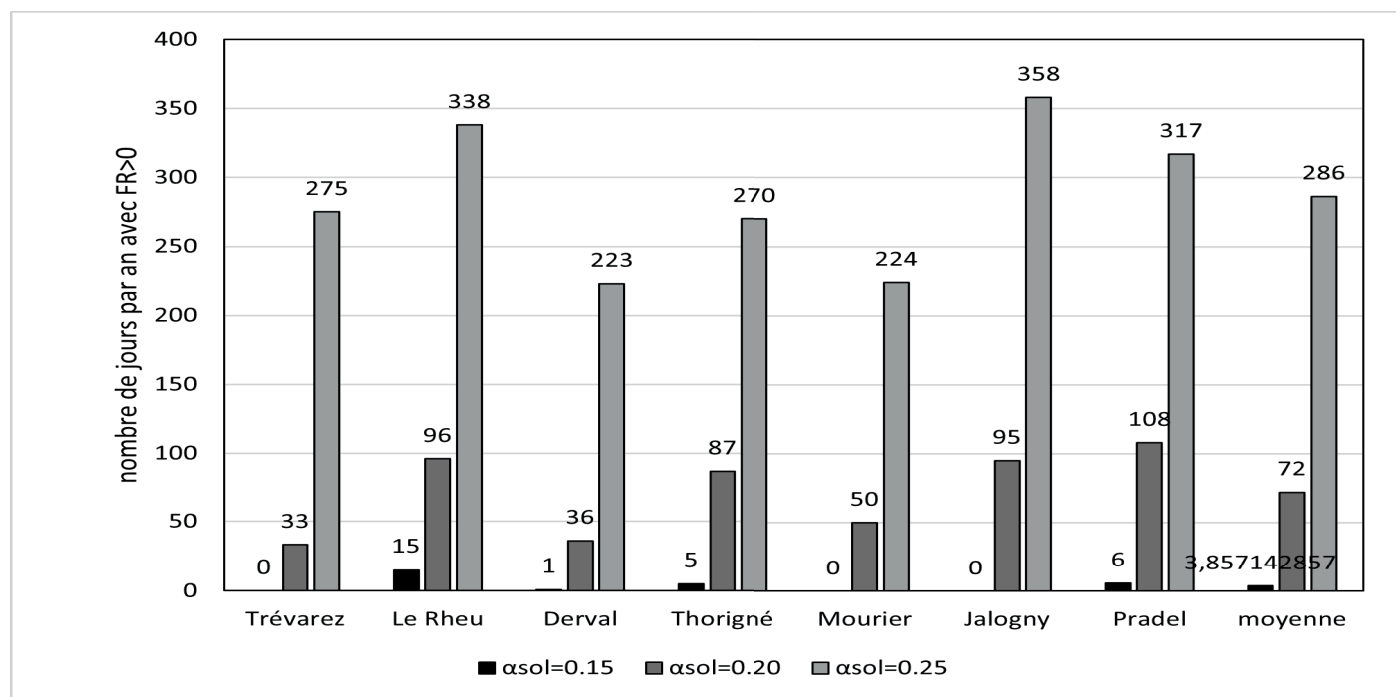


Figure 8 : nombre de jours avec un FR positif selon le niveau d' α du sol en 2022
Figure 8: Number of days with a positive FR depending on soil α level in 2022

Tableau 9 : albédo et forçage radiatif de différents végétaux cultivés
Table 9 : Albedo and radiative forcing of various cultivated plants

	Prairie (France)	Prairie Temporaire	Moutarde (2.5 mois/an)	Blé		Colza		Maïs
Albédo moyen	0.226	0.215	0.170	0.168	0.182	0.190	0.200	0.160
α de référence	0.15	0.134	≈0.170	≈0.140	0.134	≈0.140	0.134	≈0.140
FR (W/m²)*	-8.40	-10.20	-0.25	-4.14	-6.10	-4.20	-8.30	-1.30
référence bibliographique	Cet article	S	C	F	S	F	S	F

*le FR est ramené à l'année, C = Ceschia et al, 2017 ; F = Ferlicoq, 2016 ; S = Sieber, 2022

Le pâturage, comme la fauche, prélève de l'herbe, rendant le sol davantage visible. Il en résulte une baisse moyenne d'albédo, qui est de -4.9 % pendant 16 jours. Elle est moins importante que la baisse observée avec une fauche : -13.7 %, pendant un mois (Mischler et al. 2022). Les pâturages et fauches recensés dans les 7 prairies étudiées induisent en 2021 un FR de +0.42 W/m² contre +0.25W/m² en 2022 par rapport à l'absence de pâturage et de fauche (tableau 6). Ce FR>0, est statistiquement non significatif, sauf pour les sites du Mourier et de Trévarez en 2021, et est plus faible que l'effet (significatif) de la sécheresse de 2022. Le premier objectif d'une prairie étant de produire du fourrage, le prélèvement d'herbe par les animaux affecte finalement peu l'effet refroidissant des prairies. Mais, dans le cas de chargements élevés comme à Trévarez, le pâturage peut induire une hausse significative du FR jusqu'à +1 W/m² (soit +210 kg eqCO²/ha/an, tableau 6). Si cela ne pose pas de problème dans le cas où la croissance de l'herbe est favorisée par la météo, cela peut signifier qu'au contraire, un pâturage intensif sur une prairie fragilisée par une sécheresse pourrait générer un FR>0 en rendant le sol visible : dans le cas d'un surpâturage, les animaux piétinent et abîment le couvert qui fournit peu d'herbe, en arrachant des touffes d'herbes pour s'alimenter (Gilet 1981). L'effet réchauffant pourrait même alors être amplifié dans le cas où le sol aurait un albédo plus élevé.

L'effet de périodes sèches sur la dynamique d'albédo, montre que si une pluie tombe sur un sol sec en surface, l'albédo diminue. Ce phénomène est connu depuis longtemps (Itier et Parcevaux, 1973, Idso et al. 1975). Appliqué à des prairies dégradées à la suite d'une sécheresse importante, comme en 2022, la baisse moyenne d'albédo observée dans nos 7 prairies (-22 %) génère une hausse significative du FR de +0.93 W/m², soit +195.1 kg eqCO²/ha/an. La prairie conserve cependant un FR négatif (-8.5W/m²). Toutefois, dans l'hypothèse d'un albédo du sol plus élevé, une prairie serait susceptible de devenir réchauffante, ce que confirment les simulations que nous avons réalisé avec une référence d'albédo croissant du sol. Dans ce cas, le nombre de journées avec FR>0 augmente de manière importante. Ainsi pour un sol avec un albedo compris entre 0.20 et 0.25, une prairie pourrait basculer d'un FR<0 vers un FR>0. Les sols français ayant une valeur entre 0.10 et 0.15 (Carrer et al. 2018), cette situation ne devrait se rencontrer que

sur des surfaces limitées. C'est des sols plus clairs que la question d'introduire une prairie pourra poser question en termes de bilan énergétique : un FR proche de 0 n'aura pas d'incidence négative, mais s'il devient positif il pourrait contre balancer au niveau du bilan d'énergie l'effet de la séquestration de carbone. La question de l'intérêt la couverture végétale de sols calcaires dont l'albédo très élevé pourrait ainsi se poser en termes de bilan énergétique. Le FR>0 induit lié à l'albédo plus faible des végétaux par rapport à ces sols, sera à mettre en regard de leur capacité de séquestration du carbone. Cela doit aussi se mettre en perspective avec (1) d'autres composantes du bilan d'énergie : l'évapotranspiration d'un couvert peut générer aussi un effet refroidissant (non estimé dans notre étude), mais aussi (2) la capacité de certains couverts, notamment les cultures intermédiaires à limiter les fuites de nutriments, tels que les nitrates et enfin, (3) la fonction nourricière des sols agricoles.

Les conditions de sécheresses sévères liées au changement climatique observées ces dernières années limitent la productivité végétale. Des conditions de températures élevées et de précipitations moindres, entraînent une réduction de la productivité des prairies (Li et al., 2022). Des sécheresses répétées pourraient aussi induire des limitations dans la capacité des végétaux à stocker du carbone. Cela a été notamment documenté pour l'anomalie climatique de 2003 en Europe, où la canicule a annulé l'effet de 4 années de séquestration nette dans les écosystèmes (Ciais et al. 2005).

Conclusion

Le projet albédo-prairies a produit des résultats originaux : c'est la première fois que le FR d'une prairie a été calculé en France, à l'échelle d'années entières. Son effet est comparable en ordre de grandeur à la séquestration du carbone dans le sol par l'herbe, grâce à sa capacité importante de couverture du sol.

Ces travaux posent la question du bon usage de la prairie dans l'amélioration de l'albédo de surface. Plusieurs pistes de préconisa-

tions sont possibles : la première est de favoriser les surfaces en herbe dans les assolements, pour couvrir le plus possible le sol et par extension favoriser la présence de couverts entre cultures . Il faudra aussi éviter des situations de surpâturage qui peuvent laisser un sol longtemps visible lorsque l'herbe n'est pas dans de bonnes conditions de croissance. A l'inverse, dans de bonnes conditions de croissance d'herbe un chargement élevé ne semble pas nécessairement être un problème en termes d'impact sur l'albédo et le FR des prairies. Les résultats des 2 années considérées doivent encore être renforcés par de l'acquisition de données supplémentaires, comme celles de 2023 (en cours d'acquisition) et comparées à des données d'autres réseaux de mesure, tel que le réseau européen ICOS (<https://www.icos-cp.eu/>). Les conditions climatiques depuis 2020 ont d'ores et déjà permis de couvrir une gamme de conditions météorologique contrastée.

La prise en compte de l'effet albédo par les agriculteurs et les éleveurs au même titre que la séquestration du carbone par l'agriculture et la réduction des émissions de GES est aussi un moyen d'argumenter en faveur de contributions positives d'un élevage de ruminants dans le cadre de la lutte contre le changement climatique. Pour aller plus loin, les travaux doivent aller au-delà de la seule prairie et s'intéresser à l'échelle du système de culture fourragers. Un projet Casdar, Albâtre-systèmes a été déposé pour cela et a été lauréat de l'appel à projet de 2023.

Remerciements

Le projet Recherche Technologique Albédo-Prairies a été financé par le CASDAR. Nous souhaitons aussi remercier les techniciens et ingénieurs des fermes expérimentales de Trévarez, Rheu, Derval, Thorigné, Mourier, Jalogny et Pradel, qui interviennent régulièrement sur les sites pour entretenir les dispositifs de mesure et pour collecter les données. Merci aussi aux partenaires scientifiques du CESBIO et de l'AFPF et au soutien du RMT SPICEE.

Références bibliographiques

Agreste, (2021). Chiffres et données, statistiques agricole annuelle 2020 chiffres provisoires, 62.
Ballet B.(2021). L'occupation du sol entre 1982 et 2018, Agreste-les dossiers, 32.
Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. (2002). Stocker du carbone dans les sols agricoles de France, Expertise Scientifique Collective., synthèse du rapport d'expertise scientifique, 36p.
Bright R.M., Bogren W., Bernier P., Astrup R. (2016). Carbon-equivalent metrics for albedo changes in land management contexts: relevance of the time dimension, *Ecological Applications*, 26 (6), 1868-1880.
Bright R.M., Lund M. T. (2021). CO₂-equivalence metrics for surface albedo change based on the radiative forcing concept: a critical review , *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 9887–9907, <https://doi.org/10.5194/acp-21-9887-2021>

Carrer D., Pique G., Ferlicoq M., Ceamanos X., Ceschia E. (2018). What is the potential of cropland albedo management in the fight against global warming? A case study based on the use of cover crops, *Environmental Research Letters*, 13(4).
Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Oge'e J., Allard V., Aubinet M., Buchmann N., Bernhofer C., Carrara A., Chevallier F., De Noblet N, Friend AD, Friedlingstein P., Grünwald T., Heinesch B., Keronen P., Knohl A., Krinner G., Loustau D., Manca G., Matteucci G., Miglietta F., Ourcival JM, Papale D., Pilegaard K, Ramba S., Seufert G., Soussana F., Sanz, MJ., Schulze ED., Vesala T., Valentini R (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature*, 437, 529–533
Citepa, (2023). Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2022, Rapport Secten, 575.
Ceschia E., Mary B., Ferlicoq M., Pique G., Carrer D., Dejoux J.-F., Dedieu G, (2017). Potentiel d'atténuation des changements climatiques par les couverts intermédiaires, *Innovations Agronomiques* 62, 43-58.
Djamko A.(2022). Estimation de l'effet biophysique albédo sur l'impact climatique de l'utilisation de cultures intermédiaire : exemple de cas sur le site ICOS de Loncée, Mémoire de Master Bioingénieur en sciences et technologies de l'environnement, Liège université Gembloux Agrobiotech, 30.
Ferlicoq M. (2016). Comparaison pour les agroécosystèmes des contributions biogéochimiques et biophysiques au forçage radiatif net pour l'identification de leviers d'atténuation au changement climatique, THESE, Université Paul Sabatier, 353.
Gilet M. (1981). Physiologie de l'herbe et pâturage, *Fourrages*, 85, 7-21.
Hansen F. (1993). Albedos, U.S. Army Research Laboratory, 27.
Idso S.B., Jackson R.D., Reginato R.J., Kimball B.A., Nakayama F.S. (1975). The Dependence of Bare Soil Albedo on Soil Water Content, *Journal of applied meteorology and climatology*, 14 (1), 109-113. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1975\)014<0109:TDOBSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1975)014<0109:TDOBSA>2.0.CO;2)
INRA (2019). Stocker du carbone dans les sols français, quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Résumé de l'étude, 12.
Li X., Lin, G., Jiang, D., Fu, J., Wang Y. (2022). Spatiotemporal Evolution Characteristics and the Climatic Response of Carbon Sources and Sinks in the Chinese Grassland Ecosystem from 2010 to 2020, *Sustainability*, 14, 8461. <https://doi.org/10.3390/su14148461>
Météo France (2022), Bilan climatique de l'année 2021 sur la France métropolitaine, 24.
Météo France (2023), Bilan climatique de l'année 2022 sur la France métropolitaine, 37 .
Ministère de la transition écologique, 2020, Stratégie nationale bas-carbone, 4.
Mischler P., Ferlicoq M., Ceschia E., Kerjose E., (2022). L'albédo, un levier d'atténuation du changement climatique méconnu : quel potentiel d'atténuation pour les prairies ? *Fourrages*, 251, 1-16
Muñoz I., Fernandez-Alba A.R., (2010). Including CO₂-emission equivalence of changes in land surface albedo in life cycle assessment. Methodology and case study on greenhouse agriculture", *International journal of life cycle assessment*, 15, 672–681.
Parcevaux Sde, Itier B. (1975), Albedo et agriculture, Influence des activités de l'homme sur le cycle hydrométéorologique, Compte rendu des treizièmes journées de l'hydraulique, Paris, 16-18 septembre 1974. Rapport III.1. Tome 1, 1-8; https://www.persee.fr/doc/jhydr_0000-0001_1975_act_13_1_4416
Pörtner, H.O., Roberts D.C., Adams H., Adelekan I., Adler C., Adrian R., Aldunce P., Ali E., Ara Begum R., Bednar-Friedl B., Bezner Kerr B., Biesbroek R., Birkmann J., Bowen K., Caretta MA, Carnicer J., Castellanos E., Cheong TS, Chow W., Cissé G., Clayton S., Constable A., Cooley SR., Costello MJ., Craig M., Cramer W., Dawson R., Dodman D., Eftre J., Garschagen M., Gilmore EA, Glavovic BC., Gutzler D., Haasnoot H., Harper S., Hasegawa T., Hayward B., Hicke JA., Hirabayashi Y., Huang C., Kalaba K., Kiessling W., Kitoh A., Lasco R, Lawrence J., Lemos MF, Lempert R., Lennard C., Ley D., Lissner T., Liu Q., Liwenga E., Lluch-Cota S., Löschke S., Lucatello S., Luo

Y., Mackey B., Mintenbeck K., Mirzabaev A., Möller V., Moncassim Vale M., Morecroft MD., Mortsch L., Mukherji A., Mustonen T., Mycoo M., Nalau J., New M., Okem A., Ometto JP., O'Neill B., Pandey R., Parmesan C., elling M., Pinho PF, Pinnegar J., Poloczanska ES, Prakash A., Preston B., Racault MF., Reckien D., Revi A., Rose SK., Schipper ELF., Schmidt DN., Schoeman D., Shaw R., Simpson NP, Singh C., Solecki W., Stringer L., Totin E., Trisos CH., Trisurat Y., van Aalst M., Viner D., Wairiu M., Warren R., Wester P., Wrathall D., Zaiton Ibrahim (2022). Technical Summary, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change , Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 84p, doi:10.1017/9781009325844.00

Schimel, D. et al. (1995). The Science of Climate Change: Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change “ , Climate Change 1995, . (eds Houghton, J. T. et al. ,Cambridge Univ. Press, Cambridge) 65-131.

Sieber P., Bohme S., Ericsson N., Hansson PA., (2022). Albedo on cropland: Field-scale effects of current agricultural practices in Northern Europe, Agricultural and forest meteorology, 321, 108978, 11.