



La revue francophone sur les fourrages et les prairies

*The French Journal on Grasslands and Forages*

Cet article de la revue **Fourrages**,  
est édité par l'Association Francophone pour les Prairies et les  
Fourrages

Pour toute recherche dans la base de données  
et pour vous abonner :

**[www.afpf-asso.fr](http://www.afpf-asso.fr)**



AFPF - Maison Nationale des Eleveurs - 149 rue de Bercy - 75595 Paris Cedex 12  
Tel. : +33.(0)7.69.81.16.62 - Mail : [contact@afpf-asso.fr](mailto:contact@afpf-asso.fr)

Association Francophone pour les Prairies et les Fourrages

# L'albédo, un levier d'atténuation du changement climatique méconnu : quel potentiel d'atténuation pour les prairies ?

P. Mischler<sup>1</sup>, M. Ferlicoq<sup>2</sup>, E. Ceschia<sup>2</sup>, E. Kerjose<sup>1</sup>

## RESUME

L'élevage de ruminants accentue le changement climatique (CC) par l'utilisation des terres et ses émissions de gaz à effet de serre (GES). La gestion des prairies et les modes d'élevages (à l'herbe ou non) affectent aussi le climat en modifiant l'albédo ( $\alpha$ ) de la surface terrestre. Ainsi la gestion de l'albédo via l'adaptation des modes d'élevage pourrait devenir un levier d'atténuation du CC, à l'instar du stockage du carbone (C) dans le sol. Les résultats présentés ici sont issus de mesures d' $\alpha$  quotidiennes de 7 prairies françaises. L'albédo évolue selon des pas de temps variables selon les conditions météorologiques : la présence de givre en automne - hiver génère variabilité intra et inter-journalière d' $\alpha$ . Au printemps et en été, ce sont les pluies après des périodes sans précipitations, qui diminuent l' $\alpha$  pendant quelques jours (-6.9 %). De la même manière, des pratiques agricoles ont un effet plus ou moins important sur l' $\alpha$  : la fauche de refus a le moins d'impact : -3.5 % pendant quelques jours. C'est moins que le pâturage, -3.9 % en moyenne pendant 2 semaines, dont l'effet est fonction du chargement instantané en bétail. La fauche a un effet plus marqué : -13.7 % pendant un mois. En prenant comme référence un sol nu, le forçage radiatif (FR) des prairies, calculé à partir des dynamiques d'albédo est négatif, ce qui signifie un effet refroidissant sur le climat. Cette valeur est en moyenne plus négative en été (-11.1 W/m<sup>2</sup>) qu'en hiver (-3.1W/m<sup>2</sup>) du fait de niveaux d' $\alpha$  plus forts en raison de la présentation accrue de végétation combinée à un rayonnement solaire plus élevé. Une simulation de l'albédo à l'échelle d'exploitations montre que l' $\alpha$  moyen de l'assolement augmente avec la proportion des surfaces en herbe et suggère que les systèmes reposant le plus sur l'herbe auraient un FR favorable à l'atténuation du CC. Cet effet pourrait être accentué via l'adaptation des pratiques sur les prairies pour préserver et améliorer l'albédo de surface.

## SUMMARY

### **Albedo, a little-known climate change mitigation lever: what mitigation potential for grasslands?**

Ruminant livestock farming exacerbates climate change (CC) through land use and its greenhouse gas (GHG) emissions. Grassland management and livestock husbandry (with grazing or not) also affect the climate by modifying the albedo ( $\alpha$ ) of the land surface. Thus, albedo management via the adaptation of livestock management could become a lever for CC mitigation, similar to carbon (C) storage in the soil. The results presented here are derived from daily  $\alpha$  measurements of 7 French grasslands. The albedo evolves according to variable time steps depending on the meteorological conditions: the presence of frost in autumn - winter generates intra and inter-day variability of  $\alpha$ . In spring and summer, it is the rainfall after periods without precipitation, which decreases the  $\alpha$  for a few days (-6.9 %). In the same way, agricultural practices have a more or less important effect on the  $\alpha$ : mowing of refusals has the least impact: -3.5 % for a few days. This is less than grazing, -3.9 % on average for 2 weeks, whose effect depends on the instantaneous livestock load. Mowing has a more marked effect: -13.7 % for one month. Taking as reference a bare soil, the radiative forcing (RF) of grasslands, calculated from albedo dynamics is negative, which means a cooling effect on the climate. This value is on average more negative in summer (-11.1 W/m<sup>2</sup>) than in winter (-3.1W/m<sup>2</sup>) due to higher  $\alpha$  levels because of the increased presentation of vegetation combined with higher solar radiation. A farm-scale albedo simulation shows that the average  $\alpha$  of the crop rotation increases with the proportion of grass areas and suggests that systems relying more on grass would have a favorable RF for CC mitigation. This effect could be enhanced via adaptation of practices on grasslands to preserve and improve surface albedo.

L'élevage de ruminants contribue au changement climatique (CC) par des émissions de gaz à effet de serre (GES). Il peut compenser en partie son impact par la séquestration du carbone (C) dans le sol. Les propriétés de la surface terrestre régulent aussi les échanges d'énergie et d'eau entre la terre et l'atmosphère, leurs propriétés biogéophysiques influencent le climat de l'échelle locale à l'échelle

mondiale. Par exemple, la gestion des prairies modifie la proportion de rayonnement solaire incident réfléchi (i.e. l'albédo,  $\alpha$ ), l'émissivité et l'évapotranspiration de la surface. L'albédo est défini comme le rapport entre le rayonnement global réfléchi par une surface et le rayonnement global incident. Il est compris entre 0 (absorption complète) et 1 (réflexion complète). L'augmentation de l' $\alpha$ , y compris des surfaces agricoles

## AUTEURS

1 : Institut de l'Élevage, Amiens, [pierre.mischler@idele.fr](mailto:pierre.mischler@idele.fr)

2 : INRAE / CESBIO, Toulouse

MOTS-CLES : Albédo, prairie, ruminant, changement climatique, forçage radiatif.

KEY-WORDS: Albedo, grassland, ruminant, climate change, radiative forcing.

REFERENCE DE L'ARTICLE : 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

au moyen des prairies, a pour effet de renvoyer plus d'énergie solaire vers l'espace, ce qui signifie moins d'énergie absorbée par la surface et donc une baisse de la température. Ce processus reproduit à l'échelle mondiale a un effet suffisamment significatif pour compenser en partie les émissions de GES. Le projet Albédo-prairies porté par l'Institut de l'élevage (IDELE) avec le partenariat scientifique du CESBIO (Centre d'Etude Spatial de la BIOSphère), l'INRAE, l'AFPF et 6 fermes expérimentales, a pour but de caractériser les dynamiques d'a résultant de la variabilité sol-climat dans les prairies fauchées et/ou pâturées, puis à quantifier le potentiel d'atténuation associé aux changements de pratiques et de systèmes d'élevage par rapport au stockage de C. Cette comparaison constitue un défi méthodologique qui sera étudié ultérieurement dans le projet. Cet article a pour but d'analyser les déterminants des dynamiques d'a, de quantifier les effets résultant de la gestion des prairies et des événements météorologiques, pour réaliser une première estimation du forçage radiatif (FR) de prairies en France par rapport à une référence, comme un sol nu. Enfin, sur la base des dynamiques annuelles d'albédo de cultures et de prairies disponibles, une première modélisation de dynamiques d'albédo de systèmes de production ayant une part variable d'herbe dans la surface agricole utile a été réalisée.

### **L'albédo, un paramètre clef de la machinerie climatique**

Selon le quatrième rapport d'évaluation du GIEC, l'agriculture, la sylviculture et les autres utilisations des terres représentent environ 30 % du total des émissions anthropiques de GES (IPCC, 2007). Le potentiel d'atténuation mondial des écosystèmes agricoles (*i.e.* les cultures, les prairies, les pâturages, etc.) a été estimé entre 5,5 et 6 Gt d'équivalent CO<sub>2</sub> par an d'ici 2030, dont 89 % de ce potentiel est estimé être réalisable *via* la séquestration du carbone dans le sol (IPCC, 2007 ; Smith *et al.*, 2008). En Europe, l'activité de puits de carbone des écosystèmes prairiaux pourrait atténuer en partie les émissions de GES du secteur agricole (Soussana *et al.*, 2007 ; Schulze *et al.*, 2009). En effet, les prairies qui couvrent environ 13 % de la surface terrestre (Eurostat, 2011), peuvent avoir un potentiel important de séquestration du carbone grâce à l'amélioration des pratiques de gestion des prairies (Conant, 2010). La plupart des prairies européennes sont utilisées pour le pâturage ou la production de fourrage. En fonction des conditions climatiques et des pratiques de gestion, ces prairies peuvent agir soit comme un puits, soit comme une source de carbone (Soussana *et al.*, 2010 ; Allard *et al.*, 2007 ; Ammann *et al.*, 2007 ; Klumpp *et al.*, 2011 ; Jacobs *et al.*, 2007 ; Zeeman *et al.*, 2010).

Au-delà des émissions de GES et des flux de carbone, l'albédo de la surface et les autres processus biogéophysiques ont aussi un impact très significatif sur le climat notamment en raison de leur effet linéaire sur

le bilan énergétique de la surface (Bala *et al.*, 2006 ; Lee *et al.*, 2011 ; Rotenberg et Yakir, 2010). La prise en compte des dynamiques et changements d'albédo est essentielle pour les prévisions climatiques et météorologiques à moyen et long terme, ainsi que pour l'étude des changements globaux (Dickinson *et al.*, 1995 ; Henderson *et al.*, 1983). L'albédo a aussi un impact indirect sur le cycle du carbone et de l'eau puisqu'il conditionne au premier ordre l'énergie qui est disponible à la surface pour nombre de processus biogéochimiques.

### **Les déterminants des variations saisonnières de l'albédo de surface**

L'albédo de la surface terrestre est affecté par de nombreux facteurs en dehors de l'atmosphère (Yoon *et al.*, 2019 ; Bauer *et al.*, 2012) et des conditions nuageuses (He *et al.*, 2019) tels que le sol et la végétation (Zhang *et al.*, 2022 ; Jiao *et al.*, 2018 ; Jiao *et al.*, 2022), la neige (Kokhanovsky *et al.*, 2004) ou la topographie (Wen *et al.*, 2014).

L'albédo du sol est affecté par les irrégularités de surface (Oguntunde *et al.*, 2006 ; Cierniewski *et al.*, 2015 ; Kala *et al.*, 2014), son humidité (Sanchez-Mejia *et al.*, 2014), sa couleur, l'angle zénithal et certaines pratiques telles que l'application de biochar (Usowicz *et al.*, 2016).

L'albédo de la végétation, notamment des écosystèmes prairiaux ou culturaux, est dépendant des espèces cultivées (Yan *et al.*, 2021 ; Carrer *et al.*, 2018), mais aussi des variétés au sein d'une même espèce (Serban *et al.*, 2011). Ces types de végétations sont soumis à de nombreuses variations intra et interannuelles, mais aussi des variations spatiales et temporelles au cours de la période de développement de leur canopée (Zheng *et al.*, 2019).

Le principal facteur déterminant l'albédo de surface est la fraction de surface couverte par la végétation au détriment du sol (Kala *et al.*, 2014 ; Wang *et al.*, 2016). La végétation affecte l'albédo de deux manières. Tout d'abord en modifiant la contribution de l'a du sol à l'a de surface total (Hammerle *et al.*, 2007). Lorsque la végétation se développe avec un indice de surface foliaire (LAI) plus élevé, une plus grande partie de l'énergie solaire entrante est réfléchi, diffusée et/ou absorbée par le couvert végétal et seule une petite partie du rayonnement atteint le sol. Il ne restitue alors que peu de chaleur sous forme de rayonnement infra-rouge ou d'évaporation. De plus, les propriétés optiques et structurelles du couvert végétal affectent l'albédo de surface total. Par exemple, l'âge moyen du peuplement, la hauteur des plantes, la biomasse végétale et la composition des espèces végétales conditionnent l'albédo de surface et ses dynamiques (Lukeš *et al.*, 2014). Le verdissement des surfaces peut influencer le climat régional et mondial en modifiant l'albédo de surface, la rugosité de surface et le cycle hydrologique (Bonan, 2008 ; Li *et al.*, 2018 ; Zeng *et al.*, 2017). Par conséquent, l'étude des changements de l'albédo de

surface induits par la dynamique de la végétation et de la couverture terrestre est essentielle pour comprendre leur rôle dans l'évolution du climat de la Terre.

### Effet de l'occupation du sol sur l'albédo de surface et conséquences climatiques

Dans les latitudes tempérées où la modification anthropique du paysage a converti de vastes zones de forêts et de prairies en terres cultivées, les augmentations d'albédo induites ont permis un refroidissement des températures pouvant aller jusqu'à 0,7 °C en été et 1,1 °C en hiver (Bounoua *et al.*, 2002). L'albédo s'est également révélé être un modulateur important des extrêmes climatiques régionaux telles les sécheresses. Plusieurs études ont montré que l'accroissement de l'albédo de surface a un effet négatif sur les convergences des flux d'humidité et les précipitations, et que la désertification entraîne généralement des sécheresses par une rétroaction positive entre la terre et l'atmosphère causée par un albédo de surface élevé (Charney *et al.*, 1975 ; Chervin, 1979 ; Sud et Fennessy, 1982 ; Sud et Molod, 1988 ; Xue et Shukla, 1993 ; Dirmeyer et Shukla, 1996 ; Knorr *et al.*, 2001). Aussi, des simulations ont montré que la déforestation augmentait l'albédo et refroidissait l'hémisphère nord (Brovkin *et al.*, 2006 ; Govindasamy *et al.*, 2001), tandis que le reboisement dans les zones boréales pourrait diminuer l'albédo de surface et compenser l'absorption potentielle de carbone (Betts, 2000).

De nombreuses études se sont intéressées aux causes des variations d'albédo sur les forêts (Bright *et al.*, 2015), les zones urbaines (Yang *et al.*, 2015), les zones couvertes de neige (Hotaling *et al.*, 2021 ;

Thackeray *et al.*, 2016) et de glace (Hotaling *et al.*, 2021 ; Park *et al.*, 2021). Concernant les agroécosystèmes, la plupart des études se sont focalisées sur l'albédo des cultures (par exemple Mira *et al.*, 2015) notamment dans un contexte de développement des biocarburants tels que le maïs, le switch Grass ou le miscanthus (Cai *et al.*, 2016). L'effet des dynamiques d'a et des changements d'occupation du sol sur le climat a donc été bien étudié pour les forêts (par exemple, Bonan *et al.*, 2008) et les cultures (par exemple, Carrer *et al.*, 2018), mais peu d'études ont été menées sur les prairies (par exemple, Yang *et al.*, 2019).

Ainsi il y a un manque de connaissances concernant les déterminants des variations d'albédo de surface pour les prairies, mais aussi pour d'autres écosystèmes, permettant une compréhension globale de l'effet de l'albédo de surface sur le climat (Zhang *et al.*, 2022) et potentiellement d'identifier des leviers d'atténuation *via* une meilleure gestion de ses dynamiques pour les écosystèmes anthropisés. La littérature indique aussi qu'une attention particulière devrait être accordée à la rétroaction climatique induite par l'albédo de surface dans un contexte de changement climatique (Hotaling *et al.*, 2021 ; Divine *et al.*, 2015), ainsi qu'aux stratégies correspondantes en matière de gestion de l'albédo pour agir sur l'atténuation du changement climatique (Cotana *et al.*, 2014 ; Thackeray *et al.*, 2019). Enfin, ne pas prendre en compte la variabilité saisonnière d'a, liée à la croissance et à la gestion des cultures ou des prairies, comme cela a été fait dans les précédents rapports du GIEC, conduit à de fortes sur ou sous-estimations des effets radiatifs liés aux variations d'albédo de surface (Bright *et al.*, 2015) qui explique en partie pourquoi la gestion de l'albédo de surface dans une optique d'atténuation des CC a été peu

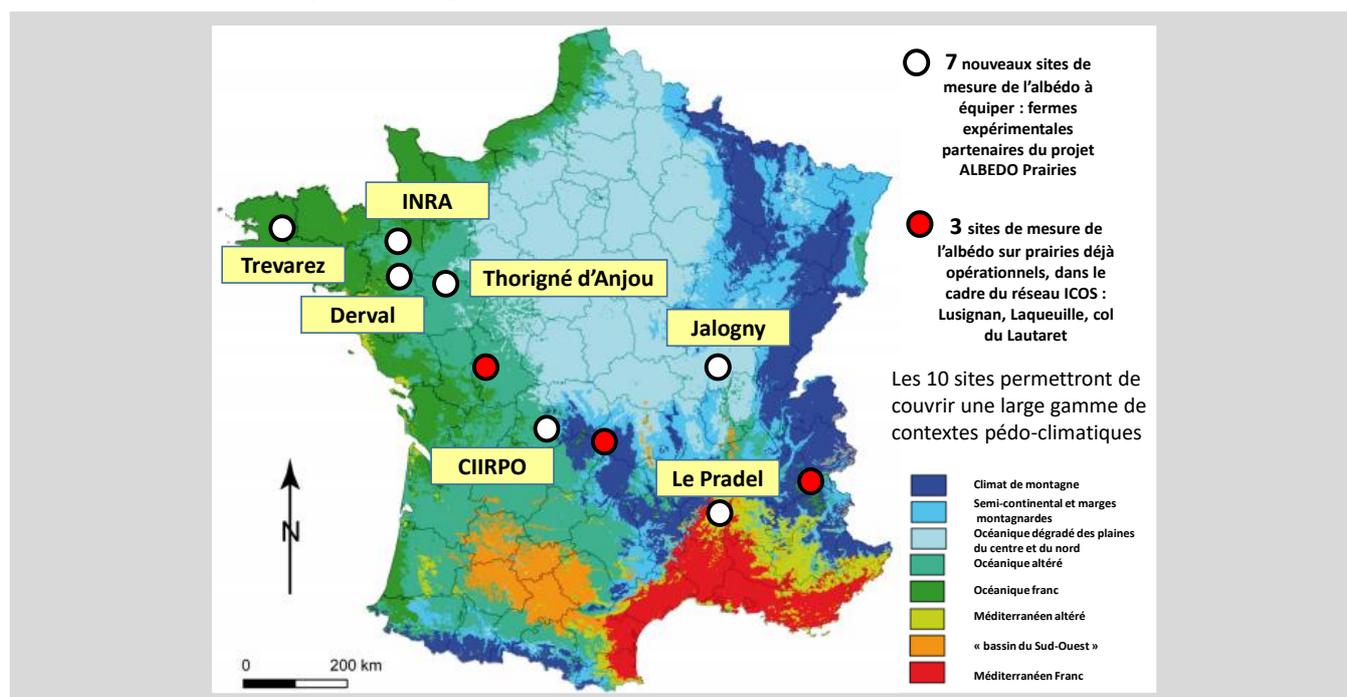


FIGURE 1 : Localisation des 7 stations expérimentales (cercle blanc) et contexte climatique  
Figure 1 : Location of the 7 experimental stations (white circle) and climate context

Site	Trévarez	Rheu	Derval	Thorigné	Mourier*	Jalogny	Pradel
Prairie:	Temporaire			Permanente			
Système	Bovin lait			Bovin allaitant	Ovin viande	Bovin allaitant	Caprin lait
Climat	Océanique			Océanique altéré		Semi continental	Meso méditerranéen
Précipitations (mm)	1280	823	724	722	928	870	840
Type de sol	Limono argileux	Limoneux	Limono sableux	Argileux de plaine alluviale	Argileux de plaine alluviale	Limono sableux	Argileux, avec cailloux
Rendement herbe (tMS/ha)	10-12	8-10	6-7	4-5	4-5	4-5	4-5

TABLEAU 1 : Principales caractéristiques de chaque site expérimental, \*climat avec des influences de montagne, mm = millimètres d'eau de pluie, tMS = tonnes de matière sèche.

Table 1 : Main characteristics of each experimental site, \*climate with mountain influences, mm = millimeters of rainfall, tMS = tons of dry matter.

considérée jusqu'à présent. A cela, il faut rajouter le fait que l'a dépend de la distribution du rayonnement solaire selon la part de rayonnement direct vis-à-vis de l'indirect, cette dernière étant augmentée par une atmosphère chargée en particules.

## 1. Matériels et méthodes

### 1.1. Acquisition de données originales de dynamiques d'albédo

Depuis juillet 2020, dans le cadre du projet Albédo-prairies, porté par l'institut de l'élevage en partenariat avec le CESBIO, l'INRAE, l'AFPF et 6 fermes expérimentales, l'albédo de prairies permanentes ou temporaires est mesuré en continu dans 7 stations expérimentales ayant une gestion des prairies et des pédoclimats contrastés (Figure 1, Tableau 1). Les stations de mesures (Figure 2) sont constituées d'une centrale d'acquisition Campbell, d'un albedomètre (NR01, Hukseflux), d'un thermo-hygromètre (HygroVUE) et de trois sondes de mesure d'humidité du sol intégrant



FIGURE 2 : Un albedomètre, ferme expérimentale de Derval (44).

Figure 2 : An albedometer, experimental farm of Derval (44).

la mesure entre 0 et 5 cm (CS 655, Campbell). Les mesures, réalisées chaque seconde, sont intégrées sur 10 minutes et permettent de calculer un albédo moyen journalier pondéré par les mesures de rayonnement solaire incident. Les stations de mesures ont été installées en juillet et août 2020.

Les données mobilisées pour cet article concernent la période du 01/08/20 au 30/09/21. Elles permettent de disposer de dynamiques d'albédo qui incluent la sécheresse de 2020 et d'événements de fauche et pâture d'intérêts en septembre 2021. Les mesures se poursuivront jusqu'en 2023. Cette valorisation d'un jeu de données original permet de proposer une méthode d'évaluation de l'effet d'événements sur l'albédo d'une prairie. Il s'agit d'événements météorologiques (la pluie après une période sèche, le givre, la neige, ...) et de pratiques agricoles (le pâturage, la fauche, la fauche de refus, les apports d'engrais).

### 1.2. Caractérisation des facteurs de variation de l'albédo d'une prairie

Les dynamiques d'albédo des prairies, dont l'herbe est consommée par les ruminants, ont été peu étudiées. Il y a donc un intérêt méthodologique sur la manière de quantifier les variations d'a à la suite d'un événement. Nous faisons ici une première proposition de méthode de calcul. Nous distinguons 2 types d'événements. D'abord ceux dont l'effet est transitoire et induit une forte variabilité journalière : il s'agit essentiellement de la formation de givre à l'automne et en hiver ou d'épisodes neigeux. Le second type d'événement a un effet qui peut durer plusieurs jours (au moins 2) : il s'agit de la fauche d'herbe, la fauche de refus, le pâturage, dont les dates sont collectées dans les fermes expérimentales. A cela s'ajoute l'humectation du sol après des précipitations, qui se manifeste par des variations conséquentes de teneur en eau du sol relevées par les sondes de chaque station de mesure.

Les changements d'albédo entre 2 journées sont calculés sur la base de la valeur absolue de sa hausse

ou de sa baisse. Deux périodes de 3 mois au cours de l'année sont analysées plus spécifiquement : une période à cheval sur le printemps et l'été caractérisée par des jours longs (du 5/5 au 5/8) et une période à cheval sur l'automne et l'hiver caractérisée par des jours courts (du 5/11 au 5/2). Les variations d'albédo ( $\Delta\alpha$ ) observées sont surtout des chutes d'importance variable.

Concernant un évènement de fauche, de pâture et d'humectation du sol, ces variations ont été calculées comme la différence d' $\alpha$  entre un état de référence ( $\alpha_{Ref}$ , c'est-à-dire pendant une période de 5 jours avant l'évènement) et l' $\alpha$  moyen ( $\alpha_{moyen}$ ) mesuré pendant toute la période ( $p$ ) suivant l'évènement. La période  $p$  se prolonge, soit jusqu'à la date où l' $\alpha$  revient à  $\pm 2.5\%$  (seuil empirique) de l' $\alpha_{Ref}$ , soit, si un pâturage ou une fauche a eu lieu avant la fin de la récupération attendue de l' $\alpha_{moyen}$  au niveau d' $\alpha_{Ref}$  (voir Figure 3). Par conséquent, le changement d' $\alpha$  moyen ( $\Delta\alpha$ ) par rapport à  $\alpha_{Ref}$  a été calculé selon l'équation suivante :

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

Pendant la période ( $p$ ), le cumul des variations d' $\alpha$  ( $\sum\Delta\alpha$ ) est calculé en plus de l' $\alpha_{moyen}$ . Il correspond à « un manque à gagner » d' $\alpha$  qui sera ultérieurement traduit en forçage radiatif.

La fauche et le pâturage sont des prélèvements d'herbe qui modifient la structure de la surface et donc l'albédo. Si une fauche est un évènement unique et simple à caractériser, le pâturage a une durée plus ou moins longue et son intensité est variable selon le chargement instantané (nombre d'UGB/ha/jour où UGB = Unités Gros Bétail). Celui-ci dépend aussi de la manière de pâturer, qui peut être du pâturage libre en continu avec une durée plus ou moins longue, ou en petits paddocks (rotatifs) délimités permettant de contrôler la durée de présence des animaux. Les vaches

et chèvres laitières ne sont pas toujours en permanence sur la parcelle puisqu'elles vont à la traite, tandis que les vaches allaitantes et ovins viande restent plus souvent 100 % du temps au champ.

La quantité d'herbe prélevée par les animaux dépend aussi de la part d'herbe dans leur ration : 100 % si le pâturage est permanent et sans affouragement, à moins de 100 % s'il y a consommation d'ensilage, par exemple.

Le chargement instantané a donc été corrigé par la part d'herbe dans la ration (données fournies par les fermes expérimentales), ce qui permet d'approcher une quantité d'herbe réellement prélevée sur la parcelle. Cette « pression de pâturage », présente des limites de précision sur la quantité d'herbe réellement consommée par les animaux et du temps de présence dans la parcelle qui n'est pas chronométré.

Toutefois, en l'absence de mesure d'herbe systématique en début et fin de pâturage, qui apporterait une certaine précision sur la quantité d'herbe prélevée, nous utiliserons en première approche cet indicateur -imparfait-, que nous corrèlerons à  $\Delta\alpha$  et à  $\sum\Delta\alpha$ , observés après à un pâturage.

Nous proposons dans la suite de cet article d'illustrer les variations d'albédo par des exemples issus de plusieurs fermes : le site du Mourier présente des similitudes de dynamiques avec ceux de Derval, Rheu, Thorigné et Pradel (présence d'épisodes de givre, périodes sèches, pâturages, ... ), le site de Trévarez se caractérise par peu de périodes sèches en raison de la pluviométrie plus régulière dans le Finistère, tandis que la parcelle de Jalogny se situe dans le lit majeur d'un cours d'eau et peut présenter des périodes de saturation en eau du sol.

### 1.3. Calcul de l'énergie réfléchié par la prairie par effet albédo

L'albédo est la fraction de lumière incidente qui est réfléchié par une surface. Sous nos latitudes, la quantité de lumière reçue est variable selon le moment de l'année : elle est maximale au solstice d'été avec des journées longues d'environ 16 heures et un soleil au plus haut au zénith. A l'inverse, lors du solstice d'hiver les journées sont courtes avec environ 8 heures d'ensoleillement. La quantité de lumière reçue par une surface est alors environ 5 fois plus importante lors du solstice d'été par rapport au solstice d'hiver (Figure 4). L'énergie réfléchié par la surface varie alors en conséquence, et dépend en plus de la nébulosité quotidienne.

L'énergie réfléchié ( $SW_{Ri}$ ) par une surface est l'énergie incidente du jour  $i$  ( $SW_{INi}$ ) multipliée par l'albédo, et s'exprime en watt par mètre carré ( $W/m^2$ ), selon l'équation suivante :

$$SW_{Ri} = \alpha SW_{INi}$$

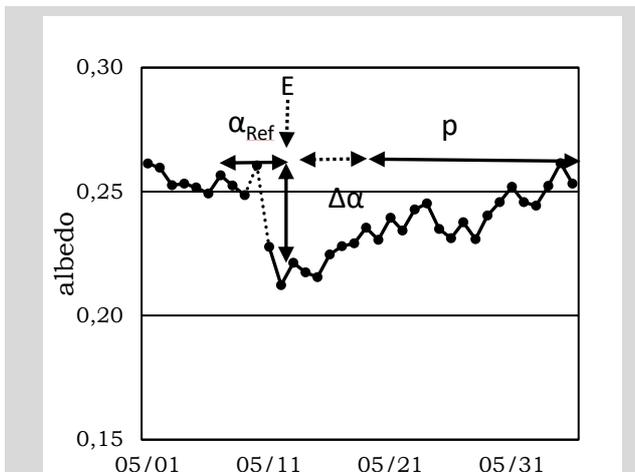


FIGURE 3 : Estimation d'une variation d' $\alpha$ , à la suite d'un évènement (E).  
Figure 3 : Estimation of a variation of  $\alpha$ , following an event (E).

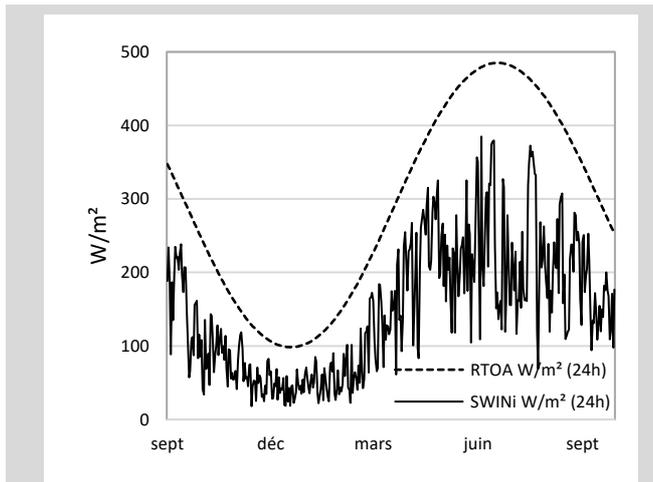


FIGURE 4 : Estimation d'une variation d' $\alpha$ , à la suite d'un évènement (E).

Figure 4 : Estimation of a variation of  $\alpha$ , following an event (E).

Calculée pour chacune des fermes expérimentales, elle sert à estimer la réduction du forçage radiatif de la prairie par rapport à une référence. Le calcul se fait d'abord sur la base d'une moyenne annuelle, afin de réaliser une première comparaison des 7 sites de mesure, puis est comparé à l'écart de forçage radiatif entre les jours longs (été) par rapport aux jours plus courts (hiver).

Les effets des modifications d'albédo sur le climat s'estiment *via* le calcul du forçage radiatif (FR) associé. Ce calcul nécessite de fixer un albédo de référence. Ici, comme il a été fait par Munoz *et al.*, 2010 et Ceschia *et al.*, 2017, l'albédo de référence correspond à un albédo de sol nu (ici =  $\alpha_{\text{sol nu}} = 0.15$ ) et selon l'équation suivante :

$$FR_i = SW_{IN_i} \times Ta_i \times \Delta_i$$

Où  $SW_{IN_i}$  est le rayonnement solaire incident journalier mesuré à la surface de la parcelle (en  $W/m^2$ ),  $Ta_i$  est la transmittance atmosphérique moyenne journalière et  $\Delta_i$  est la différence d'albédo entre la prairie et le sol nu, également au jour  $i$  : ( $\alpha_{\text{prairie}} - \alpha_{\text{ref}}$ ). La transmittance atmosphérique est parfois supposée constante (Muñoz *et al.*, 2010), mais comme les couverts sont implantés sur des périodes durant lesquelles la transmittance peut être très variable, il est préférable de la calculer à l'échelle journalière comme suit :

$$Ta_i = \frac{SW_{IN_i}}{R_{TOA_i}}$$

Où  $R_{TOA_i}$  est le rayonnement solaire journalier au sommet de l'atmosphère, calculé au jour  $i$  selon le modèle de transfert radiatif Fu-Liou (Schimel *et al.*, 1995). Idéalement, c'est une transmittance pour les rayonnements remontants qu'il faudrait utiliser et non

pas une transmittance descendante comme c'est le cas ici (Ferlicq, 2016). En effet, la transmittance remontante tient compte du rayonnement piégé par l'atmosphère et correspond mieux au rayonnement qui retourne dans l'espace.

Il n'existe cependant pas de méthode facile à mettre en œuvre pour l'estimer de manière dynamique, et le modèle Fu-Liou peut mener à une sous-estimation du forçage radiatif (Ceschia *et al.*, 2017). Des simulations réalisées avec le modèle DART ont montré que la transmittance remontante est jusqu'à 3.5 fois plus faible que la transmittance descendante en condition de ciel clair et que, globalement, la transmittance remontante est beaucoup plus proche de la transmittance calculée en utilisant uniquement le rayonnement incident diffus. En conditions de ciel couvert, les différences entre transmittance descendante (prenant en compte le rayonnement direct et diffus incident) et remontante sont beaucoup plus faibles et de l'ordre de 9 % (Ferlicq, 2016).

#### 1.4. Estimation de l'albédo d'une exploitation agricole : SIM' $\alpha$ , un prototype de modèle

La prairie représente tout ou partie de la SAU d'une exploitation agricole ayant des ruminants. Pour estimer son impact sur l'albédo, une première étude de la dynamique annuelle d'albédo de systèmes d'exploitation ayant une part de cultures et d'herbe variable, a été réalisée grâce à un prototype de calculateur d'albédo, basé sur l'assolement et élaboré à cet effet. La simulation intègre 4 systèmes d'exploitation qui ont été comparés : (1) 100 % d'herbe, (2) 66 % d'herbe et 33 % de cultures, (3) 33 % d'herbe et 66 % de cultures et (4) 100 % de cultures, sans herbe. Dans les systèmes ayant des cultures, les surfaces dédiées concernent du blé (50 %), du colza (25 %) et du maïs (25 %).

Les valeurs d'albédo (tableau 2) utilisées pour les simulations sont issues des albedomètres du réseau Idèle pour les prairies. Les valeurs des cultures sont des données issues de travaux du CESBIO à Lamasquère (Haute-Garonne) et Auradé (Gers). Elles sont disponibles pour le blé, le colza, le maïs, le tournesol, le sol nu, les chaumes, les repousses et la moutarde blanche (culture intermédiaire).

L'analyse portera sur l'effet de l'usage des sols (assolement) et de pratiques (mise en place de culture intermédiaire entre cultures et une combinaison de fauches et de pâturages par les animaux pour les prairies). Par convention, pour le pâturage et la fauche, nous avons retenu respectivement -8 % de baisse d' $\alpha$  pendant 2 décades et -14 % et 3 décades pour la fauche. Les pâturages ont lieu en avril et août, la fauche, en juin. L'échelle de temps retenue pour modéliser est la décade, qui permet de limiter les variations inter-journalières d' $\alpha$  et rend la lecture des dynamiques d' $\alpha$  plus facile.

décade	1/1	10/1	20/1	1/2	10/2	20/2	1/3	10/3	20/3	1/4	10/4	20/4	1/5	10/5	20/5	1/6	10/6	20/6
Sol nu	0.120	0.113	0.112	0.117	0.117	0.123	0.129	0.129	0.128	0.121	0.132	0.138	0.143	0.143	0.147	0.153	0.155	0.156
Moutarde																		
Blé	0.162	0.142	0.150	0.158	0.164	0.169	0.172	0.174	0.178	0.185	0.193	0.200	0.200	0.200	0.190	0.181	0.172	0.167
Colza	0.158	0.147	0.170	0.166	0.162	0.168	0.173	0.179	0.184	0.190	0.217	0.244	0.226	0.204	0.191	0.183	0.162	0.159
Maïs											0.132	0.138	0.142	0.146	0.150	0.146	0.141	0.157
Prairie	0.268	0.252	0.255	0.257	0.260	0.262	0.265	0.257	0.261	0.260	0.258	0.260	0.248	0.242	0.244	0.243	0.231	0.229

décade	1/7	10/7	20/7	1/8	10/8	20/8	1/9	10/9	20/9	1/10	10/10	20/10	1/11	10/11	20/11	1/12	10/12	20/12
Sol nu	0.158	0.160	0.158	0.155	0.157	0.162	0.160	0.167	0.160	0.160	0.147	0.143	0.134	0.125	0.123	0.128	0.134	0.120
Moutarde								0.16	0.175	0.195	0.205	0.215	0.205	0.2	0.195	0.155		
Blé	0.161	0.156	0.156	0.156							0.147	0.143	0.161	0.146	0.134	0.153	0.159	0.164
Colza	0.156	0.156			0.157	0.162	0.168	0.170	0.177	0.185	0.192	0.190	0.188	0.186	0.184	0.177	0.169	0.181
Maïs	0.168	0.170	0.174	0.176	0.181	0.182	0.186	0.180	0.174	0.168	0.168	0.168						
Prairie	0.229	0.228	0.224	0.216	0.215	0.230	0.235	0.222	0.224	0.240	0.244	0.250	0.254	0.248	0.271	0.262	0.260	0.257

TABLEAU 2 : Valeurs d'albédo utilisées pour les simulations à l'échelle de l'exploitation, par type d'occupation du sol dans une d'exploitation agricole et par décade (exemple : 1/1 = décade du 1/1 au 9/1, 10/1 = du 10 au 19/1 et 20/1 = du 20/1 à la fin du mois)

Table 2 : Albedo values used for farm-scale simulations, by land use type on a farm and by decade (example: 1/1 = decade from 1/1 to 9/1, 10/1 = from 10 to 19/1 and 20/1 = from 20/1 to the end of the month)

## 2. Résultats

### 2.1. Des dynamiques d'albédo contrastées selon le contexte pédoclimatique : effet de la météo

Pour 5 des 7 sites expérimentaux [sites du Rheu, Derval, Thorigné, Pradel et Mourier (figures 5)], les dynamiques d' $\alpha$  présentent des similitudes, avec une augmentation entre la fin de l'été et l'hiver avec une plus forte variabilité inter-journalière en hiver. L' $\alpha_{\text{moyen}}$  journalier diminue ensuite au printemps jusqu'en été.

Sur le site de Trévarez dans le Finistère (figure 6), l' $\alpha$  est relativement régulier tout au long de l'année, il y a moins de périodes avec des températures négatives où du givre se forme et une pluviométrie régulière La ferme

de Jalogny (figure 8) a pour particularité un  $\alpha_{\text{moyen}}$  légèrement plus faible en hiver ( $\alpha=0.204$ ) qu'en été ( $\alpha=0.212$ , +3.9 %). La parcelle expérimentale étant dans le lit majeur d'un cours d'eau (la Grosne), elle est souvent saturée en eau en hiver, ce qui assombrit la surface.

Pour l'ensemble des sites, la variabilité inter-journalière d' $\alpha$  est plus élevée sur la période automne/hiver (tableau 3) que sur la période printemps/été. Cette variabilité est cependant moins forte en automne/hiver sur le site de Trévarez avec  $\Delta\alpha=0.0095$ , contre  $\Delta\alpha>0.19$  pour les 6 autres sites. Cela s'explique par l'absence de pâturage et de fauche susceptibles de modifier l'albédo à Trévarez durant cette saison.

En période hivernale, les températures et aussi l'humidité relative influencent les dynamiques d'albédo notamment *via* la formation de givre. Cette augmentation est exacerbée en cas de neige, qui a

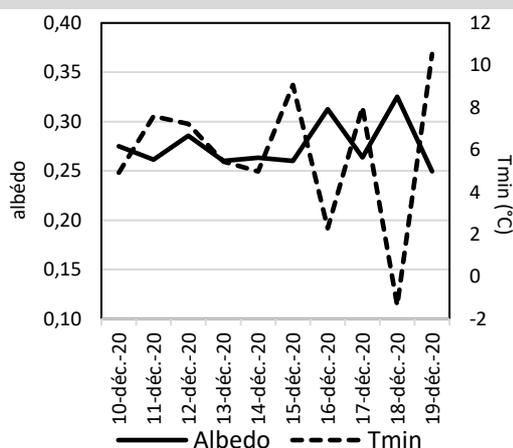


FIGURE 5 : Dynamiques d'albédo journalier sur le site du Mourier, avec des températures minimales quotidiennes de l'air (Tmin)

Figure 5 : Daily albedo dynamics at the Mourier site, with daily minimum air temperature (Tmin)

	Moyenne de $\Delta\alpha$ (J0-1) période automne/hiver (1)	Moyenne de $\Delta\alpha$ (J0-1) période printemps/été (2)	(1)/(2)
Trévarez	0.0095	0.0062	1.5
Le Rheu	0.0261	0.0078	3.4
Derval	0.029	0.0051	5.7
Thorigné	0.0273	0.0063	4.4
Mourier	0.0197	0.0057	3.5
Jalogny	0.0195	0.0081	2.4
Pradel	0.0286	0.0051	5.6
<b>Moyenne</b>	<b>0.0228</b>	<b>0.0063</b>	<b>3.8</b>

TABLEAU 3 : Moyenne de la variabilité d'albédo inter-journalière, par saison et rapport entre saison pour les 7 sites expérimentaux. (J0-1 = écart entre une journée et la journée précédente).

Table 3 : Average inter-day albedo variability, by season and ratio between seasons for the 7 experimental sites. (D0-1 = difference between one day and the previous day).

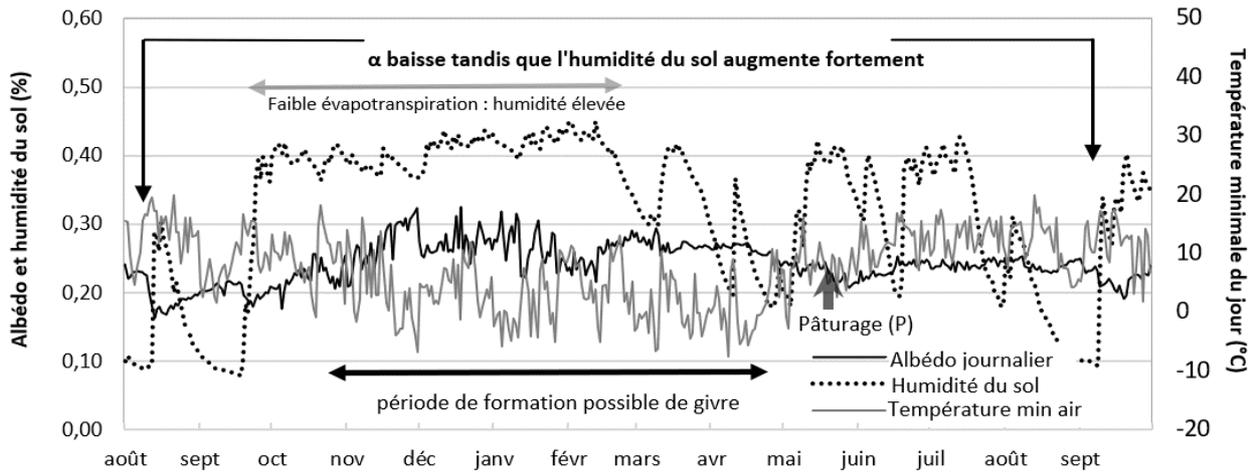


FIGURE 6 : Dynamique d'albédo et d'humidité du sol et des températures minimales sur le site du Mourier. (min = minimale).  
 Figure 6 : Dynamics of albedo and soil moisture and minimum temperatures at the Mourier site. (min = minimum).

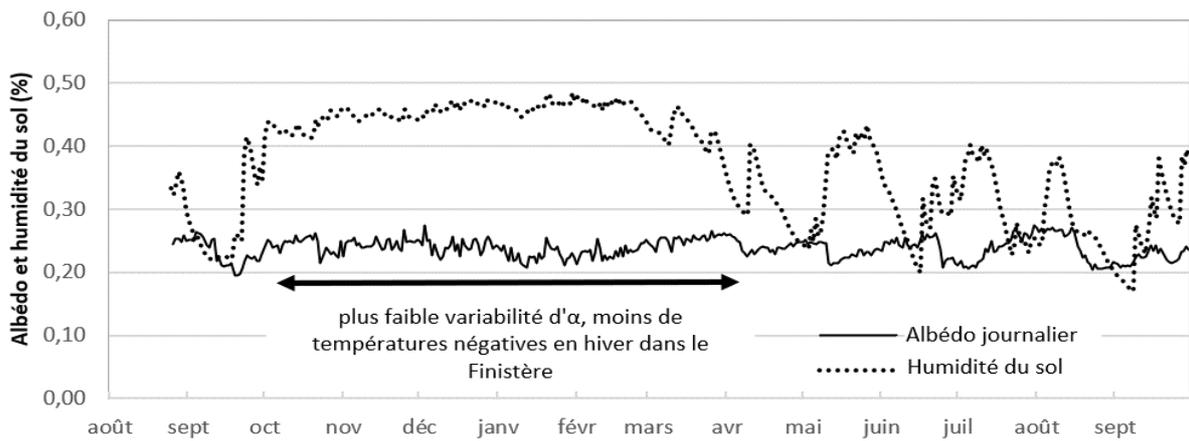


FIGURE 7 : Albédo moyen quotidien et d'humidité du sol sur le site de Trévarez.  
 Figure 7 : Average daily albedo and soil moisture at the Trévarez site.

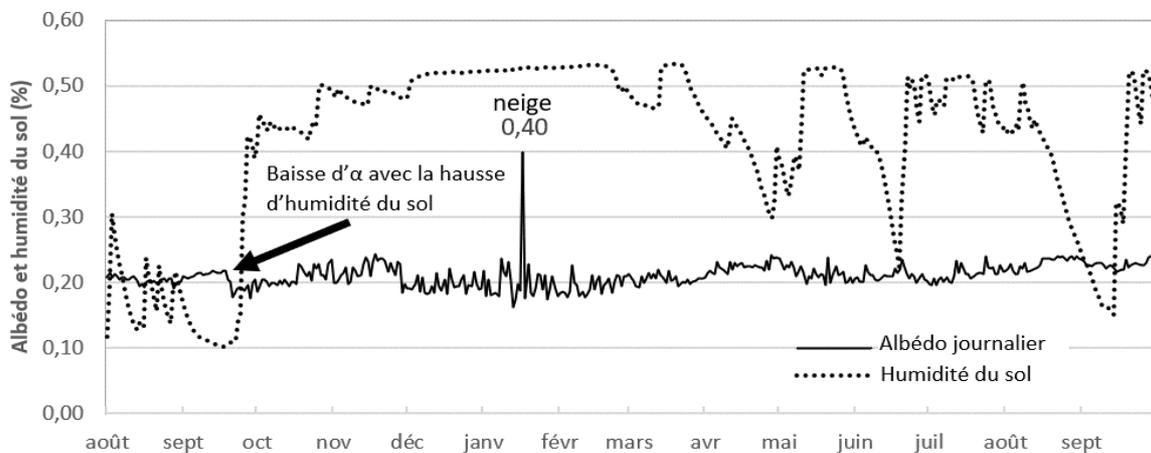
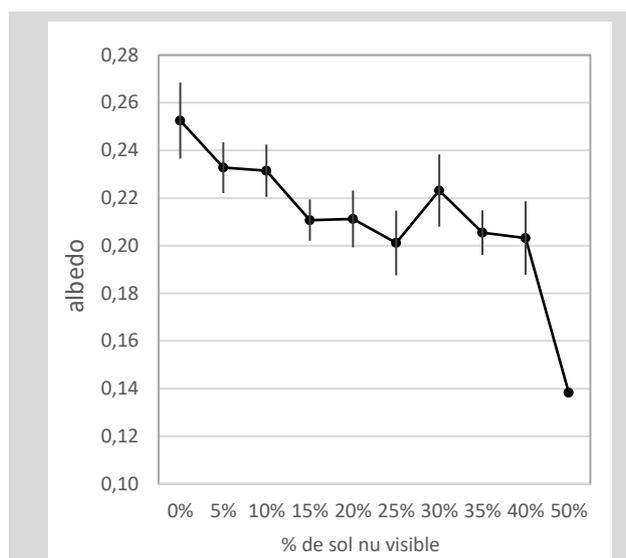


FIGURE 8 : Albédo moyen quotidien et d'humidité du sol sur le site de Jalogny.  
 Figure 8 : Average daily albedo and soil moisture at the Jalogny site.

persisté pendant la journée (figure 8, pic d' $\alpha$  à 0.4 en janvier). Le givre étant clair, il accroît l'albédo de surface [voir encadré 1]. L'observation des courbes de température minimales diurnes ( $T_{min}$  - figure 9) montre que lorsqu'elles baissent autour de 0°C durant 2 journées consécutives, l'albédo augmente.

Au niveau météorologique, les mesures effectuées en 2020-21 ont permis d'enregistrer 30 événements d'humidification importante du sol par la pluie après des périodes avec peu de précipitations. 9 ont eu lieu entre Avril et Juin où les sols peuvent encore bénéficier de l'humidité hivernale, et 21 de Juillet à Septembre. D'Octobre à Mars, le contenu en eau du sol reste à des niveaux élevés pour l'ensemble des sites expérimentaux. Il devient plus variable en été à la faveur d'une évapotranspiration généralement plus élevée (figures 6, 7 et 8). Quand la pluie survient après une période sans précipitations, l' $\alpha$  diminue en moyenne de 7 %, pendant 10.5 jours ( $\pm 8$ ) (voir Tableau 4, figure 8). La diminution d' $\alpha$  la plus faible suivant une pluie a lieu au Rheu (-1.3 %) en avril 2021 pendant 5 jours et la plus importante à Thorigné (-37 %) pendant 19 jours en août 2020. Ainsi, le cumul moyen de baisse quotidienne d'albédo, qui correspond au déficit d'albédo entre le début de l'évènement (pluie) et sa fin (retour de l'albédo à sa valeur d'origine), était de -116 %. Cet effet est plus fort lorsque le sol est peu couvert par la végétation et globalement l'albédo de surface décroît avec la proportion de sol visible à la surface (figure 9).

Cette baisse d'albédo de surface s'explique par un  $\alpha$  du sol nu inférieur à celui de la végétation sur nos sites. Aussi, l'albédo du sol étant plus impacté par les pluies que celui de la végétation, l'albédo de surface décroît d'autant plus que le sol est davantage visible. Par conséquent, des prairies dégradées qui laissent le sol visible pourraient provoquer une diminution d'albédo résultant en un " effet de réchauffement ", par



**FIGURE 9 : Valeur moyenne (et écart-type) d'albédo du sol des fermes expérimentales, selon la proportion de sol nu visible**

*Figure 9 : Average soil albedo value (and standard deviation) of the experimental farms, according to the proportion of visible bare soil*

accroissement du forçage radiatif, probablement renforcé par une diminution de l'évapotranspiration et une augmentation des flux de chaleur sensible (Bright *et al.*, 2017).

D'autres facteurs affectent les dynamiques d'albédo : les événements météorologiques (alternance de périodes sèches ou humides entre le printemps et l'automne) et les pratiques de gestion (pâturation, fauche, fauche de refus, fertilisation/amendements).

Ferme expérimentale :	Trévarez	Rheu*	Derval	Thorigné	Mourier	Jalogny	Pradel
$\alpha$ moyen	0.241	0.215	0.236	0.223	0.241	0.216	0.225
$\pm$ écart-type	$\pm 0.03$	$\pm 0.01$	$\pm 0.05$	$\pm 0.07$	$\pm 0.06$	$\pm 0.04$	$\pm 0.06$
Pâturage (n)/durée (jours (j))	(5)/3.8	(6)/6.7	(9)/5.9	(5)/6	(5)/4.4	(4)/15	(4)/4.8
Chargement UGB/ha/j	43.1	36.6	31.9	8.3	23.1	3.3	3.6
Pression de pâturage**	27.2	20	12.5	8.3	22.3	3.3	2.5
Baisse moyenne $\alpha$	-7.0%	-2.1%	-3.1%	-5.3%	-6.4%	-1.5%	-1.4%
Baisse cumulée $\alpha$	-176%	-26%	-58%	-97%	-121%	-26%	-5%
Durée de baisse d' $\alpha$ (j)	23.2	10.8	13.4	17.2	17.4	14.5	6
Fauche (F)/ F refus (FRE)) (n)	F (2)	F (1)	FRE (1)	FRE (1)	FRE (1)	/	FRE (3)
Baisse moyenne $\alpha$	-13.8%	-16.3%	-7.5%	-0.8%	-3.1%		-3.1%
Baisse cumulée $\alpha$	-428%	-440%	-45%	-1.8%	-12.4%		-13.6%
Durée de baisse d' $\alpha$ (j)	31	27	6	2	4		3
Humectation du sol (n)	Pas de données	(7)	(5)	(3)	(4)	Souvent sous l'eau	(11)
Baisse moyenne $\alpha$		-6.4%	-0.7%	-18.2%	-9.5%		-5.9%
Baisse cumulée $\alpha$		-116%	-8%	-134%	-155%		-280%
Durée de baisse d' $\alpha$ (j)		7.6	6.6	11.3	10.5		13.9

**TABLEAU 4 : Effets du pâturage, de la fauche et de l'humectation du sol par la pluie sur l'albédo de surface des prairies suivies dans le cadre de cette étude.** (n) = nombre d'évènements (fauche, pâturation, etc.)

*Table 4 : Effects of grazing, mowing, and soil wetting by rain on surface albedo of grasslands monitored in this study.* (n) = number of events (mowing, grazing, etc.)

En hiver, si on prend par exemple une humidité relative de 80 % et une température de 3°C, alors le point de rosée (que l'on peut estimer grâce à des abaques) est de -0.1°C sur la surface (herbe). En jours longs, si on prend une humidité relative de 80 % et une température de 15°C, alors le point de rosée est de 11.6°C sur la surface. En hiver, le manque de rayonnement incident limite le réchauffement du sol et des surfaces végétales, qui perdent leur chaleur par rayonnement infra-rouge ce qui leur permet d'atteindre des valeurs négatives. La probabilité que la surface du sol et des feuilles de l'herbe soit inférieure ou égale à 0°C étant plus importante en hiver qu'en été, il peut y avoir une formation de givre, entraînant un niveau d'albédo plus élevé une partie de la journée. Cependant, le flux solaire moins significatif à cette période de l'année, limite l'importance de ce phénomène.

#### ENCADRE 1 : Le point de rosée et le givre

Box 1: *Dew point and frost*

## 2.2. Les dynamiques d'albédo sont modifiées par les pratiques de gestion des prairies

Au niveau des pratiques agricoles, la période de mesure est concernée par 37 événements de pâturage, 3 fauches pour produire du foin ou de l'enrubannage et 6 fauches de refus.

Le pâturage a un effet variable sur l'albédo de surface (tableau 4 en fonction des sites. En moyenne, une baisse d' $\alpha$  de -4 % ( $\alpha = \pm 0,008$ ) était observée durant 15 $\pm$ 9 jours à la suite d'un pâturage. Dans 6 cas sur 37, il n'y a pas eu de diminution observée mais plutôt une légère augmentation ( $\Delta\alpha = +2\%$ , soit  $\sum\Delta\alpha = +13\%$  pendant 10 jours). Cela correspond dans 5 cas sur 6 à un chargement en bétail faible (en moyenne 3 UGB/ha/j).

À l'inverse, pour les 6 situations où le déficit cumulé d'albédo,  $\sum\Delta\alpha$ , était le plus élevé (-225 %, soit un  $\Delta\alpha = -8\%$  durant 28 jours), un chargement moyen instantané corrigé de 29 UGB/ha/j était observé.

La plus faible diminution moyenne d'albédo a été observée à la ferme de Jalogny (-1,5 %,  $\alpha = \pm 0,003$  durant 11 jours) et elle correspondait au taux de chargement journalier instantané le plus faible observé (3,3 UGB/jour). La plus forte diminution d' $\alpha$  a été observée à Trévarez (-7 %,  $\alpha = -0,017$ ), correspondant à un temps de pâturage court (3,8 jours) mais avec un taux de chargement parmi les plus élevés (43,1 UGB/jour) (Tableau 4).

Même si le nombre d'événements de pâture observés est encore trop faible pour en tirer des conclusions définitives, il apparaît que les effets du

pâturage ne seraient pas négligeables en termes de forçage radiatif. En effet, Carrer et al., (2018) ont simulé une augmentation de l'albédo de surface égale à 0,002, à la suite de l'introduction de cultures de couverture pendant 3 mois, sur 4,5 % des terres arables en Europe (UE-28), ce qui a conduit à un effet de refroidissement équivalent à 2,92 MtCO<sub>2</sub>-eq.an<sup>-1</sup>. Si nos résultats montrent une faible corrélation entre la diminution moyenne de l'albédo et le taux de chargement instantané en UGB/ha/jour ( $R^2=0.14$ ), la prise en compte cumulée  $\sum\Delta\alpha$  améliore cette corrélation ( $R^2=0.24$ ).

Les résultats sont encore plus significatifs avec  $R^2=0,37$  (figure 10) lorsqu'on considère  $\sum\Delta\alpha$  et le taux de chargement journalier pondéré par le % d'herbe consommée dans la ration de l'animal pendant la période de pâturage (appelé « pression de pâturage » dans le tableau 4, exprimé en UGB eq/ha/jour). Il s'agit toutefois d'une estimation approximative de la quantité d'herbe prélevée sur la parcelle.

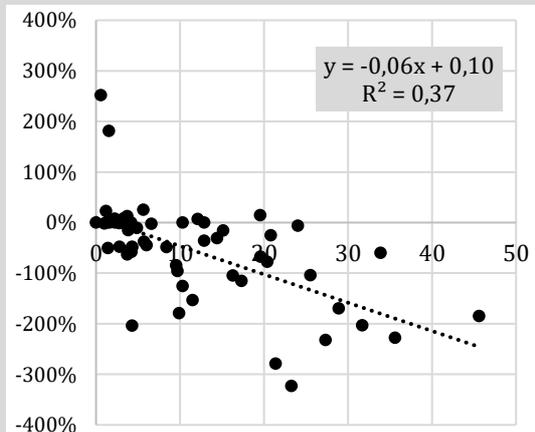


FIGURE 10 : Cumul de baisse d'albédo (en %) en fonction du chargement instantané corrigé de la part d'herbe dans l'alimentation.

Figure 9: *Cumulative albedo decrease (in %) in accordance to the instantaneous load corrected for the proportion of grass in the diet.*

Seuls 3 événements de fauche ont été observés, mais ils avaient un effet important sur les dynamiques d' $\alpha$  (Tableau 4). Deux de ces événements de fauche concernent le site de Trévarez. Sur ce site,  $\alpha$  a diminué en moyenne de 14 % (contre 7 % pour le pâturage) pendant 31 jours (23 pour le pâturage). L'ordre de grandeur est le même au Rheu. Ces résultats suggèrent que la fauche pourrait affecter davantage l' $\alpha$  de surface des prairies par rapport au pâturage, en raison de l'enlèvement rapide d'une grande quantité d'herbe d'une part, alors que celle-ci est retirée progressivement par les animaux sur plusieurs jours.

En revanche, les fauches de refus semblent avoir un effet limité sur l'albédo de surface (Tableau 4). Leur rôle est d'éliminer des plantes envahissantes (chardons par exemple) ou d'avoir un effet prophylactique (en caprins). Les 6 événements répertoriés ont entraîné une

faible diminution d' $\alpha$  en moyenne. La plus faible était de l'ordre de  $-3.5\%$  sur 4 jours (contre  $-3.9\%$  pour le pâturage mais sur 15 jours, générant une baisse cumulée d'albédo de  $-17\%$  contre  $-76\%$  pour la pâture et  $-380\%$  pour la fauche. Des analyses plus poussées seront possibles une fois que l'acquisition de données supplémentaires aura été réalisée. Elles permettront de préciser l'importance de chacune de ces pratiques de gestion des prairies sur la dynamique de l'albédo. La suite des travaux consistera alors à calculer la variation de forçage radiatif induite par la variation d'albédo observée à la suite de ces événements.

### 2.3. Un effet variable des prairies sur le forçage radiatif selon la saison et sa localisation en France

Si estimer les effets environnementaux et des pratiques agricoles sur le forçage radiatif ne permet pas de tirer des conclusions définitives à ce stade du projet Albédo-prairies, nous disposons tout de même de 7 séries de mesures de dynamiques d' $\alpha$  sur 14 mois. Cette quantité importante de données contrastées permet de réaliser une première estimation du forçage radiatif des prairies en comparaison à une situation de référence, définie arbitrairement comme étant un sol nu. Cette première analyse permet surtout de comparer les FR entre les sites et elle sera complétée par les données acquises en 2022 et 2023.

La dynamique annuelle d'albédo de Trévarez, présentée ici à titre d'exemple (Figure 11) montre une dynamique de forçage radiatif variable en fonction des événements de fauche et de pâturage selon la période de l'année. Une certaine symétrie apparaît entre les

variations d'albédo et celles du FR. A chaque événement,  $\alpha$  diminue et en retour le FR qui est négatif, par rapport à un sol nu de référence, augmente tout en restant inférieur à 0. Puis le FR diminue à nouveau à la faveur de l'accroissement de l'albédo lié à la pousse de l'herbe. Une forte variabilité inter-journalière du FR est observée, causée par une variabilité de l'enneigement et donc de la transmittance atmosphérique et du rayonnement solaire incident.

Dans les 7 sites de mesures, le FR reste négatif, à quelques exceptions près. Ainsi sur, le site de Thorigné, le FR a été ponctuellement positif lors de la sécheresse de 2020 ( $+1.5\text{ W/m}^2$  entre le 14 et le 20/08/20), à la suite d'une augmentation de l'humidité du sol faisant suite à un épisode pluvieux et en raison d'une proportion importante de sol visible (environ 50 %) sur cette prairie temporaire ayant connu des difficultés d'implantation. La comparaison du FR moyen annuel entre les 7 sites de mesure montre une gamme de variation allant de  $-7.3\text{ W/m}^2$  (Rheu) à  $-10.2$  (Mourier). Il est fonction du niveau de rayonnement incident de chaque site et des dynamiques d'albédo mesurées. La comparaison du FR entre l'hiver et l'été montre un contraste important pour les 7 sites de mesures (Tableau 5). Il est toujours plus faible (en valeur absolue) en jours courts qu'en jours longs, ce qui est logique car ces périodes sont caractérisées par de faibles rayonnements et des transmittances plus basses qu'en été (le rayonnement incident est en moyenne 4 fois plus élevé en été qu'en hiver). Dans le cas de Trévarez, ces valeurs sont respectivement de  $-2\text{ W/m}^2$  en hiver et de  $-11.9\text{ W/m}^2$  en été.

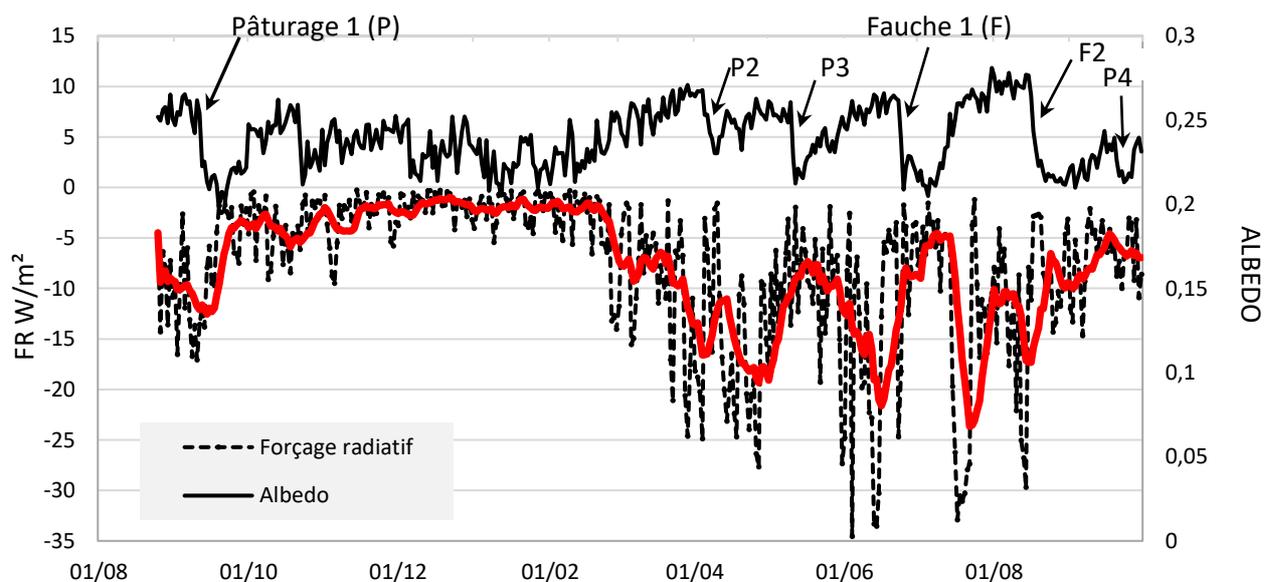


FIGURE 11 : Dynamique d'albédo et forçage radiatif (FR) en référence à un sol nu à Trévarez. Les événements liés à des pratiques (fauche, F, et pâturages, P) sont présentés sur la figure (chronologiquement : Pâturage 1 = du 10 au 12/9/20, P2 = 5 au 8/4/21, P3 = 10 au 12/5/21 et P4 = 19-22/9/21 ; fauche 1 = 23/6/21 et F2 = 17/8/21). La ligne rouge représente la moyenne mobile du FR sur 10 jours.

Figure 11: Albedo dynamics and radiative forcing (RF) with reference to bare soil at Trévarez.

Du 1/8/20 au 30/09/21	Trévarez	Le Rheu	Derval	Thorigné	Mourier	Jalogny	Pradel	
Type d'élevage	BL	BL	BL	BV	OV	BV	CL	Moyenne
<b><math>\alpha</math> moyen annuel</b>	<b>0.238</b>	<b>0.213</b>	<b>0.235</b>	<b>0.222</b>	<b>0.242</b>	<b>0.211</b>	<b>0.222</b>	<b>0.226</b>
Rayonnement incident/24h	150	164	177	166	176	169	190	190
Rayonnement réfléchi (SWINi x $\alpha$ ) W/m <sup>2</sup> /24h	36	35	42	37	43	36	42	43
<b>FR (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>-7.8</b>	<b>-7.3</b>	<b>-9.4</b>	<b>-7.5</b>	<b>-10.2</b>	<b>-7.3</b>	<b>-9.0</b>	<b>-8.4</b>
<b><math>\alpha</math> jours courts (hiver)</b>	<b>0.237</b>	<b>0.209</b>	<b>0.263</b>	<b>0.249</b>	<b>0.27</b>	<b>0.204</b>	<b>0.244</b>	<b>0.239</b>
Rayonnement incident/24h	50	54	56	54	63	54	68	68
Rayonnement réfléchi (SWINi x $\alpha$ ) W/m <sup>2</sup> /24h	12	11	15	13	17	11	17	16
<b>FR (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>-2.0</b>	<b>-2.2</b>	<b>-3.7</b>	<b>-3.0</b>	<b>-4.5</b>	<b>-1.7</b>	<b>-4.5</b>	<b>-3.1</b>
<b><math>\alpha</math> jours longs (été)</b>	<b>0.238</b>	<b>0.208</b>	<b>0.229</b>	<b>0.215</b>	<b>0.235</b>	<b>0.212</b>	<b>0.191</b>	<b>0.218</b>
Rayonnement incident/24h	225	240	248	247	258	250	288	288
Rayonnement réfléchi (SWINi x $\alpha$ ) W/m <sup>2</sup> /24h	54	50	57	53	61	53	55	63
<b>FR (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>-11.9</b>	<b>-9.5</b>	<b>-12.4</b>	<b>-10.4</b>	<b>-13.7</b>	<b>-10.6</b>	<b>-9.1</b>	<b>-11.1</b>

TABLEAU 5 : Forçage radiatif (FR) moyen annuel, hivernal et estival de 7 prairies en référence à un sol nu. BL pour bovin laitier, BV pour bovin viande, OV pour ovin viande, CL pour caprin laitier  
 Table 5: Average annual, winter and summer radiative forcing (RF) of 7 grasslands with reference to bare soil. BL for dairy cattle, BV for beef cattle, OV for beef sheep, CL for dairy goats

En hiver, sur le site de Jalogny, le FR était seulement de - 1.7 W/m<sup>2</sup> en raison d'un albédo faible causé par un sol saturé en eau, tandis que sur les sites du Pradel et du Mourier des FR plus négatifs ont été observés avec des valeurs proches de - 4.5 W/m<sup>2</sup>, en raison d'un  $\alpha$  et d'un rayonnement incident plus élevés.

En été, le FR du site du Pradel était le plus faible (- 9.1 W/m<sup>2</sup>) en raison d'un albédo plus bas (0.191) induit par davantage de sol visible (12 %). A l'inverse, au Mourier des FR plus négatifs ont été observés en été (- 13.8 W/m<sup>2</sup>) grâce à un albédo élevé (0.235) et moins de sol visible (3 %).

## 2.4. Simuler l'albédo d'une exploitation agricole avec SIM' $\alpha$ : les systèmes herbagers bien placés pour atténuer le changement climatique

**Effets de l'assolement :** Les simulations réalisées sur des assolements montrent un gradient décroissant de l'albédo entre les systèmes basés sur 100 % d'herbe et les systèmes basés sur 100 % de cultures et 0 % d'herbe (figure 12). En moyenne annuelle, même si cette comparaison d'albédo doit encore faire l'objet d'une estimation du forçage radiatif, l'écart d'albédo est de 33 % en moins pour les fermes n'ayant que des cultures par rapport aux fermes basés sur 100 % d'herbe.

Cet écart s'explique par les valeurs d'albédo de chaque surface de l'assolement des fermes tout au long de l'année (tableau 2) :

- Un sol nu a un albédo faible dans notre cas : 0.142, en moyenne avec une valeur proche de 0.12 en hiver quand il est le plus humide et légèrement supérieure (0.15) en été quand le sol est plus souvent sec.
- Les cultures ont un albédo variable. Il peut être supérieur à 0.2 en pleine végétation, mais entre le semis et la période de couverture total du sol par la végétation, le sol reste largement visible, cela qui mène à de plus faibles valeurs d'albédo de surface. Il en est de même pour les périodes d'interculture qui ne comportent pas de couvert intermédiaire dans cette simulation. De manière générale, la prairie a un albédo plus élevé car elle couvre mieux le sol et en permanence.

Dans ces simulations, on constate qu'il y a un gradient décroissant tant au niveau de l'albédo moyen que des dynamiques annuelles entre les systèmes 100 % herbagers et ceux qui n'ont que des cultures (figure 12).

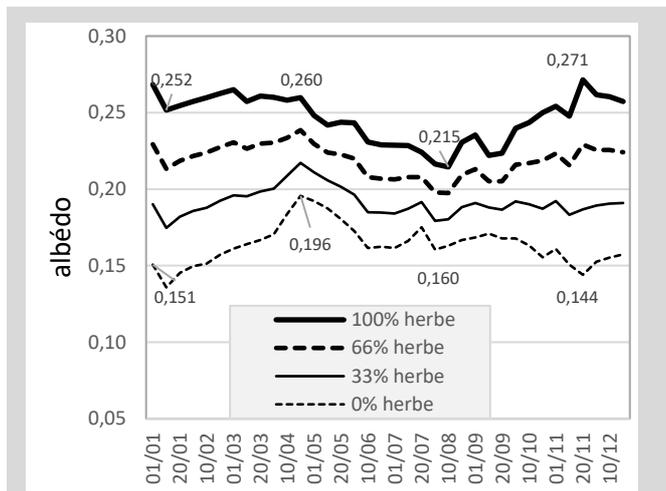


FIGURE 12 : Simulations d'albédo pour différents systèmes d'élevage ; systèmes basés sur un gradient de 100% à 0% d'herbe (100% de cultures) et sol nu  
 Figure 12: Albedo simulations for different livestock systems; systems based on a gradient from 100% to 0% grass (100% crops) and bare soil

En termes de dynamique, les fermes uniquement en herbe ont un albédo maximal en hiver qui se réduit en été en passant de 0.260 à 0.215 avant de remonter à l'automne. Les ferme en 100 % « culture » partent d'un niveau d'albédo plus faible, augmentent jusqu'à 0.196, avant de diminuer progressivement jusqu'à une valeur basse de 0.144 à l'automne, ce qui correspond à une forte proportion de sols quasis nus (tableau 2) entre la récolte et le plein développement végétatif des cultures.

**Effet des pratiques de fauche, de pâture et de mise en place de cultures intermédiaires.** L'effet des fauches et des pâtures sur l'albédo ont été simulées tout au long de la saison : à un premier pâturage en avril succèdent une fauche en juin et une autre pâture en août. Le système 100 % herbe présente ici la baisse la plus forte d'albédo en été (- 6.6 %), mais sa valeur absolue reste supérieure aux autres systèmes ayant moins d'herbe dans la SAU (tableau 6). La mise en place d'une culture intermédiaire dans le système avec 0 % d'herbe permet une hausse d'albédo significative (+ 8 %) à l'automne. Il reste cependant inférieur aux systèmes ayant de l'herbe, y compris celui ayant seulement 33 % d'herbe dans la SAU.

### 3. Discussion

L'albédo des prairies présente une variabilité saisonnière qui dépend des pratiques agricoles et des événements climatiques telles que les précipitations qui surviennent au printemps et en été, particulièrement si le sol est visible. Dans cette étude, les dynamiques d' $\alpha$  présentent des similarités pour 5 sites sur les 7 : il diminue entre l'hiver et l'été, puis remonte pendant l'automne. Au printemps, la baisse est plus précoce dans certains sites (Pradel), probablement en lien avec un ralentissement de la pousse de l'herbe. Les deux sites de Trévarez et de Jalogny ont en revanche des dynamiques moins variables. A Trévarez, le climat océanique doux réduit la variabilité inter journalière d'albédo, y compris en automne-hiver du fait du givre moins fréquent, car ce climat favorise une pousse de l'herbe régulière. A Jalogny, le pâturage quasi continu du printemps à l'automne avec un chargement faible, conduit à une surface d'herbe moins haute et moins

variable (5.7 cm +/- 1.5) que pour les 4 autres sites où nous disposons de cette information (8.4 cm, +/-3.5).

Une première ébauche de hiérarchie des événements ayant un effet sur l'albédo a donc été établie. Par ordre croissant d'impact, il y a la fauche de refus, le pâturage, l'humectation du sol et enfin la fauche pour le foin ou l'enrubannage. Le pâturage a un impact variable en fonction du chargement instantané, pondéré par la part d'herbe dans la ration. La limite de ce classement est qu'il ne repose que sur 14 mois de mesures, mais celles-ci se poursuivront en 2022 et 2023. Ce jeu de données inclut cependant des conditions météorologiques contrastées : 2020, qui a connu une forte sécheresse et 2021, des pluies régulières et des températures plus fraîches.

En comparaison à un sol nu de référence ayant un albédo de 0.15, le forçage radiatif des prairies est négatif (effet refroidissant par rapport à un sol nu). Ce  $FR < 0$  présente une importante variabilité saisonnière liée à la quantité de rayonnement solaire reçue et au niveau d'albédo de chaque site. La fauche et le pâturage réduisent ce forçage radiatif négatif. Par exemple, une fauche à Trévarez (figure 8) engendrait une diminution de FR de - 15/-20 W/m<sup>2</sup> à environ - 5 W/m<sup>2</sup>. La raison la plus probable est que le prélèvement de l'herbe modifie la structure du couvert végétal et laisse apparaître en partie le sol nu, ce qui réduit l'albédo de surface. Seules 2 situations ponctuelles de  $FR > 0$  ont été observées sur les sites de Thorigné (pendant 6 jours, en 2020) et du Pradel (pendant 2 jours en 2021). Ces situations correspondent à des prairies peu productives caractérisées par un sol davantage visible.

L'analyse de l'impact sur le FR des événements (fauche, etc...) survenant sur les parcelles équipées d'un albedomètre doit encore être affinée. A ce stade, la forte variabilité quotidienne du FR est attribuée à la variabilité de la nébulosité. De plus, le FR étant fonction de la quantité de rayonnement incident, la hiérarchisation de l'effet de la fauche et de la pâture sur le FR sera probablement à établir en fonction de la saison : une fauche réduisant fortement l'albédo en juin quand les jours sont les plus longs n'aura pas le même effet si elle est réalisée fin août quand les jours raccourcissent. Une autre limite de notre étude réside

système: pratique agricole:	0% herbe			33% herbe					66% herbe				100% herbe			
	Ref	Ci	Ci-Ref	Ref	Ci	Ci-Ref	f+p	(f+p)-Ref	Ref	Ci	Ci-Ref	f+p	(f+p)-Ref	Ref	f+p	(f+p)-Ref
$\alpha$ annuel exploitation	0.164	0.168	2.3%	0.191	0.194	1.3%	0.190	-0.8%	0.219	0.220	0.6%	0.216	-1.5%	0.246	0.241	-2.0%
$\alpha$ hiver exploitation	0.153	0.153	0%	0.188	0.188	0%	0.188	0%	0.224	0.224	0%	0.224	0%	0.259	0.259	0%
$\alpha$ printemps exploitation	0.179	0.179	0%	0.203	0.203	0%	0.201	-0.7%	0.226	0.226	0%	0.223	-1.3%	0.250	0.245	-1.8%
$\alpha$ été exploitation	0.166	0.169	1.6%	0.186	0.188	0.9%	0.181	-2.6%	0.206	0.207	0.4%	0.196	-4.8%	0.225	0.211	-6.6%
$\alpha$ automne exploitation	0.158	0.170	7.8%	0.189	0.197	4.3%	0.189	0.0%	0.220	0.224	1.9%	0.220	0%	0.250	0.250	0%

Ref = ni cipan, ni fauche, ni pâturage      Ci = culture intermédiaire, f = fauche, p = pâture

**TABEAU 6 :  $\alpha$  de l'assolement selon la pratique (f+p = fauche + 2 pâturages, Ci = culture intermédiaire, moutarde) et la saison (hiver / printemps) . Ref = référence, c'est-à-dire le système de production sans fauche ou culture intermédiaire. fauche et 2 pâturage par parcelle chaque année.**

*Table 6:  $\alpha$  crop rotation by practice (f+p = mowing + 2 grazing, Ci = intermediate crop, mustard) and season (winter/spring) . Ref = reference, i.e. the production system without mowing or intermediate crops. mowing and 2 pastures per plot each year.*

dans le manque de données d'évènements de fauche permettant une compréhension plus fine de l'impact de cette pratique sur le FR.

L'humectation du sol qui réduit l'albédo est un évènement subi, puisqu'on ne maîtrise pas les pluies. Cependant, le maintien d'un couvert herbacé en bon état est un moyen de maintenir un niveau élevé d'a. Cela pourrait déboucher, dans certains cas, à des préconisations de réduction de chargement animal, et remettre en question le mode d'alimentation, le niveau de production d'herbe et/ou la quantité d'animaux sur une exploitation. La prise en compte du potentiel productif de la parcelle selon sa réserve utile et de la capacité de la prairie à reconstituer rapidement un couvert, sont d'autres paramètres dont il faudra probablement tenir compte.

Enfin, pour mieux estimer le FR de chaque prairie, **un travail de caractérisation de l'albédo du sol est à envisager**. En effet une limite de nos calculs est le choix d'un albédo de référence de 0.15, basé sur des mesures en grande culture par le CESBIO, qui n'a pas été mesuré sur les parcelles de références (il faudrait désherber la parcelle). Un travail complémentaire de mesures d'albédo du sol nu est à envisager avec un matériel adapté. Cependant, les références d'albédo du sol disponibles sont, sauf exception (sols sableux ou crayeux) inférieures à 0.20, soit moins que les prairies qui conserveraient alors un FR négatif.

La simulation d'albédo des modèles d'exploitations agricoles avec SIM'a montre que les systèmes les plus herbagés ont un d'albédo plus élevé. C'est grâce aux données de références d'albédo sur blé, colza, maïs et prairies que nous avons pu réaliser ces simulations. Ainsi nous avons pu démontrer que le FR des systèmes les plus herbagés est inférieur à celui des systèmes avec cultures. Nous avons aussi montré *via* les simulations de fauche et de pâturage que ces évènements ont un impact limité sur le niveau d'albédo de l'assolement, comparativement à celui, plus faible, des cultures. Ces dernières peuvent toutefois être améliorées d'un point de vue de l'albédo *via* l'implantation de cultures intermédiaires. Si ce travail de simulation permet d'ores et déjà d'avoir des ordres de grandeur selon les systèmes de production, pour parvenir à être plus représentatif des systèmes agricoles français, **il nous manque toutefois des références concernant la dynamique d'albédo d'autres cultures (de vente ou fourragères)**, de méteils, de dérobées à base de graminées et/ou légumineuses, etc. pour couvrir la diversité des systèmes fourragers métropolitains ; afin de calculer avec plus de précision le forçage radiatif de systèmes de production avec une part variable de cultures de vente et de surfaces fourragères.

Par la suite, des comparaisons de bilan de GES des systèmes d'exploitation auxquelles on additionne l'effet albédo converti en « équivalent carbone », devront être faites entre des systèmes basés à 100 % sur l'herbe et des systèmes où celle-ci est en proportion variable. Mais

d'ores et déjà, on constate qu'en considérant comme référence le sol nu, le FR des prairies de notre étude est plus négatif que celui d'une culture intermédiaire de type CIPAN (- 4 W/m<sup>2</sup> pendant 3 mois). En équivalent carbone, le FR induit par les effets albédo d'une moutarde en culture intermédiaires est de 124 à 720 kgC/ha/an (Ceschia *et al.*, 2017). Cet ordre de grandeur est comparable à l'effet stockage de carbone de 300 kgC/ha/an en milieu tempéré d'une culture intermédiaire rapporté par plusieurs autres études (Justes *et al.*, 2013 ; Poeplau et Don, 2015), ou d'une culture intermédiaire de type légumineuse (236 kgC/ha/an, McDaniel *et al.*, 2014). Si ces résultats sont encourageants quant au potentiel des surfaces végétales agricoles comme moyen d'atténuation du changement climatique *via* les effets albédo (Pellerin *et al.*, 2020), il faut encore pour les prairies établir dans le cadre de notre étude les conversions des W/m<sup>2</sup> de l'énergie réfléchie vers l'espace en kgCO<sub>2</sub>eq/ha/an.

## 4. Conclusion

Le pâturage et la fauche réduisent l'albédo de surface des prairies de manière variable. L'adaptation de l'intensité de certaines pratiques pour maintenir la capacité d'une prairie à couvrir le sol pourrait donc contribuer à atténuer le changement climatique par le maintien d'un niveau élevé d'albédo et de son effet sur le forçage radiatif mais aussi *via* d'autres effets biogéophysiques (par exemple, la diminution des flux de chaleur sensible).

Poursuivre les acquisitions de données d'albédo est cependant nécessaire pour affiner nos conclusions et proposer des adaptations réalistes des modes de gestion des prairies garantissant une production durable mais aussi une plus grande efficacité d'un point de vue atténuation du changement. Ainsi, des comparaisons des effets d'albédo (convertis en eq-CO<sub>2</sub>) avec le potentiel de séquestration du carbone et les émissions de GES de différents systèmes agricoles seront nécessaires pour identifier les pratiques répondant le mieux à ces critères.

Nos résultats actuels suggèrent aussi que l'adoption par les exploitations d'élevage de ruminants, de systèmes basés sur une part plus importante des surfaces en herbe permettrait d'atténuer le climat *via* les effets albédo, en complément du stockage additionnel de carbone dans le sol.

La gestion de l'albédo devra cependant s'envisager au-delà des seules prairies. L'incertitude alimentaire générée par le changement climatique pose à court terme et d'une manière aiguë la question de la concurrence alimentaire humaine et animale. Des compromis seront certainement à réaliser entre la fonction nourricière de l'agriculture et son rôle dans l'atténuation du changement climatique. Une vision à long terme doit cependant coexister avec les besoins alimentaires immédiats et la nécessité d'agir sur le

climat qui d'ores et déjà impacte le rendement de certaines cultures d'Europe de l'Ouest depuis plusieurs années (Lorjoux et Noël, 2012), afin de prévenir le risque d'amplification de pénuries alimentaires.

**Remerciements** : le projet Recherche Technologique Albédo-Prairies est financé par le CASDAR. Nous souhaitons aussi remercier les techniciens et les responsables des fermes expérimentales qui interviennent régulièrement sur les sites pour entretenir les dispositifs de mesure et pour collecter les données.

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allard V., Soussana J.F., Falcimagne R. *et al.*, (2007). « The role of grazing management for the net biome productivity and greenhouse gas budget (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub>) of semi-natural grassland ». *Agric. Ecosyst. Environ.* 121(1–2), 47–58
- Ammann C., Flechard C.R., Leifeld J. *et al.*, (2007). « The carbon budget of newly established temperate grassland depends on management intensity ». *Agric. Ecosyst. Environ.* 121(1–2), 5–20
- Bala G., Caldeira K., Mirin A., Wickett M., Delire C., Phillips T. J., (2006). « Biogeophysical effects of CO<sub>2</sub> fertilization on global climate ». *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 58:5, 620-627
- Bauer S.E., Menon S., (2012). « Aerosol Direct, Indirect, Semidirect, and Surface Albedo Effects from Sector Contributions Based on the IPCC AR5 Emissions for Preindustrial and Present-Day Conditions ». *J. Geophys. Res.-Atmos.* 117, D1206.
- Betts R.A., (2000). « Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo ». *Nature* 408, 187–190.
- G.B., (2008). « Bonan Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests Science ». 320 (5882), pp. 1444-1449.
- Bounoua L., Defries R., Collatz G.J., Sellers P., Khan H., (2002). « Effects of land cover conversion on surface climate ». *Climatic Change* 52, 29–64.
- Bright R.M., Zhao K., Jackson R.B., Cherubini F., (2015). « Quantifying Surface Albedo and Other Direct Biogeophysical Climate Forcings of Forestry Activities ». *Glob. Chang. Biol.* 21, 3246–3266.
- Bright E. D., O'Halloran T., Pongratz J., Zhao K., & Cescatti A., (2017). « Local temperature response to land cover and management change driven by non-radiative processes ». *Nature Climate Change* 7(4), 296–302. <https://doi.org/10.1038/nclimate3250>
- Bright R.M., Lund M.T., (2021). « CO<sub>2</sub>-equivalence Metrics for Surface Albedo Change Based on the Radiative Forcing Concept: A Critical Review ». *Atmos. Chem. Phys.* 21, 9887–9907.
- Brovkin V., Claussen, Driesschaert E. *et al.*, (2006). « Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity ». *Clim Dyn.* 26, 587–600 (2006).
- Cai H., Wang J., Feng Y., Wang M., Qin Z., Dunn J.B., (2016). « Consideration of Land Use Change-Induced Surface Albedo Effects in Life-Cycle Analysis of Biofuels ». *Energy Environ. Sci.* 9, 2855–2867.
- 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), 044030.
- Charney J., Stone P.H., Quirk W.J., (1975). « Drought in the Sahara: a biophysical feedback mechanism ». *Science* 187, 434–435.
- Chervin R.M., (1979). « Response on the NCAR general circulation model to changed land surface albedo ». *Report of the JOC Study Conference on Climate Models*, vol. 1, no. 22. WMO, pp. 563–581.
- Cierniewski J., Karnieli A., Kazmierowski C., Krolewicz S., Piekarczyk J., Lewinska K., Goldberg A., Wesolowski R., Orzechowski M., (2015). « Effects of Soil Surface Irregularities on the Diurnal Variation of Soil Broadband Blue-Sky Albedo ». *IEEE J.-STARS*, 8, 493–502.
- Conant R.T., (2010). « Challenges and Opportunities for Carbon Sequestration in Grassland Systems. A Technical Report on Grassland Management and Climate Change Mitigation ». *Integrated Crop Management*, FAO, Rome, Italy.
- Cotana F., Rossi F., Filippini M., Coccia V., Pisello A.L., Bonamente E., Petrozzi A., Cavalaglio G., (2014). « Albedo Control as an Effective Strategy to Tackle Global Warming: A Case Study ». *Appl. Energy*, 130, 641–647.
- Dickinson R.E., (1995). « Land Processes in Climate Models ». *Remote Sens. Environ.* 51, 27–38.
- Dirmeyer P.A., Shukla J., (1996). « The effect on regional and global climate of expansion of the worlds desert ». *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 122, 451–482.
- Divine D.V., Granskog M.A., Hudson S.R.; Pedersen C.A., Karlsen T.I., Divina S.A., Renner A.H.H., Gerland S., (2015). « Regional Melt-Pond Fraction and Albedo of Thin Arctic First-Year Drift Ice in Late summer ». *Cryosphere* 9, 255–268.
- Eurostat, (2011). « Europe in Figures: Eurostat Yearbook 2011 ». *Publications Office of the European Union*, Luxembourg.
- 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 ». *Thèse de doctorat* Université Paul Sabatier, 357p.
- Govindasamy B., Duffy P.B. and Caldeira K., (2001). « Land use changes and northern hemisphere cooling ». *Geophysical Research Letters* 28: doi: 10.1029/2000GL006121. issn: 0094-8276.
- Hammerle A., Haslwanter A., Tappeiner U., Cernusca A., Wohlfahrt G., (2007). « Leaf area controls on energy partitioning of a mountain grassland ». *Biogeosciences Discussions*, European Geosciences Union 4 (5), pp.3607-3638. fhal-00297925f.
- He M., Hu Y., Chen N., Wang D., Huang J., Stammes K., (2019). « High Cloud Coverage over Melted Areas Dominates the Impact of Clouds on the Albedo Feedback in the Arctic ». *Sci. Rep.* 9, 9529.
- Henderson-Sellers A., Wilson M.F., (1983). « Surface Albedo Data for Climatic Modeling ». *Rev. Geophys.* 21, 1743–1778.
- Hotelling S., Lutz S., Dial R.J., Anesio A.M., Benning L.G., Fountain A.G., Kelley J.L., McCutcheon J., Skiles S.M., Takeuchi N. *et al.*, (2021). « Biological Albedo Reduction on Ice Sheets, Glaciers, and Snowfields ». *Earth-Sci. Rev.* 220, 103728.
- IPCC. Climate Change, (2007). « Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment ». *Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jacobs C.M.J., Jacobs A.F.G., Bosveld F.C. *et al.*, (2007). « Variability of annual CO<sub>2</sub> exchange from Dutch grasslands ». *Biogeosciences* 4(5), 803–816.
- Jiao Z., Zhang X., Breon F.M., Dong Y., Schaaf C.B., Roman M.O., Wang Z., Cui L., Yin S., Ding A. *et al.*, (2018). « The Influence of Spatial Resolution on the Angular Variation Patterns of Optical Reflectance as Retrieved from MODIS and POLDER Measurements ». *Remote Sens. Environ.* 215, 371–385.
- Jiao Z., Ding A., Kokhanovsky A., Schaaf C., Breon F., Dong Y., Wang Z., Liu Y., Zhang X., Yin S. *et al.*, (2019). « Development of a Snow Kernel to Better Model the Anisotropic Reflectance of Pure Snow in a Kernel-Driven BRDF Model Framework ». *Remote Sens. Environ.* 221, 198–209.
- Justes E. *et al.*, (2013). « Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires. Conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres systèmes écosystémiques ». <https://www6.paris.inra.fr/depe/Projets/Cultures-Intermediaires>
- Kokhanovsky A.A., Zege E.P., (2004). « Scattering Optics of Snow ». *Appl. Optics* 43, 1589–1602.
- Kala J., Evans J.P., Pitman A.J., Schaaf C.B., Decker M., Carouge C., Mocko D., Sun Q., (2014). « Implementation of a Soil Albedo Scheme in the CABLEv1.4B Land Surface Model and Evaluation Against MODIS Estimates over Australia ». *Geosci. Model Dev.* 7, 2121–2140.
- Klumpp K., Tallec T., Guix N., Soussana J.F., (2011). « Long-term impacts of agricultural practices and climatic variability on carbon storage in a permanent pasture ». *Global Change Biol.* 17(12), 3534–3545.
- Knorr W., Schnitzler K.-G., Govaerts Y., (2001). « The role of bright desert regions in shaping North African climate ». *Geophys. Res. Lett.* 28, 3489–3492.

- Lee X., Goulden M., Hollinger D. et al., (2011). « Observed increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes ». *Nature* 479, 384–387.
- Li Q., Ma M., Wu X., Yang H., (2018). « Snow cover and vegetation-induced decrease in global albedo from 2002 to 2016 ». *J. Geophys. Res. Atmos.* 123 (1), pp. 124-138.
- Lorjoux J., Noël V., (2012). « Les rendements mondiaux sous l'influence du changement climatique ». *Perspectives agricoles* n°293, p 20-23.
- Lukeš P., Rautiainen M., Manninen T., Stenberg P., Möttöus M., (2014). « Geographical gradients in boreal forest albedo and structure in Finland ». *Remote Sens. Environ.* 152, pp. 526-535.
- McDaniel M., Tiemann L., Grandy A.S., (2014). « Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis ». *Ecological Applications* 24, 560–570. doi:10.1890/13-0616.1.
- Mary B., Ferlicoq M., Pique G., Carrer D., Dejoux J.-F., Dedieu G., (2017). « Potentiel d'atténuation des changements climatiques par les couverts intermédiaires Ceschia E.1 ». *Innovations Agronomiques* 62, 43-58.
- Mira M., Weiss M., Baret F., Courault D., Hagolle O., Gallego-Elvira B., Olioso A., (2015). « The MODIS (Collection V006) BRDF/albedo Product MCD43D: Temporal Course Evaluated over Agricultural Landscape ». *Remote Sens. Environ.* 170, 216–228.
- Oguntunde P.G., Ajayi A.E., Van de Giesen N., (2006). « Tillage and Surface Moisture Effects on Bare-Soil Albedo of a Tropical Loamy Sand ». *Soil Till. Res.* 85, 107–114.
- Park C., Takeuchi N., (2021). « Unmasking Photogranulation in Decreasing Glacial Albedo and Net Autotrophic Wastewater Treatment ». *Environ. Microbiol.* 23, 6391–6404.
- Poeplau C., Don A., (2015). « Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis ». *Agriculture, Ecosystems and Environment* 200, 33–41.
- Rotenberg E and Yakir D., (2010). « Contribution of semi-arid forests to the climate system ». *Science* 327: 451– 454.
- Sanchez-Mejia Z.M., Papuga S.A., Swetish J.B., Van Leeuwen W.J.D., Szutu D., Hartfield K., (2014). « Quantifying the Influence of Deep Soil Moisture on Ecosystem Albedo: The Role of Vegetation ». *Water Resour. Res.* 50, 4038–4053.
- Schimel D.S., (1995). « Terrestrial ecosystems and the carbon cycle ». *Global Change Biology* 1, 77–91.
- Schulze E.D., Luyssaert S., Ciais P. et al., (2009). « Importance of methane and nitrous oxide for Europe's terrestrial greenhouse gas balance ». *Nature Geosci.* 2(12), 842–850.
- Șerban G., Tudor Cotfas D., Cotfas P.A., (2011). « Significant differences in crop albedo among Romanian winter wheat cultivars ». *Romanian Agricultural research*, NO. 28, 2011.
- Sud Y.C., Fennessy M.A., (1982). « A study of the influence of the surface albedo on July circulation in semiarid regions using the GLAS GCM ». *J. Climate* 2, 105–125.
- Smith P., Martino D., Cai Z. et al., (2008). « Agriculture. In: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz B., Davidson O.R., Bosch P.R., Dave R., Meyer L.A. (Eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK (2007). 3. Smith P., Martino D, Cai Z et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture ». *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 363(1492), 789–813.
- Soussana J.F., Allard V., Pilegaard K. et al., (2007). « Full accounting of the greenhouse gas (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) budget of nine European grassland sites ». *Agric. Ecosyst. Environ.* 121(1–2), 121–134.
- Soussana J.F., Tallec T., Blanfort V., (2010). « Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands ». *Animal* 4(3), 334–350.
- Sylvain P., Laure B., Camille L., Raphaël M., Michele S. et al., (2020). « Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? ». *Rapport scientifique de l'étude*. Étude réalisée pour l'ADEME et le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. INRA. pp.528. hal-03163517.
- Thackeray C.W., Fletcher C.G., (2016). « Snow Albedo Feedback: Current Knowledge, Importance, Outstanding Issues and Future Directions ». *Prog. Phys. Geogr.-Earth Environ.* 40, 392–408.
- Usovicz B., Lipiec J., Lukowski M., Marczewski W., Usovicz J., (2016). « The Effect of Biochar Application on Thermal Properties and Albedo of Loess Soil under Grassland and Fallow ». *Soil Till. Res.* 164, 45–51.
- Wen J., Zhao X., Liu Q., Tang Y., Dou B., (2014). « An Improved Land-Surface Albedo Algorithm with DEM in Rugged Terrain ». *IEEE Geosci. Remote Sens.* 11, 883–887.
- Xue Y., Shukla J., (1993). « The influence of land surface properties and Sahel climate. Part 1. Desertification ». *J. Climate* 6, 2232– 2445.
- Yan H., Wang S., Dai J., Wang J., Chen J., Shugart H.H., (2021). « Forest Greening Increases Land Surface Albedo during the Main Growing Period between 2002 and 2019 in China ». *J. Geophys. Res.-Atmos.* 126, e2020J–e33582J.
- Yang J., Wang Z., Kaloush K.E., (2015). « Environmental Impacts of Reflective Materials: Is High Albedo a 'Silver Bullet' for Mitigating Urban Heat Island? ». *Renew. Sust. Energy Rev.* 47, 830–843.
- Yang Y., Wang K., (2019). « The effect of different land use patterns on the microclimate and ecosystem services in the agro-pastoral ecotone of Northern China ». *Ecological Indicators* 106: 105552.
- Yoon J., Chang D.Y., Lelieveld J., Pozzer A., Kim J., Yum S.S., (2019). « Empirical Evidence of a Positive Climate Forcing of Aerosols at Elevated Albedo ». *Atmos. Res.* 229, 269–279.
- Zeeman M.J., Hiller R., Gilgen A.K. et al., (2010). « Management and climate impacts on net CO<sub>2</sub> fluxes and carbon budgets of three grasslands along an elevational gradient in Switzerland ». *Agric. Forest Meteorol.* 150(4), 519–530.
- Zeng Z., Piao S., Li L., Zhou L., Ciais P., T., Wang T., Li Y., Lian X., Wood E.F., Friedlingstein P., Mao J., Estes L.D., Myneni R. B., Peng S., Shi X., Seneviratne S.I., Wang Y., (2017). « Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades ». *Nat. Clim. Change* 7 (6), pp. 432-436.
- Zhang X., Jiao Z., Zhao C., Qu Y., Liu Q., Zhang H., Tong Y., Wang C., Li S., Guo J. et al., (2022). « Review of Land Surface Albedo: Variance Characteristics, Climate Effect and Management Strategy ». *Remote Sens.* 14, 1382.
- Zheng L., Zhao G., Dong J., Ge Q., Tao J., Zhang X., Qi Y., Doughty R.B., Xiao X., (2019). « Spatial, Temporal, and Spectral Variations in Albedo Due to Vegetation Changes in China's Grasslands ». *ISPRS J. Photogramm* 152, 1–12.
- Zhang X., Jiao Z., Zhao C., Guo J., Zhu Z., Liu Z., Dong Y., Yin S., Zhang H., Cui L., et al., (2022). « Evaluation of BRDF Information Retrieved from Time-Series Multiangle Data of the Himawari-8 AHI ». *Remote Sens.* 14, 139.