

VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DE L'ALBÉDO. ANALYSE MENÉE À LA RÉOLUTION MÉTRIQUE

Gabrielle van DURME et Michel ERPICUM

Résumé

L'albédo est un agent climatique peu étudié et encore mal compris. Pourtant il exerce une influence certaine sur l'évolution de notre climat. Cette influence est particulièrement visible lors des changements d'occupation du sol. Le but de la recherche présentée dans ce papier est d'affiner les connaissances sur l'albédo et les facteurs qui l'influencent. À cette fin, une campagne de mesures sur le terrain a été effectuée. Tous les facteurs n'ont pu être étudiés et parmi ceux qui ont pu l'être, les plus importants – ceux qui induisent la plus grande variation d'albédo – sont le développement de la végétation, la présence de neige et la variation journalière de la hauteur du soleil.

Mots-clés

Albédo, climat, occupation du sol

Abstract

Albedo is a climatic factor that has been barely studied and thus is badly understood. However, it has a certain influence on our climate. This influence is especially visible in case of land use changes, such as deforestation. The aim of the study presented in this paper is to increase the current knowledge on albedo and the factors that influence it. To achieve this, a field survey was conducted. Not all factors could be studied during the field campaign; among those that were effectively observed, the most important ones – those that were responsible for the biggest changes in albedo – were the development of vegetation, the presence of snow and the daily variation of the height of the sun.

Keywords

Albedo, climate, land use

INTRODUCTION

Le climat planétaire, et plus particulièrement le réchauffement global récent, fait l'objet d'une attention soutenue de la part des chercheurs, du monde politique, mais aussi du grand public. Ce réchauffement inquiète – le plus souvent – et les scientifiques tentent d'en déterminer les causes et les conséquences sur notre environnement naturel, économique et social.

Il existe différents agents qui agissent sur notre climat, les plus connus étant les gaz à effet de serre. À l'exception de ceux-ci, la plupart de ces agents, dont l'albédo, sont encore assez mal compris (IPCC, 2001).

En ce qui concerne l'albédo, cet agent est en outre fortement « délaissé » par les chercheurs. En effet, l'Intergovernmental Panel on Climate Change lui consacre un sixième de page sur les 350 que contient le rapport « *Climate Change 2001* », pour dire notamment qu'il y a eu beaucoup moins d'études sur cet agent com-

parativement à tous les autres présentés dans le rapport. Pourquoi ce manque d'intérêt ? L'homme change pourtant la face de la Terre sur de grandes étendues. Il n'y a pas de réponse, mais le fait est là.

La reconnaissance de l'influence de l'albédo sur le climat n'est pourtant pas neuve : une des premières études à avoir analysé les changements d'occupation du sol et détecté leurs impacts sur le climat date de 1975 (Myhre *et al.*, 2003). Depuis lors, énormément de travail a été accompli, mais il reste encore beaucoup à faire. De nombreux chercheurs soulignent le besoin crucial d'une base de données fiable de l'albédo.

La recherche présentée ici a pour objectif d'identifier et d'étudier les caractéristiques des différents facteurs influençant l'albédo d'une surface donnée. Cette recherche n'est qu'une partie d'un mémoire réalisé en vue de l'obtention de la Licence en Sciences Géographiques à l'Université de Liège (van Durme, 2004).

Le point I introduit très brièvement les résultats d'une large prospection dans la littérature. Cet état des connaissances constitue un point de départ important pour la suite de cette étude. De plus, aucune synthèse récente des connaissances actuelles sur l'albédo n'a déjà été réalisée. Le point II porte sur la partie pratique de la recherche. L'analyse de l'albédo a été effectuée à l'aide d'une campagne de mesures sur le terrain. Notons que dans le mémoire mentionné ci-dessus, l'analyse a également été menée à la résolution kilométrique à l'aide de traitements de l'imagerie satellitaire. Enfin, la troisième section sera consacrée aux conclusions.

I. ÉTAT DES CONNAISSANCES

Dans cette section, nous commencerons par rappeler la définition de l'albédo. Nous examinerons ensuite les connaissances actuelles sur les facteurs qui influencent l'albédo et sur les liens existant entre l'occupation du sol et le climat via l'albédo.

A. Définition de l'albédo

Pour rappel, l'albédo est la fraction du rayonnement solaire (direct et diffus) qui est réfléchi par une surface dans un hémisphère. Il s'agit d'une grandeur adimensionnelle. Le soleil rayonne essentiellement dans les longueurs d'onde comprises entre 200 à 3 000 μm , mais les UV courts et moyens sont absorbés par la couche d'ozone dans la stratosphère. Ils ne parviennent pas à la surface de la Terre et l'intervalle des longueurs d'onde du rayonnement solaire arrivant au sol s'étend ainsi de 300 à 3 000 μm .

B. Facteurs influençant l'albédo

Contrairement à une opinion répandue, l'albédo d'une surface est loin d'être une constante. De nombreux facteurs influencent l'albédo. Si certains d'entre eux sont liés aux surfaces et à leurs propriétés, les autres dépendent de conditions extérieures à ces surfaces. Nous examinerons brièvement ces deux groupes de facteurs.

1. Facteurs liés aux surfaces

1.a. Propriétés optiques

L'albédo étant la fraction du rayonnement solaire réfléchi par les surfaces, il dépend bien entendu de leurs propriétés optiques, c'est-à-dire de la manière dont les surfaces se comportent lorsqu'elles sont soumises à un rayonnement. Elles vont transmettre, absorber et/ou réfléchir ce rayonnement dans des proportions bien spécifiques, mais variant en fonction de divers facteurs (Guyot, 1997). Ces facteurs sont les suivants :

- *Type de surface* : naturelle, artificielle, eau, rocher, forêt, etc. ;

- *État de la surface* : humidité, couleur, état de la végétation, présence de neige, rugosité, etc.

1.b. Géométrie en 3 dimensions

L'agencement des diverses composantes d'une surface donnée va influencer l'albédo résultant, et ce à différentes échelles (Guyot, 1997).

Le phénomène le plus important est l'effet de *piège à lumière* : dans toute structure en 3 dimensions, le rayonnement réfléchi par une surface peut être intercepté par une autre surface ; il est alors en partie absorbé et en partie réémis. À cet effet, s'ajoute celui de l'ombrage mutuel, chaque structure pouvant en ombrager une autre et diminuer ainsi le rayonnement qu'elle reçoit. L'architecture de la surface étudiée ainsi que l'angle d'incidence solaire contrôlent la quantité de pénétration, de piège radiatif et d'ombrage mutuel, résultant en une plus ou moins grande diminution de l'albédo.

2. Facteurs extérieurs

2.a. Angle solaire zénithal

La hauteur du soleil dans le ciel agit de façon prépondérante sur l'albédo des surfaces. Cette influence est complexe et multiple ; elle a fait – et fait toujours – l'objet de nombreuses recherches.

Ce facteur est trop complexe pour être expliqué en détail dans le cadre de cet article. Nous renvoyons le lecteur intéressé à van Durme (2004).

En bref, l'influence de l'angle solaire zénithal (ASZ) – angle formé par la verticale locale et la direction du soleil dans le ciel – agit, d'une part, par la modification de la BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) de la surface (voir encadré ci-après) et, d'autre part, par l'atténuation de l'éclairement lors de la traversée de l'atmosphère et par le taux de pénétration et l'importance des pièges à lumière à proximité du sol.

L'influence de l'angle solaire zénithal est également fonction de la proportion de rayonnement direct et diffus, du type de surface (dont sa géométrie) et de la topographie (variation de l'angle d'incidence du rayonnement solaire). Elle se traduit par des variations diurne, annuelle et en fonction de la latitude. Par ailleurs, de manière générale, une augmentation de l'ASZ se traduit par un accroissement de l'albédo.

La BRDF est le résultat de l'anisotropie des surfaces. L'énergie réfléchi par la surface terrestre est fonction de la direction de l'énergie incidente et de la direction de l'énergie réfléchi. Cette BRDF peut être vue comme la surface enveloppe de toutes les réflectances d'une surface dans toutes les directions. L'albédo est l'intégrale de cette BRDF pour tous les angles zénithaux et azimutaux de réflexion.

2.b. Atmosphère

L'atmosphère provoque deux effets sur l'albédo. Premièrement, lorsque les mesures d'albédos sont effectuées à partir de satellites, la valeur obtenue ne reflète pas uniquement les caractéristiques réfléchives de la surface étudiée mais elle porte aussi l'empreinte de l'atmosphère qui se trouve entre le radiomètre et la surface. L'atmosphère altère l'albédo de la surface. Une correction appelée correction atmosphérique est donc nécessaire pour extraire du signal enregistré une information indépendante des effets de l'atmosphère, variables dans le temps et l'espace, et concernant la seule surface terrestre. Notons que cet effet de l'atmosphère affecte la mesure de l'albédo mais pas l'albédo réel de la surface. La présence de nuages masque l'albédo de la surface du sol mais augmente la valeur de l'albédo atmosphérique.

Deuxièmement, de la turbidité de l'atmosphère dépend aussi la BRDF d'une surface (Liu *et al.*, 1994). En effet, pour un éclairage identique, la BRDF d'une surface, et donc son albédo, varie si la distribution de cet éclairage varie.

Pour rappel, l'éclairage énergétique est la puissance reçue par unité de surface d'un récepteur. Il s'exprime en Wm^{-2} .

C. Occupation du sol, albédo et climat

L'albédo de la surface contrôle la quantité d'énergie qui est disponible pour l'évaporation et le réchauffement de l'air à son contact. Différentes occupations du sol ou des changements d'occupation du sol induisent différentes réactions climatiques en raison de leurs albédos différents. L'albédo n'est bien entendu pas le seul facteur responsable des différences climatiques entre deux surfaces et il n'est d'ailleurs pas évident de dissocier ces facteurs ainsi que leurs influences respectives.

Les liens existant entre une surface, son albédo et le climat peuvent être mis en évidence grâce aux changements d'occupation du sol induits par l'homme et à leurs impacts involontaires sur l'albédo des surfaces ainsi que leurs effets corollaires sur le climat (par exemple : Dirmeyer *et al.* 1994 ; Culf *et al.*, 1995 ; Betts, 2000 ; Hoffman *et al.*, 2000 ; Govindasamy *et al.*, 2001). L'exemple le plus important est la déforestation et plus particulièrement celle de la forêt amazonienne. Un des effets observés de la déforestation amazonienne est le suivant : une augmentation de l'albédo. Une moins grande fraction du rayonnement solaire est absorbée et il y a donc moins d'énergie disponible pour le réchauffement de l'air et l'évaporation. La convection, principal mécanisme de production des précipitations dans les régions intertropicales, est affaiblie et les précipitations sont réduites (Lofgren, 1995a et 1995b).

En outre, les forêts utilisent davantage d'énergie pour évapotranspirer l'eau (flux de chaleur latente) que les sols nus ou recouverts d'herbe. Il en résulte davantage de vapeur d'eau dans l'air au-dessus des forêts et moins d'énergie disponible pour le réchauffement de l'air. Par contre, le flux de chaleur sensible est plus important au-dessus des sols nus ou recouverts d'herbe ; ce qui se traduit par un réchauffement diurne plus marqué de la surface de ces sols, comparativement aux forêts. Ceci peut annuler l'effet de l'albédo plus important au-dessus des sols nus ou recouverts d'herbe.

Rappelons qu'il reste malheureusement de nombreuses incertitudes en ce qui concerne les processus sous-tendant notre climat et donc l'amplitude des impacts engendrés par les changements d'occupation du sol sur le climat. En plus de ces incertitudes relatives au climat et à ses réponses possibles, la connaissance de l'albédo est, elle aussi, imparfaite.

Par ailleurs, la neige et les glaciers influencent fortement l'albédo et le climat, car ils réfléchissent une très grande part de l'énergie solaire incidente ; ce qui se traduit par un faible réchauffement de ces interfaces. Ceux-ci entretiennent ainsi le froid. D'autre part, une fonte des neiges et des glaciers consécutive à un réchauffement du climat se traduit par une diminution de l'albédo et par une absorption plus grande de l'énergie solaire incidente au niveau du sol. C'est notamment pour cette raison que les modèles prévoient un réchauffement du climat plus marqué dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord consécutivement à la fonte des glaciers et des glaces de mer de ces régions-là. L'augmentation de l'albédo engendrée par une croissance des surfaces enneigées et englacées a d'ailleurs contribué à renforcer le refroidissement du climat observé durant les grandes glaciations du Quaternaire.

II. MESURES SUR LE TERRAIN

A. Instrumentation et méthodologie

L'appareil de mesure utilisé pour mesurer l'albédo est un *albédomètre* placé à 2 mètres du sol. Cet albédomètre est composé de deux *pyranomètres* identiques opposés disposés horizontalement, l'un dirigé vers le ciel et l'autre vers le sol. Les pyranomètres employés dans cette étude sont des pyranomètres SP LITE (Kipp & Zonen, 2003). L'étendue spectrale de ces deux capteurs est limitée, comprise entre 400 et 1 100 μm . Nous parlerons d'albédo même si cette étendue spectrale n'est pas identique à la gamme du rayonnement solaire (soit de 300 à 3 000 μm). En effet, ce rayonnement est peu important pour les longueurs d'onde excédant 1 100 μm .

Lors de notre campagne de terrain, des mesures ont été réalisées sur 18 sites se situant aux alentours de Liège :

d'une part, à Milmort et, d'autre part, au Sart-Tilman à proximité du bâtiment de géographie (Bat B11). Notre objectif était d'étudier une gamme aussi large que possible de surfaces différentes. Au total, 11 surfaces naturelles et 7 surfaces artificielles ont été étudiées. Ces surfaces naturelles ont concerné 4 champs de betteraves, de froment, d'orge d'hiver et de chicorées, un pré de pâture, une friche, 3 pelouses et 2 surfaces recouvertes de copeaux (clairs et foncés). Les surfaces artificielles ont concerné un trottoir, une surface de graviers, une surface pavée et 4 surfaces couvertes de macadam.



Figure 1. Localisation des sites de Milmort et du Sart-Tilman (ULg), Belgique

La campagne de mesures a pu être menée pendant deux périodes bien distinctes : la première du 10/02/2004 au 30/03/2004 et la seconde du 28/06/2004 au 19/07/2004. Le 19/07/2004, une expérience a été menée sur les sites situés aux alentours de Milmort en mesurant l'albédo sur des surfaces sèches puis, juste après, sur les mêmes surfaces arrosées artificiellement. Nous disposons donc ainsi de deux échantillons différents pour des conditions d'éclairement identiques.

Les facteurs que nous avons examinés sont les suivants : la nature des surfaces, leur état en termes de développement de la végétation, d'humidité ou de mouillage, la présence de neige, le vieillissement de copeaux de bois, l'angle solaire zénithal tout aussi bien que l'éclairement direct ou diffus.

La direction du rayonnement réfléchi n'a pas pu être étudiée, car les pyranomètres utilisés mesuraient l'énergie dans l'entière de l'hémisphère. Ces mesures ont toutefois permis d'éviter les erreurs commises lors de la dérivation de l'albédo à partir d'une seule direction de réflexion. La topographie n'a pas pu être prise en compte car toutes les surfaces sélectionnées étaient horizontales. Les effets de pièges à lumière dans les couverts de dimensions plus importantes, tels une forêt, un verger ou une ville n'ont pas été envisagés.

Notons qu'il est très difficile d'isoler l'influence de chacun de ces facteurs, car il n'est pas possible, en conditions réelles, de maintenir tous les facteurs constants sauf un qui pourrait alors être analysé.

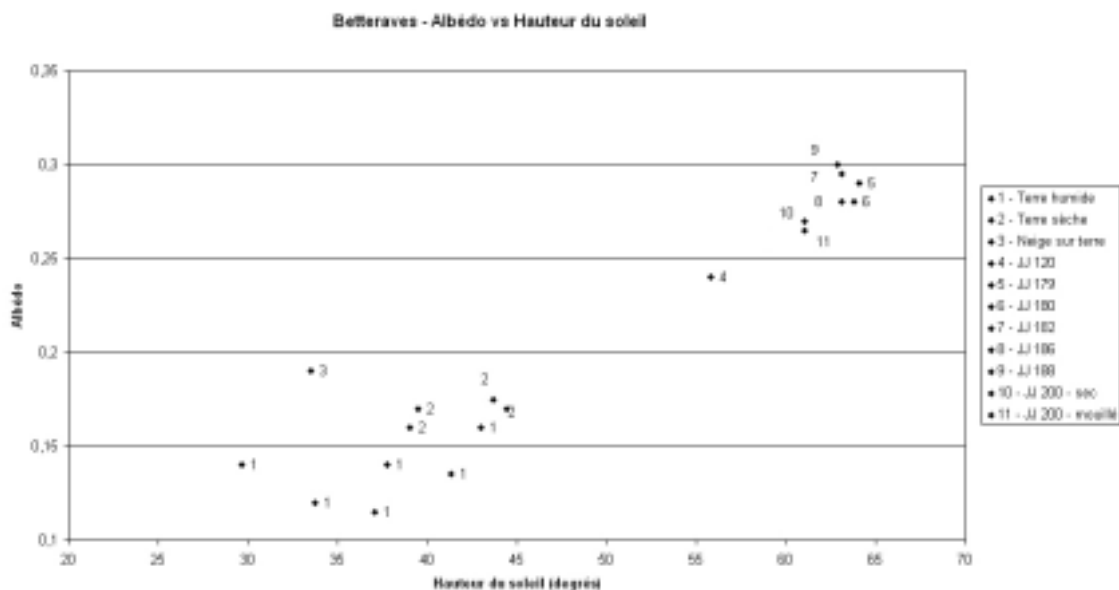


Figure 2. Albédo du champ de betteraves en fonction de l'angle solaire zénithal, mais aussi en fonction des caractéristiques du champ (via le JJ : n° du jour dans l'année civile)

Lors de chaque mesure, les paramètres suivants ont été notés : la date et l'heure (pour retrouver l'ASZ), l'état de la surface, la nébulosité ainsi que le type de nuages, l'éclairement solaire (en Wm^{-2}) et l'albédo.

Enfin, notre dispositif de mesures a permis également d'enregistrer le rayonnement solaire et l'albédo d'une surface lors d'une journée complète, le 24/07/2004. Pour cela, le dispositif a été installé sur la prairie située à côté du bâtiment de géographie au Sart-Tilman. Les mesures d'éclairement ont été comparées à celles de la station météorologique située à proximité immédiate.

B. Résultats

Les données récoltées lors de la campagne de mesures ont tout d'abord été analysées site après site. Les différents sites ont ensuite été comparés. De nombreux graphiques ont été réalisés pour mener cette analyse et seuls quelques exemples sont présentés ici. Nous avons également examiné les données complémentaires provenant de la journée complète de mesures. Un rapport plus complet de l'analyse des données de terrain est présenté dans van Durme (2004).

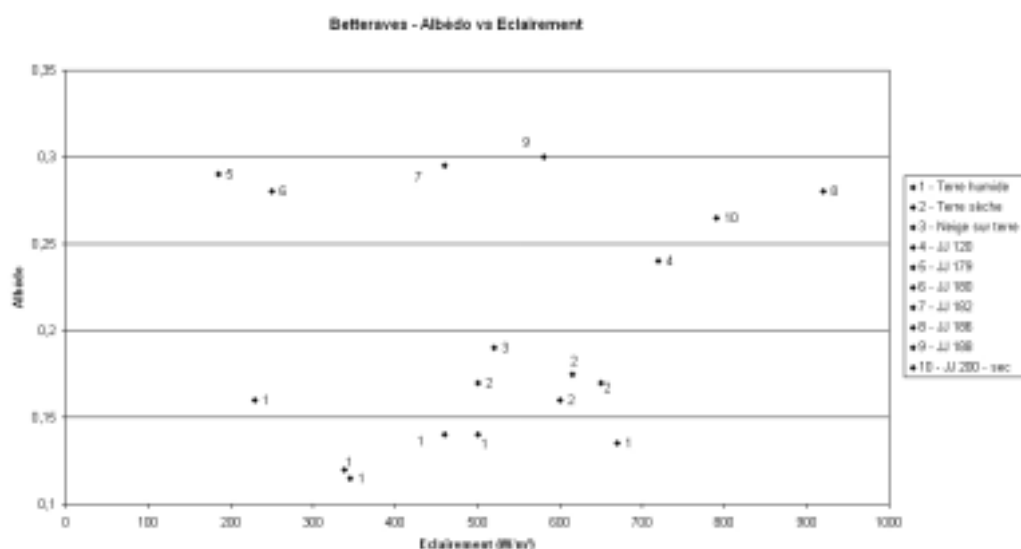


Figure 3. Albédo du champ de betteraves en fonction de l'éclairement et en fonction des caractéristiques du champ (JJ = n° du jour dans l'année civile)

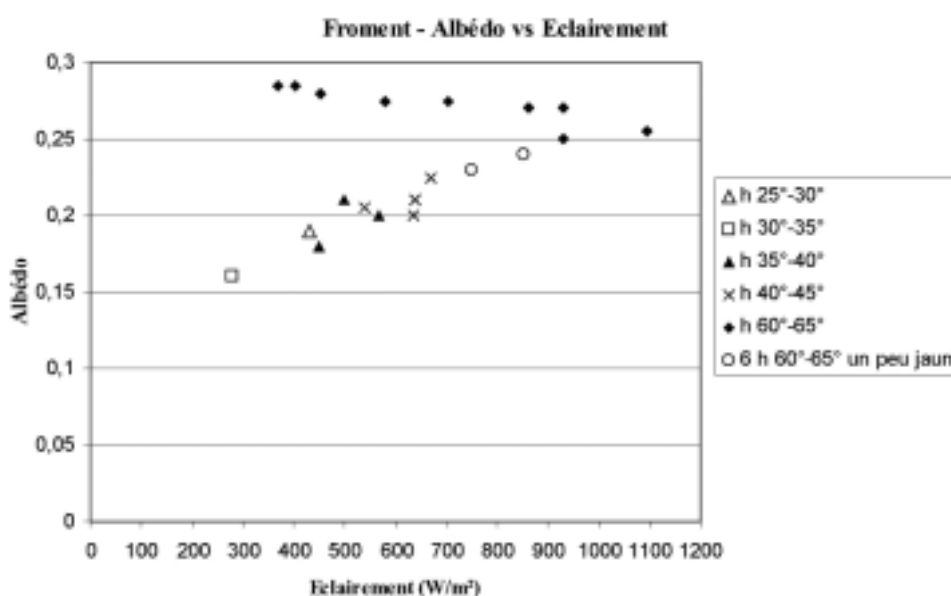


Figure 4. Albédo du champ de froment en fonction de l'éclairement et de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon mesurée vers midi (donc fonction du jour dans l'année civile)

1. Les surfaces naturelles

Pour illustrer le cas des surfaces naturelles, nous prenons l'exemple d'un champ de betteraves. Les champs en général présentent une forte variation des caractéristiques de leur surface. Cela se traduit par un accroissement de l'albédo parallèle au développement de la végétation. La figure 2 montre les valeurs de l'albédo du champ en fonction de la hauteur du soleil, h . Étant donné que les mesures ont chaque fois été réalisées aux alentours du midi local, l'augmentation de la valeur de h reflète généralement le moment dans l'année et donc le jour julien (JJ). Ceci n'est cependant pas vrai pour les mesures de la 2^e période (du 28/06 au 19/07, soit JJ 179 à 200) où la déclinaison du soleil est dans sa phase descendante ; h ne varie toutefois pas beaucoup durant cette période.

L'examen de ce graphique nous permet de constater tout d'abord que lorsque le champ de betteraves n'est constitué que de terre nue, l'humidité a beaucoup d'importance : la terre mouillée est plus foncée et présente donc un albédo plus faible.

Notre expérience du 19/07 (JJ 200) montre une légère diminution de l'albédo lorsque le sol est mouillé (points 10 et 11). Remarquons que, lors de notre expérience, la végétation n'a pas eu le temps de réagir à l'augmentation de l'humidité dans le sol et que seul l'assombrissement de la terre – qui est encore un peu visible – va jouer.

Notons que cette expérience n'a été réalisée qu'une seule fois et que, contrairement à l'influence de l'humidité sur un sol de terre, l'influence de l'humidité sur une surface végétale ne peut être affirmée ou infirmée sur base de cette unique expérience.

Minnis *et al.* (1997) indiquent que les petites gouttes d'eau à la surface des plantes causent normalement un accroissement de l'albédo. Cet effet n'a pas été visible lors de notre expérience ; il est probablement annulé par l'assombrissement de la terre.

Par ailleurs, la neige a pour effet d'accroître l'albédo ; si l'augmentation n'est pas spectaculaire dans le cas présent (point 3), c'est que la neige ne recouvrait qu'approximativement 20% de la surface et que les 80% restants étaient bien entendu très foncés.

Nous avons également vérifié si l'éclairement solaire possédait une quelconque influence sur l'albédo du champ. Comme nous le voyons sur la figure 3, la quantité d'éclairement reçu ne semble pas avoir d'effet sur l'albédo.

Ceci n'est qu'un exemple parmi les 11 sites naturels étudiés. Les autres sites ont montré un comportement légèrement différent. Pour résumer les résultats obtenus lors de l'analyse des 11 sites, concernant les facteurs que nous avons étudiés, nous pouvons dire que :

a) Les facteurs principaux influençant l'albédo des surfaces naturelles sont les suivants :

- Le développement de la végétation (souvent au détriment de l'étendue de la surface de terre) est le facteur prépondérant.
- L'humidité, qui joue également un rôle important, mais uniquement lorsque le sol de terre est visible.
- Dans le cas de la surface de copeaux récents (et clairs), le facteur dominant est leur assombrissement, qui est lié au vieillissement et entraîne donc une diminution de l'albédo au fil du temps.
- La neige, lorsqu'elle est présente, engendre une hausse de l'albédo qui dépend du pourcentage de zone couverte (et aussi de la fraîcheur de la neige, mais nous n'avons pas eu l'occasion d'étudier cette variable).

b) L'influence de la hauteur du soleil n'a pas été mise en évidence.

c) La quantité d'éclairement semble exercer une influence sur l'albédo du champ de froment et peut-être du champ d'orge. Cette influence dépend de la hauteur du soleil et n'agit pas sur toutes les surfaces. Ce résultat, mis en évidence sur la figure 4, est assez surprenant, mais l'ordre de grandeur des variations engendrées ainsi

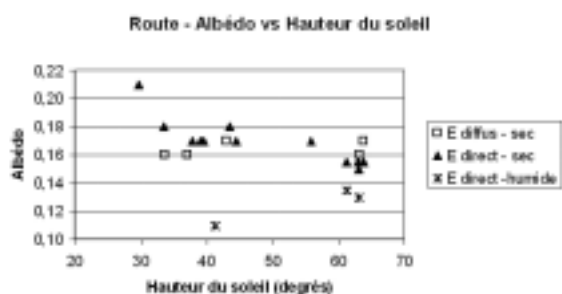


Figure 5. Albédo d'une route en macadam en fonction de la hauteur du soleil

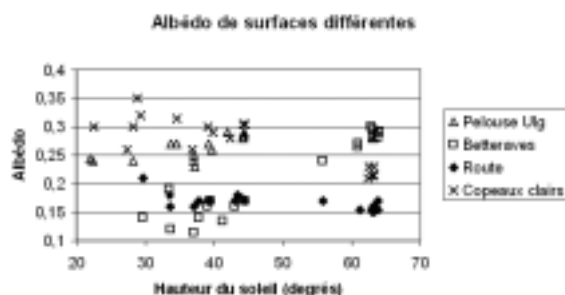


Figure 6. Albédo de différentes surfaces en fonction de la hauteur du soleil

que la répétitivité de cette tendance, donnent de la crédibilité à cette influence de l'éclairement.

d) Il reste une part de variabilité non expliquée pour chaque surface. Elle est probablement due, entre autres, à un manque de précision dans les notes concernant l'état de la surface. Ceci est surtout vrai pour les surfaces herbeuses, mais également pour les champs à l'état de terre où le labourage perturbe complètement la rugosité de la surface. La variabilité provient vraisemblablement aussi de la dépendance à la longueur d'onde de la sensibilité du capteur. L'état de l'atmosphère, et donc la composition spectrale de l'éclairement, varie d'un jour à l'autre et cela se répercute sur ce qui est mesuré.

2. Les sites artificiels

L'exemple que nous prenons ici est celui d'une route en macadam (Milmort).

Notons que, compte tenu du fait que les surfaces artificielles ne connaissent pas d'évolution saisonnière comme les surfaces naturelles, l'influence de la hauteur du soleil – si elle s'exerce sur la surface en question – sera directement reconnaissable.

Pour cette route en effet, l'influence de la hauteur du soleil est visible sur la figure 5. En effet, l'albédo de cette surface diminue lorsque la hauteur du soleil augmente et lorsque l'éclairement est direct. Lorsque l'éclairement est diffus, l'influence de la hauteur du soleil ne se marque pas et l'albédo est relativement constant. De plus, les différences d'albédo existant entre l'éclairement direct et l'éclairement diffus lorsque le soleil est bas, s'estompent lorsque la hauteur augmente, car l'albédo d'éclairement diffus ne diminue pas, contrairement à l'albédo d'éclairement direct. De même, l'effet attendu de l'assombrissement des surfaces, dû à l'humidité, est également présent.

Enfin, l'albédo de ces surfaces est indépendant de l'éclairement.

Nous ne présentons ici qu'un seul des 7 sites étudiés.

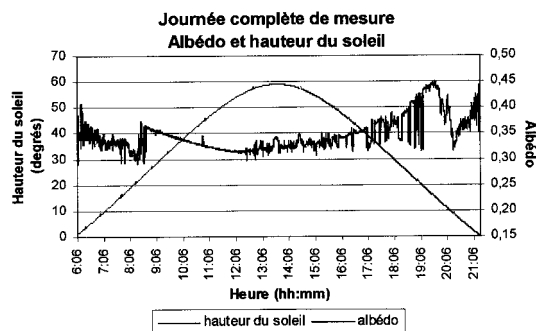


Figure 7. Données d'albédo provenant de la journée de mesure et hauteurs du soleil correspondantes

Les résultats de l'analyse complète sont les suivants :

a) Les facteurs principaux influençant l'albédo des surfaces artificielles sont :

- Le mouillage, qui assombrit la surface et fait baisser l'albédo.
- La hauteur du soleil, qui affecte l'albédo de la plupart des surfaces que nous avons étudiées dans le sens d'une réduction de l'albédo en fonction de l'accroissement de la hauteur du soleil.

b) L'éclairement n'influence pas l'albédo des surfaces construites, sauf pour la surface du parking ULg (asphalte) où les mesures ont montré une diminution de l'albédo parallèlement à l'augmentation de l'éclairement. Il n'est cependant pas sûr qu'il faille prendre ces données en considération, car l'exemple est isolé et la variation d'éclairement qu'il exhibe n'est pas significative.

c) Il reste une part de variabilité non expliquée pour chaque surface. Les causes avancées pour expliquer cela sont les mêmes que pour les surfaces naturelles, soit le manque de précision dans les notes concernant l'état de la surface et la dépendance de la sensibilité du capteur à la longueur d'onde. Cependant, la variabilité de l'albédo de certaines surfaces est assez surprenante (notamment les pavés et la route ULg) ; les surfaces artificielles ne doivent pourtant pas changer de façon si importante. Notons enfin que d'autres surfaces, surtout la surface de graviers, montrent, au contraire, une constance exceptionnelle.

3. Comparaison entre différentes surfaces

La figure 6 permet la comparaison de l'albédo d'une surface herbeuse, d'un champ, d'une surface artificielle ainsi que de la surface « copeaux clairs ».

Les différentes surfaces possèdent des albédos très divers. De plus, en raison des amplitudes de variation annuelle très différentes tant en importance qu'en signe, les rapports entre les albédos des surfaces changent également au cours de l'année. Les changements les plus importants sont engendrés par le développement de la végétation (champ de betteraves), *a fortiori* lorsque l'on passe d'une surface de terre à une surface couverte de végétation (accroissement de l'albédo du simple au double, voire plus). Viennent ensuite les changements provoqués par le vieillissement des copeaux, suivis par ceux provenant de l'évolution de la pelouse. En comparaison, les modifications d'albédo des surfaces artificielles engendrées par les variations de la hauteur du soleil sont négligeables.

4. Données de la journée de mesure du 24 juillet 2004 sur la prairie de Sart-Tilman

Ces données sont présentées dans la figure 7. Comme prévu, l'influence de la hauteur du soleil est bien visible. Elle engendre une diminution de l'albédo au fur et à

mesure que l'on s'approche du midi local et une augmentation lorsqu'on s'en éloigne.

Il existe deux asymétries dans la courbe de l'albédo.

a) La première est que l'albédo est plus élevé en fin de journée qu'au début. Cela est dû à la présence d'obstacles à l'éclairement sur le site de mesure. En effet, pour la deuxième demi-journée, l'éclairement est toujours direct pour des hauteurs du soleil plus basses, qui peuvent donc engendrer des albédos plus élevés.

b) La deuxième asymétrie est la suivante : pour une même hauteur du soleil, l'albédo est plus faible en première partie de journée. En effet, l'albédo commence à augmenter vers 12h06, soit environ une heure et demi avant le midi local. La présence de la rosée peut expliquer une asymétrie, mais, premièrement, l'asymétrie s'exerce dans l'autre sens selon Minnis *et al.* (1997) et, deuxièmement, l'herbe était sèche à midi. Nous n'avons pas d'explication pour ce phénomène dans l'état actuel de nos connaissances.

L'allure saccadée de la courbe d'albédo en milieu de journée est due au passage de petits cumulus. Les répercussions de ces passages sur la courbe sont plus importantes lorsque le soleil est bas car, alors, la différence entre l'albédo d'éclairement direct – fortement influencé par la hauteur du soleil – et l'albédo d'éclairement diffus – indépendant de la hauteur du soleil – est plus grande.

CONCLUSIONS

La partie théorique de cet article portant sur l'état des connaissances de l'albédo illustre bien toute la complexité de cet agent climatique – qui reste actuellement encore peu compris. Elle montre aussi que l'influence de l'albédo sur le climat (via les changements d'occupation du sol) est bien réelle.

Nous avons ensuite pu, grâce à la campagne de mesures réalisée sur le terrain, confirmer et préciser l'influence de certains facteurs sur l'albédo de quelques types de surface, ainsi que sur l'évolution saisonnière de cet albédo :

a) L'importance du type de surface avec notamment la dualité surfaces naturelles – surfaces artificielles. Les premières sont caractérisées par des albédos plus élevés lorsque la végétation est présente ; de l'ordre de 0,25 contre 0,13 pour les secondes. Nous avons également noté des différences au sein même de ces catégories. Ceci montre bien que malgré la variabilité de l'albédo pour une même surface, il demeure néanmoins caractéristique de la surface en question.

b) L'influence de la couleur et notamment de l'assombrissement des surfaces causé par le mouillage.

c) La présence de neige sur la surface. L'augmentation de l'albédo engendrée par la neige dépend du taux de recouvrement ainsi que du niveau de fraîcheur de la neige, mais ces aspects n'ont pas été approfondis dans cette étude.

d) L'influence prépondérante du développement de la végétation – et des cultures en particulier – sur les variations saisonnières de l'albédo des surfaces naturelles. L'amplitude des variations d'albédo engendrées par ce facteur sont considérables et peuvent aller jusqu'à une augmentation de l'albédo du simple au double, voire plus.

e) La hauteur du soleil. Son influence sur la variation saisonnière n'est visible que sur les surfaces artificielles. L'amplitude de la variation induite est minimale (de l'ordre de 0,03) ; elle est plus que compensée par le développement de la végétation sur les surfaces naturelles. Son influence sur l'évolution diurne de l'albédo est plus considérable, mais cet aspect n'a pu être étudié que lors d'une expérience unique.

Nous n'avons, par contre, pas pu mettre en évidence les effets d'autres facteurs. Il s'agit notamment de la rosée, dont Minnis *et al.* (1997) pensent qu'elle cause une augmentation de l'albédo.

Les résultats de nos observations apportent des interrogations concernant le rôle de la quantité de rayonnement solaire reçue. Ce paramètre engendre-t-il de réelles variations de l'albédo ou est-ce seulement un artefact dû au capteur, notamment à la dépendance de sa sensibilité à la longueur d'onde ?

Il reste également une part de variabilité non expliquée dans les mesures. Elle doit être partiellement due à des modifications de l'état de la surface se répercutant sur ses propriétés optiques. Ces modifications n'ont pas été suffisamment considérées lors de la campagne de mesures. Il pourrait s'agir, par exemple, de la hauteur des herbes ou de la profondeur des sillons dans un champ. En outre, il est important de garder à l'esprit que notre échantillon de données est relativement restreint.

Enfin, rappelons qu'il reste un certain nombre de facteurs qui n'ont pas été étudiés dans le cadre de cette recherche car ils exigeaient une campagne de mesure plus longue et/ou plus fournie, une autre échelle d'étude ou encore d'autres sites de mesure.

BIBLIOGRAPHIE

- BARIOU R., LECAMUS D. & LE HENAFF F., 1985c. *Dossiers de télédétection (5) : Albédo, réflectance*. Centre Régional de Télédétection, Université de Rennes 2.
- BETTS R.A., 2000. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature*, Vol. 408, pp. 187-190.
- BETTS R.A., 2001. Biogeophysical impacts of land use on present-day climate : near-surface temperature change and radiative forcing. *Atmospheric Science Letters*, Vol. 2, pp. 39-51.
- CULF A.D., FISCH G. & HODNETT M.G., 1995. The albedo of Amazonian forest and ranch land. *Journal of Climate*, Vol. 8, pp. 1 544-1 554.
- DIRMEYER P.A. & SHUKLA J., 1994. Albedo as a modulator of climate response to tropical deforestation.

- Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, D10, pp. 20 863-20 877.
- GEIGER R., 1965. *The Climate near the Ground*. Fourth edition. Chapitres 1, 3, 4. Oxford University Press, London.
- GOVINDASAMY B., DUFFY P.B. & CALDEIRA K., 2001. Land use change and northern hemisphere cooling. *Geophysical Research Letters*, Vol. 28, pp. 291-294.
- GUYOT G., 1997. *Climatologie de l'Environnement : De la plante aux écosystèmes*. Chapitres 1, 5, 7. Masson, Paris.
- HOFFMANN W.A. & JACKSON R.B., 2000. Vegetation-climate feedbacks in the conversion of tropical savanna to grassland. *Journal of Climate*, Vol. 13, pp. 1 593-1 602.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: Synthesis Report*. Cambridge University Press, 397 p.
- KIPP & ZONEN, 2003. *Instruction manual, SP LITE silicon pyranometer*. Kipp and Zonen, 22 p.
- LIU C.H., CHEN A.J. & LIU G.R., 1994. Variability of the bare soil due to different solar zenith angles and atmospheric haziness. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 15, pp. 2 531-2 542.
- LOFGREN B.M., 1995a. Sensitivity of land-ocean circulations, precipitation, and soil moisture to perturbed land surface albedo. *Journal of Climate*, Vol. 8, pp. 2 521-2 542.
- LOFGREN B.M., 1995b. Surface albedo-climate feedback simulated using two-way coupling. *Journal of Climate*, Vol. 8, pp. 2 543-2 562.
- MINNIS P., MAYOR S., SMITH W.L. Jr. & YOUNG D.F., 1997. Asymmetry in the diurnal variation of surface albedo. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, pp. 879-890.
- MYHRE G. & MYHRE A., 2003. Uncertainties in radiative forcing due to surface albedo changes caused by land-use changes. *Journal of Climate*, Vol. 16, pp. 1 511-1 524.
- OKE T. R., 1987. *Boundary Layer Climates*. Second edition. Methuen & Co. LTD, London, New York, 435 p.
- SAILOR D.J. & FAN H., 2002. Modelling the diurnal variability of effective albedo for cities. *Atmospheric Environment*, Vol. 36, pp. 713-725.
- van DURME G. 2004. *Variabilité spatio-temporelle de l'albedo: Analyse menée aux résolutions métrique et kilométrique*. Mémoire de Licence en Sciences Géographiques, Université de Liège, inédit, 133 p. + 56 p. (annexes).
- XUE Y. & SHUKLA J., 1993. The influence of land surface properties on Sahel climate. Part I : Desertification. *Journal of climate*, Vol. 6, pp. 2 232-2 245.

Adresses des auteurs :

Gabrielle van DURME
Rue Jacob Makoy, 48
B-4000 Liège
gabriellevandurme@hotmail.com

Michel ERPICUM
Département de Géographie physique
Institut de Géographie
Université de Liège.
Allée du 6 août, 2 – Bât. B11
B-4000 Sart Tilman, Liège
michel.erpicum@ulg.ac.be