



HAL
open science

Mesure de l'exposition au rayonnement ultraviolet solaire pour les études épidémiologiques

Isabelle Chaillol

► **To cite this version:**

Isabelle Chaillol. Mesure de l'exposition au rayonnement ultraviolet solaire pour les études épidémiologiques. Médecine humaine et pathologie. Université Claude Bernard - Lyon I, 2011. Français. NNT : 2011LYO10231 . tel-00831718

HAL Id: tel-00831718

<https://theses.hal.science/tel-00831718>

Submitted on 7 Jun 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Délivrée par

L'UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON 1

DIPLÔME DE DOCTORAT

(arrêté du 7 août 2006)

Soutenue publiquement le 23 novembre 2011

par

CHAILLOL Isabelle

Mesure de l'exposition au rayonnement ultraviolet solaire pour les études épidémiologiques

JURY :

M BOISSEL Jean-Pierre (Président)
Mme CATTARUZZA Maria Sofia (Rapporteur)
M DIXSAUT Gilles (Rapporteur)
Mme BROGNIEZ Colette (Examinateur)
M DORÉ Jean-François (Directeur de thèse)
M BONIOL Mathieu (Co-encadrant)

Remerciements

Ce travail de thèse a pu voir le jour grâce au projet EuroSun, qui m'a permis de travailler sur des données de qualité. Je remercie Peter Boyle qui a initié ce projet et qui m'a accueillie à l'International Prevention Research Institute à mi-parcours afin que je termine ma thèse dans de bonnes conditions.

Mes remerciements vont également à Jean-François Doré et Mathieu Boniol qui m'ont initiée à la recherche et encadrée tout au long de cette thèse, ainsi qu'à Philippe Autier qui a partagé avec enthousiasme ses connaissances et qui m'a accueillie dans son équipe au CIRC au début de ma thèse.

Merci aux autres collègues de cette équipe, qui ont participé à un début de thèse très agréable. Je tiens aussi à remercier toute l'équipe Screening qui a pris la suite au moment charnière et qui m'a tendu la main jusqu'à la fin. Je remercie également Eve El Akroud pour toute son aide qui a facilité la continuité de mon encadrement.

Je remercie aussi les membres de mon jury que je n'ai pas encore cité pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail, Jean-Pierre Boissel qui a accepté d'être le président de mon jury, les rapporteurs de cette thèse Gilles Dixsaut et Maria-Sofia Cattaruzza, et Colette Brogniez pour ses commentaires constructifs sur la partie physique du sujet.

Pour finir, un grand merci à mes collègues d'IPRI, Maria, Alice, Kim, Laura, Faustine, Caroline, Michel, Maria-Paula, et tous les autres qui m'ont soutenue dans les moments les plus délicats. Merci pour la bonne humeur que vous avez apportée dans les bureaux et autour du café. Vos encouragements, ainsi que ceux de mes amis, m'ont été très précieux.

Résumé

Le rayonnement ultraviolet (UV) est un cancérigène pour lequel peu d'informations sur l'exposition des populations est disponible. L'intensité et les variations de l'exposition au rayonnement UV solaire, principale source d'exposition, a un impact sur la santé mais il est difficile de les surveiller. Le travail de cette thèse a permis de développer un outil pour une estimation quantitative de l'exposition individuelle à l'UV solaire pour l'épidémiologie.

Nous avons créé un atlas des moyennes mensuelles d'irradiation journalière en Europe. Certaines données manquantes au niveau des pays nordiques en hiver ont dû être extrapolées. Nous avons vu que la saisonnalité est forte et que la répartition spatiale ne suit pas seulement le gradient de latitude. Par exemple, l'irradiation UV est plus élevée au sud des pays nordiques qu'au centre de l'Europe.

Une enquête a été menée dans huit populations européennes afin d'estimer l'exposition individuelle. Ces populations ont des comportements différents vis-à-vis de l'exposition au soleil. Après une étape de modélisation pour estimer les données d'irradiation UV manquantes au nord de la Norvège sur l'ensemble de l'année, nous avons pu quantifier l'exposition chronique et l'exposition pendant les vacances dans trois populations (française, italienne et norvégienne).

L'outil développé au cours de cette thèse pourra être utilisé pour de futures études épidémiologiques qui permettront de connaître l'exposition au rayonnement ultraviolet solaire de populations et de mieux comprendre son rôle dans l'étiologie de diverses maladies, telles que les cancers cutanés.

Sommaire

Résumé.....	5
2. Introduction.....	9
1.1 Evolution des habitudes face au soleil.....	9
1.2 Impact du rayonnement ultraviolet sur la santé.....	12
1.2.1 Qu'est ce que le rayonnement UV ?.....	12
1.2.2 Actions locales.....	13
1.2.3 Effets positifs.....	15
1.2.4 Cancers cutanés non mélanomes.....	15
1.2.5 Mélanomes.....	16
1.2.6 Pathologies oculaires.....	27
1.2.7 Système immunitaire.....	27
1.2.8 Résumé de l'action du rayonnement UV sur la santé.....	28
1.3 Exposition au rayonnement ultraviolet.....	29
1.3.1 Facteurs influençant la dose de rayonnement UV.....	29
1.3.2 Mesure de l'irradiation UV.....	32
3. Objectif de la thèse.....	40
4. Outils de mesure de l'exposition au rayonnement UV.....	47
3.1 Données de rayonnement UV.....	47
3.1.1 Des images Météosat aux données de rayonnement solaire.....	47
3.1.2 Des données de rayonnement solaire total aux données de rayonnement UV.....	51
3.2 Atlas de l'irradiation UV en Europe.....	52
3.2.1 Présentation de l'Atlas.....	52
3.2.2 Distribution spatiale de l'irradiation dans l'ultraviolet.....	55
3.2.3 Evolution temporelle.....	62
3.2.4 Estimation des données manquantes au nord de l'Europe en hiver.....	65
3.3 Comparaison avec l'atlas d'irradiation UV de l'action COST 726.....	71
3.4 Discussion.....	75
5. Exposition au rayonnement UV solaire de populations européennes.....	78
4.1 Estimation de l'exposition individuelle au rayonnement UV solaire.....	78
4.2 Résultats des études auprès de populations européennes.....	83
4.2.1 Population française.....	83
4.2.2 Population italienne.....	94
4.2.3 Population norvégienne.....	104
4.3 Comparaison entre les populations.....	118

4.4	Exposition au soleil et incidence et mortalité des mélanomes cutanés en Europe.....	125
4.5	Discussion	127
4.5.1	Enquête pilote en France.....	127
4.5.2	Expositions des individus et des populations en Europe	128
6.	Discussion	131
7.	Références	138
8.	Glossaire.....	154
9.	Annexes.....	156
7.1	Annexe A : Cartographie de l'irradiation journalière UV totale en Europe à l'échelle des pays	156
7.2	Annexe B : Questionnaire de l'enquête en population du projet EuroSun	177
7.3	Annexe C : Articles publiés et soumis	186

1. Introduction

1.1 Evolution des habitudes face au soleil

Autrefois, la mode incitait à garder un teint clair, en particulier dans les classes sociales élevées. Les personnes protégeaient leur peau du soleil, en utilisant par exemple des ombrelles ou de larges chapeaux. Mais dès la fin du 19^{ème} siècle, les gens commencent à s'exposer de plus en plus fréquemment au soleil pour des activités récréatives telles que des activités sportives en plein air (Albert & Ostheimer 2002). Dans les années 1910, le bronzage et même les coups de soleil sont de plus en plus considérés comme le signe d'une bonne santé car ils reflètent une exposition au soleil et au « grand air » (Albert & Ostheimer 2002). Mais cette tendance à rechercher l'exposition au soleil reste encore limitée.

Les effets positifs du rayonnement UV sur la santé a mené à l'apparition des photothérapies utilisant ces longueurs d'onde. En 1903, Finsen a obtenu le prix Nobel de médecine pour ses travaux sur la photothérapie utilisant le rayonnement UV contre la tuberculose cutanée. Dans les années 1920, on fait le lien entre l'exposition aux rayonnements de longueurs d'onde inférieures à 313 nm, correspondant aux longueurs d'onde les plus courtes du rayonnement ultraviolet (UV), et une protection contre le rachitisme (Albert & Ostheimer 2003a). Des traitements sont alors développés. Ils consistent à exposer les enfants au soleil ou à des lampes émettant un rayonnement UV (Martin et coll. 2009). L'exposition à ces longueurs d'onde est vue comme une forme de médecine préventive et les autorités de santé publique recommandent d'augmenter l'exposition solaire (Randle 1997). L'exposition au rayonnement ultraviolet solaire et artificiel est de plus en plus utilisée comme prophylaxie et photothérapie, et les bains de soleil deviennent fréquents (Albert & Ostheimer 2003a).

Dès les années 1890, on suspecte des effets néfastes sur la santé. Le dermatologue Paul Gerson Unna à Hambourg fait le lien entre des lésions précancéreuses et une exposition au soleil sur le long terme. Le dermatologue français William Dubreuilh montre en 1907 que les kératoses précancéreuses et les cancers de la peau sont fréquents chez les personnes travaillant en extérieur, et sur les parties du corps exposées au soleil, suggérant qu'ils seraient liés à une exposition professionnelle (Albert & Ostheimer 2002), mais ces travaux passent inaperçus à l'époque. A l'issue de la première guerre mondiale, les femmes se libèrent et commencent à avoir de plus en plus d'occupations en extérieur (sport, balades,...). Peu à peu, le teint halé n'est plus considéré comme le reflet de journées de travail passées en extérieur. Les bains de soleil deviennent populaires et un bronzage devient le signe d'une bonne santé. A la fin des années 1920, le bronzage est à la mode et les magazines l'encouragent pour améliorer la santé et l'apparence (Martin et coll. 2009).

C'est seulement à partir des années 1930 que la propriété carcinogène du rayonnement UV est reconnue. En 1932, les services de santé publique des Etats-Unis commencent à encourager une attention particulière vis-à-vis de la surexposition au soleil et déconseillent l'exposition aux heures les plus ensoleillées de la journée en été. Et c'est dans les années 1940 et 1950 que l'on mène les premières études épidémiologiques sur le rôle de l'exposition solaire dans l'étiologie des cancers cutanés (Albert & Ostheimer 2003b).

Bien que les messages de prévention sur la dangerosité du rayonnement UV du soleil soient généralement bien assimilés, les gens continuent encore de s'exposer (Murphy, 2002 ; Goulart, Wang, 2010). Le bronzage est encore aujourd'hui souvent perçu comme un signe de bonne santé et de beauté (Miles et coll. 2005 ; Young 2004 ; Olson et coll. 2008).

En 2001, dans le cadre de la cohorte SU.VI.MAX (Suppléments en Vitamines et Minéraux Anti-oxydants) développée par l'Institut de Veille Sanitaire français (InVS), une enquête transversale a permis de collecter des informations concernant le comportement des Français vis-à-vis de l'exposition à l'UV naturel (le rayonnement solaire) et artificiel (les cabines de bronzage) (Ezzedine et coll. 2008). D'après cette étude, l'esthétisme et la préparation à l'exposition des vacances sont les deux principales motivations invoquées pour l'utilisation des cabines de bronzage. Les utilisateurs d'UV artificiel se protègent moins, en portant des T-shirts ou en se mettant à l'ombre par exemple, après les séances car ils se sentent protégés par leur bronzage. Ces pratiques entraînent une surexposition au rayonnement UV solaire. De

plus, les utilisateurs de cabines de bronzage sont parmi les grands consommateurs de crème solaire dont l'utilisation augmenterait le temps d'exposition au soleil (Autier et coll. 2007).

L'exposition au rayonnement UV artificiel et l'exposition au soleil sont fortement liées. Les comportements qui visent à rechercher l'une de ces expositions reflètent souvent le désir de bronzer et l'utilisation d'appareil de bronzage est souvent accompagnée de bains de soleil (Ezzedine et coll. 2008 ; Boldeman et coll. 1997 ; Køster et coll. 2009).

Ces expositions n'ont pas le même impact sur tous les individus. Certaines personnes sont plus sensibles au rayonnement ultraviolet. Pour définir les personnes à risque, Fitzpatrick met en place en 1973 une classification des types de peau en fonction de la réaction au soleil. Le phototype I regroupe ceux qui « brûlent mais ne bronzent pas », le phototype II ceux qui « brûlent toujours et bronzent avec difficulté », le phototype III ceux qui « brûlent mais bronzent bien », le phototype IV ceux qui « bronzent sans jamais brûler », le phototype V regroupe les asiatiques mats et les méditerranéens et le phototype VI les noirs d'Afrique et d'Amérique, les aborigènes australiens et les indiens du sud de l'Inde. Des campagnes de prévention incitant les populations à se protéger du soleil aux moments les plus ensoleillés ont été mises en place dans les populations à risque. Une part importante de la population australienne a des origines britanniques. Ces individus ont tendance à avoir une peau claire et un phototype sensible. De plus, ils sont exposés à de fortes doses. Dans les années 1970, dans le Queensland en Australie, on enseigne à la population à repérer des signes précoces de cancers cutanés (Smith 1979). Puis le programme 'sun smart' est lancé dans les années 1980 à l'échelle nationale (Marks 1999). Les messages de prévention sont aussi diffusés en Ecosse (MacKie & Hole 1992) et en Italie (Cristofolini et coll. 1993). Aux Etats-Unis, au Canada, au Royaume-Uni et en Suède, des programmes nationaux ont commencé dans les années 1980 ou au début des années 1990 (Robinson, Rademaker, et coll. 1997 ; Rivers & Gallagher 1995 ; Miles et coll. 2005 ; Bränström et coll. 2006).

1.2 Impact du rayonnement ultraviolet sur la santé

1.2.1 Qu'est ce que le rayonnement UV ?

En 1801, Johann Ritter a découvert la région ultraviolette du spectre solaire. Il a montré une action chimique des longueurs d'onde plus courtes que le violet, de 100 à 400 nm, sur le chlorure d'argent. Cette partie du spectre correspond au rayonnement UV. Il est subdivisé en trois groupes en fonction des caractéristiques physiques des différentes longueurs d'onde : UVC de 100 à 280 nm, UVB de 280 à 315 nm et les UVA de 315 à 400 nm. Seulement 1% du rayonnement de longueur d'onde supérieure à 315 nm est absorbé par l'ozone de l'atmosphère et 90% pour les longueurs d'onde inférieures à 315 nm (Armstrong 1994). En pratique, les photobiologistes utilisent parfois une subdivision différente, en fonction des caractéristiques biologiques du rayonnement ultraviolet : UVC de 200 à 290 nm, les UVB de 290 à 320 nm et les UVA de 320 à 400 nm (Diffey 2002). Les rayonnements UVC ainsi définis (de longueur d'onde inférieure à 290 nm) n'atteignent pas la surface de la Terre, sauf à très haute altitude où la couche atmosphérique traversée par les UV est moins épaisse. La séparation à 320 nm correspond à la longueur d'onde au-delà de laquelle le rayonnement traverse le verre. De plus, les effets biologiques sont plus importants pour les longueurs d'onde plus courtes que 320 nm.

Le flux d'énergie du rayonnement s'exprime en Watt par unité de surface (par exemple : W/cm^2). L'irradiation reçue par un individu ou par une surface dépend de ce flux d'énergie et du temps d'exposition. Elle s'exprime en Joules par unité de surface (par exemple : J/cm^2) ou en Wattheures par unité de surface (Wh/cm^2). Par exemple, une dose de 100 Wh correspond à la dose reçue avec une puissance de 100 watts pendant une heure ou avec une puissance de 50 Watts pendant deux heures. 1 Wh correspond à 3600 Joules.

Lorsque l'irradiation est exprimée en fonction de la longueur d'onde, on parle de distribution spectrale. Il est important de la prendre en compte car la nature des effets du rayonnement UV dépend de la longueur d'onde (Setlow 1974 ; Agar et coll. 2004 ; Pearse et coll. 1987).

1.2.2 Actions locales

L'érythème, que l'on appelle communément un coup de soleil, est une inflammation de la peau due à une surexposition au rayonnement UV. Il est principalement dû aux UVB mais les UVA sont aussi en cause dans leur apparition (Setlow 1974). La figure 1.1 montre le spectre d'action du rayonnement sur cette altération, sur les érythèmes et sur les cataractes. Un spectre d'action définit l'intensité du rôle de chaque longueur d'onde dans le développement d'une maladie. Les effets érythémateux permettent de classer les types de peau selon leur sensibilité, comme avec la classification de Fitzpatrick.

L'UVA induit sur le long terme un vieillissement prématuré de la peau par une diminution de l'efficacité de l'élastose dans le tissu conjonctif. La peau se dépigmente et se détend et des rides apparaissent (Rabe et coll. 2006).

Après une exposition au soleil, on observe souvent une augmentation de la pigmentation de la peau. La pigmentation est due à la mélanine qui protège la peau du rayonnement ultraviolet. Il s'agit d'un mécanisme de défense dû à l'exposition. Il existe deux types de pigmentation de la peau provoquée par l'exposition à l'UV. L'exposition à l'UVA, provoque chez certains individus une pigmentation qui dépend de la quantité de mélanine déjà présente. Cette pigmentation peut durer jusqu'à 24 heures après l'exposition (Costin & Hearing 2007). Le deuxième type de pigmentation est la pigmentation adaptative, elle est visible quelques jours après l'exposition et peut durer plusieurs mois (Costin & Hearing 2007). La peau réagit à cette agression en synthétisant des nouvelles molécules de mélanine. Une forte dose d'UVA et/ou d'UVB est responsable de cette réaction. Elle sert à protéger la peau des effets de l'ultraviolet en limitant sa pénétration dans l'épiderme, mais cette protection est faible (Brenner & Hearing 2008 ; Miyamura et coll. 2011).

Le rayonnement UV altère la structure de l'ADN en fonction de la longueur d'onde (figure 1.1). En temps normal, les mécanismes de réparation de l'ADN corrigent ces dommages. Mais s'ils sont trop nombreux, ils provoquent une apoptose des cellules concernées voire des tumeurs (Matsumura & Ananthaswamy 2004). Le rayonnement UV engendre notamment des mutations du gène TP53. Ce gène code pour la protéine p53 qui agit comme un suppresseur de tumeurs. Elle empêche des cellules de croître ou de se diviser de manière incontrôlée et prévient ainsi les cancers. (Gallagher & Lee 2006 ; Meeran et coll. 2008).

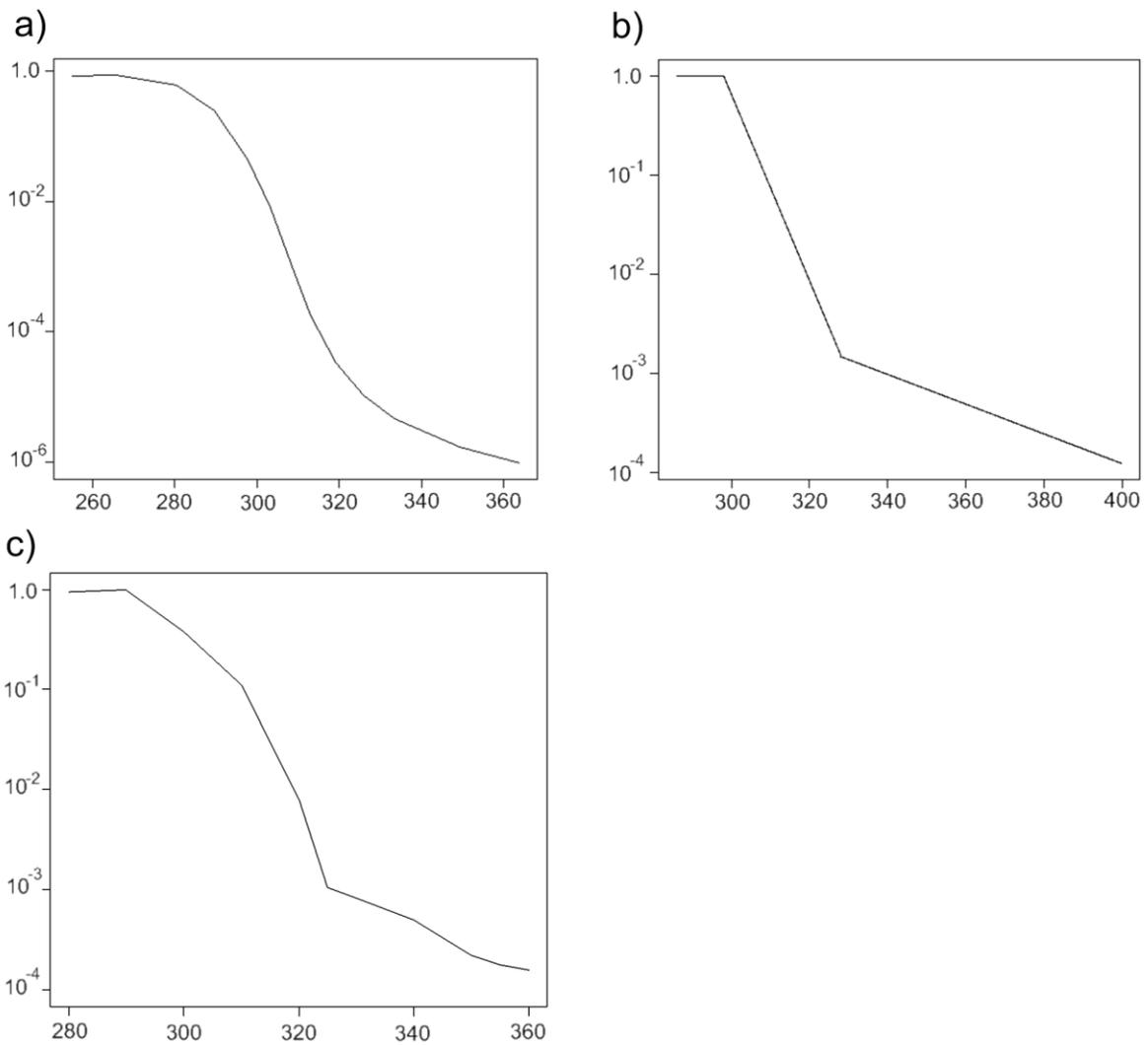


Figure 1.1 : Spectres d'action du rayonnement UV sur (a) les mutations de l'adn (Setlow 1974), (b) l'érythème (<http://uv.biospherical.com/version2/.%5Cdozerates%5CCIE.txt>, consulté de le 22 janvier 2012) et (c) les cataractes (Turnbull, 1977) en fonction de la longueur d'onde.

1.2.3 Effets positifs

Diverses études suggèrent un effet protecteur de l'exposition au soleil sur certains types de cancers (Boffetta et coll. 2008 ; Krickler & Armstrong 2006 ; John et coll. 2004 ; Smedby et coll. 2005 ; Luscombe et coll. 2001 ; John et coll. 2007 ; Hughes et coll. 2004). L'explication avancée est le rôle de l'UVB dans la synthèse de vitamine D. Mais ces études utilisent des données écologiques et des approximations de l'exposition au rayonnement UV, comme le temps passé en extérieur. Un groupe de travail du Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC) a étudié la relation entre l'exposition à l'UV et une éventuelle diminution de risque pour certains cancers. L'exposition à l'UV diminue le risque seulement pour le cancer du colon.

Le rayonnement UV est utilisé en photothérapie contre certaines maladies comme le psoriasis, la dermatite atopique (York & Jacobe 2010) et le rachitisme (Rajakumar et coll. 2007).

D'un point de vue sociétal, certaines personnes considèrent le bronzage induit par l'exposition au rayonnement solaire comme un atout esthétique. Il est souvent considéré comme un facteur améliorant l'apparence. (Goulart & Wang 2010 ; Cafri et coll. 2009 ; Börner et coll. 2009).

1.2.4 Cancers cutanés non mélanomes

Le rayonnement UV a été classé en cancérigène de groupe 1 c'est-à-dire en cancérigène pour l'homme par le CIRC en 2009 (El Ghissassi et coll. 2009). Il est notamment un facteur de risque pour les cancers de la peau. Une étude en laboratoire a montré que l'exposition chronique (plusieurs mois) au rayonnement UV induit des cancers cutanés chez la souris (Kripke & Fisher 1976).

Mais la causalité entre les cancers de la peau et l'exposition au soleil est complexe. L'effet de l'exposition au rayonnement UV sur les cancers de la peau dépend du type de cancer (MacKie 2006 ; Young 2009).

Les cancers cutanés non mélanomes les plus répandus sont les carcinomes baso-cellulaires (BCC) qui se développent dans la couche basale de l'épiderme et les carcinomes épidermoïdes (ou spino-cellulaires = SCC).

Les BCC se développent souvent sur des sites exposés tels que la tête et le cou. Leur croissance est lente et ils sont souvent détectés avant d'envahir d'autres tissus (Samarasinghe et coll. 2011). Les BCC ne semblent pas liés à l'exposition cumulative au cours de la vie. Ils seraient plutôt liés à une surexposition intermittente récréative ou à des épisodes de coups de soleil (MacKie 2006 ; English et coll. 1997).

Les SCC se développent aussi sur des zones exposées au soleil mais ont tendance à être plus agressifs que les BCC. Ils sont liés à l'exposition solaire accumulée sur toute la durée de la vie. L'exposition professionnelle est donc un facteur de risque important pour le SCC. Ce type d'exposition est responsable de l'augmentation du risque de développement de kératose actinique, précurseur de SCC (Padilla et coll. 2010 ; English et coll. 1997 ; MacKie 2006 ; Kennedy et coll. 2003). Même si le SCC semble plus particulièrement lié à l'exposition professionnelle (Schmitt et coll. 2011), il est aussi lié à l'exposition récréative (Young 2009).

Pour ces deux types de cancers cutanés, l'exposition pendant l'enfance joue un rôle particulier. En effet, des études ont montré une incidence deux fois plus faible en Australie chez les migrants nés au Royaume-Uni que chez les natifs australiens (English et coll. 1997).

1.2.5 Mélanomes

Les mélanomes sont des cancers de la peau qui se développent à partir de mélanocytes, les cellules qui produisent la mélanine. Ils sont responsables de plus de décès que les autres cancers cutanés. La mortalité augmente depuis les années 1950 dans les pays développés. Dans certains pays, elle est suivie d'une diminution. En Australie, dans les pays nordiques (Danemark, Finlande, Suède, Norvège) et aux USA (Roush et coll. 1992) on observe un accroissement jusqu'aux générations nées autour de 1930-1935, suivi d'une diminution dans les cohortes les plus récentes. Au Royaume-Uni et au Canada (Elwood & Lee 1974), la mortalité augmente jusqu'aux générations nées pendant la seconde guerre mondiale, puis se

stabilise ou diminue légèrement dans les cohortes les plus récentes. En France, en Italie et en ex-Tchécoslovaquie, elle est en forte augmentation constante. Au Japon, on observe une augmentation régulière mais faible (Severi et coll. 2000).

Les études sur le lien entre l'exposition solaire et l'incidence des mélanomes montrent un risque lié à une exposition intermittente, non professionnelle. Elles montrent aussi un effet de la migration. Les australiens originaires d'Europe, où il y a un plus faible taux d'incidence et souvent une irradiation UV plus faible qu'en Australie, ont un taux d'incidence globalement plus élevé que les populations de leur pays européen d'origine mais plus faible que la population australienne (Holman & Armstrong 1984 ; English et coll. 1997).

Mélanome et UV

On observe les plus fortes incidences en Australie et en Nouvelle-Zélande (Curado et coll. 2007 ; Parkin et coll. 2002). L'exposition dans l'enfance jouerait un rôle plus important encore que l'exposition cumulée à l'âge adulte sur le développement des mélanomes (Autier & Doré 1998 ; Whiteman et coll. 2001). Avoir eu au moins un coup de soleil sévère pendant l'enfance est associé à un doublement du risque de mélanomes (Ma et coll. 2007). Plusieurs études sur des populations de migrants suggèrent l'importance de l'exposition précoce. Les habitants du comté de Los Angeles ayant émigré de latitudes plus élevées ont un risque plus faible de développer un mélanome que les natifs du comté (Mack & Floderus 1991). Les migrants vivant en Australie et nés en dehors de l'Océanie ont un risque plus faible de mortalité par mélanome que les habitants nés en Australie. Le risque dépend de la durée de séjour en Australie et de l'âge d'arrivée (Khlal et coll. 1992). D'autres études ont montré que les migrants ayant grandi dans les pays fortement ensoleillés ont plus de risque de développer un mélanome que les individus ayant grandi dans un pays plus faiblement ensoleillé, l'exposition à l'âge adulte étant égale (Whiteman et coll. 2001).

Les mélanomes sont aussi plus souvent liés à une exposition intermittente (English et coll. 1997 ; Gandini et coll. 2005 ; Lea et coll. 2007). Les personnes ayant une peau claire ont plus de coups de soleil et ont plus de risque de développer un mélanome (Holman et coll. 1983 ;

Kricker et coll. 1993). Des études ont suggéré pour cette maladie un rôle protecteur de l'exposition chronique cumulée au cours de la vie (Kennedy et coll. 2003 ; Garland 2003). Les ouvriers qui travaillent en extérieur ont moins de risque de développer un mélanome que ceux qui travaillent en intérieur. En fait, des études plus spécifiques montrent une relation plus complexe de la causalité entre l'exposition au rayonnement UV et les mélanomes. Les différentes formes d'exposition ont été étudiées pour les différentes formes de mélanomes (MacKie 2006). Le mélanome à extension superficielle est la forme la plus commune de mélanome et est principalement dû à des épisodes d'exposition au soleil courts et intenses dans l'enfance (Porras & Cockerell 1997). La forme nodulaire est la plus agressive car elle a une première phase de croissance verticale mais le rôle de l'UV dans son développement n'est pas clairement établi. Le mélanome lentigineux (ou mélanome de Dubreuilh) affecte les individus plus âgés et est influencé par une exposition chronique (Katsambas & Nicolaidou 1996).

Une étude conduite par la Mutualité Sociale Agricole (communiqué du 19 septembre 2011, www.msa.fr) a montré un plus faible taux d'incidence pour la plupart des cancers étudiés dans la population d'agriculteurs que dans la population française générale. Cependant, le taux d'incidence des mélanomes cutanés est plus élevé. Ce résultat est inattendu car plusieurs études ont suggéré un rôle protecteur de l'exposition chronique, à laquelle sont sujets les agriculteurs, sur le développement des mélanomes.

Longueurs d'onde en cause dans le mélanome

Une problématique dans la recherche sur les mélanomes est de définir le spectre d'action, et en particulier de définir le rôle de l'UVB et le rôle de l'UVA. On suspecte depuis longtemps que les mélanomes malins sont associés à l'exposition au soleil et que l'UVB est en cause puisqu'ils sont à l'origine des érythèmes et de certaines mutations de l'ADN (Snyder & May 1975).

Mais, on suspecte aussi le rôle des longueurs d'onde plus grandes (Setlow 1974 ; Wang et coll. 2001 ; Lim et coll. 2001 ; Autier et coll. 2011). Des études récentes suggèrent que l'UVA, mutagène pour l'homme (Robert et coll. 1996), est un carcinogène important dans les cellules souches cutanées (Agar et coll. 2004). L'irradiation UVA est 30 à 40 fois plus importante que l'UVB sous le soleil de midi durant l'équinoxe à latitude tempérée sous un

ciel clair (Pearse et coll. 1987). De plus, le rayonnement UVA pénètre plus la peau : la couche de l'épiderme, qui recouvre la couche basale, absorbe 56% des UVB et 27% des UVA dans les peaux caucasiennes (Garland 2003). Le nombre de photons d'UVA atteignant les mélanocytes, cellules à partir desquelles se développent les mélanomes et situées dans la couche basale, est 60 à 80 fois plus important que le nombre de photons d'UVB. L'UVB a donc un rôle dans le développement des mélanomes mais il est aussi possible que l'UVA soit en cause dans l'apparition de cette maladie.

Saisonnalité de l'incidence des mélanomes

Il existe une variation saisonnière avec un pic en été, dans les deux hémisphères, dont les causes sont encore loin d'être élucidées : soit un surdiagnostic dû par exemple aux variations des tenues vestimentaires en fonction de la saison, soit une surexposition à l'UV.

Dix-neuf études dans différentes populations à peau claire aux Etats-Unis, en Europe et en Australie ont systématiquement montré que l'incidence des mélanomes cutanés est plus importante en été qu'en hiver, quelle que soit la latitude (Scotto & Nam 1980 ; Hinds et coll. 1981 ; Holman & Armstrong 1981 ; Polednak 1984 ; Swerdlow 1985 ; Schwartz et coll. 1987 ; Akslen & Hartveit 1988 ; Braun et coll. 1994 ; Akslen 1995 ; Blum et coll. 1997 ; Lambe et coll. 2003 ; Schmid-Wendtner et coll. 2004 ; Boniol et coll. 2005 ; Boniol et coll. 2006 ; Nikolaou et coll. 2007 ; Quatresooz et coll. 2008 ; Crocetti et coll. 2009 ; Jayasekara et coll. 2009 ; Bakos et coll. 2010).

Les différents sites anatomiques ne sont pas exposés de la même manière au soleil. Elwood a étudié l'incidence des cas de mélanomes en Colombie Britannique (Elwood, 1998). Avant 50 ans, le risque de mélanomes est plus élevé sur les sites anatomiques exposés de manière intermittente. Après 50 ans, ils apparaissent plus souvent sur les sites exposés en permanence. Nous nous sommes intéressés à la saisonnalité du diagnostic des mélanomes par site anatomique et par sexe pour étudier l'impact de l'exposition au soleil sur la distribution anatomique des mélanomes (Chaillol et coll. 2011).

Les recherches sur les variations saisonnières de l'incidence en fonction de l'épaisseur de Breslow peuvent aider à la compréhension du rôle des rayonnements UV sur l'augmentation de l'incidence des mélanomes. L'épaisseur de Breslow est une mesure de la phase de

croissance verticale d'un mélanome. C'est un indice fort de la survie : plus un mélanome est épais, plus grande sera la probabilité de métastase distante vers les ganglions lymphatiques ou les organes distants et donc plus la probabilité de décès sera grande.

Nous avons réalisé une étude sur les données d'incidence des mélanomes cutanés en Irlande du Nord. Elles sont disponibles depuis 1984, grâce à un registre du cancer du Northern Ireland Cancer Registry (NICR), registre national basé sur la population. Le NICR couvre une population de 1 740 000 habitants avec un fort taux de vérification microscopique et un très faible taux de cas basé uniquement sur le certificat de décès. L'exhaustivité de l'enregistrement pour les mélanomes a été estimée à 98,5% à partir d'un échantillon (McMullen, 2004). L'analyse a été conduite sur 3 868 cas de mélanomes cutanés invasifs (1 453 chez les hommes et 2 415 chez les femmes) diagnostiqués de 1984 à 2006.

La saisonnalité de l'incidence des mélanomes a été étudiée avec le test de Nam. La méthode est basée sur le ratio du nombre de cas de mélanomes diagnostiqués en été (juin, juillet et août) sur le nombre de cas de mélanomes diagnostiqués en hiver (décembre, janvier et février). Le test a été utilisé pour tester la significativité statistique de l'écart à un ratio de 1,0 (pas de variation saisonnière) et pour calculer l'intervalle de confiance à 95% (IC 95%) de ce ratio. Cette méthode n'utilise que six mois, soit environ la moitié des données. Pour utiliser l'ensemble des données dans l'étude de la saisonnalité, nous avons analysé l'incidence des mélanomes dans une régression de Poisson modifiée en zéro (« Zero-Inflated Poisson »). Pour prendre en compte la taille de la population par classe d'âge pour chaque sexe et pour chaque année, nous l'introduisons en variable « offset » dans le modèle. Nous avons utilisé l'année et le mois de diagnostic comme variables prédictives. Comme nous supposons que le motif de saisonnalité est corrélé avec l'irradiation des UV solaires, le mois de diagnostic a été entré dans le modèle par couple de mois (« mois-UV ») : juin et juillet (irradiation UV solaire maximale) ont été codés 6, mai et août ont été codés 5, avril et septembre ont été codés 4, mars et octobre ont été codés 3, février et novembre ont été codés 2 et janvier et décembre ont été codés 1. Cette dernière catégorie a été utilisée en catégorie de référence. Ce classement est corrélé avec la dose de radiation UV atteignant la surface terrestre qui, en moyenne, augmente de janvier à juin et diminue de juillet à décembre, le solstice d'été étant autour du 21 juin. Cette analyse multivariée a été stratifiée sur le sexe et l'épaisseur de Breslow : mélanomes fins (< 2 mm) et épais (≥ 2 mm). La coupure a été prise à 2 mm d'après le système de classification des tumeurs en stades de l'American Joint Committee sur le Cancer (Balch et

coll. 2009). Une analyse multivariée a aussi été conduite avec une stratification sur l'âge en deux catégories (< 50 ans et \geq 50 ans) et sur le site anatomique.

En moyenne, le nombre de mélanomes invasifs diagnostiqués est supérieur en été de 39% (ratio de Nam : 1,39 et IC 95% : 1,27-1,52) par rapport à l'hiver. Cette saisonnalité est plus forte pour les mélanomes de moins de 2 mm (Figure 1.1). Chez les hommes de moins de 50 ans, la variation saisonnière n'est présente que pour les mélanomes de moins de 2 mm (Tableau 1.1). Chez les hommes de 50 ans et plus, nous n'observons pas de variation saisonnière pour les mélanomes fins ni pour les mélanomes épais. Pour les mélanomes de moins de 2 mm chez les femmes, une saisonnalité marquée est observée avec une amplitude similaire dans les deux catégories d'âge. En revanche, nous n'observons pas de variabilité saisonnière pour les mélanomes plus épais.

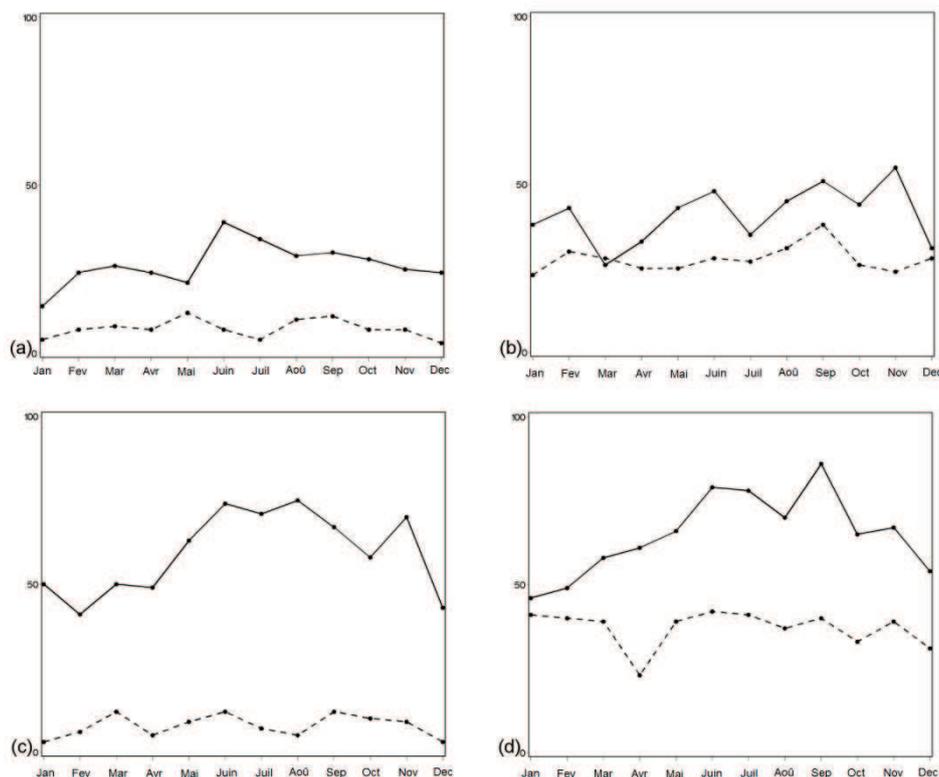


Figure 1.2 : Nombre mensuel de mélanomes cutanés invasifs de moins de 2 mm d'épaisseur (lignes continues) ou de 2 mm d'épaisseur ou plus (lignes pointillées) diagnostiqués en Irlande du Nord au cours de la période 1984-2006 chez les hommes de moins de 50 ans (a), les hommes de 50 ans et plus (b), les femmes de moins de 50 ans (c) et les femmes de plus de 50 ans (d)

Le ratio été/hiver des mélanomes invasifs est de 1,47 (IC 95% : 1,31-1,65) chez les femmes et de 1,26 (IC 95% : 1,09-1,46) chez les hommes. Une stratification plus grande sur l'épaisseur de Breslow a montré que le ratio été/hiver était plus élevé et significatif pour les mélanomes invasifs de moins de 1 mm chez les deux sexes et pour les mélanomes de 1 à 1,99 mm chez les femmes. Les variations saisonnières diminuent régulièrement avec l'augmentation de l'épaisseur de Breslow.

Tableau 1.1 : Ratio été/hiver¹ des mélanomes cutanés invasifs en Irlande du Nord au cours de la période 1984-2006 en fonction du genre et de l'épaisseur de Breslow

	Femmes				Hommes			
	No.		Ratio	95% IC	No.		Ratio	95% IC
	Eté	Hiver			Eté	Hiver		
Tous invasifs	704	475	1,47	1,31-1,65	400	319	1,26	1,09-1,46
<1mm	334	205	1,63	1,37-1,94	160	110	1,45	1,14-1,85
1-2mm	117	81	1,44	1,09-1,91	73	64	1,14	0,81-1,61
2-4mm	80	64	1,25	0,90-1,73	58	46	1,26	0,87-1,83
≥4mm	66	62	1,06	0,75-1,51	50	53	0,94	0,64-1,39
Inconnue	107	63	1,70	1,26-2,30	59	46	1,28	0,87-1,89

¹Nombres de mélanomes diagnostiqués en juin, juillet et août comparés aux nombres de mélanomes diagnostiqués en décembre, janvier et février

L'analyse multivariée stratifiée sur l'épaisseur de Breslow et sur l'âge a pris en compte toutes les données disponibles sur les mélanomes invasifs diagnostiqués de 1984 à 2006 (Tableau 1.2). Chez les hommes comme chez les femmes, quatre cinquièmes des mélanomes épais sont apparus à partir de 50 ans. Une saisonnalité significative a été observée pour le risque de mélanomes fins chez les moins de 50 ans. Chez les femmes, une saisonnalité significative similaire a été observée pour le risque de mélanomes fins avant et après 50 ans. Aucune saisonnalité significative n'a pu être mise en évidence pour les mélanomes épais quel que soit

l'âge. Pour les hommes et pour les femmes, les données suggèrent une saisonnalité pour les mélanomes épais diagnostiqués avant 50 ans mais qui n'est pas significative.

Les deux tiers des mélanomes fins ou épais chez les femmes ont été diagnostiqués sur les membres, contre un tiers seulement chez les hommes. Pour chacun des sexes, la saisonnalité est remarquable pour les mélanomes fins diagnostiqués sur les membres inférieurs et supérieurs. Aucune saisonnalité n'est perceptible pour les mélanomes fins diagnostiqués sur la tête et le cou ni sur le tronc, ni pour les mélanomes épais quel que soit le site.

Le résultat principal de cette étude a été de mettre en évidence, pour les hommes et pour les femmes, une variation saisonnière substantielle pour les mélanomes fins diagnostiqués sur les membres et presque absente pour les mélanomes fins diagnostiqués sur la tête et le cou et sur le tronc. Aucune saisonnalité n'a été détectée pour les mélanomes épais. Les mélanomes des femmes d'Irlande du Nord se développent plus fréquemment sur les membres, tandis que chez les hommes, ils sont plus souvent diagnostiqués sur la tête et le cou et sur le tronc. Par conséquent, la faible variation saisonnière de l'incidence des mélanomes fins chez les hommes de moins de 50 ans et l'absence de variation saisonnière chez les hommes de 50 ans et plus peut être due à la prédominance des mélanomes sur la tête et le cou et sur le tronc.

Ces différences qui ont été observées dans la saisonnalité ne sont pas des résultats isolés. Les résultats sont cohérents avec les études antérieures (Scotto & Nam 1980 ; Hinds et coll. 1981 ; Polednak 1984 ; Swerdlow 1985 ; Schwartz et coll. 1987 ; Akslen & Hartveit 1988 ; Blum et coll. 1997 ; Schmid-Wendtner et coll. 2004 ; Boniol et coll. 2005 ; Nikolaou et coll. 2007 ; Crocetti et coll. 2009 ; Jayasekara et coll. 2009 ; Bakos et coll. 2010). Globalement, les variations saisonnières sont toujours plus marquées chez les femmes que chez les hommes, souvent plus marquées chez les individus les plus jeunes et généralement plus marquées pour les mélanomes diagnostiqués sur les membres que pour les mélanomes diagnostiqués sur la tête et le cou et le tronc. La variation saisonnière semble être plus particulièrement prononcée pour les mélanomes superficiels extensifs, mais les mélanomes lentigineux suivent aussi souvent une variation saisonnière. Cinq études ont trouvé une saisonnalité plus importante pour les lésions fines. Une étude en milieu hospitalier réalisée en Grèce sur 400 individus n'a trouvé aucun changement de la saisonnalité en fonction de l'épaisseur de Breslow (Nikolaou

et coll. 2007). Les observations sur la population d'Irlande du Nord peuvent être considérées comme valides pour la plupart des populations à peau claire.

Nos résultats soutiennent l'hypothèse de l'induction par le rayonnement UV des mélanomes pendant la saison ensoleillée. Mais cette hypothèse n'est cohérente que pour les mélanomes fins se développant sur les membres. Ces différences anatomiques ne sont vraisemblablement pas dues à des différences dans l'exposition au soleil entre ces sites. Chez les habitants d'Irlande du Nord, le tronc n'est pas exposé en hiver mais il est sujet à des expositions intermittentes et fortes au soleil pendant l'été. Les effets combinés de l'induction par le rayonnement UV avec une détection précoce devraient aussi résulter en une variation saisonnière de l'incidence des mélanomes développés sur le tronc. Or cela n'a pas été observé.

La tête et le cou sont constamment exposés au rayonnement UV solaire mais l'intensité de cette radiation a une forte saisonnalité. D'après les tableaux de Diffey et Elwood, la dose d'UV érythémateux ambiante en Irlande du Nord est 12,6 fois plus importante en été qu'en hiver. Or, de même que pour le tronc, les mélanomes diagnostiqués sur ce site anatomique ne montrent pas de variation saisonnière.

Une exposition intense à l'UV est susceptible de déclencher un développement rapide (en quelques semaines ou quelques mois) des mélanomes fins sur les membres. Comme l'exposition à l'UV des membres est intermédiaire entre celle du tronc et celle de la tête et du cou, l'influence variable de la saisonnalité sur les sites distaux (les membres) et axiaux (la tête et le cou et le tronc) signifierait que le développement des mélanomes n'est pas seulement influencé par l'exposition au soleil mais aussi par le site anatomique.

Tableau 1.2 : Risque relatif des mélanomes invasifs cutanés en Irlande du Nord ajusté sur l'année du diagnostic estimé à partir du modèle de Poisson chez les hommes et chez les femmes, par groupe d'âge et par épaisseur de Breslow, 1984-2006

	Adj. RR	95%IC		Adj. RR	95%IC		Adj. RR	95%IC		Adj. RR	95%IC	
	<u>Hommes de moins de 50 ans</u>						<u>Hommes de 50 ans et plus</u>					
	BT<2mm (n=318)			BT≥2mm (n=87)			BT<2mm (n=492)			BT≥2mm (n=333)		
Mois-UV												
Jan-Déc	(réf.)	-	-	(réf.)	-	-	(réf.)	-	-	(réf.)	-	-
Fév-Nov	1,30	0,83	2,04	2,02	0,79	5,15	1,40	1,00	1,95	1,06	0,70	1,61
Mar-Oct	1,40	0,90	2,18	2,16	0,86	5,45	0,99	0,69	1,41	1,08	0,71	1,64
Avr-Sep	1,45	0,93	2,26	2,58	1,04	6,35	1,26	0,89	1,78	1,24	0,83	1,86
Mai-Aou	1,37	0,87	2,16	3,15	1,31	7,60	1,22	0,87	1,71	1,11	0,73	1,68
Juin-Juil	1,91	1,26	2,90	1,57	0,59	4,15	1,21	0,86	1,71	1,07	0,71	1,62
mois-UV en variable continue	1,10	1,03	1,18	1,10	0,96	1,25	1,02	0,96	1,08	1,02	0,95	1,09
p-value	0,01			0,17			0,53			0,62		
	<u>Femmes de moins de 50 ans</u>						<u>Femmes de 50 ans et plus</u>					
	BT<2mm (n=711)			BT≥2mm (n=93)			BT<2mm (n=779)			BT≥2mm (n=445)		
Mois-UV												
Jan-Déc	(réf.)	-	-	(réf.)	-	-	(réf.)	-	-	(réf.)	-	-
Fév-Nov	1,18	0,87	1,62	2,48	0,94	6,52	1,14	0,85	1,53	1,05	0,73	1,50
Mar-Oct	1,05	0,77	1,43	3,64	1,45	9,17	1,20	0,90	1,60	0,97	0,67	1,40
Avr-Sep	1,16	0,85	1,57	2,83	1,09	7,31	1,39	1,06	1,84	0,85	0,58	1,24
Mai-Aou	1,43	1,06	1,92	2,35	0,88	6,22	1,39	1,05	1,86	1,02	0,71	1,47
Juin-Juil	1,48	1,10	1,98	3,23	1,26	8,26	1,61	1,22	2,12	1,12	0,79	1,60
mois-UV en variable continue	1,08	1,03	1,13	1,12	0,99	1,27	1,09	1,04	1,14	1,01	0,95	1,08
p-value	<0,01			0,08			<0,01			0,70		

BT : Epaisseur de Breslow – Les données dans le tableau sont des risques relatifs (RR) et des intervalles de confiance de Wald à 95%. Le RR est obtenu par exponentiation du coefficient du modèle de Poisson modifié en zéro en incluant l'année de diagnostic, mois-UV.

La large variation saisonnière des mélanomes fins sur les membres sans variation des mélanomes épais, en particulier chez la femme, suggère qu'une exposition intermittente à l'UV n'induirait pas une progression des mélanomes fins à un stade de mélanome épais. En effet, la progression de mélanomes fins à mélanomes épais pourrait prendre plus de temps, probablement plus de quelques mois avec pour conséquence l'absence de saisonnalité dans le développement des mélanomes épais. Alternativement, nous pouvons supposer que le développement des mélanomes épais est indépendant de l'exposition à l'UV et dépend de facteurs liés à l'hôte qui ne suivent pas de saisonnalité. Cette hypothèse implique que l'exposition à l'UV serait le facteur de risque environnemental principal de développement de mélanomes fins, souvent faiblement agressifs, tandis que le développement de mélanomes épais, qui sont généralement plus agressifs, dépendrait de facteurs indépendants de l'UV mais toujours inconnus. Ces facteurs indépendants de l'UV seraient fortement liés au processus de vieillissement car l'incidence des mélanomes épais accroît avec l'âge.

Whiteman et coll. (Whiteman et coll. 2003) ont proposé l'hypothèse que les mélanomes puissent apparaître selon deux processus différents, le premier dépendant des naevi et le second étant plus associé à une exposition solaire chronique. Ces processus suggèrent au moins deux types de mécanismes biologiques impliqués dans le développement des mélanomes. L'étude de Whiteman et coll. était cependant basée sur des mélanomes survenant sur le tronc et sur la tête et le cou, et non sur les membres. Nos résultats concernent les mélanomes diagnostiqués sur tous les sites anatomiques. Les mécanismes décrits par Whiteman et coll. sont probablement plus complexes que ce qui a été initialement proposé, avec des processus biologiques liés au site anatomique, au stade du mélanome (c'est-à-dire avec des mécanismes biologiques différents pour les mélanomes fins et les mélanomes épais) et au sexe.

1.2.6 Pathologies oculaires

Le rayonnement UV atteint aussi l'œil. Il est absorbé d'abord par le cristallin puis par la cornée ; il n'atteint pas la rétine. Les rayonnements les plus susceptibles de jouer un rôle majeur dans les maladies oculaires sont ceux issus de la diffraction et de la réflexion car les rayonnements directs ont peu de risque d'atteindre la cornée et les autres tissus oculaires, et ce en raison de l'aversion naturelle à regarder directement en direction du soleil. La cataracte est la maladie oculaire liée à l'exposition solaire la plus répandue. Il s'agit d'une opacification totale ou partielle du cristallin qui provoque une baisse de la vision. Plusieurs études suggèrent le rôle des UVB dans certains types de cataractes liées à l'âge (Norval 2006). Le spectre d'action de l'UV sur les cataractes est représenté sur la Figure 1.1. Le rayonnement UV peut aussi provoquer des inflammations de la cornée, de l'iris ou de la conjonctive de l'œil qui apparaissent dans les quelques heures suivant l'exposition.

1.2.7 Système immunitaire

L'irradiation UVA et à l'UVB diminue les défenses immunitaires (Halliday & Rana 2008). Elle réduit la capacité de certaines personnes à résister à des maladies infectieuses et compromet l'efficacité des vaccinations (Norval 2006). L'immunosuppression peut être responsable des cancers cutanés et des maladies infectieuses (Norval 2006 ; Narayanan et coll. 2010). Les rayonnements sont absorbés par des molécules présentes dans la peau, les chromophores, ce qui entraîne indirectement une diminution de la capacité des cellules immunitaires à reconnaître les micro-organismes pathogènes et les protéines tumorales. La peau et les yeux sont donc moins enclins à répondre aux agents infectieux et à se protéger contre les cancers de la peau.

L'étude de Kripke sur l'irradiation au rayonnement UV a montré que la greffe des tumeurs cutanées induites par une exposition chronique chez la souris sur une souris syngénique était rejetée, sauf si la souris receveuse est aussi préalablement irradiée (Fisher 1977). Les résultats suggèrent que ce phénomène est dû à des mécanismes d'immunosuppression induits par le rayonnement ultraviolet.

En revanche, son rôle dans le développement des lymphomes est controversé (Adami et coll. 1999 ; Grandin et coll. 2008 ; Hughes et coll. 2004). Le lymphome non hodgkinien, cancer du système lymphatique, a été associé à l'exposition aux UV dans plusieurs études. Cependant, certaines études montrent une association positive (Adami et coll. 1999 ; Grandin et coll. 2008), d'autres une association négative, c'est-à-dire un effet protecteur du rayonnement UV (Hughes et coll. 2004 ; Smedby et coll. 2005 ; Hartge et coll. 2006 ; Boffetta et coll. 2008). Cela a été observé en particulier quand les bains de soleil ou les épisodes de coups de soleil servent de variable d'approximation de l'exposition UV dans les études.

1.2.8 Résumé de l'action du rayonnement UV sur la santé

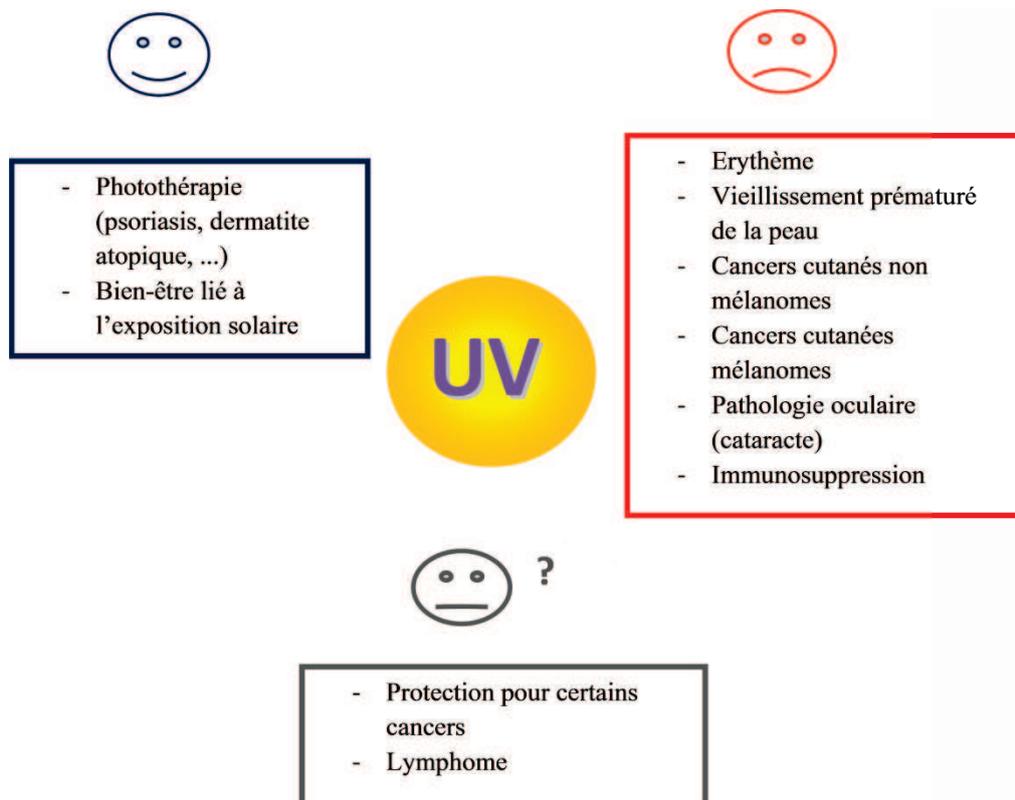


Figure 1.3 : Actions du rayonnement ultraviolet sur la santé

1.3 Exposition au rayonnement ultraviolet

L'estimation de l'irradiation UV reçue par les individus et les populations est importante pour étudier son impact sur la santé, mais différents facteurs sont également à prendre en compte. L'exposition terrestre à l'UV est fortement dépendante des facteurs météorologiques et l'effet de ces facteurs varie en fonction de la longueur d'onde (Seckmeyer et coll. 1996 ; Kudish et coll. 2005). Pour l'exposition individuelle, il faut prendre en compte les comportements tels que le temps passé en extérieur et les moyens de protection (T-shirt, crème solaire, lunettes,...).

1.3.1 Facteurs influençant la dose de rayonnement UV

Ozone

La couche d'ozone (O_3) de l'atmosphère est située dans la stratosphère, à environ 10 km au dessus de la surface terrestre. Elle absorbe la quasi-totalité des UVC et une partie des UVB dont elle est le principal composant absorbant dans l'atmosphère et très peu d'UVA.

En 1974, Molina et Rowland ont suggéré que la couche d'ozone pouvait être détruite par des substances industrielles contenant du brome et du chlore telles que le chlorofluorocarbène très largement utilisé dans les sprays aérosols, les réfrigérateurs et les climatiseurs (Molina & Rowland 1974). Ces substances sont photodissociées quand elles atteignent la stratosphère où elles relâchent du brome et du chlore dont la durée de vie est élevée. La présence de ces atomes entraîne une réaction en chaîne catalytique qui transforme une molécule d'ozone en deux molécules de dioxygène. Le dioxygène absorbe seulement les rayonnements d'une longueur d'onde de moins de 242 nm, c'est-à-dire seulement une partie des UVC.

Dans les années 1980, nous avons commencé à nous intéresser plus en détails à la diminution de la quantité d'ozone dans l'atmosphère et à ses effets. Elle est susceptible d'entraîner une augmentation de l'irradiation UV arrivant jusqu'à la surface terrestre (Kimlin 2008). Une

diminution de 1% de l'ozone atmosphérique engendrerait une augmentation de 2% de la dose de rayonnement UV efficace sur l'ADN (Setlow 1974).

Angle zénithal solaire

L'irradiation UV dépend aussi de l'angle zénithal solaire (Kimlin 2008). Il s'agit de l'angle que forme la direction du soleil avec la verticale à la surface de la Terre (le point du ciel à la verticale du lieu est appelé Zénith). Plus l'angle solaire zénithal est grand, c'est-à-dire plus le soleil est loin du Zénith, plus la couche d'atmosphère à traverser par les rayonnements est épaisse (Figure 1.3). Ainsi, l'irradiation est plus importante quand le soleil est proche du zénith, c'est-à-dire au midi solaire, qu'en début de matinée ou en fin de journée, en particulier pour les UVB.

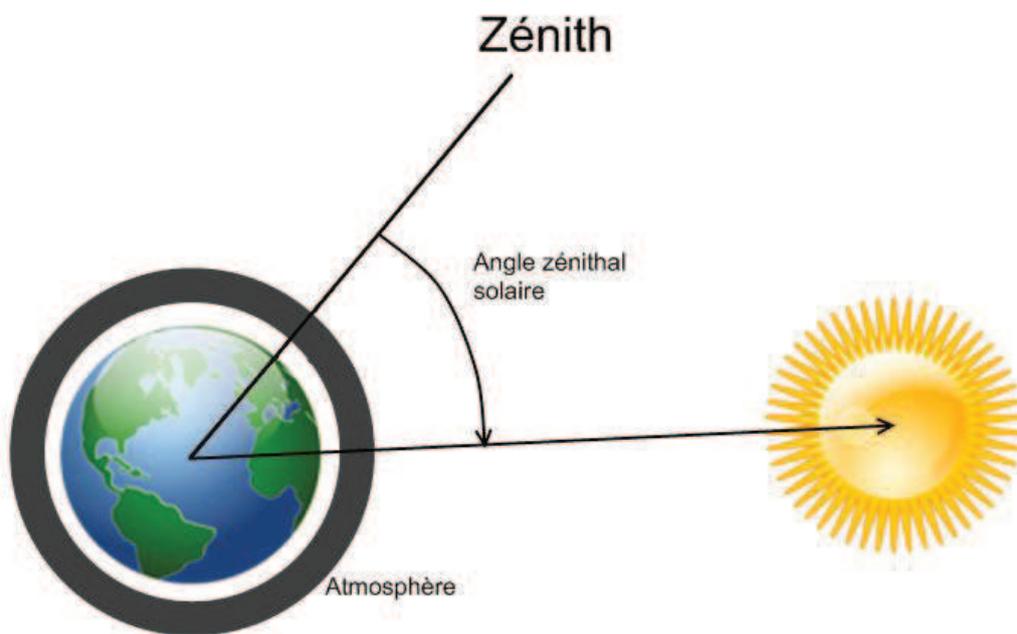


Figure 1.4 : Représentation schématique de l'angle zénithal solaire

De la même manière, l'angle solaire zénithal minimum est plus petit en été qu'en hiver à cause de l'inclinaison de l'axe de la Terre, ce qui entraîne une plus forte irradiation.

De plus, la Terre est plus proche du soleil pendant l'été austral que pendant l'été boréal à cause de la forme elliptique de l'orbite terrestre autour du soleil. La distance Terre-soleil varie de $\pm 3\%$ au cours de l'année. L'irradiation UV est plus importante de 7% dans l'hémisphère sud pendant l'été austral que dans l'hémisphère nord pendant l'été boréal (Tarasick et coll. 2003).

Latitude

La latitude est un des facteurs principaux de la variation de l'irradiation UV. Plus on se situe vers les pôles, plus l'angle solaire zénithal augmente et moins l'irradiation UV atteignant le sol est importante.

Altitude

Aux altitudes les plus élevées, les rayonnements UV ont une épaisseur d'atmosphère plus fine à traverser et sont donc moins atténués. L'augmentation du rayonnement UV varie de 5% à 20% pour chaque kilomètre d'altitude selon la longueur d'onde (Aucamp et coll. 2011).

Albédo

L'albédo est le taux de rayonnement atteignant la surface terrestre qui est réfléchi par celle-ci. Il est souvent inférieur à 10%. La principale exception est la neige dont l'albédo peut amplifier le rayonnement UV jusqu'à 90%. Le sable reflète 15 à 30% du rayonnement. Au contraire, l'herbe réfléchit peu le rayonnement UV. La réflexion de l'eau dépend de son mouvement. Une eau calme ne reflète que 5% tandis qu'une eau agitée peut refléter jusqu'à 20% (Diffey 2002).

Aérosols

Diverses particules de l'atmosphère, les aérosols, diffusent et absorbent les radiations UV. La diffusion est le phénomène par lequel un faisceau de rayonnement est dévié dans de multiples directions. Lorsqu'une petite particule se trouve sur le trajet de l'onde ultraviolette, elle rayonne à son tour dans toutes les directions (Kimlin 2008).

Nébulosité

L'effet d'un nuage sur le rayonnement UV dépend de sa composition, sa densité et son altitude. Dans la plupart des cas, la nébulosité diminue le rayonnement (Kimlin 2008). La transmittance d'un nuage est le ratio de l'éclairement UV avec couverture nuageuse et de l'éclairement UV sans couverture nuageuse. Elle diminue quand la longueur d'onde augmente. Elle est de 45% pour les UVA et 60% pour les UVB (Seckmeyer et coll. 1996). Les nuages, qui sont composés soit de gouttelettes liquides ou de gouttelettes de glace, atténuent les UV principalement par diffusion (Diffey 2002). Les gouttelettes ont un rayon d'environ 1 à 30 microns, beaucoup plus large que les longueurs d'onde des UV.

Certaines études ont montré que les nuages pouvaient augmenter le rayonnement UV par rapport à une journée sans nuage par phénomène de réflexion, en particulier le rayonnement UVB (Sabburg et coll. 2001 ; Thiel et coll. 1997).

1.3.2 Mesure de l'irradiation UV

Une difficulté dans la mesure de rayonnement UV est de supprimer les autres composants du spectre électromagnétique. Ce problème est dû au fait que l'énergie du rayonnement UV est très faible en comparaison des rayonnements visibles et infrarouges. Diverses méthodes ont été développées pour estimer l'exposition au rayonnement ultraviolet solaire et sont discutées ici dans l'optique d'utilisations dans les études épidémiologiques.

1.3.2.1 Spectromètres et radiomètres (mesures directes)

Les spectroradiomètres et les radiomètres sont des appareils de mesure directe de l'irradiation ultraviolette au sol. Ils fournissent des données pour des localisations précises (Martínez-Lozano et coll. 2002).

Un site internet sur le projet Eusosun, en cours de construction, propose quelques illustrations de ces instruments de mesures (<http://www.eurosun-project.org/>).

Spectroradiomètres

Le spectroradiomètre est utilisé pour déterminer la distribution spectrale de l'irradiation qui sert à définir les spectres d'action, c'est-à-dire le pouvoir pathogène du rayonnement pour chaque longueur d'onde. Les spectroradiomètres sont composés de deux parties. L'optique d'entrée reçoit la lumière et la transmet au monochromateur qui la diffracte en fonction de la longueur d'onde. Ce deuxième élément est dit dispersif car il sépare les différentes longueurs d'ondes afin que seuls les UV atteignent le détecteur. Le principal avantage est qu'il donne le spectre du rayonnement UV reçu en temps réel, c'est-à-dire qu'il ne nécessite pas d'étape intermédiaire pour l'obtention du résultat. Pour chaque longueur d'onde, souvent avec un pas de 0,5 à 1 nanomètre, on peut mesurer l'énergie ultraviolette reçue au sol en prenant en compte le rayonnement spectral direct, celui diffusé par l'atmosphère grâce à l'optique d'entrée. On obtient ainsi l'irradiation spectrale globale reçue par la surface. Les mesures peuvent aussi être pondérées par différents spectres d'action pour estimer la dangerosité des rayonnements.

Cependant, le temps de balayage de l'ensemble du spectre peut prendre jusqu'à plusieurs minutes et son volume est encombrant. Il doit donc rester fixe et ne permet pas le suivi d'un individu. En outre, le faible nombre de spectroradiomètres ne peut pas couvrir tout un territoire. En 2010, il n'existe que deux sites équipées de spectroradiomètres en service en France métropolitaine (Villeneuve d'Ascq, St Michel l'Observatoire). L'utilisation de spectroradiomètres requiert une attention constante ce qui engendre un fort coût.

Toutefois, les mesures obtenues avec ces instruments sont précises et peuvent être utilisées pour valider des cartes faites à partir d'estimations satellitaires ou par modélisation.

Radiomètre à large bande

Le radiomètre à large bande est un instrument moins coûteux qui permet de mesurer l'irradiation fournie par un ensemble de longueurs d'ondes prédéfinies et non pour chaque longueur d'onde. Il possède généralement un détecteur avec un dispositif de sélection des longueurs d'onde et une optique d'entrée. Par exemple, un radiomètre à UVB doit avoir un capteur avec une réponse spectrale uniforme pour les longueurs d'ondes comprises entre 280 et 315 nm et une réponse nulle pour les autres longueurs d'onde. Il existe aussi des radiomètres à UVA et à UV érythémateux. Le capteur doit recevoir les rayonnements provenant de tous les côtés pour prendre en compte le rayonnement direct, diffus et réfléchi.

Le temps de réponse est plus rapide que celui des spectroradiomètres ce qui permet de prendre en compte les changements météorologiques rapides. Le radiomètre le plus utilisé est le Robertson-Berger (Grainger et coll. 1993 ; Hartge et coll. 2006 ; Johnsen & Moan 1991 ; Lea et coll. 2007). Il mesure la dose d'ultraviolet reçue pour les longueurs d'onde responsables de l'apparition des érythèmes. Mais il est sensible à la température (Johnsen & Moan 1991). De plus, pour couvrir de grandes zones géographiques, il est nécessaire d'avoir un grand réseau de radiomètres.

1.3.2.2 Dosimètres individuels

Les dosimètres individuels sont des outils de plus petite taille et de moindre coût. Le fonctionnement des dosimètres individuels chimiques ou biologiques est basé sur des caractéristiques des rayonnements UV. Ces rayonnements causent des dommages biologiques ou chimiques sur les films des dosimètres, l'estimation de l'irradiation est faite à partir de la mesure de ces dommages (Horneck 1995). Ainsi, la dose mesurée sera en réalité une dose pondérée par le spectre d'action en cause dans les dommages.

Le site internet propose des illustrations des différents types de dosimètres individuels (<http://www.eurosun-project.org/>).

Dosimètres chimiques

Les dosimètres chimiques sont souvent sous forme de « patches » que l'on dispose sur une zone anatomique d'un volontaire, par exemple sur l'épaule. Ils permettent des mesures précises de l'irradiation UV des différentes zones anatomiques. Par exemple, des mesures ont été faites sur le visage d'un mannequin avec des dosimètres miniaturisés (Downs & Parisi 2007). L'instrument mesure les changements chimiques induits par les rayonnements UV (Knuschke & Barth 1996 ; Dunne 1999 ; Mills et coll. 2005 ; Parisi & Kimlin 2004 ; Schouten et coll. 2009 ; Smith 1989). Le plus souvent, ils contiennent du polysulfone qui est dégradé par les UV (en particulier par les UVB). La sensibilité du film aux différentes longueurs d'onde est similaire à celle de la peau lors de l'apparition d'érythème. Ces films de polysulfone ont été utilisés par exemple pour l'estimation de l'exposition solaire des enfants, pendant les loisirs, au travail, pour étudier la distribution anatomique de l'exposition solaire (Boldemann et coll. 2006 ; Downs & Parisi 2009 ; Gies & Wright 2003 ; Moise et coll. 1999 ; O'Riordan et coll. 2000 ; Downs & Parisi 2007). Mais d'autres réactifs chimiques peuvent être utilisés. Par exemple, des films d'oxyde Poly (2,6-diméthyl-1,4-phénylène) (PPO) ont servi pour des mesures sous l'eau (Schouten et coll. 2007).

Ces dosimètres fournissent une bonne estimation de l'exposition réelle des individus. Mais le coût de mise en place est élevé. Les patches ne sont pas chers, mais la logistique nécessaire pour la mesure est importante. Comme les patches peuvent saturer, ils doivent être changés une ou deux fois par jour les jours de fort ensoleillement. De plus, on ne peut pas distinguer l'UVA de l'UVB.

Dosimètres biologiques

Un dosimètre biologique réalise une mesure du rayonnement UV en utilisant l'induction de mutations dans des microorganismes comme le bacillus subtilis (Puskeppel et coll. 1992 ; Bérces et coll. 1999 ; Tyrrell 1995 ; Quintern et coll. 1997 ; Furusawa et coll. 1998) ou les bactériophages (Rontó et coll. 1992 ; Bérces et coll. 1999 ; Fekete et coll. 1998 ; Modos et coll. 1999). Ces mutations sont à l'origine par exemple de l'inactivation de spores et de bactériophages ou de réactions chimiques impliquant la photosynthèse de vitamine D et la polycristallisation d'uracile. Par exemple, l'utilisation du bactériophage T7 est fréquente car

sa réponse spectrale est similaire à l'action spectrale de l'érythème (Rontó et coll. 1992). Par exemple, des dosimètres à spores ont permis de mesurer l'irradiation spectrale pondérée par les réponses biologiques (Boldeman et coll. 2004). Ils imitent ainsi les situations in-vivo.

Ces dosimètres permettent aussi une bonne estimation de l'exposition réelle des individus mais cette estimation passe par une analyse des mutations engendrées par le rayonnement. Il y a donc un long délai pour l'obtention du résultat et un coût de gestion important. Ils doivent être remplacés au cours de la journée à cause de la saturation. De même qu'avec les dosimètres chimiques, on ne peut pas distinguer les UVA des UVB.

Dosimètres électroniques

Les dosimètres électroniques peuvent être munis de capteurs distincts d'UVA et UVB. Ils se présentent soit sous forme de montre, soit sous forme de boîtier porté ou placé à côté des individus lors d'expositions (El Naggar et coll. 1995).

Ils enregistrent les expositions en continu sur des périodes de temps pouvant atteindre jusqu'à plusieurs mois et permettent d'obtenir une description fine des expositions en fonction des activités (Thieden et coll. 2000 ; Autier et coll. 2000). Par exemple, Thieden a utilisé des dosimètres électroniques pour estimer l'exposition UV des travailleurs ayant un poste en extérieur durant l'hiver et durant l'été (Thieden et coll. 2000).

Ce dispositif est onéreux et nécessite une étape de calibration. Le port du dosimètre, notamment sous forme de montre, peut modifier l'enregistrement. Par exemple, une manche peut cacher le capteur ou les mouvements du volontaire peuvent l'orienter vers le sol. Les études utilisant des dosimètres individuels souffrent de limitations techniques et logistiques : les mesures ne peuvent être réalisées que sur un effectif limité. Mais bien que plus encombrants que les dosimètres biologiques ou chimiques, les capteurs des dosimètres électroniques peuvent être facilement portés, à la taille par exemple, et reliés à un enregistreur de données porté dans une poche. Ils permettent de séparer UVA et UVB.

Avec l'ensemble des dosimètres individuels, on peut toujours suspecter un biais du comportement, car la présence d'un dosimètre et la connaissance de la mesure peuvent induire des changements de comportement.

1.3.2.3 Satellites (mesures indirectes)

L'utilisation de données satellitaires permet l'estimation de l'exposition au rayonnement UV pour des localisations où des mesures directes ne sont pas possibles. Les données de satellites peuvent être utilisées pour générer des cartes car elles permettent de couvrir une large zone géographique. Les paramètres influençant le rayonnement UV, c'est-à-dire essentiellement l'ozone, la nébulosité, l'albédo de la surface, sont dérivés à partir des mesures des satellites. Ils sont ensuite inclus dans un modèle de transfert radiatif pour estimer l'irradiation UV à la surface terrestre. Mais la précision de ces modèles a des limites. Les valeurs estimées à partir des capteurs positionnés dans l'espace doivent être validées avec des mesures au sol, plus directes et donc plus précises.

Pour l'estimation du rayonnement UV, plusieurs types d'instruments sont utilisés :

Ozone Monitoring Instrument (OMI)

Ozone Monitoring Instrument (OMI) est un instrument à bord de la plateforme Aura. Il mesure l'ozone total, la nébulosité et le rayonnement solaire réfléchi par la partie supérieure de l'atmosphère. Il continue l'enregistrement du Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) (McPeters et coll. 1998 ; Schmalwieser et coll. 2009) et balaie la totalité de la surface terrestre. Mais l'instrument ne peut fournir qu'une estimation de l'UV atteignant la surface terrestre à faible résolution.

Satellites GOES

Les Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) sont des satellites géostationnaires, localisés à 36 000 km au dessus de l'équateur, de l'agence américaine NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) responsable de l'étude de l'océan et de l'atmosphère. Les images qu'ils fournissent ont une résolution au sol de 10 km en latitude et 13 km en longitude et couvrent le continent Nord-Américain et l'océan Atlantique. Elles sont archivées depuis 1995 (Perez 1997 ; Zelenka et coll. 1999).

Satellites Météosat

Les satellites Météosat sont aussi des satellites géostationnaires, près de la longitude 0 (méridien de Greenwich). Ils mesurent par réflexion l'irradiation totale (notamment la partie visible du spectre, le rayonnement infrarouge et la vapeur d'eau) reçue à la surface de la Terre et couvrent l'Europe, l'Afrique et l'océan Atlantique. Plusieurs algorithmes existent pour estimer les doses de rayonnement UV à partir de ces données satellitaires.

Ces données ont été utilisées pour la création des cartes d'Europe et la reconstruction de l'exposition des individus durant cette thèse. Elles contiennent une mesure toutes les 20 minutes, avec une résolution d'environ 10 km, et prennent en compte la nébulosité.

1.3.2.4 Approximation de l'exposition à l'UV avec la latitude ou des questionnaires

Comme il est souvent difficile d'avoir une vraie mesure de l'irradiation UV pour l'exposition des individus dans les études épidémiologiques, une alternative est l'approximation avec des mesures plus faciles à obtenir.

Latitude

La relation inverse entre la latitude et le rayonnement solaire est bien connue car la latitude a un fort impact sur l'angle solaire zénithal et donc sur l'épaisseur de l'atmosphère qui sera traversée par le rayonnement solaire. Des études se basent sur cette relation pour étudier le rôle de l'UV dans certaines maladies (Auerbach 1961 ; Adami et coll. 1999 ; Chang et coll. 2009). L'étude d'Adami, sur les données du registre de cancer suédois, est basée sur l'estimation de l'exposition en classant les individus dans différents groupes, en fonction de la latitude de résidence (Adami et coll. 1999). Ils concluent à une faible association entre l'exposition et le taux d'incidence de cancer pour le lymphome non hodgkinien, pour le mélanome malin et le cancer cutané spino-cellulaire. Pour la leucémie lymphoïde chronique (CLL), aucune association n'est mise en évidence.

Questionnaire

Dans les études se basant sur un simple questionnaire, le temps passé en extérieur sert souvent de variable d'approximation (Chang et coll. 2009 ; Wright & Reeder 2005). Différentes expositions peuvent être ciblées. Le temps d'exposition tout au long de la vie (Krickler et coll. 2005 ; Boffetta et coll. 2008) pendant le travail et pendant les activités de loisir. Le temps passé en extérieur ne fournit qu'une approximation très vague de l'exposition UV. Le temps passé en extérieur n'est pas forcément bien corrélé avec les mesures prises avec des dosimètres personnels (Dadvand et coll. 2011 ; Thieden et coll. 2001). Les questionnaires peuvent aussi être couplés avec une estimation de l'irradiation ambiante mesurée avec des radiomètres, ce qui permet d'avoir une estimation quantitative de l'exposition (Lea et coll. 2007 ; Hartge et coll. 2006).

Les érythèmes, sont souvent un indicateur de l'exposition dans les études. Les antécédents d'érythèmes dans l'enfance ou à l'âge adulte sont considérés comme un marqueur des expositions intenses au soleil (Davis et coll. 2002 ; Smedby et coll. 2005 ; Cockburn et coll. 2001 ; Whiteman & Green 1994). Mais la définition d'un « coup de soleil » varie d'une étude à l'autre. De plus, l'érythème ne reflète pas seulement l'exposition au soleil mais aussi la sensibilité au rayonnement solaire des participants.

Les questionnaires permettent aussi de recueillir des informations concernant les attitudes face au soleil (Robinson et coll. 1997 ; Davis et coll. 2002 ; Smedby et coll. 2005 ; Cockburn et coll. 2001). Les bains de soleil avec la volonté de bronzer sont un marqueur d'une exposition intermittente forte ; le travail en extérieur est plutôt le marqueur de l'exposition chronique. L'enquête peut être complétée avec des renseignements concernant la protection au soleil telle que l'utilisation de crème solaire, la recherche d'ombre, le port de chapeau, lunettes et T-shirt.

De manière générale, quelle que soit la variable d'approximation utilisée dans le questionnaire, le biais de mémoire doit être pris en compte dans l'interprétation des résultats. La réminiscence est souvent mauvaise lorsque l'on demande aux participants de se souvenir de détails loin dans le passé.

2. Objectif de la thèse

Synthèse des données disponibles

L'exposition au soleil, intentionnelle ou non, est responsable de l'exposition à l'UV qui peut être à l'origine de certaines maladies. Or, dans différents pays, y compris des pays où les populations sont à risque comme en Europe, les individus ont tendance à s'exposer fréquemment au soleil pour bronzer ou pour le bien-être moral. L'exposition chronique ou intermittente au rayonnement UV solaire est un facteur de risque environnemental dans plusieurs maladies. Elle a en particulier un effet cancérigène avéré. Pourtant peu d'informations sont disponibles sur l'exposition des individus et des populations.

Les variations spatio-temporelles du rayonnement UV solaire peuvent avoir des conséquences sur la santé. La diminution de l'épaisseur de la couche d'ozone peut notamment faire varier l'exposition au rayonnement UV. Bien que cette diminution ait été démontrée et que l'on connaisse l'effet d'absorption de l'ozone sur le rayonnement UV, il est difficile de mettre en évidence des variations du rayonnement UV dans le temps. Pour surveiller les variations spatio-temporelles de l'irradiation UV solaire, les différents instruments décrits précédemment ont été utilisés dans des études antérieures.

Les estimations d'irradiation en Europe se basant sur des mesures de radiomètres ou des spectroradiomètres couvrent des zones limitées (Thiel et coll. 1997 ; Martínez-Lozano et coll. 2002 ; Lebert et coll. 2002). Elles doivent être complétées avec des données extrapolées afin de couvrir des zones complètes. De plus, la durée d'enregistrement est souvent limitée à quelques années, notamment parce que les instruments et leur entretien sont coûteux. On ne peut donc pas suivre des populations sur le long terme.

Une autre source de données est l'instrument TOMS, puis OMI. Il couvre une zone très large : de 180° est à 180° ouest et de 65° sud à 65° nord. Cependant, il ne fournit qu'une mesure par jour car il n'est pas géostationnaire. Il ne tient donc pas compte de la durée des jours dans le calcul de l'irradiation journalière. De plus, il ne mesure pas directement le rayonnement solaire mais l'estime à partir de paramètres tels que l'ozone.

Plusieurs projets se sont servis de ces outils pour produire des bases de données ou des atlas de l'irradiation UV terrestre en Europe.

Dans le cadre des projets EDUCE et EU-SUVDAMA une base de données, l'« European UV database », a été créée (<http://www.muk.uni-hannover.de/EDUCE>, consulté le 15 septembre 2011). Elle a été construite à partir d'un modèle de transfert de rayonnement basé sur les mesures d'un réseau d'environ 20 instruments au sol pour des données de juin 2000 à novembre 2003. Le modèle requiert que les paramètres soient disponibles pour l'ensemble de l'Europe. De plus, des données sont manquantes pour certaines périodes selon les stations (Seckmeyer, 2008).

Le projet MAUVE (MApping of UV by Europe) est un projet soutenu par la commission européenne qui s'est déroulé de 1997 à 2000 (<http://www.nilu.no/projects/mauve/>, consulté le 15 septembre). Il a abouti à la création de cartes de l'irradiation UV en Europe dérivées de données satellitaires. Ces données permettent de mieux couvrir l'Europe mais la période disponible est courte pour détecter d'éventuelles variations temporelles.

Enfin, le projet COST est basé sur des modèles de transfert de rayonnement. L'irradiation globale est estimée par interpolation à partir de mesures au sol sur 153 sites : les données pour 79 sites provenant du World Radiation Data Centre depuis 1964, 31 sites du US National Renewable Energy Laboratory, 36 sites du National Meteorological and Hydrological Services et 7 autres sites. L'atlas créé au cours de ce projet contient des cartes de l'irradiation UV de 1957 à 2002. La base de données est disponible sur internet (<http://www-med-physik.vu-wien.ac.at/uv/cost726/cost726.htm>) avec une résolution géographique d'un degré de latitude et de longitude.

Les bases de données et les atlas issus de ces projets ont des limites pour l'étude des variations spatio-temporelles de l'irradiation UV en Europe. Les périodes couvertes sont très

courtes (par exemple MAUVE) ou la couverture géographique est très petite car les données sont basées sur des mesures au sol (par exemple EU-SUVDAMA, COST).

Parallèlement, l'étude du rôle du rayonnement UV solaire dans le développement de certaines maladies nécessite une mesure de l'exposition des individus et des populations à ce rayonnement. Cela permettra notamment de mieux comprendre et évaluer son rôle dans le cancer de la peau et savoir s'il est un facteur de risque dans le développement des lymphomes.

Diverses méthodes ont été mises en place mais elles peuvent avoir des inconvénients dans la mesure de l'exposition au rayonnement UV dans le cadre d'études épidémiologiques.

Certaines études se basent sur des questionnaires pour reconstruire l'exposition des individus. Ce suivi peut remonter sur toute la vie mais plus on remonte loin dans le passé, plus le risque de biais de mémoire est élevé. De plus, un questionnaire ne fournit pas une estimation quantitative de l'irradiation reçue par l'individu. En effet, une variable représentative est souvent utilisée dans les questionnaires. On retrouve principalement le temps passé en extérieur (Bodiwala et coll. 2004 ; Boffetta et coll. 2008 ; Kricker et coll. 2005 ; Davis et coll. 2002 ; Diffey 2008 ; Hughes et coll. 2004 ; John, Schwartz, et coll. 2007), la volonté de bronzer (Hartge et coll. 2006) ou la latitude (Adami et coll. 1999). La latitude n'est pas une donnée appropriée pour faire une approximation de l'exposition à l'UV (Dadvand et coll. 2011). Les questionnaires ne fournissent pas une mesure réelle de l'exposition. De plus, les réponses ne sont pas toujours fiables. Les participants doivent parfois estimer le temps passé en extérieur dans un passé lointain (Bodiwala et coll. 2004 ; John, Schwartz, et coll. 2007). L'étude de Kricker (Kricker et coll. 2005) enregistre les activités extérieures des participants depuis l'âge de 8 ans. Cela peut induire un biais de mémoire important dans les résultats. D'autre part, les réponses aux questionnaires ne sont pas nécessairement objectives puisque les répondants peuvent avoir assimilé les messages de prévention diffusés par les médias expliquant la dangerosité d'une exposition excessive au soleil. Lorsque les questionnaires sont utilisés seuls, ils ne tiennent pas compte de l'irradiation terrestre. Cette dernière varie selon la saison et selon l'emplacement géographique de l'individu. Dans l'étude de Boffetta (Boffetta et coll. 2008), les participants sont recrutés dans différents pays européens, où l'exposition solaire peut être très variée.

Certains instruments de mesure permettent d'obtenir une estimation quantitative de l'exposition individuelle. Les dosimètres individuels sont développés spécialement pour suivre l'exposition des individus. Les dosimètres électroniques portés au poignet (Thieden et coll. 2000) ont été utilisés pour mesurer l'exposition des enfants et des adultes pendant la vie quotidienne ou pendant les vacances (Autier et coll. 2000 ; Thieden et coll. 2004). Le port de ces dosimètres a des contraintes et des difficultés dues à la position de l'appareil et à l'angle de mesure. Les résultats sont influencés par les conditions d'utilisation et ils sont limités à une population de faible effectif. Une limitation majeure des badges biologiques et chimiques est la saturation rapide des produits réactifs. Ils ne peuvent donc pas être utilisés pour de fortes doses ni sur de longues périodes. La plupart des études utilisant les dosimètres ont un suivi limité dans le temps (Boldeman et coll. 2004 ; Parisi et coll. 2000 ; Thieden et coll. 2000 ; Boldemann et coll. 2006 ; Downs & Parisi 2009 ; Moise et coll. 1999). Cependant, la mesure est précise car elle fournit une estimation quantitative de l'irradiation reçue par l'individu qui porte l'instrument, quels que soient ses déplacements, à condition de s'assurer qu'il ne risque pas d'être couvert par les vêtements et qu'il ne soit pas orienté en direction du sol. Les dosimètres peuvent être utilisés pour décrire l'irradiation UV solaire de populations dans des circonstances particulières, par exemple des enfants dans une cour d'école (Boldeman et coll. 2004), des employés sur leur lieu de travail (Gies & Wright 2003), dans les voitures (Moehrle et coll. 2003), etc...

Des études ont couplé des questionnaires avec des mesures au sol. Cette méthode permet d'obtenir une mesure quantitative qui prend en compte le comportement des individus, en particulier le temps passé en extérieur (Lea, 2007 ; Hartge, 2006). Mais la précision des résultats est limitée par le nombre de radiomètres. Dans l'étude de Lea (Lea, 2007), seulement 18 stations au sol, réparties sur le territoire des Etats-Unis, sont utilisées. Les estimations sont donc effectuées à partir de données de faible résolution géographique et les résultats ne prennent pas en compte les résidences à l'extérieur du pays. De plus, l'exposition intermittente ne se base pas sur ces mesures mais seulement sur les questionnaires. Une étude aux Etats-Unis s'est basée sur 30 ans de mesures de 239 stations de radiométrie pour analyser le rôle du rayonnement UV sur le développement des mélanomes (Tatalovich, 2006). Une méthode d'interpolation a permis d'avoir une bonne estimation de l'irradiation sur l'ensemble du pays. L'étude montre que l'exposition chronique quotidienne avant 45 ans est un facteur de risque pour le mélanome. Mais en Europe, le réseau de mesures au sol d'EDUCE et EU-

SUVDAMA compte seulement une trentaine de stations. Une étude similaire en Europe aurait donc une mauvaise résolution géographique.

Pour avoir des données plus précises sans avoir besoin d'utiliser des méthodes d'interpolation, des données de satellites peuvent être utilisées. Cela a été fait aux Etats-Unis ; les données du TOMS ont été utilisées pour estimer l'exposition résidentielle. Elle n'a montré aucun lien entre cette exposition et le risque de mélanome (Solomon, 2004). En Europe, le satellite Meteosat a permis la création de la base de données SoDa. L'irradiation peut être estimée pour toute la journée car il est géostationnaire. Ces données ont déjà été utilisées, par exemple pour étudier le lien entre l'irradiation UVB et la sclérose en plaques (Orton, 2011).

L'avancée des connaissances sur les mécanismes d'action du rayonnement UV sur la santé nécessite de nouvelles études épidémiologiques basées sur une mesure quantitative et précise de l'irradiation UV. Les variations spatio-temporelles de l'irradiation UV au sol peuvent avoir un impact sur la santé mais il est difficile de les surveiller. De plus, la principale limitation des études épidémiologiques sur le rôle du rayonnement UV est le manque de données couvrant une zone géographique suffisamment large et de bonne résolution permettant d'estimer l'exposition des individus. Il existe un besoin en épidémiologie d'estimer les doses et les longueurs d'onde de l'exposition individuelle à l'UV solaire, qui est la principale source d'irradiation UV, pour étudier son rôle dans le développement des maladies liées à ce rayonnement. Pour être utilisables, les données doivent couvrir la zone d'intérêt de l'étude sur de longues périodes. Elles doivent être fiables et accessibles et leur origine doit être clairement détaillée.

Spécification de l'outil

Pour fournir les données de rayonnement UV pour les études épidémiologiques, l'outil doit donner une mesure quantitative et non biaisée du rayonnement. Il doit permettre le suivi longitudinal d'un grand échantillon d'individus. Pour reconstruire l'exposition des individus, l'instrument utilisé doit avoir une bonne résolution géographique et couvrir suffisamment de zones géographiques. Les différents moments d'exposition doivent pouvoir être suivis, pendant les activités récréationnelles ou professionnelles, au quotidien ou pendant les vacances. Pour étudier le rôle de l'exposition au rayonnement UV solaire, il faut aussi prendre

en compte les expositions au rayonnement artificiel et la fraction de peau exposée au soleil durant les différents moments d'exposition.

Orientation des travaux de la thèse

Le travail de cette thèse est basé sur les données du projet EuroSun. Ce projet a été développé pour surveiller l'exposition des individus et des populations au rayonnement UV solaire et étudier les risques de cette exposition sur des maladies dans l'Union Européenne. Il repose sur des valeurs d'irradiation terrestre en Europe issues de mesures du satellite Météosat et des enquêtes dans plusieurs populations européennes à l'aide d'un questionnaire téléphonique.

Grâce à ce projet, une source importante de données a pu être mise à disposition pour cette thèse. Au cours de ce travail, les données de rayonnement UV atteignant la surface terrestre ont pu être analysées, dans l'objectif de détecter les zones géographiques particulièrement exposées ou les tendances temporelles du rayonnement. En outre, un outil de mesure de l'exposition individuelle au rayonnement UV a été développé au cours de la thèse. Il permet de suivre deux types d'exposition des individus et des populations. Un indicateur de l'exposition est l'exposition journalière qui reflète l'intensité d'une exposition de courte durée. Un autre est l'exposition annuelle qui est corrélée à l'exposition chronique. Ces différents types d'exposition ont été estimés, à l'aide des données météorologiques et de questionnaire, selon différentes catégories de la population, notamment, selon le sexe, les diverses classes d'âge et la région de résidence au sein de plusieurs pays européens. Les résultats seront mis à disposition, notamment via un site internet. Ainsi le rôle des différents types d'exposition (exposition quotidienne, exposition intermittente, pendant les différentes étapes de la vie) dans le développement des cancers et des autres maladies liées au rayonnement UV pourra être étudié de manière plus fiable dans de futures études épidémiologiques, pour tenter de prédire l'évolution des maladies liées au rayonnement UV solaire et de mieux communiquer sur les risques.

Dans un premier temps, l'objectif est de fournir un atlas de l'exposition UV en Europe pour la période 1988-2007, à partir de données satellitaires précises. Il devra permettre de surveiller l'évolution temporelle du rayonnement, les variations saisonnières et de détecter des distributions géographiques particulières de l'irradiation au sol, au-delà d'un simple gradient nord-sud. En particulier, il met en évidence les zones fortement exposées. La latitude explique

en partie la variabilité de l'irradiation au sol, cette relation peut dépendre du lieu et de la saison. La différence d'irradiation entre l'été et l'hiver pouvant être un facteur de risque pour certaines maladies, il est important de savoir à partir de quel mois l'irradiation peut être considérée comme forte et si cette saisonnalité est similaire sur tout le continent.

Nous avons aussi développé une méthode pour reconstruire l'exposition chronique et l'exposition récréative intermittente afin d'avoir une quantification des différentes expositions individuelles. Celles-ci incluent les doses d'irradiation journalière et annuelle reçues au quotidien et pendant les vacances. Les vacances sont souvent des périodes de surexposition, notamment au ski ou à la plage, car les personnes passent généralement plus de temps en extérieur et partent dans des régions ensoleillées. Pour cela, nous allons reconstruire l'exposition individuelle jour par jour en tenant compte du lieu (de résidence et de vacances) et de la durée d'exposition. Ainsi, nous pourrions estimer les différents types d'exposition pour les différentes populations en Europe.

Dans la pratique, différentes étapes seront nécessaires. En mettant en lien les résultats du questionnaire avec les données de rayonnement UV terrestre, nous obtiendront l'irradiation de chaque participant pour chaque jour du suivi. Afin d'estimer l'exposition individuelle, le questionnaire a été mis en place avec pour objectif de suivre les participants de chacun des huit pays européens impliqués dans le projet. Les participants renseignent les différents lieux et dates de vacances et les différents lieux de résidence, avec les dates éventuelles de déménagements, au cours des années précédant l'interview pour localiser les individus jour par jour. Ces informations seront complétées par le nombre d'heures passées en extérieur.

L'applicabilité de la méthode sera tout d'abord testée sur un échantillon français. Ce pilote sera suivi d'enquêtes sur des populations italienne, norvégienne, estonienne, allemande, écossaise, hongroise et portugaise. L'exposition au rayonnement UV solaire pourra être estimée pour chaque population.

3. Outils de mesure de l'exposition au rayonnement UV

3.1 Données de rayonnement UV

Les données de rayonnement UV utilisées sont celles du projet EuroSun. La limite entre l'UVA et l'UVB a été définie à 320 nm. Cette partie décrit le processus utilisé par MINES ParisTech pour les obtenir.

3.1.1 Des images Météosat aux données de rayonnement solaire

Le rayonnement ultraviolet représenté sur l'atlas a été estimé à partir des bases de données Helioclim contenant les valeurs d'irradiation solaire totale reçue à la surface terrestre (Blanc et coll. 2011). Ces données Helioclim sont estimées à partir des enregistrements des satellites Météosat (Rigollier et coll. 2004) puis converties en irradiation UV.

3.1.1.1 Principes de la méthode Heliosat-2

Les satellites Météosat sont de type géostationnaire, c'est-à-dire qu'ils sont toujours positionnés au-dessus du même point géographique situé sur l'équateur. Ils font partie des moyens qu'utilisent les météorologues pour la prévision du temps et la climatologie. Les images Météosat sont fréquentes (toutes les 30 minutes en 2001) et couvrent l'Europe,

l'Afrique et l'océan Atlantique, ce qui permet un bon suivi spatio-temporel du rayonnement solaire.

Les satellites Meteosat fournissent les données de rayonnement solaire dans trois bandes spectrales : visible, vapeur d'eau et infrarouge (Bachari et coll. 2001) pour les plus anciens et dans douze bandes spectrales pour les plus récents depuis 2004. Pour le spectre visible, des coefficients d'étalonnage, qui décrivent la relation entre la mesure électronique des satellites et la quantité d'énergie reçue par la pupille d'entrée du capteur optique, sont obtenus par analyse de mesures effectuées de jour et de nuit (Rigollier et coll. 2002). Cette étape permet d'étalonner les images obtenues par les satellites les unes avec les autres et donc, d'obtenir un ensemble homogène dans le temps, indépendant des changements de capteurs des satellites.

La méthode Héliosat-1 a été développée dans les années 1980 pour convertir les mesures des satellites en données d'irradiation totale. Elle est basée sur plusieurs paramètres empiriques (c'est-à-dire des paramètres issus d'expériences), en particulier l'albédo de la surface terrestre et la nébulosité. Ces paramètres sont étalonnés avec des données de mesure au sol.

Dans la méthode Heliosat-2, les paramètres empiriques sont remplacés par des lois physiques (Rigollier et coll. 2004). Il n'est plus nécessaire de faire coïncider les résultats avec des mesures au sol pour réguler les paramètres. Cela permet l'utilisation de la méthode même dans les régions pour lesquelles aucune mesure au sol n'est disponible. Cette méthode a été mise en production en 2002 par MINES ParisTech dans le but d'exploiter des données de satellites météorologiques géostationnaires afin de produire de longues séries temporelles de rayonnement total sur plan horizontal à la surface sur l'ensemble de l'Europe et de l'Afrique.

3.1.1.2 Principaux facteurs de la méthode Héliosat-2

L'estimation de l'irradiation totale sur plan horizontal à la surface prend en considération la diffusion par les particules et les molécules de l'atmosphère ainsi que la diffusion par les nuages.

Indice de nébulosité (ou facteur de nébulosité, ou indice d'ennuagement)

Le paramètre clé de la méthode est le facteur de nébulosité que l'on applique sur l'irradiation estimée pour le ciel clair (Bachari et coll. 2001) car le rayonnement solaire atteignant la surface terrestre est très fortement influencé par la nébulosité.

La méthode est basée sur le principe que l'atténuation par l'atmosphère des rayonnements d'ondes courtes peut être déterminée par la différence entre le facteur de réflexion, ou albédo, qui devrait être observé en condition de ciel clair et celui qui est réellement observé par le capteur (Espinar et coll. 2009). Ces comparaisons entre la valeur observée et la valeur attendue se basent sur les irradiances mesurées dans le spectre visible et les albédos calculés.

Indice de clarté, indice de ciel clair

L'indice de clarté, K_T , est le ratio du rayonnement global horaire reçu au sol sur une surface horizontale sur la même quantité mais reçu au sommet de l'atmosphère. Plus l'atmosphère est opaque à cause des nuages ou de la turbidité optique, plus le rayonnement au sol est faible, et plus le K_T est petit. Même par ciel clair, il y a une atténuation du rayonnement d'environ 20 à 30 % ; ceci signifie que la plus grande valeur de K_T sera d'environ 0,7 à 0,8. L'intérêt de cet indice est qu'il normalise le rayonnement par rapport aux fluctuations saisonnières et effets latitudinaux dus à l'orbite de la terre autour du soleil et son inclinaison sur le plan orbital.

L'indice de ciel clair, K_c , est le ratio du rayonnement global horaire reçu au sol sur une surface horizontale sur la même quantité mais pour ciel clair. Plus l'atmosphère est opaque à cause des nuages ou de la turbidité optique, plus le rayonnement au sol est faible par rapport à ce qui devrait être observé par ciel clair, et plus le K_c est petit. Le K_c varie entre 0 (pas de rayonnement) et 1 (ciel clair). Il peut éventuellement être plus grand que 1 si le ciel est exceptionnellement clair, auquel cas la valeur de rayonnement surpasse celle attendue pour un ciel normalement clair.

L'indice K_c permet d'estimer le rayonnement global horaire en condition réelle comme une fraction du rayonnement en condition de ciel clair. L'irradiation journalière est calculée en sommant les irradiances horaires du lever au coucher du soleil (Rigollier et coll. 2004).

3.1.1.3 Validation des données

De nombreuses vérifications de la qualité des estimations ont été effectuées en les comparant à des observations faites dans les réseaux météorologiques. L'irradiation globale estimée à partir des images du satellite a une erreur type moyenne autour de 4% (Bachari et coll. 2001). A titre d'exemple, citons les résultats de Rigollier et coll. (2004) qui ont appliqué la méthode Héliosat-2 aux données du satellite Météosat de juillet 1994, janvier 1995 et avril 1995. Le coefficient de corrélation avec les mesures au sol pour chacun des mois, pour les données journalières et pour les moyennes mensuelles des données journalières est toujours compris entre 0,85 et 0,92. L'irradiation est surestimée en janvier 1995 et sous-estimée en juillet 1994 et en avril 1995. L'erreur type moyenne est plus faible pour les moyennes mensuelles. Par exemple, pour juillet 1994, l'erreur type moyenne est de 15% pour l'irradiation journalière et de 7% pour la moyenne mensuelle de l'irradiation journalière.

Comme aucune mesure au sol n'est utilisée pour le développement de la méthode Heliosat-2, elle peut être utilisée dans toutes les zones couvertes par les satellites météorologiques géostationnaires et sur de longues périodes. Elle peut être appliquée en temps réel ou sur des données d'archives. La précision est meilleure avec la méthode Heliosat-2 qu'avec la méthode Héliosat-1 car elle est basée sur de meilleures connaissances externes telles que l'altitude de la surface et le facteur de trouble de Linke (c'est-à-dire la réduction de la transparence de l'atmosphère causée par l'absorption et la dispersion par les particules solides ou liquides autres que des nuages.). La majeure partie des imprécisions provient de la sensibilité aux fluctuations de nébulosité.

Le contenu de la base de données HelioClim est disponible sur www.soda-is.com (Gschwind et coll. 2006). La base HelioClim-1 fournit les irradiances journalières de 1985 à 2005 avec une résolution de 30 km. Des données d'archive Météosat à résolution dégradée par rapport à l'originale ont été utilisées pour sa construction à cause du coût des données à cette époque là. La base HelioClim-3, débutée en 2004, est, elle, construite en temps réel par acquisition des images Météosat toutes les 15 minutes. Sa résolution spatiale est de 3 km au nadir du satellite, c'est-à-dire au point de la Terre à la verticale du satellite. Elle décroît lorsqu'on s'éloigne de ce point. Elle est d'environ 7 km pour la France, et 8 à 9 km pour la Scandinavie. Les bases de données HelioClim-1 (1985-2005) et HelioClim-3 (à partir de 2004) sont regroupées et

homogénéisées pour pouvoir calculer le rayonnement UV de 1985 jusqu'à présent (Blanc et coll. 2011).

3.1.2 Des données de rayonnement solaire total aux données de rayonnement UV

Pour estimer le rayonnement UV reçu à la surface terrestre, une base de données a été développée en exploitant les bases de données existantes HelioClim. A partir de la valeur d'irradiation solaire totale reçue à la surface terrestre, il est possible de calculer l'irradiation UV, c'est-à-dire la dose d'UV cumulée sur un temps donné car ces deux types d'irradiation sont très corrélés (Seckmeyer et coll. 2008).

Le rayonnement solaire total est converti en rayonnement UV avec l'algorithme de l'Institut Royal de Météorologie (Wald et coll. 2010). Notons K_T , l'indice de clarté, E l'irradiation totale au sol et E_0 l'irradiation totale en dehors de l'atmosphère. Rappelons que l'indice de clarté est défini comme le ratio de l'irradiation totale sur l'irradiation totale en dehors de l'atmosphère :

$$K_T = E/E_0$$

La conversion du rayonnement total en rayonnement ultraviolet, UVA ou UVB, se fait avec la relation suivante :

$$UV = E [a - b K_T]$$

avec a et b positifs et constants pour chaque région spectrale.

Les estimations ainsi obtenues ont été comparées avec les mesures au sol dans deux localisations : à Villeneuve d'Ascq, dans le nord de la France, où la présence d'une couverture nuageuse est fréquente et à El Arenosillo, dans le sud de l'Espagne. Deux ans de mesures avec des spectroradiomètres pour mesurer spectralement l'irradiation ont permis d'obtenir les valeurs de rayonnement UVA et UVB. Les écarts entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées au sol augmentent avec l'intensité du rayonnement. Cet écart est plus grand à El Arenosillo qu'à Villeneuve D'Ascq. Les UVB sont sous-estimés et les UVA sont surestimés. Malgré ces biais, les comparaisons ont montré une bonne corrélation entre les valeurs prédites et les valeurs estimées (Wald et coll. 2010).

La base de données SoDa utilisée au cours de ce travail contient les valeurs d'irradiation UV journalière. Elle couvre une période de 20 ans, de 1988-2007 et se focalise sur l'Europe.

3.2 Atlas de l'irradiation UV en Europe

3.2.1 Présentation de l'Atlas

Nous avons créé un atlas avec ces données SoDa pour représenter la distribution spatiale de l'irradiation UV. Il représente les moyennes mensuelles de l'irradiation UV journalière pour les longueurs d'ondes correspondant à l'UVA, l'UVB et l'UV total (UVA et UVB) pour quatre périodes de cinq ans : 1988-1992 ; 1993-1997 ; 1998-2002 ; 2003-2007. Ces périodes ont été choisies en cohérence avec les périodes du Cancer Incidence in Five Continents qui publie les taux d'incidence de tumeurs dans le monde (Curado et coll. 2007).

Une carte est créée pour chaque type d'UV, chaque période et chaque mois ou la moyenne annuelle. Deux échelles de couleur sont utilisées. L'échelle de couleur absolue consiste en une échelle unique pour toutes les cartes représentant le même type d'UV, quels que soient le mois et la période. Sur toutes les cartes, une même valeur est représentée par la même couleur. L'échelle absolue permet de comparer rapidement le rayonnement UV entre les différentes périodes et les différents mois pour mettre en évidence les distributions spatiales d'irradiation pendant un même mois et une même période. L'échelle de couleur relative est unique pour chaque carte. Elle utilise les deux couleurs extrêmes de l'échelle dans chaque carte.

Une partie des cartes représente l'Europe. Elles couvrent l'ensemble des pays de l'Union Européenne. Mais les données sont limitées au nord et elles ne couvrent pas la totalité des pays nordiques. Les valeurs d'irradiation UV sont aussi représentées individuellement pour chaque pays de l'Union Européenne et la Norvège. Quelques-unes de ces cartes, représentant l'irradiation en juin et en novembre sur la période 2003-2007, sont fournies pour chaque pays à titre d'exemple dans l'annexe A.

Les cartes ont été construites avec le logiciel SAS par plusieurs étapes. La première consiste à représenter les valeurs de rayonnements comme des pixels de dimensions suivantes : cinq minutes d'angle de latitude sur cinq minutes d'angle de longitude, sur une zone couvrant l'Europe. Pour une meilleure représentation, nous avons ensuite ajouté un cache blanc sur les mers et les océans, puis représenter les frontières des pays ainsi que l'échelle des distances et une flèche pour indiquer le nord. Les cartes permettent ainsi une meilleure visualisation de l'exposition terrestre au rayonnement UV solaire sur les pays européens.

Pendant la période 2003-2007, deux étés (2003 et 2006) ont été caniculaires. La période la plus récente avant celle-ci, 1998-2002, a été choisie pour illustrer les résultats.

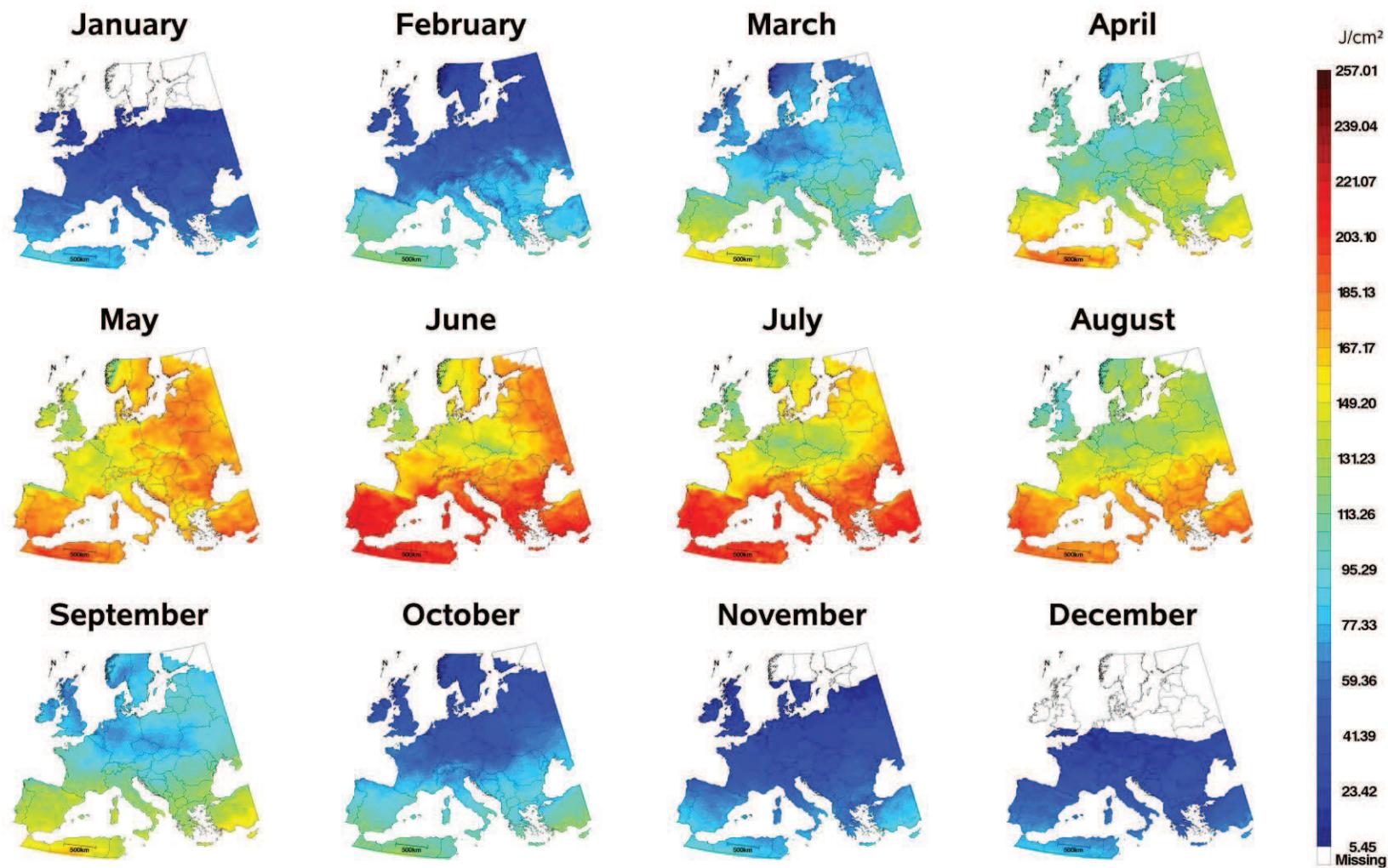
Des données de rayonnement UV sont manquantes au nord de l'Europe pour les mois de novembre, décembre et janvier. Pour compléter l'atlas, ces données ont été estimées.

L'ensemble des cartes sera disponible sur le site internet en construction du projet EuroSun.

L'ensemble des cartes des moyennes mensuelles d'irradiation UV total en Europe pendant la période 1998-2002 (Figure 3.1) montre la saisonnalité et la distribution géographique de l'irradiation. Comme attendu, l'irradiation UV est globalement plus élevée pendant la période estivale et dans le sud de l'Europe. Mais nous observons des écarts par rapport à ces distributions géographiques attendues. Ces écarts sont décrits ci-dessous, ainsi que les évolutions temporelles.

La distribution géographique dépend fortement du mois. Par exemple, en mai le nord de l'Allemagne reçoit une irradiation plus forte que le nord de la France, ce qui n'est pas le cas en juin. L'irradiation UV est en moyenne cinq fois plus élevée en été (défini comme juin et juillet) qu'en hiver (défini comme décembre et janvier) en prenant en considération chaque localisation où la valeur d'irradiation est disponible pour ces quatre mois. La latitude la plus au nord qui a pu être utilisée pour ce calcul est $52,3^\circ$ (ce qui correspond environ à la latitude d'Amsterdam et de Berlin). Ce ratio été/hiver est positivement corrélé avec la latitude ($r^2=0,83$), c'est-à-dire plus élevé au nord, du fait des fortes valeurs d'irradiations observées au nord de l'Europe en été. Le ratio été/hiver est de 4 à latitude 40° (où se trouve Madrid par exemple), 5 à 45° (approximativement la latitude de Lyon) et 7 à 50° (entre Paris et Lille). Malheureusement, au-delà de cette latitude, les données ne sont pas disponibles en hiver. Ce problème est développé dans la partie 3.2.4.

Le pic de la saisonnalité est plus tôt dans l'année aux latitudes élevées (Figure 3.2). Aux latitudes 50° et 60° , l'irradiation est la plus forte en mai et en juin tandis qu'à la latitude 40° , le pic est en juin et juillet. De plus, l'irradiation est en moyenne légèrement supérieure à 60° de latitude par rapport à 50° de latitude au mois de juin et similaire en mai et en juillet.



Europe, 1998-2002, UVtot, Absolute scale
 Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56)

Data source: SoDa, Eurosun project

Figure 3.1 : Moyenne mensuelle de l'irradiation UV total pour tous les mois (échelle absolue) en Europe, période 1998-2002

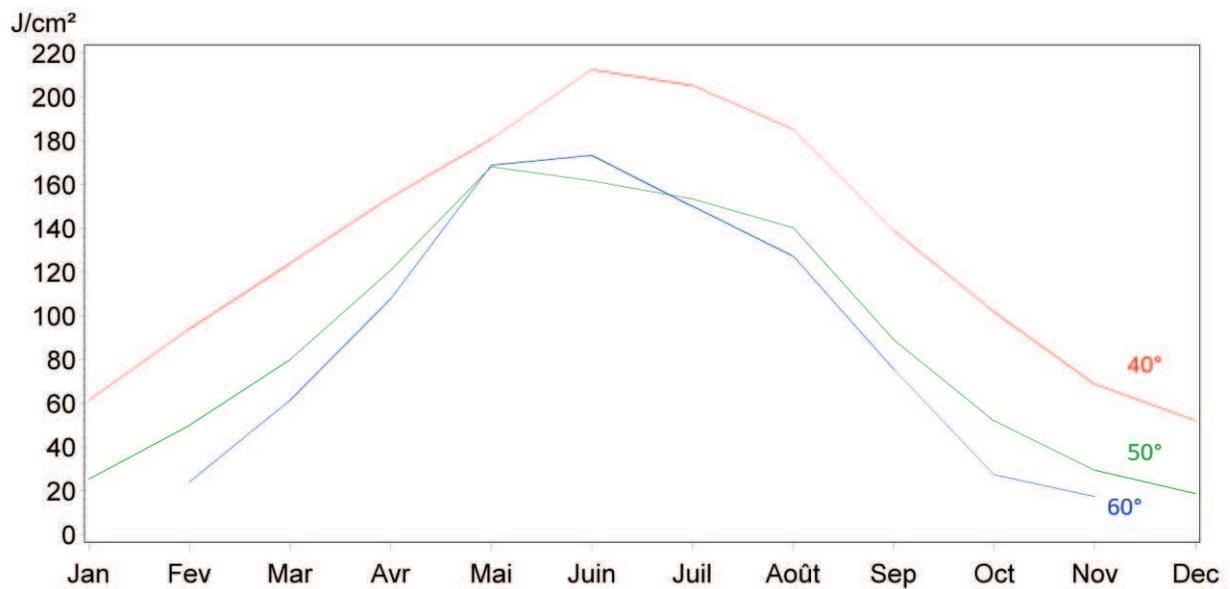


Figure 3.2 : Variation saisonnière des moyennes mensuelles de l'irradiation UVA journalière pour les latitudes 40°, 50° et 60° pour la période 1998-2002

3.2.2 Distribution spatiale de l'irradiation dans l'ultraviolet

Du fait de l'orientation de la Terre par rapport au soleil, le rayonnement atteignant la surface terrestre dans l'hémisphère nord devrait être plus élevé au sud qu'au nord. Cependant, les variations de l'irradiation UV en fonction de la latitude peut dépendre d'autres paramètres tels que le mois ou la longitude, en raison des variations spatiales de la topographie de la surface terrestre.

La relation entre l'irradiation UV et la latitude a été quantifiée avec un coefficient de corrélation de Spearman pour chaque mois. Il permet de déterminer le pourcentage de la variance de l'irradiation qui est associé à la latitude. Une régression linéaire simple a été réalisée afin de tester l'évolution de l'irradiation en fonction de la variation de latitude. Cette évolution a été calculée pour chacun des mois et est exprimée en pourcentage de l'irradiation moyenne mensuelle pour une augmentation de latitude de 10°.

L'irradiation est corrélée négativement avec la latitude pendant la plupart des mois (Figure 3.3) mais la corrélation varie fortement selon la saison. Cette corrélation est très forte

d'octobre à février. Pour ces mois, entre 89 et 96% de la variance de l'irradiation est associée à la latitude et l'irradiation diminue de plus de 60% de la moyenne mensuelle lorsque la latitude augmente de 10° (la diminution la plus forte est observée pour le mois de décembre : -91%). Le pourcentage de la variance de l'irradiation qui est associée à la latitude est plus faible pour les mois estivaux ; il est compris entre 40 et 77% pour les mois de mars et avril ainsi que les mois de juin à septembre et elle est de seulement 3% en mai. La diminution la plus forte pour ces sept mois est observée en mars et elle est de 35% pour une augmentation de 10° de latitude.

On attendait une symétrie des cartes autour des mois de juin et juillet, le solstice d'été ayant lieu autour du 21 juin. Or la diminution de l'irradiation UV en fonction de la latitude est sept fois plus importante en août qu'en mai (août : -20% et mai : -3%). En août, l'irradiation suit le gradient de latitude, quelle que soit la longitude (Figure 3.1), ce qui n'est pas observé en mai pour les longitudes les plus à l'est.

L'atlas met donc en évidence la présence de distributions géographiques particulières indépendantes de la latitude, en particulier en été.

A l'échelle de l'Europe, par exemple au mois de juin (Figure 3.4), les îles britanniques sont très faiblement irradiées par rapport au reste de l'Europe même à latitude équivalente ou supérieure. De manière générale, nous observons un gradient ouest-est au nord du continent. Ainsi, les pays baltes, la Biélorussie et le sud de la Finlande sont fortement irradiés. L'irradiation sur cette zone est plus forte qu'au Benelux, en Allemagne et en Pologne qui se trouvent pourtant plus au sud. Le sud de la Norvège et de la Suède sont aussi plus fortement irradiés que ces pays. Au sud de l'Europe, l'irradiation de la surface terrestre est plus élevée près des côtes (Figure 3.4). Sur cette zone, l'irradiation semble plus importante à l'ouest qu'à l'est.

Les régions montagneuses sont visibles sur les cartes d'irradiation UV. Elles peuvent être responsables de la forte irradiation sur la péninsule ibérique et sur les alpes. Les variations d'altitude et de nébulosité peuvent avoir un impact sur l'irradiation.

Au sein de chaque pays, il est possible d'observer des distributions particulières.

Par exemple, en Espagne et en Norvège, l'irradiation varie au niveau des chaînes de montagnes. Le nord de l'Espagne, au nord de la cordillère cantabrique, a reçu beaucoup moins

d'irradiation que le reste du pays. De même, à l'ouest de la Norvège, l'irradiation est plus faible.

Si nous regardons de plus près ce qui se passe en France au mois de juin (Figure 3.5), la région parisienne est plus irradiée que le centre et le sud-ouest du pays. Le sud-est reçoit un rayonnement très intense, comparable à celui qui est observé au sud de l'Italie (Figure 3.1). L'irradiation UV en France en juin est hétérogène. Les valeurs les plus faibles, observées au nord de la France, sont autour de 145 J/cm^2 , les plus élevées, observées dans le sud-est, autour de 225 J/cm^2 . Dans le sud-ouest, l'irradiation peut descendre aux alentours de 155 J/cm^2 . Ces distributions particulières sont similaires pour les autres mois estivaux (Figure 3.6). En hiver, de même que pour l'ensemble de l'Europe, l'irradiation est plus fortement corrélée à la latitude. Le pic de la saisonnalité de l'irradiation UV est en juin.

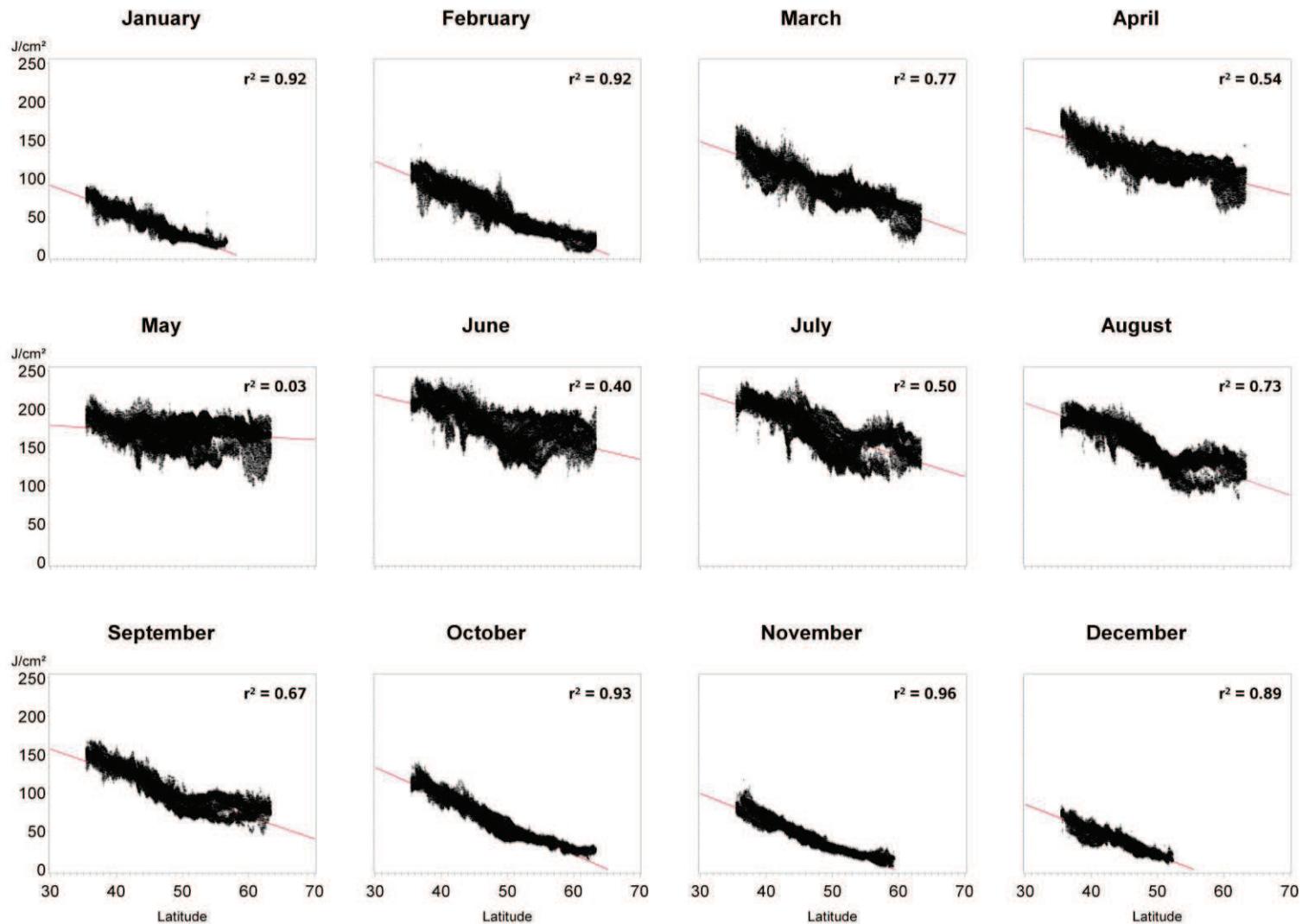
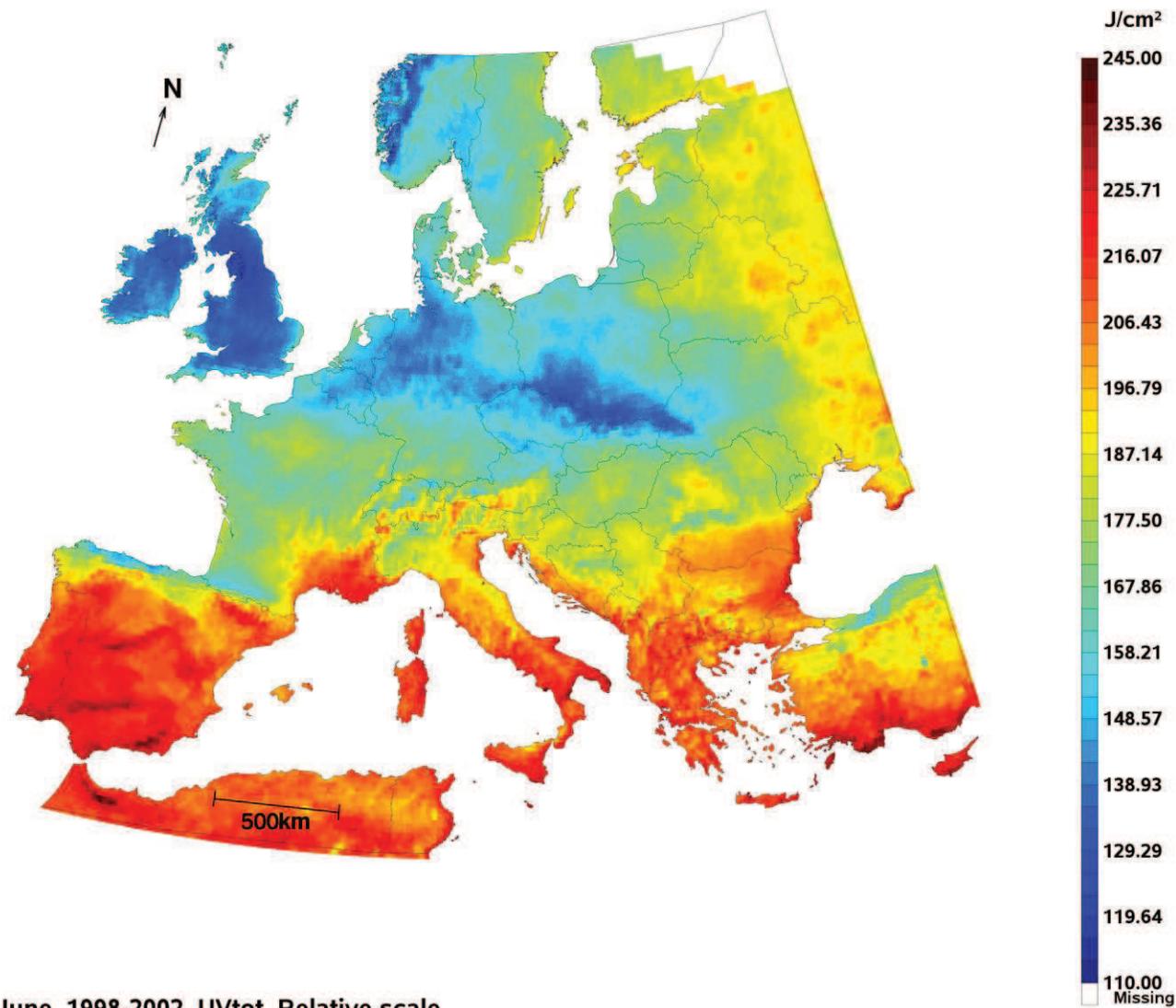


Figure 3.3 : Moyenne mensuelle d'irradiation journalière dans l'UV total sur la période 1998-2002 en fonction de la latitude. Les droites rouges sont les droites de regression entre l'irradiation et la latitude.



Europe, June, 1998-2002, UVtot, Relative scale
 Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56)

Data source: SoDa, Eurosun project

Figure 3.4 : Moyenne mensuelle de l'irradiation UV total journalière en juin (échelle relative) en Europe, période 1998-2002

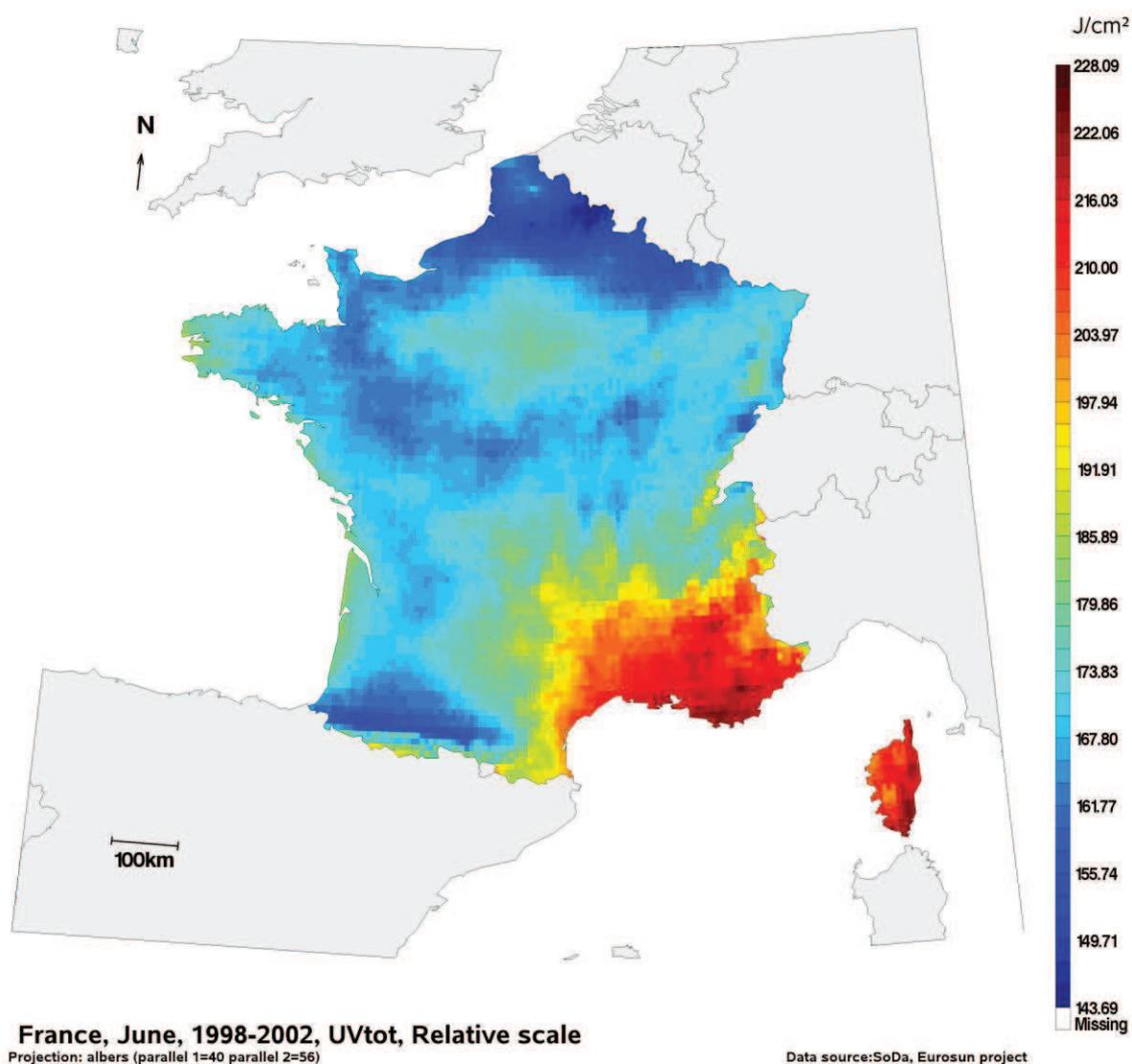
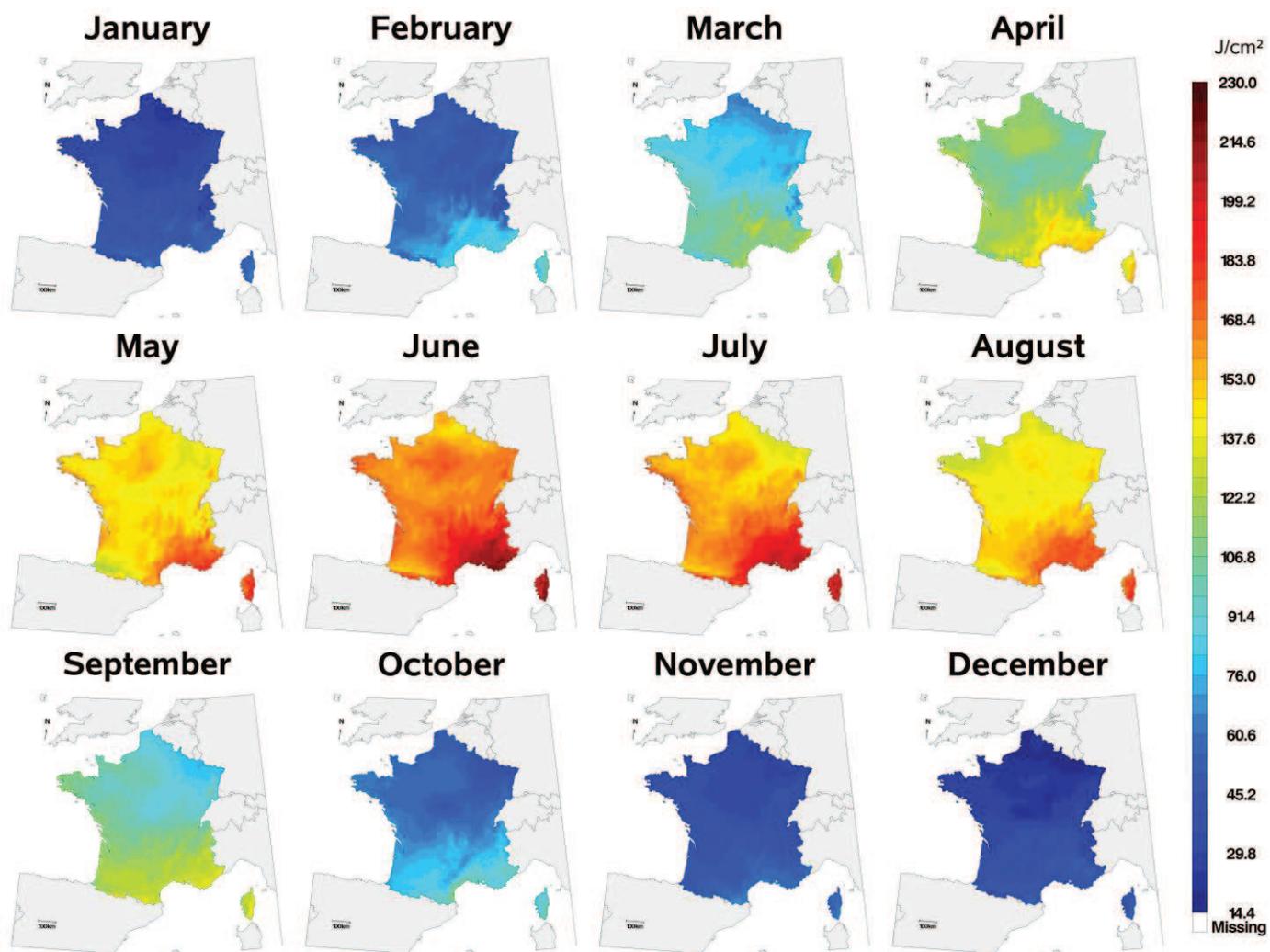


Figure 3.5 : Moyenne mensuelle de l'irradiation UV total journalière en France sur la période 1998-2002 au mois de juin



France, 1998-2002, UVTot, Absolute scale
 Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56)

Data source: SoDa, Eurosun project

Figure 3.6 : Moyenne mensuelle de l'irradiation UV total journalière en France sur la période 1998-2002

3.2.3 Evolution temporelle

Pour étudier la tendance temporelle de l'irradiation UV, l'évolution au cours des quatre périodes étudiées a été définie comme étant le pourcentage de l'irradiation UV pour chaque période par rapport à l'irradiation UV reçue au cours de la première période. L'évolution est représentée pour chaque mois sur la Figure 3.7. Les doses d'irradiation sur les mers et l'océan sont exclues pour l'analyse de l'évolution pour ne garder que l'irradiation sur les terres.

L'irradiation UV terrestre a tendance à diminuer légèrement au cours des quatre périodes (Figure 3.7). En moyenne, nous observons une diminution annuelle de 0,4% de l'irradiation sur 1988-1992 ($p < 0,01$). L'évolution temporelle a été testée avec une régression simple pour chacun des mois. L'irradiation augmente de 0,1% de la valeur observée sur la première période (1988-2002) par an en juin ($p = 0,06$). Il s'agit du seul mois pour lequel nous observons une augmentation. L'irradiation reste stable en avril ($p = 0,52$) et septembre ($p = 0,80$) et diminue d'environ 0,4% de la valeur de 1988-2002 par an en mai ($p < 0,01$), juillet ($p = 0,03$) et août ($p < 0,01$). Pour les mois hivernaux, d'octobre à février, la diminution est plus forte (octobre : $p < 0,01$; novembre : $p = 0,04$; décembre : $p = 0,57$; janvier : $p = 0,07$; février : $p = 0,01$). Elle monte jusqu'à 1.2% par an en octobre. Cependant, il faut noter que le graphique de la Figure 3.7 ne permet pas de comparer les évolutions entre les mois car la zone géographique disponible pour le calcul n'est pas la même pour tous les mois. Il prend en compte moins de valeurs pour les mois d'hiver car certaines données sont manquantes au nord de l'Europe en cette saison.

Cette évolution temporelle varie aussi à travers l'Europe. Cette variation spatiale est particulière pour chaque mois. Pour étudier l'évolution spatio-temporelle, l'évolution temporelle est définie comme le pourcentage de l'évolution annuelle par rapport à l'irradiation reçue pendant la première période pour chaque pixel représenté sur les cartes. Les cartes de la Figure 3.8 montrent que l'évolution temporelle n'est pas homogène à travers l'Europe. En juin, nous observons une augmentation de l'irradiation sur une grande partie de l'Europe mais elle diminue au nord du continent. Pour les mois de mai, juillet et août, la diminution globale est similaire, mais la répartition spatiale est différente. En août, la diminution est faible.

Nous n'observons pas d'évolution sur l'ensemble de l'année car l'irradiation ne varie pas en été au cours des périodes. Une diminution au cours du temps est observée en hiver mais elle

n'influe pas sur l'évolution moyenne sur les douze mois du fait des faibles valeurs d'irradiation observées pendant cette saison.

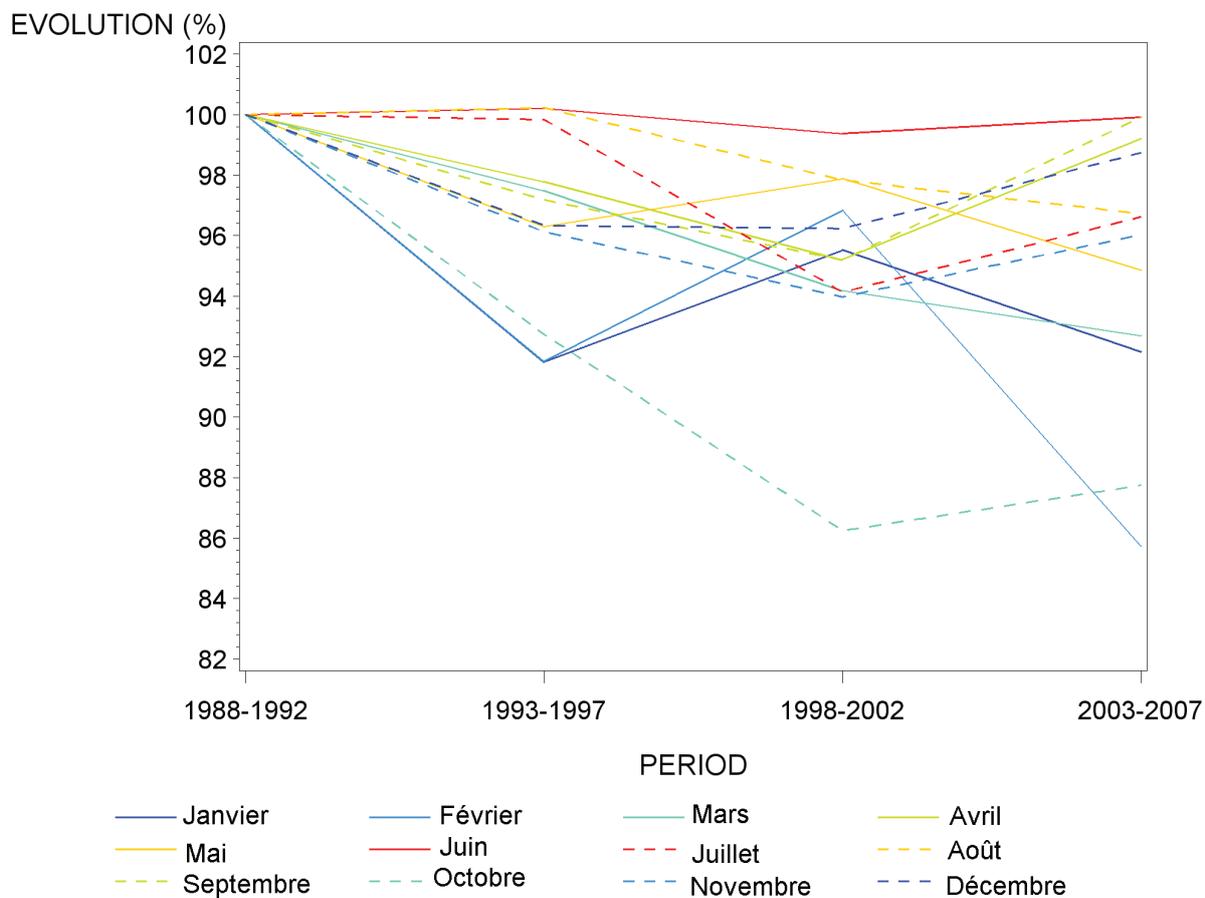
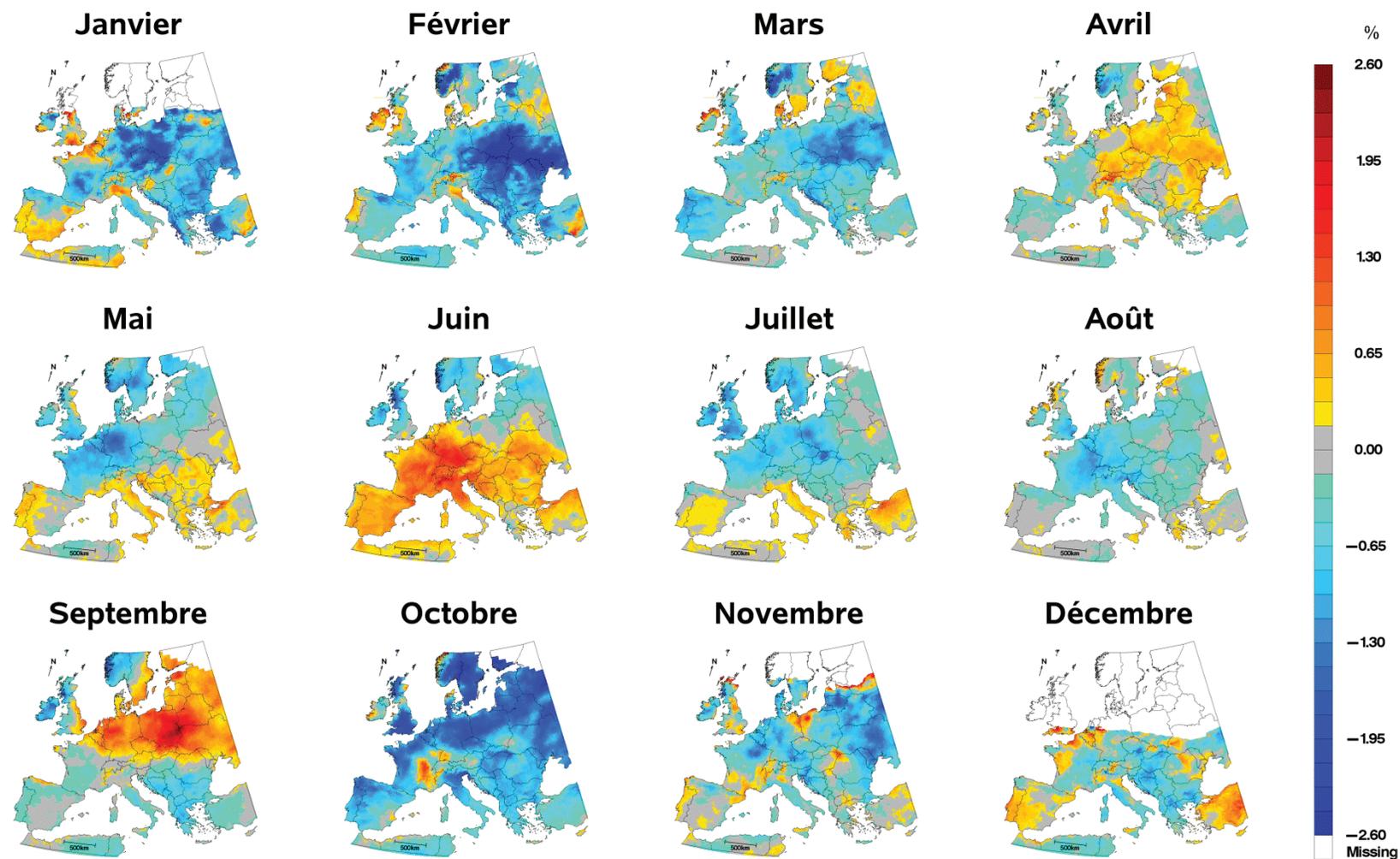


Figure 3.7 : Evolution de l'irradiation UV total en pourcentage de la première période



Europe, évolution annuelle de l'irradiation UV (en pourcentage)

Projection: albers (parallèle 1=40 parallèle 2=56)

Source des données: SoDa, projet Eurosun

Figure 3.8 : Carte de l'évolution spatio-temporelle des moyennes mensuelles de l'irradiation UV totale journalière

3.2.4 Estimation des données manquantes au nord de l'Europe en hiver

Les cartes d'irradiation UV des mois de novembre, décembre et janvier sont incomplètes au nord (Figure 3.1). L'angle solaire zénithal est très grand, c'est-à-dire que le soleil est « bas dans le ciel », sur cette zone en hiver ce qui rend le calcul de l'irradiation à partir des données satellites trop imprécis.

Nous avons extrapolé ces données en nous basant sur les variations géographiques d'un autre mois pour lequel cette zone est couverte. Le mois de février a été choisi car la corrélation entre l'irradiation de chacun de ces trois mois « incomplets » (novembre, décembre et janvier) et l'irradiation de février est très forte. Par exemple, le coefficient de corrélation est de 0,91 entre les valeurs d'irradiation du mois de février et celles de janvier (Figure 3.9). L'estimation des données manquantes se base sur les variations géographiques de l'irradiation en février et sur la différence entre la dose moyenne du mois « incomplet » et la dose moyenne du mois de février.

Les valeurs au sud peuvent influencer fortement sur la moyenne car elles sont élevées. Les données à extrapoler se situent au nord de l'Europe et sont supposées être plus faibles. Les moyennes ne sont donc pas calculées sur toutes les valeurs disponibles, seul le quart des valeurs UV disponibles le plus au nord pour le mois « incomplet » sera utilisé pour le calcul de la moyenne, les valeurs correspondant à la même zone géographique sont utilisées pour le calcul de la moyenne pour le mois de février.

Pour chaque pixel de la carte, de coordonnées i et j , les variations géographiques du mois de février sont exprimées par le taux de l'écart à la moyenne :

$$t_{i,j}^{f^{ev}} = (UV_{i,j}^{f^{ev}} - \overline{UV^{f^{ev}}}) / \overline{UV^{f^{ev}}}$$

Avec $UV_{i,j}^{f^{ev}}$, l'irradiation au pixel de coordonnées i et j pour le mois de février, et $\overline{UV^{f^{ev}}}$ la moyenne pour le mois de février en utilisant les valeurs correspondant aux localisations du quart le plus au nord des valeurs disponibles sur les cartes des mois « incomplets ».

Au final, chaque valeur manquante est obtenue par extrapolation comme suit :

$$UV_{i,j} = \overline{UV} + t_{i,j}^{f^{ev}} * \overline{UV}$$

Avec \overline{UV} la moyenne du quart le plus au nord des valeurs disponibles sur les cartes des mois « incomplets ».

Les données sont estimées avec ces formules pour toute l'Europe, y compris toute la zone sur laquelle les valeurs d'irradiation sont disponibles. Ainsi, les nouvelles estimations peuvent être comparées avec les données déjà disponibles sur cette zone pour la validation de la méthode.

Le coefficient de corrélation entre l'irradiation UVA estimée et l'irradiation UVA de la base de données est 0,96 pour le mois de novembre, 0,93 pour le mois de décembre et 0,95 pour le mois de janvier. La corrélation entre les valeurs estimées et les données SoDa est très forte mais les valeurs élevées sont sous-estimées et les valeurs faibles sont surestimées (Figure 3.10).

Pour corriger ce biais, nous avons utilisé les résidus, définis comme la différence entre ces valeurs estimées et les valeurs de SoDa. Les résidus sont négatifs pour les valeurs d'irradiation les plus élevées et positifs pour les valeurs les plus faibles. La variation des résidus en fonction des valeurs estimées est analysée avec une régression linéaire. Les paramètres de ce modèle de régression représentent le lien entre le biais de l'estimation et nos valeurs estimées. Par conséquent, à partir de ces paramètres et des valeurs estimées, le biais peut-être extrapolé pour la zone où les données SoDa sont manquantes. Il est ensuite utilisé pour ajuster l'estimation en recentrant les résidus autour de zéro. Les données ainsi ajustées sont représentées en fonction des données SoDa sur la Figure 3.11.

Les valeurs d'irradiation ajustées sont ensuite utilisées pour remplir les valeurs manquantes dans l'atlas. Les cartes complétées sont présentées sur la Figure 3.12.

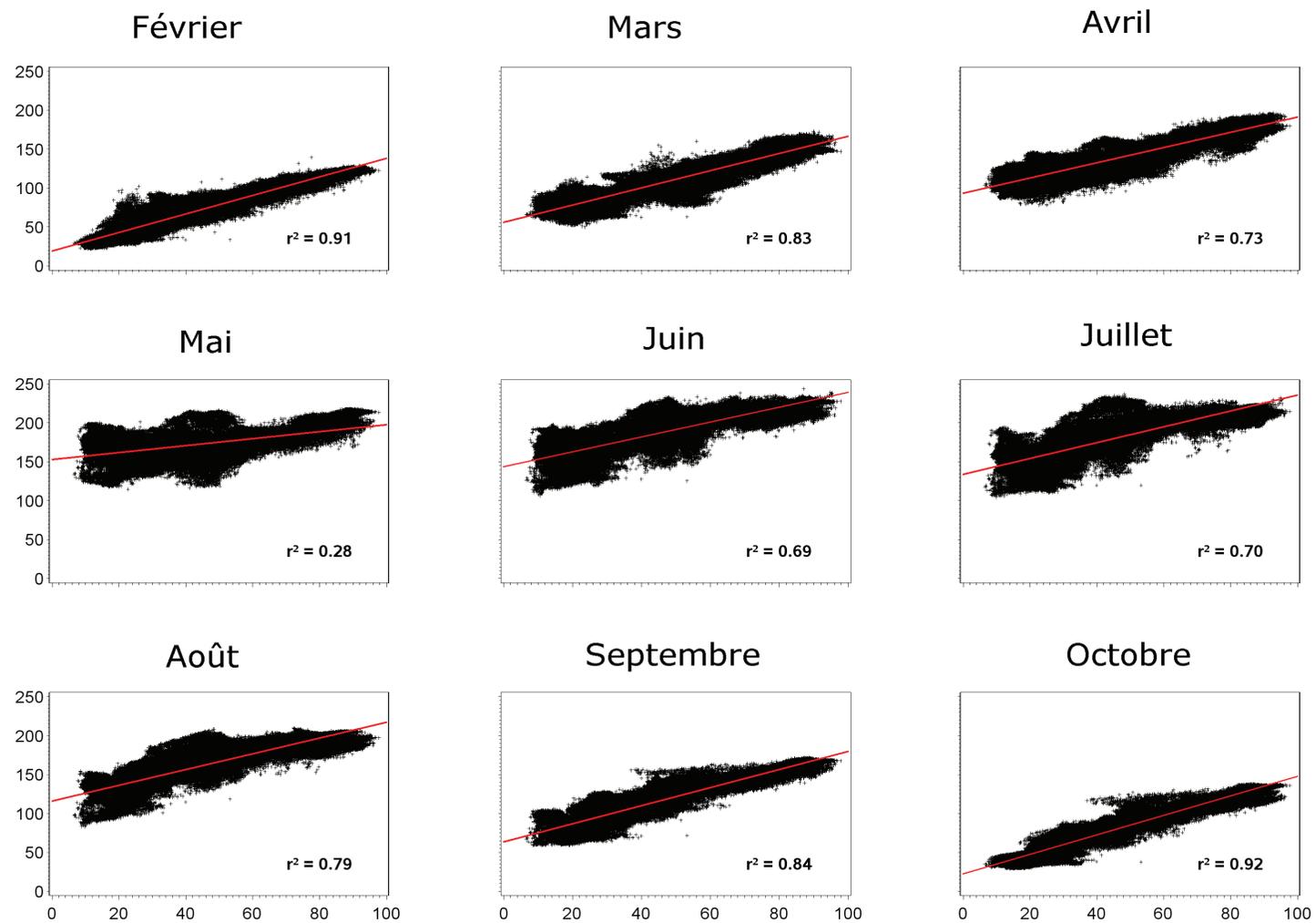


Figure 3.9 : Corrélation entre les valeurs d'irradiation UVA du mois de janvier et les valeurs d'irradiation UVA de chacun des mois pour lesquels les données sont disponibles pour toute l'Europe, sur la période 1998-2002

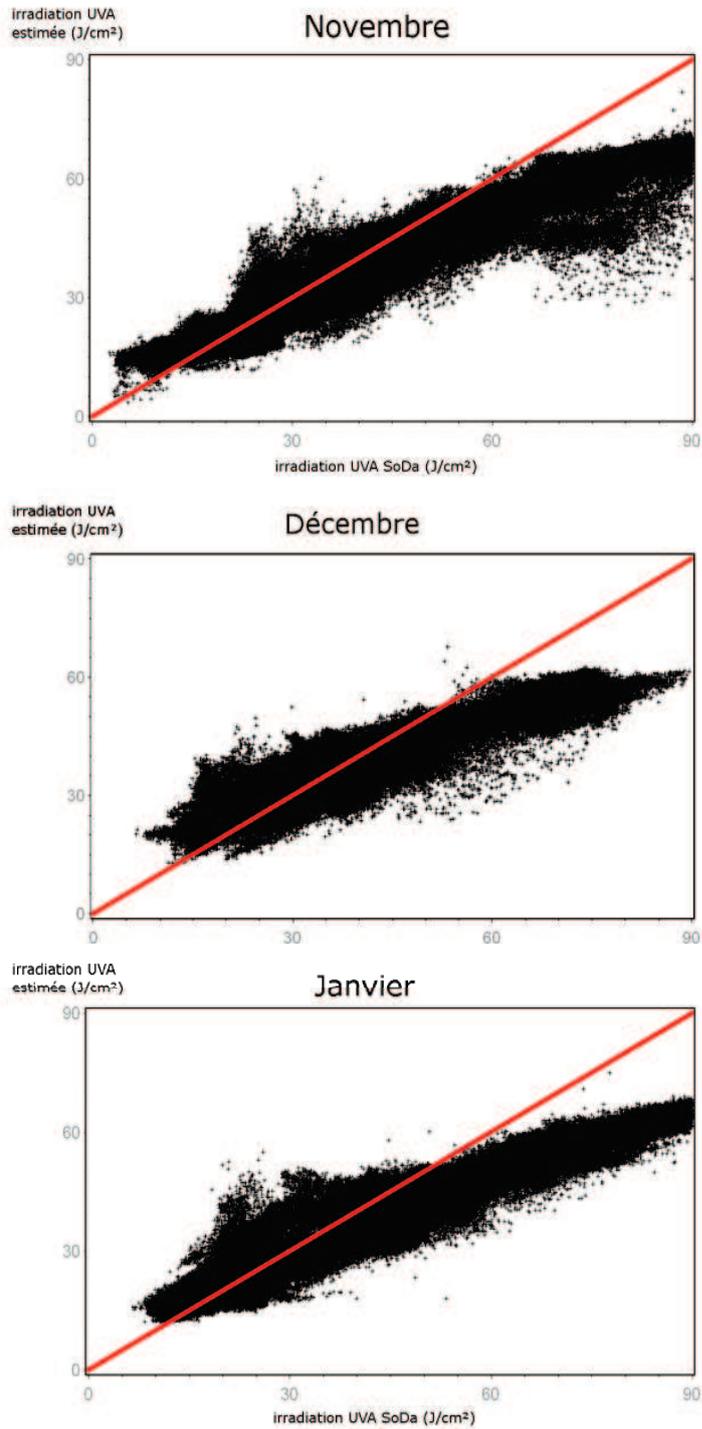


Figure 3.10 : Corrélation entre l'estimation de l'irradiation UVA et les données SoDa

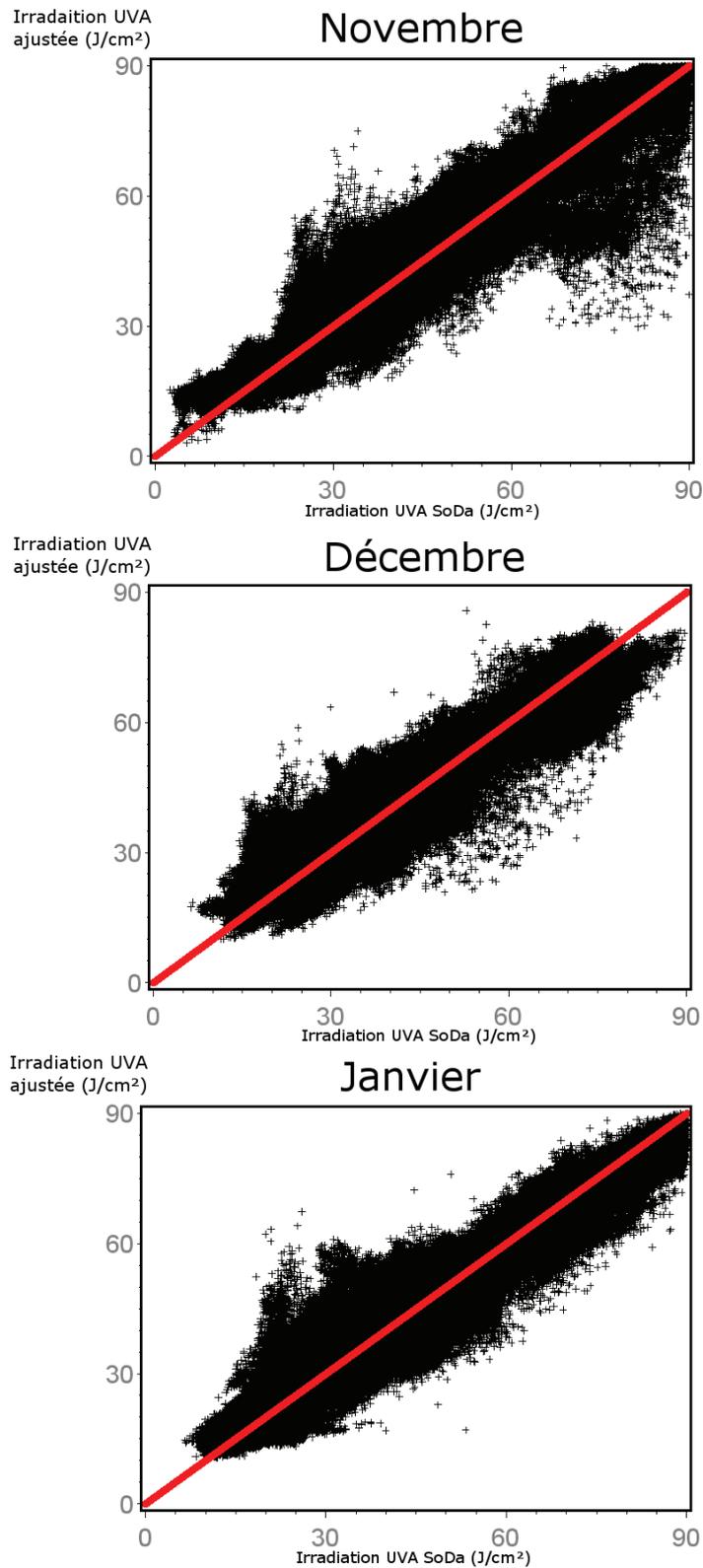


Figure 3.11 : Corrélation entre l'estimation de l'irradiation UVA ajustée et les données SoDa

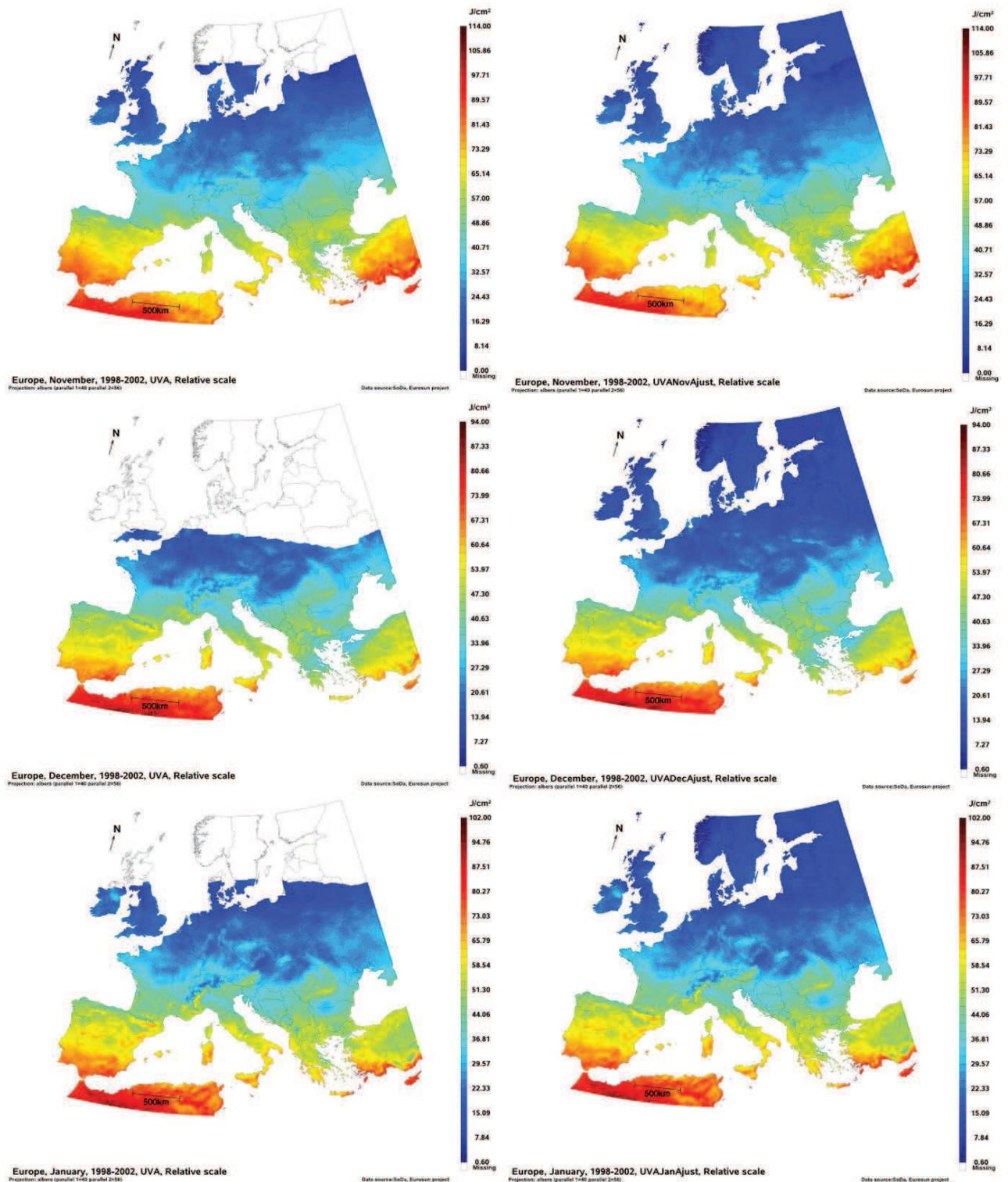


Figure 3.12 : Moyenne mensuelle de l'irradiation journalière en novembre, décembre et janvier avec les données SoDa seules (à gauche) et complétées par les données estimées (à droite)

3.3 Comparaison avec l'atlas d'irradiation UV de l'action COST 726

Pendant le déroulement du projet Eurosun, l'action COST 726 a développé une base de données de l'irradiation UV en Europe sur une période de cinq décennies (de 1957 à 2002). Elle a mis à disposition sur un site internet (<http://www-med-physik.vu-wien.ac.at/uv/cost726/cost726.htm>) les données, que nous avons pu extraire.

COST (European Cooperation in Science and Technology) est un large réseau intergouvernemental européen pour la coopération dans les travaux de recherche. L'action COST 726 a pour objectif principal d'améliorer la compréhension des distributions du rayonnement UV en Europe et de son évolution sur de longues périodes. L'irradiation UV a été estimée sans mesure directe du rayonnement solaire mais avec des outils de modélisation. Les modèles utilisés sont des modèles de transfert de rayonnement. Ils sont basés sur les effets de diffusion et d'absorption des composants rencontrés par le rayonnement UV pendant son trajet de l'extérieur de l'atmosphère jusqu'à la surface terrestre. Ils prennent en compte l'angle solaire zénithal, l'ozone, les molécules d'air, les particules d'aérosol, la nébulosité, l'albédo et l'altitude.

Les paramètres inclus dans le modèle sont disponibles sur cinq décades et permettent d'estimer des doses d'irradiation d'UV journalières.

L'irradiation est représentée sous forme de cartes couvrant la zone de 30,5° nord à 80,5° nord et de 25,5° ouest à 35,5° est avec une résolution spatiale de 0,05° × 0,05° et sous forme de tableau au format texte pour la même zone mais avec une résolution spatiale de 1° × 1°. Ils présentent le rayonnement UV pondéré par le spectre d'action érythémateuse pour ne prendre en compte que l'effet érythémateux, c'est-à-dire majoritairement des UVB.

Méthode de pondération spectrale utilisée dans le projet COST 726

Les effets radiatifs des composants de l'atmosphère dépendent de leur quantité et de leurs propriétés. La modélisation permettant de prendre en compte ces effets divise l'atmosphère en plusieurs couches avec des propriétés de diffusion et d'absorption propres à chacune. Il en

résulte un modèle simple si nous l'appliquons pour une localisation donnée à une date donnée. Mais il n'est pas possible d'estimer chaque point séparément car les paramètres d'entrée ne sont pas disponibles pour chacun de ces points. Les résultats de l'action COST sont donc obtenus par méthodes d'interpolation. En effet, les valeurs réelles des composants atmosphériques et des propriétés de la surface terrestre sont souvent indisponibles ou de mauvaise qualité. De plus, ces composants ont un effet dépendant de la longueur d'onde. La modélisation se fait donc en fonction de la longueur d'onde.

La création des cartes a été faite à partir des données estimées par des modèles de transfert de rayonnement. Il prend en compte les valeurs d'angle solaire zénithal (26 valeurs de 1° à 85°), la colonne d'ozone totale (33 valeurs de 100 à 600 DU), l'épaisseur des aérosols à 308 nm (8 valeurs entre 0 et 1,4), l'albédo de la surface (5 valeurs de 0 à 1) et l'altitude (6 valeurs de 0 à 4 000 mètres). Les doses journalières sont recalculées à partir des doses estimées 48 fois par jour (une fois toutes les 30 minutes) en incluant le midi solaire local.

Comparaison des données UV modélisées et mesurées dans le projet COST

Le rayonnement UV solaire est mesuré avec des spectroradiomètres, des radiomètres larges bandes ou des radiomètres multibandes à filtre. Les spectroradiomètres fournissent le rayonnement UV spectral et leurs résultats sont utilisés comme référence. Les radiomètres sont plus nombreux car plus simples d'utilisation et moins coûteux. Les radiomètres multibandes à filtre ont fourni le rayonnement UV pondéré sur le spectre érythémateux. Douze stations ont été incluses dans la validation du modèle avec les critères suivants : plus de 18 mois estivaux (mai-août) avec au moins 15 jours par mois et au moins 5 ans de données avec au moins 220 jours couverts disponibles pour chaque année. Au minimum un des critères suivants devait être validé : la pente de la représentation des doses estivales mensuelles modélisées sur les doses estivales mensuelles mesurées doit être supérieure à 0,75 ou le coefficient de corrélation entre les doses estivales mensuelles modélisées et mesurées doit être supérieure à 0,8 ou l'écart-type du ratio des doses estivales annuelles mesurées sur les doses estivales annuelles modélisées doit être inférieur à 0,05. La couverture géographique des 12 sites ainsi sélectionnés va de la latitude 40° nord à 67° nord.

16 modèles différents ont été testés en se basant sur des données issues de mesures au sol. Les meilleurs résultats sont obtenus avec les modèles basés sur les mesures au sol de nébulosité et

d'ozone mais les données sont disponibles sur une plus faible période. A noter que les écarts les plus larges sont obtenus pour les valeurs de rayonnement les plus faibles.

Le modèle choisi prend comme paramètres la colonne totale d'ozone et l'angle solaire zénithal pour calculer le rayonnement UV en condition de ciel clair. Puis le résultat est corrigé pour l'albédo de la surface terrestre et pour les caractéristiques des aérosols. Les UV-CMF (facteur de modification des nuages) proviennent de mesures pyranométriques et prend en compte l'angle zénithal solaire.

Résultats de l'action COST et comparaison avec les données SoDa

D'éventuelles tendances temporelles ont été étudiées en comparant les valeurs de 2002 par rapport aux valeurs de 58-78. Des augmentations ont été détectées pour les périodes estivales aux latitudes basses, notamment en Grèce. Une diminution a été identifiée aux latitudes plus élevées. Globalement, l'irradiation reste stable dans le temps. Ces tendances temporelles sont similaires à celles observées avec les données SoDa.

La raison la plus probable de la présence de « points chauds », i.e. les zones pour lesquelles le rayonnement est plus important, est la différence de nébulosité.

Dans le rapport final de l'action COST (disponible sur <http://www-med-physik.vu-wien.ac.at/uv/cost726/cost726.htm>, consulté le 15 septembre 2011), une comparaison est faite entre les cartes issues de cette étude et les données issues du satellite Météosat sur les doses érythémateuses du 21 juillet 1997. Les valeurs au sud de la latitude 45° nord pour les données COST sont plus élevées que celles des données Météosat.

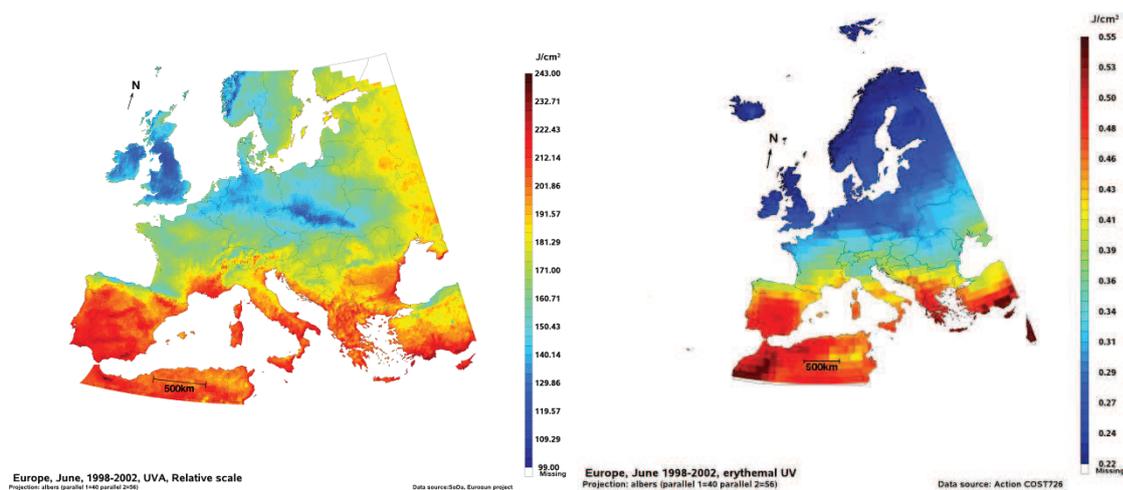


Figure 3.13 : Moyenne mensuelle de l'irradiation journalière en juin sur la période 1998-2002 d'après les données SoDa dans l'UVA (à gauche) et d'après les données COST dans l'UV erythémateux (à droite).

La figure 3.13 représente sur des cartes la moyenne mensuelle de l'irradiation journalière pour le mois de juin sur la période 1998-2002, avec les données SoDa et avec les données issues du projet COST 726 et disponibles sur le site internet (<http://www-med-physik.vu-wien.ac.at/uv/cost726/cost726.htm>). Certaines caractéristiques de la distribution géographique se retrouvent sur les deux cartes, comme une forte irradiation près des côtes méditerranéennes, ou une plus faible irradiation au nord de la cordillère cantabrique, en Espagne.

L'effet de la latitude est plus prononcé en été avec les données de l'action COST, qu'avec nos données. Pour les données COST, la diminution de l'irradiation est de 28% à 51% de la dose mensuelle moyenne pour une augmentation de 10° de latitude pour les mois de mars à septembre sur la période 1998-2002. Cette diminution est de 70% à 97% le reste de l'année. Ces résultats sont proches des nôtres, bien que les nôtres aient été obtenus à partir de données d'UVA, excepté pour le mois de mai où l'on n'avait pas observé de relation avec la latitude avec les données SoDa.

Cependant nous retrouvons les mêmes tendances géographiques, en particulier celles qui dépendent probablement de la nébulosité (par exemple, une plus forte irradiation au sud-est de la France qu'au sud-ouest). De même, les moyennes mensuelles des doses érythémateuses journalières issues du projet COST ont été comparées avec les doses d'UVA de SoDa pour les

mois d'avril 1984 et de juin 1991. Les cartes représentent l'écart à la dose moyenne. Les résultats sont aussi cohérents entre les deux estimations.

3.4 Discussion

Le projet Eurosun a permis la réalisation d'une cartographie de l'irradiation UV (UVA, UVB et UV total) en Europe avec une résolution de 10 km et de ses variations au cours des vingt dernières années.

Les distributions spatiales pour un mois et une période donnés sont facilement repérés grâce à une représentation de cartes en échelle relative, alors que les variations temporelles et saisonnières en fonction des localisations géographiques ont été observées sur les cartes en échelle absolue. La latitude est considérée comme un fort prédicteur de l'irradiation UV, c'est pourquoi elle est utilisée dans certaines études comme variable d'approximation pour l'analyse du rôle de l'irradiation UV dans le développement de certaines maladies. Cependant, nos résultats montrent une corrélation faible entre la latitude et l'irradiation UV en été. Ils ont par exemple mis en évidence que l'irradiation ambiante au nord de l'Europe est très élevée en mai. Des zones de forte irradiation ont été détectées, par exemple au sud des pays nordiques ou en région parisienne. Les îles britanniques sont peu irradiées par rapport aux autres pays, y compris par rapport aux pays de latitude équivalente.

L'atlas permet aussi de surveiller les changements dans l'irradiation ambiante, notamment une éventuelle augmentation dans le temps due à la diminution de la couche d'ozone. 90% de l'ozone atmosphérique se trouve dans la stratosphère. De 1970 à 1991, l'ozone stratosphérique diminue de 1.2% par décennie en Europe en moyenne. La diminution s'est accélérée sur la partie la plus récente de la période, jusqu'à -4% de 1978 à 1991 (Armstrong 1994).

Cependant, nos résultats ne montrent aucune tendance temporelle globale dans ce sens, ce qui est confirmé par les résultats du projet COST basés sur des données de 1958 à 2002. Ces résultats ont aussi montré des caractéristiques de la distribution géographique similaires aux nôtres, notamment une relation plus faible entre la latitude et l'irradiation UV en été qu'en hiver. Bien que le projet COST estime l'irradiation UV pondérée par la courbe d'action de l'érythème et que nous présentions des données d'UVA, le fait d'avoir retrouvé les mêmes

caractéristiques particulières de la distribution géographique et l'absence d'augmentation ou de diminution au cours du temps conforte nos résultats.

Les cartes avec une échelle absolue mettent en évidence une saisonnalité marquée de l'irradiation. L'irradiation est cinq fois plus importante en été qu'en hiver et elle est déjà très élevée dès le mois de mai en particulier dans les pays du nord.

Le principal avantage de notre atlas est qu'aucune mesure au sol n'est nécessaire pour les estimations. Les mesures ont une bonne résolution pour toute la zone disponible, ce qui permet de mieux détecter des distributions géographiques particulières, comme des régions où l'irradiation dans l'UV est importante. Cependant, il ne s'agit pas de mesures directes comme nous pouvons obtenir avec des instruments de mesure au sol, mais il faut toutefois remarquer que des validations ont été effectuées avec des instruments de mesures au sol.

Les images du satellite Météosat sont fréquentes mais les travaux n'utilisent que les valeurs moyennes mensuelles. Les doses journalières auraient permis de faire une analyse plus sensible des variations saisonnières. Nous avons toutefois pu repérer que les doses sont déjà élevées en mai dans les pays nordiques et que le pic est plus tard dans l'année que pour les latitudes plus basses. Les données qui proviennent des images du satellite Météosat qui est géostationnaire prennent en compte la durée journalière d'ensoleillement, qui varie selon la latitude et la saison, et elles viennent de mesures directes de l'irradiation globale (directe et diffuse).

Une autre limite est le groupement des données par périodes de cinq ans dans notre étude. Toutefois, les données par année existent dans la base SoDa. Pour étudier la tendance temporelle, des données annuelles auraient fourni une meilleure puissance statistique. Cependant aucune tendance temporelle globale n'a été détectée dans l'analyse de l'action COST qui repose sur 45 ans de données.

Des raisons physiques liées à l'angle zénithal solaire ont limité l'estimation dans le nord de l'Europe en novembre, décembre et janvier. Les valeurs étant disponibles sur cette zone pour les autres mois, nous avons utilisé la variabilité géographique observée sur l'un d'eux pour estimer ces données manquantes. Les variations de nébulosité entre les mois, qui est un

facteur important de variation de l'irradiation de l'UV, ne sont pas prises en compte dans ce modèle. Cependant, un mois hivernal c'est-à-dire proche des mois de novembre, décembre et janvier a été utilisé pour l'estimation et on peut supposer que les variations de nébulosité sont proches au sein d'une même saison. Après validation des résultats, l'atlas a pu être complété pour avoir une représentation géographique plus complète. Bien que les valeurs d'irradiation ainsi estimées ne soient pas aussi fiables que celles issues de la base de données, un ajustement a permis de supprimer la surestimation pour les valeurs faibles. Ainsi, nous avons obtenu une bonne estimation pour les valeurs au nord de l'Europe.

4. Exposition au rayonnement UV solaire de populations européennes

4.1 Estimation de l'exposition individuelle au rayonnement UV solaire

Des enquêtes ont été mises en place dans plusieurs pays européens pour évaluer l'exposition des individus au rayonnement UV solaire en se basant sur le lieu et la durée d'exposition au soleil ainsi que sur les valeurs de rayonnement estimées dans la base de données SoDa.

Les réponses au questionnaire sont couplées avec la base de données Geonames, qui contient les coordonnées géographiques des communes, pour géolocaliser les lieux de vacances et de résidence des participants. Grâce à ces coordonnées, la valeur du rayonnement UV est récupérée dans la base de données SoDa, pour chaque jour de chacun des lieux sur lesquels se trouvaient les individus.

Questionnaire

Le suivi des populations est réalisé avec un questionnaire portant sur le lieu de résidence ainsi que sur la date et le lieu des vacances. Pour chaque saison et pour chaque période de vacances le temps passé en extérieur est enregistré. Les réponses sont ensuite couplées avec les valeurs d'irradiation de la surface terrestre obtenues à partir des données du satellite. Ainsi, les doses cumulatives journalières et annuelles reçues au cours des dernières années sont estimées pour chaque participant.

Dans chacun des pays participant à l'enquête, un échantillon est interviewé par téléphone, avec le système CATI (Computer Assisted Telephone Interview). La durée des interviews a été estimée à 14 minutes. Notre questionnaire enregistre les caractéristiques démographiques et les facteurs de sensibilité au soleil. Il a été limité dans le passé pour limiter le biais de mémoire. Les questionnaires, complètement anonymes, enregistrent la date et le lieu de résidence sur les dix dernières années avec les éventuels déménagements. Les participants ont souvent plus de mal à se souvenir des informations concernant les vacances, en particulier lorsqu'elles sont antérieures à cinq ans. La date et le lieu de vacances ne sont donc pris en compte que sur les cinq dernières années. Les vacances sont définies comme toute période plus longue qu'un week-end prolongé et passée hors du lieu de résidence. Elles représentent les périodes pendant lesquelles l'exposition au soleil est différente de l'exposition quotidienne. Lorsqu'une période de vacances est itinérante, c'est-à-dire qu'il y a plus d'un lieu de vacances, alors seul le premier lieu est enregistré.

Ces enquêtes ont été menées dans huit pays. La première s'est déroulée en France pour servir d'étude pilote et valider l'outil. Puis les interviews se sont déroulées de manière similaire en Italie, en Norvège, en Estonie, en Allemagne, en Écosse, en Hongrie et au Portugal. Dans chaque pays où l'enquête est conduite, le coordinateur local est responsable de la traduction du questionnaire de l'anglais à la langue du pays, du choix de l'institut de sondage, et de la supervision de la récolte des données.

L'enquête est stratifiée sur les principales régions du pays pour obtenir un échantillon représentatif de la distribution géographique de la population. En France, huit grandes zones ont été utilisées (Figure 4 .1). Cependant, l'échantillon n'est pas complètement représentatif de la population. Il a été stratifié sur l'âge et le sexe de sorte que l'on obtienne 20 individus dans chaque groupe d'âge et de sexe, afin d'avoir suffisamment de participants pour estimer l'exposition dans chaque catégorie. Les groupes d'âge suivant ont été utilisés : 0-4 ; 5-9 ; 10-14 ; 15-19 ; 20-24 ; 25-29 ; 30-39 ; 40-49 ; 50-59 ; 60-69 ans.

L'étude pilote a été lancée en France en 2008. Nous avons rédigé une version française pour le questionnaire. L'institut de sondage Enov Research a interviewé 406 participants français pendant le mois de février 2009. Une ligne téléphonique a été mise en place pour suivre les conversations. Grâce à ce système nous avons pu écouter en direct et vérifier le déroulement des entretiens. L'enquête était présentée comme un projet de recherche impliquant l'INSERM ce qui a suscité l'intérêt de certaines personnes et facilité la participation. Pour les autres pays

participants, le protocole indique de présenter l'enquête comme étant un projet de recherche publique impliquant diverses autorités locales.

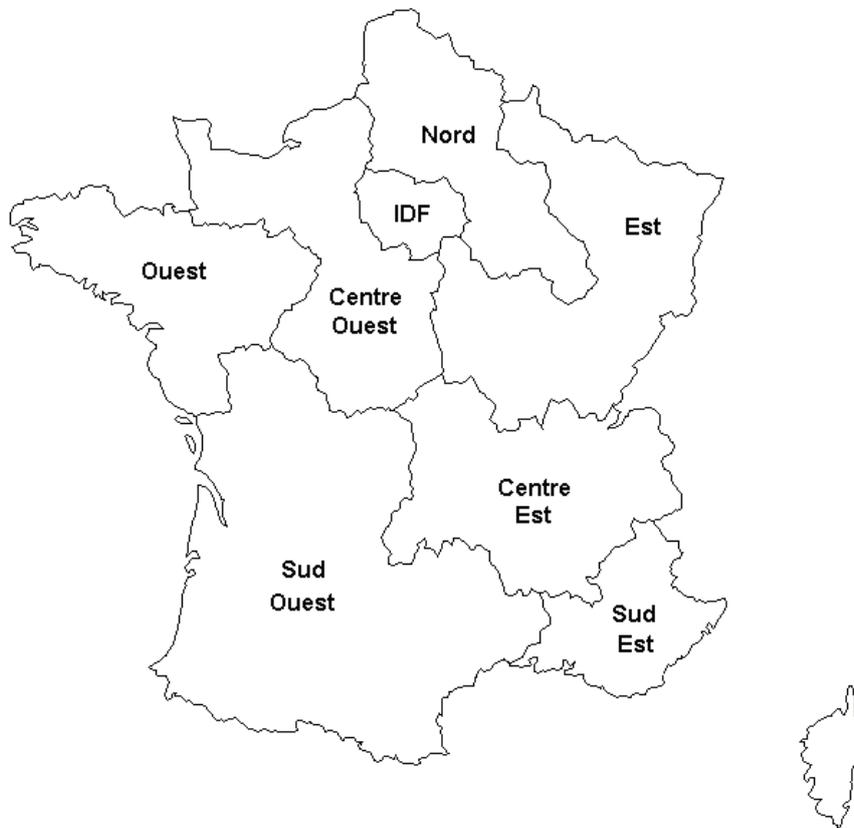


Figure 4.1 : Zones géographiques utilisées pour le questionnaire français - IDF : Ile De France

Géolocalisation

Les données sont nettoyées pour homogénéiser les formats des variables entre les pays car les réponses ont été enregistrées par différents instituts.

Pour chaque lieu de résidence et de vacances, nous extrayons les coordonnées géographiques (latitude et longitude) à partir de la base de données Geonames (<http://www.geonames.org/>, consulté le 15 septembre 2011). Cette étape est indispensable pour lier les résultats du questionnaire avec l'irradiation UV reçue au sol provenant de la base de données SoDa. Les mesures de rayonnement UV sont extraites de la base SoDa à partir de ces coordonnées. L'enquêteur encourage le participant à être le plus précis possible sur la localisation des vacances et des résidences. Le nom de la commune doit être enregistré en priorité car les données d'irradiation UV ont une résolution de 10 km environ. Le code postal et le nom du

département doivent être enregistrés si le participant les connaît car ils sont indispensables dans le cas où plusieurs communes portent le même nom ou si celui-ci est mal orthographié. De même, quand la commune n'est pas renseignée, le code postal peut parfois être utilisé. Lorsque l'on n'a que le département ou la région, la latitude et la longitude du centroïde du département ou de la région sont utilisées pour extraire les données UV correspondant au lieu. Quand le pays seulement est connu, les coordonnées de la capitale sont utilisées.

Reconstruction de l'exposition jour par jour

Les données de la base SoDa utilisées pour évaluer les doses reçues par les individus sont des données d'irradiation journalières (Cros et coll. 2004). Elles couvrent une zone géographique plus grande que celles de l'atlas. Cette zone s'étend de 66° sud à 66° nord et de 66° ouest à 66° est. Cette base de données inclut les irradiances pour l'Europe, mais aussi l'Afrique et l'océan Atlantique depuis 1985 pour les UVA et les UVB avec une grande résolution d'environ 10 km.

À partir des lieux de résidence reportés, les données UV correspondantes sont extraites pour une année complète en fonction de la date de déménagement pour chaque lieu de résidence. Ensuite, nous avons pu reconstruire l'exposition terrestre pour chaque jour en suivant les différentes habitations des individus et en prenant en compte les dates exactes de déménagement.

Les données d'irradiation reçue sur le lieu de vacances sont extraites pour la période exacte des vacances lorsque celle-ci est connue. Pour une petite proportion de vacances seuls le nombre de jours et le mois de vacances sont reportés. Dans ce cas, nous nous servons du nombre de jours de vacances au milieu du mois donné. Quelques vacances ont lieu dans des zones qui ne sont pas couvertes par les mesures du satellite. Les vacances correspondant à ces lieux sont systématiquement exclues de la reconstruction de l'exposition à l'UV.

Ainsi, pour chaque jour des cinq années précédant l'interview, nous avons une estimation de la dose d'irradiation UV reçue au sol sur les lieux où se trouvait chaque individu, qu'il soit sur son lieu de résidence ou en vacances. Les données sont fournies en UVA, UVB et UV total sous forme de doses journalières cumulées au sol pour chaque jour en fonction du lieu où il se trouve (en vacances ou à sa résidence), et est exprimée en J/cm².

Le comportement des individus face au soleil est un facteur important de l'exposition. Il est pris en compte dans le questionnaire avec le nombre d'heures passées en extérieur par semaine pour chaque saison durant l'exposition résidentielle et pour chaque période de vacances. Ces durées d'exposition sont utilisées pour pondérer les données d'irradiation journalière reçues au sol et estimer l'exposition des individus pour chaque jour du suivi.

Moyenne journalière et moyenne annuelle

Les doses reçues par les participants français et les participants italiens ont pu être reconstruites avec les données SoDa. Pour les Norvégiens, beaucoup de données sont manquantes au nord du pays, notamment en hiver. Elles ont été estimées à l'aide d'un modèle de régression.

Au sein de chacune de ces trois populations, les modèles log-linéaires ont permis de tester les différences de temps passé en extérieur sur le lieu de résidence selon le groupe d'âge, le sexe, la catégorie socioprofessionnelle et la zone de résidence. Les temps passés en extérieur sur le lieu de résidence sur les mêmes catégories ont été comparés avec des modèles linéaires simples.

À partir des doses d'UV reçues chaque jour du suivi, nous avons estimé l'exposition cumulative journalière moyenne et l'exposition cumulative annuelle moyenne sur le lieu de résidence et pendant les vacances.

Méthodes pour l'analyse des différents facteurs liés à l'exposition

Les échantillons ne sont pas représentatifs de la population, cependant la répartition géographique des participants doit être similaire à celle de la population du pays. L'adéquation est testée avec un test de Chi-Deux.

Les comportements pendant les vacances entre les différentes catégories sont comparés en se basant sur la durée moyenne et le nombre annuel moyen des vacances. Les durées moyennes sont comparées avec un modèle de régression simple, le nombre de vacances avec un modèle de régression de Poisson.

Le nombre d'heures hebdomadaire passées en extérieur a été comparé entre les catégories avec un modèle de régression lognormale pour les activités sur le lieu de résidence et un modèle de régression gamma pour les activités des vacances. Les modèles ont été choisis selon la distribution des données.

L'incertitude des estimations de l'exposition reçue par les échantillons a été quantifiée avec un intervalle de confiance à 95%. Cet intervalle a été défini à l'aide d'un modèle de régression gamma.

4.2 Résultats des études auprès de populations européennes

4.2.1 Population française

Entre mars et avril 2009, 406 individus ont participé à l'enquête téléphonique conduite en France par l'institut de sondage ENOV RESEARCH. L'échantillon a été stratifié de sorte qu'il soit composé d'entre 20 et 22 individus de chaque catégorie d'âge et de sexe et que la distribution géographique soit très similaire à celle de la population française métropolitaine (Figure 4.2). La distribution socioprofessionnelle n'était pas contrôlée. La proportion des participants sans profession était plus faible dans l'échantillon que dans la population car il n'est pas représentatif de celle-ci. Plus particulièrement, l'échantillon était limité à 69 ans, il sous-estime donc la proportion de retraités qui inclut la catégorie des individus sans profession (Tableau 4.1). Lorsqu'on prend en compte les individus ayant entre 15 et 69 ans, qui sont susceptibles d'avoir une profession, la distribution socioprofessionnelle de l'échantillon est similaire à celle de la population ($\chi^2=7,9$; p-value=0,34).

Les résultats du questionnaire regroupent les informations concernant 406 individus ce qui représente 1 049 vacances. Les coordonnées (latitude-longitude) du lieu de vacances ont été retrouvées de manière automatique pour 345 vacances à l'aide des tableaux geonames. Les 704 autres vacances ont des coordonnées fausses, ou en ont plusieurs ou alors n'en ont pas du

tout. Le site <http://www.geonames.org/> permet de rechercher les coordonnées des communes une à une ou bien une plus grande zone géographique (département, région, pays) quand la commune n'est pas connue. Ainsi, 697 paires de coordonnées sont extraites avec les précisions suivantes : 162 sont extraites avec la commune, 314 avec le département, 21 avec la région (France), 143 avec le pays et 57 avec une autre zone. Pour quelques vacances, certains lieux sont très imprécis. Notamment, les coordonnées de Washington sont utilisées pour les vacances aux USA et les coordonnées de Pékin pour la Chine. Seules 7 vacances n'ont pas été géolocalisées.

Sur les 406 individus, 139 ont déménagé au moins une fois au cours des 10 dernières années, 34 au moins deux fois et 12 au moins trois fois.

Pour l'ensemble des individus, 613 lieux de résidences sont renseignés mais 597 seulement sont gardés car pour les autres, la résidence est antérieure à 10 ans ou la commune est la même que sur la période suivante. Sur les 597 lieux de résidences, 196 ont dû être retrouvés à la main (dont 160 avec la commune, 38 avec le département et 1 avec le pays).

Pendant l'année 2008, 66% des participants ont eu au moins une période de vacances. C'est cohérent avec la proportion de 65% dans la population en 2004 d'après l'INSEE. 2004 est l'année la plus récente pour laquelle les données sont disponibles pour la population entière. Parmi les 286 participants de 15 ans et plus, 180 (soit 63%) ont eu des vacances au moins une fois en 2008. La probabilité de partir pour les vacances dépend de la catégorie socioprofessionnelle ; 78% des cadres et 47% des ouvriers ont eu des vacances en 2008. Dans la population française du même groupe d'âge, 73% sont partis en vacances en 2007, 92% des cadres et 64% des ouvriers ont eu des vacances en 2007. Les pourcentages sont plus élevés pour les données de l'INSEE car ils définissent les vacances comme étant des périodes d'une durée d'au moins deux jours tandis qu'elles sont définies comme des périodes plus longues qu'un week-end prolongé pour l'échantillon. Néanmoins, nos résultats semblent cohérents.

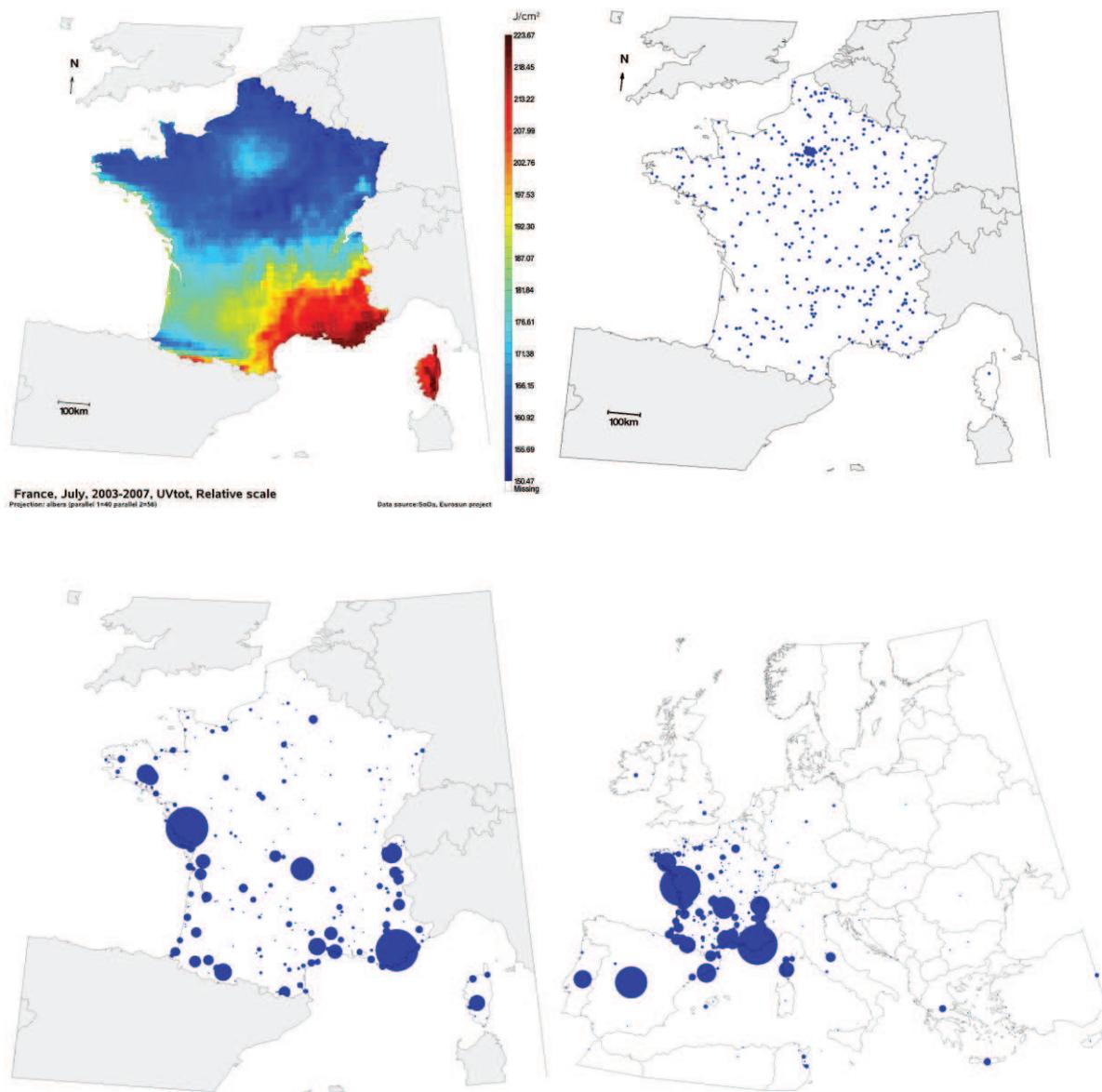


Figure 4.2 : Irradiation UV totale en France en juillet 2003-2007 (en haut à gauche), localisations des résidences actuelles au moment de l'interview (en haut à droite), lieux de vacances en France métropolitaine au cours des cinq dernières années (en bas à droite) et en Europe (en bas à gauche). Les localisations des vacances sont représentées par des points de taille proportionnelles au nombre de vacances ayant eu lieu à cette localisation.

Tableau 4.1 : Distribution des catégories socioprofessionnelles parmi les participants de 15 ans ou plus et parmi la population française de 15 ans ou plus.

Catégories socioprofessionnelles	Echantillon*	Population française (métropole) (2008)
Agriculteurs	5 (1,7%)	596 000 (1,0%)
Artisans	9 (3,1%)	2 071 000 (3,2%)
Cadres	36 (12,6%)	5 392 000 (8,8%)
Intermédiaires	43 (15,0%)	8 054 000 (13,6%)
Employés	70 (24,5%)	10 217 000 (16,7%)
Ouvriers	45 (15,7%)	8 132 000 (13,5%)
Sans profession (retraités, étudiants, chômeurs, ...)	78 (27,3%)	27 673 000 (41,1%)
Total	286 (100%)	62 135 000 (100%)

*120 participants de moins de 15 ans non pris en compte dans le tableau

Exposition résidentielle

Sur le lieu de résidence, le temps passé en extérieur est de 12,5 heures par semaine en moyenne. Les participants passent presque trois fois plus de temps à l'extérieur en été (20 h) qu'en hiver (7 h).

La moyenne par région de ce temps hebdomadaire pendant lequel les participants sont exposés au soleil est comprise entre 10 heures dans la région parisienne et 19 heures dans le sud-est (Tableau 4.2). Les habitants de l'est sont aussi souvent en extérieur (14 h). Les individus entre 60 et 69 ans passent 19 heures par semaine à l'extérieur en moyenne (Tableau 4.2). Les ouvriers et les cadres passent plus de temps en extérieur (19,5 heures par semaine, $p < 0,01$; 19 heures par semaine, $p < 0,01$ respectivement) que le groupe des enfants utilisé comme référence (13,5 heures par semaine). Cependant, les différences entre catégories socioprofessionnelles ne sont plus significatives après ajustement sur l'âge (erreur de type 3=0,71).

Pour l'ensemble des participants, l'exposition à l'UVA moyenne cumulée sur le lieu de résidence a été de 4 454 J/cm² (Intervalle de confiance 95% : 4085 J/cm² - 4869 J/cm²) par an et 12,4 J/cm² (Intervalle de confiance 95% : 11,4 J/cm² - 13,6 J/cm²) par jour.

Les individus ayant entre 60 et 69 ans ont reçu une forte dose d'irradiation UVA cumulative annuelle (6 819 J/cm²). Les habitants de la région sud-est reçoivent environ deux fois plus d'irradiation UVA que les habitants des autres régions. Cela s'observe pour l'exposition cumulative annuelle (8 000 J/cm²) et pour l'exposition journalière (22,2 J/cm²) ($p < 0,01$ avec la catégorie est comme référence).

Seulement 313 individus sur les 406 interviewés ont eu des vacances au moins une fois pendant les cinq ans du suivi et ont fourni suffisamment d'informations pour reconstruire l'exposition à l'UV. Pour ces 313 participants l'exposition moyenne à l'UVA sur le lieu de résidence est de 4 363 J/cm² par an. Les individus de ce groupe ayant entre 60 et 69 ans ont aussi reçu une dose annuelle (6 524 J/cm²) et une dose journalière (18,3 J/cm²) d'UVA plus importantes que les autres catégories d'âge (Tableau 4.3 et Tableau 4.4) ($p < 0,01$ avec la catégorie des 20-29 ans comme référence). Les habitants de la zone sud-est ont aussi reçu une dose annuelle (8 017 J/cm²) et une dose journalière (22,4 J/cm²) plus importantes (Tableau 4.3 et Tableau 4.4) ($p > 0,01$ avec les habitants de la région est comme référence). Les habitants de la région parisienne (la zone avec la population la plus dense) n'ont reçu que 3 136 J/cm² par an et 8,9 J/cm² par jour sur le lieu de résidence. La différence entre ces valeurs et les valeurs correspondant aux habitants du centre ouest n'est pas statistiquement significative ($p = 0,63$ pour l'exposition annuelle et $p = 0,65$ pour l'exposition journalière).

Tableau 4.2 : Temps passé en extérieur selon le groupe d'âge et la zone de résidence au moment de l'interview

		N	Temps passé en extérieur sur le lieu de résidence (en heures/semaine)	Temps passé en extérieur sur le lieu de vacances (en heures/semaine)
Groupes d'âge	0-9	80	11,5	22,0
	10-19	82	11,3	26,7
	20-29	79	10,8	29,2
	30-39	41	13,5	31,2
	40-49	40	11,9	28,1
	50-59	44	13,0	29,4
	60-69	40	19,2	26,7
Zones de résidence	Centre-est	56	12,0	22,1
	Centre-ouest	43	11,3	30,5
	Est	50	14,1	30,1
	Ile-de-France	75	10,2	28,4
	Nord	45	13,2	21,2
	Ouest	35	12,3	26,5
	Sud-est	34	18,7	25,6
	Sud-ouest	68	11,4	31,0

Tableau 4.3 : Exposition à l'UVA cumulative annuelle pour les participants étant partis au moins une fois en vacances pendant les cinq années précédant l'interview

		N	Exposition à l'UVA sur le lieu de résidence (J/cm ²)	Exposition à l'UVA sur le lieu de vacances (J/cm ²)	Exposition totale à l'UVA	% of UVA résidentiel/total
Sexe	Hommes	154	5024	360	5385	93,3
	Femmes	159	3724	337	4061	91,7
Groupe d'âge	0-9	57	4 174	331	4 505	92,7
	10-19	72	3 911	384	4 295	91,1
	20-29	60	3 980	339	4 319	92,2
	30-39	35	4 651	309	4 960	93,8
	40-49	26	3 733	340	4 073	91,7
	50-59	31	4 480	411	4 891	91,6
	60-69	32	6 524	309	6 833	95,5
Catégorie socio-professionnelle	Agriculteurs	3	6 893	296	7 189	95,9
	Artisans	7	5 356	654	6 009	89,1
	Employés	58	3 723	335	4 058	91,7
	Ouvriers	28	6 013	290	6 303	95,4
	Intermédiaires	37	4 114	342	4 456	92,3
	Cadres	24	5 207	387	5 594	93,1
	Etudiants	12	3 977	225	4 203	94,6
	Sans profession	10	4 051	341.13	4 392	92,2
	Enfants	134	4 164	358.70	4 522	92,1
Zone de résidence	Centre-est	44	4 166	291	4 457	93,5
	Centre-ouest	36	3 462	382	3 844	90,1
	Est	31	4 914	265	5 179	94,9
	Ile-de-France	63	3 136	562	3 698	84,8
	Nord	35	3 855	283	4 138	93,2
	Ouest	24	4 631	397	5 028	92,1
	Sud-est	27	8 017	259	8 276	96,9
	Sud-ouest	53	4 631	237	4 868	95,1
Total		313	4 364	349	4 712	92,6

Tableau 4.4 : Exposition journalière à l'UVA pour les participants étant partis au moins une fois en vacances pendant les cinq années précédant l'interview

		N	Exposition à l'UVA sur le lieu de résidence (J/cm ²)	Exposition à l'UVA sur le lieu de vacances (J/cm ²)	Exposition totale à l'UVA	Ratio de l'exposition résidentielle / Exposition pendant les vacances
Sexe	Hommes	154	14	39	15	2,7
	Femmes	159	10	36	11	3,4
Groupes d'âge	0-9	57	12	27	12	2,3
	10-19	72	11	36	12	3,3
	20-29	60	11	42	12	3,8
	30-39	35	13	46	14	3,6
	40-49	26	11	36	11	3,5
	50-59	31	13	41	13	3,3
	60-69	32	18	33	19	1,8
Catégorie socio-professionnelle	Agriculteurs	3	19	59	20	3,1
	Artisans	7	15	76	16	5,1
	Employés	58	10	36	11	3,4
	Ouvriers	28	17	40	17	2,4
	Intermédiaires	37	12	46	12	4,0
	Cadres	24	15	36	15	2,5
	Etudiants	12	11	32	12	2,9
	Sans profession	10	11	38	12	3,3
	Enfants	134	12	33	12	2,8
Zones de résidence	Centre-est	44	12	30	12	2,6
	Centre-ouest	36	10	42	11	4,3
	Est	31	14	40	14	2,9
	Ile-de-France	63	9	41	10	4,6
	Nord	35	11	31	11	2,9
	Ouest	24	13	39	14	3,0
	Sud-est	27	22	32	23	1,5
	Sud-ouest	53	13	39	13	3,0
Total		313	12	37	13	3,05

Exposition des vacances

Au cours des cinq ans de suivi, 330 individus (81% de l'échantillon) ont pris au moins une fois des vacances. Peu d'habitants de la région est (62%), peu d'enfants de moins de 5 ans (67%), d'adultes âgés de 40 à 49 ans (67%) et d'ouvriers (64%) sont partis en vacances.

Au total, les participants ont eu 1 049 vacances, dont 281 à l'étranger. 444 périodes de vacances ont été localisées avec la commune et 308 avec le département français. Pour les 297 autres, la réponse était moins précise et une entité géographique plus large a été utilisée, telle que la région ou la capitale du pays. Neuf vacances n'ont pas pu être utilisées car elles ont eu lieu en dehors du cadre du satellite et pour 32 vacances, le temps passé en extérieur était inconnu. Au final, 1 008 vacances, concernant 329 individus, étaient disponibles pour le calcul de l'exposition individuelle. Les doses d'exposition à l'UV pendant les vacances ont été calculées pour 313 individus qui ont fourni suffisamment d'information concernant la résidence et les vacances.

Une période de vacances dure en moyenne 14 jours et les participants ont cumulé 47 jours de vacances en moyenne pendant les cinq ans de suivi. Au cours de cette période, ils ont cumulé 3,2 périodes de vacances (Tableau 4.5). Les habitants de la région parisienne ont eu des vacances plus longues (23 jours en moyenne) que les habitants des autres régions ($p < 0,01$ avec les habitants du sud ouest utilisés comme référence) et ils ont cumulé 76 jours de vacances pendant le suivi. Le nombre de vacances est similaire dans toutes les régions (erreur de type 3 $< 0,01$). Les individus âgés de 10 à 14 ans et de 60 à 69 ans ont eu beaucoup de vacances (respectivement 4,1 et 4,2 périodes) et la durée des vacances est modérée (respectivement 15 et 14 jours). Les enfants de 5 à 9 ans ont eu des vacances fractionnées : 3,8 périodes de vacances et 12 jours par période en moyenne. Au contraire, les individus ayant entre 20 et 24 ans ont eu des vacances longues mais peu fréquentes : 2,6 périodes de vacances de 18 jours en moyenne, de même que les étudiants et les personnes sans profession (respectivement 2,7 périodes de 19 jours et 2,5 périodes de 20 jours en moyenne). Les cadres ont beaucoup de vacances, en moyenne 4,2 périodes de 14,5 jours. Le nombre et la durée des vacances sont similaires chez les hommes et les femmes.

Tableau 4.5 : Nombre et durée totale annuelle des vacances selon la zone de résidence

	Nombre total de participants*	Nombre de participants ayant pris au moins une fois des vacances (%) *	Nombre de vacances par participants**	Durée moyenne des vacances (en jours)
Centre-est	56	45 (80,4%)	3,0	11,6
Centre-ouest	43	37 (86,1%)	3,7	12,5
Est	50	31 (62,0%)	2,4	12,5
Ile-de-France	75	66 (88,0%)	3,3	23,4
Nord	45	36 (80,0%)	3,4	14,0
Ouest	35	29 (82,9%)	3,8	12,0
Sud-est	33	28 (84,9%)	3,1	10,7
Sud-ouest	68	57 (83,8%)	2,7	11,4
Total	405	329	3,2	14,3

*La résidence d'un individu n'a pas été identifiée

**En prenant en compte les participants ayant pris au moins une fois des vacances au cours des 5 années précédant l'interview

Les 327 participants qui ont eu des vacances dans l'hémisphère nord sont partis 4° de latitude plus au sud en moyenne que leur lieu de résidence. Environ 43% d'entre eux sont partis dans un lieu d'au moins 5° plus au sud que leur lieu de résidence. Les individus de tous les groupes d'âge, des deux sexes, et de tous les groupes socioprofessionnels sont tous partis plus au sud que leur lieu de résidence. Seuls les habitants de la région sud-est font exception. 64% des vacances ont eu lieu en juillet ou en août. Les vacances ayant eu lieu en France, soit 73% des vacances ont eu lieu principalement près des côtes et dans les Alpes, où l'irradiation UV est forte (Figure 4.2). Les vacances à l'étranger se sont souvent déroulées dans les pays méditerranéens.

Pendant les vacances, les participants ont passé 2,2 fois plus de temps en extérieur (27 h par semaine) qu'en temps normal. Ce temps d'exposition est similaire chez les hommes et chez les femmes ($p=0,25$). Les individus de 25 à 29 ans passent plus de temps dehors que les autres (34 heures par semaine, $p<0,01$; référence : 20-24 ans avec 24 h). Les habitants du centre-est et du nord passent seulement 22 heures et 21 heures dehors par semaine ($p=0,05$ pour le centre-est et $p=0,03$ pour le nord). Après ajustement sur l'âge, les résultats sont toujours significatifs ($p=0,03$ pour le centre-est et $p=0,08$ pour le nord).

Les vacanciers cumulent 349 J/cm^2 d'UVA (intervalle de confiance à 95% : $302 \text{ J/cm}^2 - 405 \text{ J/cm}^2$) en moyenne par an pendant les vacances. En une journée de vacances, ils cumulent 37 J/cm^2 (intervalle de confiance à 95% : $34,5 \text{ J/cm}^2 - 40,2 \text{ J/cm}^2$) en moyenne. Les individus de 10 à 19 ans et de 50 à 59 ans cumulent une dose annuelle d'UVA (Tableau 4.3) significativement plus forte que pour les individus de 40-49 ans ($p>0,01$). Les parisiens ont reçu 42 J/cm^2 par jour et ils cumulent 562 J/cm^2 par an. Les habitants du sud-est et du sud-ouest reçoivent les doses d'UVA les plus faibles.

Exposition totale

L'exposition totale à l'UV parmi les individus ayant eu au moins une période de vacances est de $4\,712 \text{ J/cm}^2$ (intervalle de confiance à 95% : $4\,352 \text{ J/cm}^2 - 5\,139 \text{ J/cm}^2$) par an et $12,9 \text{ J/cm}^2$ (intervalle de confiance à 95% : $11,9 \text{ J/cm}^2 - 14,1 \text{ J/cm}^2$) par jour. Les habitants de la région sud-est ont reçu environ deux fois plus d'irradiation UV que les habitants des autres régions (Tableau 4.3 et Tableau 4.4) ($p<0,01$ en utilisant la catégorie de habitants de l'est comme référence). Les individus de 60 à 69 ans ont reçu des doses annuelles d'UVA élevées ($6\,833 \text{ J/cm}^2$), $p=0,04$ avec la participants de 30-39 ans comme référence. Les doses d'UVA reçues sur le lieu de résidence correspondent à 92,6% de la dose totale cumulée sur l'année. 84,8% de la dose reçue par les habitants de la région parisienne a été reçue sur le lieu de résidence et 96,9% pour les habitants de la région sud-est.

La dose journalière reçue pendant les périodes de vacances est 3 fois plus élevée que la dose reçue sur le lieu de résidence. Cependant, ce ratio est de seulement 1,8 pour les individus de 60-69 ans et 1,4 pour les parisiens.

La dose reçue pour la population française de moins de 70 ans a pu être calculée à partir de l'échantillon. En prenant en compte, la structure d'âge, le sexe et la distribution géographique, l'exposition à l'UVA cumulée en un an a été estimée à 4 825 J/cm² par personne dans la population française de moins de 70 ans (intervalle de confiance à 95% : 4 433 J/cm² ; 5 218 J/cm²).

4.2.2 Population italienne

Les enquêtes téléphoniques dans la population italienne ont eu lieu en mai 2010 pour 413 participants italiens. La stratification a été effectuée de la même manière que pour l'enquête en France. L'échantillon est composé de 20 à 23 individus par groupe d'âge et de sexe. D'après l'ISTAT (institut national italien de la statistique), la population totale en Italie est de plus de 51 millions d'habitants répartis de manière inégale sur chacune des zones : nord-est (9,8 millions d'habitants), nord-ouest (13,5 millions d'habitants), centre (10,0 millions d'habitants), sud (12,3 millions d'habitants) et les îles (Sardaigne et Sicile : 5,8 millions d'habitants) (Figure 4.3). La répartition des participants selon leur lieu de résidence au moment de l'interview (Figure 4.4) est homogène pour les cinq zones, contrairement à ce qui avait été réalisé en France. Nous avons entre 80 et 85 individus par zone. Elle n'est donc pas représentative de la distribution de la population italienne. Cependant, les principales villes, Rome, Milan, Turin et Naples, sont bien couvertes.



Figure 4.3 : Zones géographiques utilisées pour le questionnaire italien

Au total, il y a eu 591 périodes de vacances dont 18% à l'étranger. 48% des coordonnées des lieux de vacances n'ont pas pu être récupérées automatiquement et ont dû être récupérées à la main. Au final, 549 lieux de résidences ont pu être géolocalisés avec les coordonnées de la commune, 9 avec la région et 33 avec les coordonnées du pays. 563 vacances ont été utilisées pour reconstruire les expositions pendant les vacances car 28 localisations étaient hors du champ du satellite. 279 individus ont fourni suffisamment d'informations pour reconstruire l'exposition UV et ont eu au moins une fois des vacances.

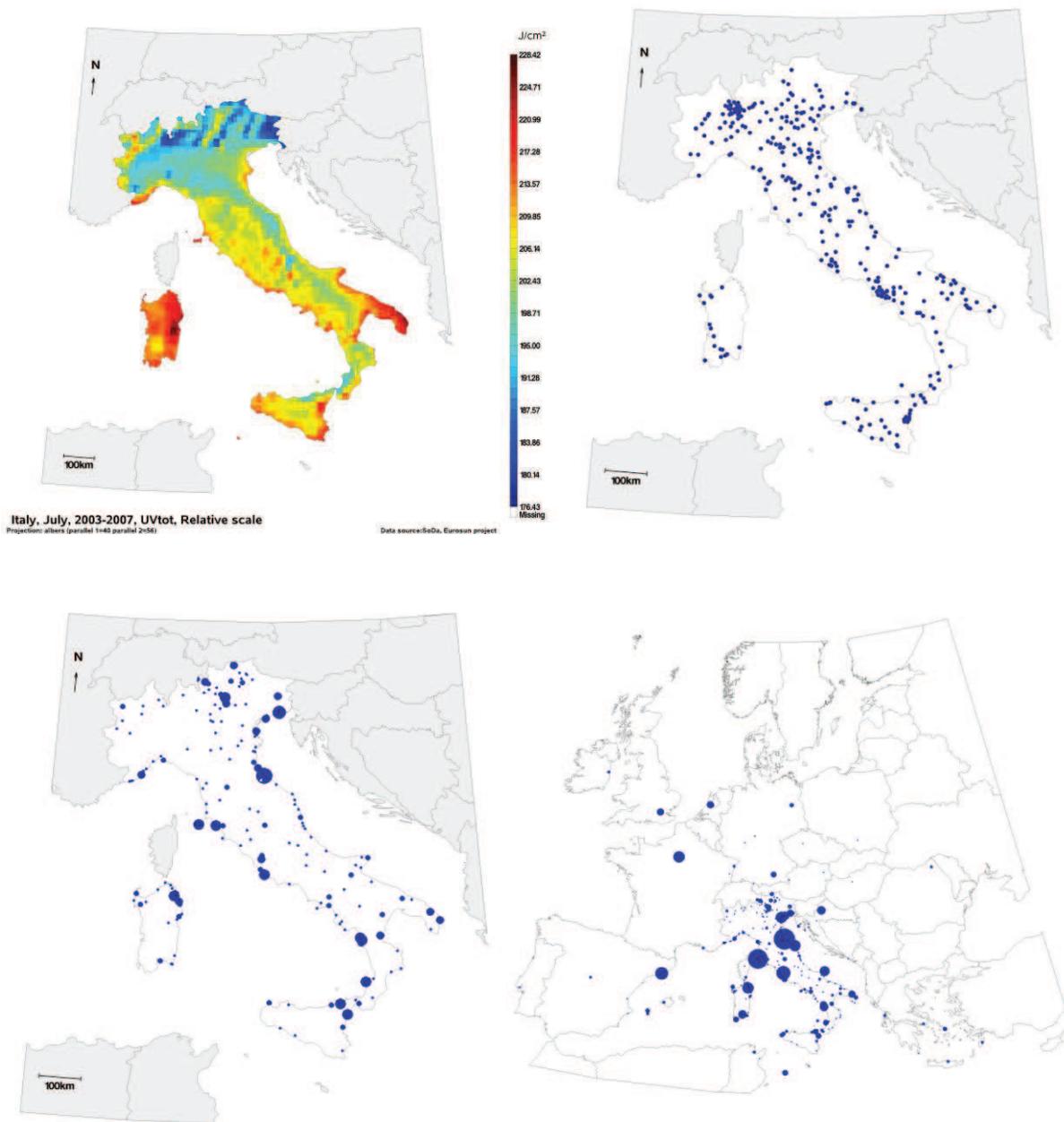


Figure 4.4 : Irradiation UV en Italie en juillet 2003-2007 (en haut à gauche), localisations des résidences actuelles au moment de l'interview (en haut à droite) et localisations des vacances en Italie pendant les cinq années précédant l'interview (en bas à gauche) et des vacances en Italie (en bas à droite)

Exposition résidentielle

Les Italiens passent plus de temps en extérieur sur le lieu de résidence que les Français. Ils y passent 21 heures par semaine en moyenne sur l'année et trois fois plus en été (34 heures par semaine) qu'en hiver (12 heures par semaine). Ce temps d'exposition est le même quelle que soit la zone de résidence (Tableau 4.6) (erreur de type 3 : 0,75).

En revanche, il dépend de l'âge (erreur de type 3=0,04) et de la catégorie socioprofessionnelle (erreur de type 3<0,01). Les participants de 60-69 ans sont 16 heures par semaine environ en extérieur pour les loisirs contre 25,4 heures par semaine pour les 50-59 ans, cette différence est significative ($p<0,01$).

Les travailleurs de profession intermédiaire passent peu de temps dehors (14 heures par semaine) tandis que les ouvriers et les étudiants passent plus de 23 heures par semaine dehors ($p=0,01$ et $p=0,09$, respectivement).

De même qu'en France, les hommes passent un peu plus de temps dehors que les femmes ($p<0,01$).

Les informations étaient suffisantes pour reconstruire l'exposition résidentielle pour 408 participants. La dose cumulée annuelle moyenne de l'échantillon est estimée à 8 982 J/cm² (intervalle de confiance 95% : 8463 J/cm² – 9545 J/cm²) et la dose journalière a été estimée à 24,8 (intervalle de confiance à 95% : 23,4 J/cm² - 27,1 J/cm²). Les ouvriers et les étudiants ont reçu plus de 10 000 J/cm² ce qui est significativement supérieur à la dose reçue par les personnes avec une profession intermédiaire, 6 481 J/cm² ($p<0,01$ pour les deux catégories socio-professionnelles). Plus le lieu de résidence est au sud, plus les individus cumulent d'UV (de 8 204 J/cm² dans le nord ouest à 9 784 J/cm² dans le sud). Les habitants des îles (Sardaigne et Sicile) reçoivent beaucoup d'UV (9 634 J.cm²). Les hommes (9 736 J/cm²) en ont reçu plus que les femmes (8 243 J/cm²) ($p<0,01$).

Pour les 279 participants ayant eu des vacances et pour lesquels nous avons pu reconstituer l'exposition à l'UV, l'exposition résidentielle totale est de 9 433 J/cm² par an et 26,2 J/cm² par jour.

Tableau 4.6 : Temps passé en extérieur (en heures par semaine) sur le lieu de résidence et pendant les vacances

		N*	Temps en extérieur sur le lieu de résidence**	Temps en extérieur pendant les vacances***
Groupe d'âge	0-9	83	19,9	58,3
	10-19	83	21,9	63,6
	20-29	81	20,7	64,8
	30-39	43	21,4	57,5
	40-49	41	20,0	61,4
	50-59	41	25,4	57,9
	60-69	41	15,7	59,9
Catégorie socioprofessionnelle	Agriculteurs	4	27,1	-
	Artisans	6	15,0	46,8
	Employés	57	19,0	59,3
	Ouvriers	36	26,6	61,9
	Intermédiaires	11	14,0	48,2
	Cadres	11	21,7	57,0
	Etudiants	70	23,3	68,4
	Sans profession	93	19,7	62,0
Sexe	Enfants	125	19,8	58,7
	Hommes	204	22,7	61,9
	Femmes	209	18,9	60,6

*Effectif de l'échantillon

**Sur 408 données non manquantes

***Sur 288 individus ayant eu des vacances et ayant renseigné le temps passé en extérieur

Tableau 4.7 : Exposition cumulative annuelle à l'UVA sur le lieu de résidence et pendant les vacances

		N	% participants inclus dans le calcul*	Exposition résidentielle à l'UVA (J/cm ²)	Exposition à l'UVA pendant les vacances (J/cm ²)	Exposition totale à l'UVA (J/cm ²)	% UVA résidentiel /total
Sexe	Hommes	136	67	10 586	471	11 057	95,7
	Femmes	143	69	8 337	529	8 865	94,0
Groupe d'âge	0-9	55	67	9 111	639	9 750	93,4
	10-19	59	72	9 674	548	10 222	94,6
	20-29	62	78	9 018	400	9 418	95,8
	30-39	32	76	10 212	462	10 675	95,7
	40-49	28	70	9 246	286	9 532	97,0
	50-59	19	48	11 413	680	12 093	94,4
	60-69	24	57	8 264	485	8 749	94,5
Catégorie socioprofessionnelle	Agriculteurs	0	-	-	-	-	
	Artisans	5	83	5 987	192	6 179	96,9
	Employés	46	82	8 940	425	9 365	95,5
	Ouvriers	25	69	12 033	527	12 560	95,8
	Intermédiaires	5	46	4 705	183	4 887	96,3
	Cadres	7	64	11 035	288	11 323	97,5
	Etudiants	53	77	9 739	385	10 125	96,2
	Sans profession	54	59	9 622	473	10 095	95,3
	Enfants	84	68	8 968	680	9 647	93,0
Zone de résidence	Nord-ouest	69	83	8 217	494	8 711	94,3
	Nord-est	63	78	8 767	442	9 210	95,2
	Centre	61	75	9 672	677	10 349	93,5
	Sud	44	53	11 230	386	11 616	96,7
	Iles	42	52	10 200	463	10 663	95,7
total		279	68	9 433	501	9 934	95,0

* Pourcentage de participants partis en vacances et pour lesquels les informations sur les lieux et le temps passé en extérieur sont disponibles.

Tableau 4.8 : Exposition cumulative journalière à l'UVA sur le lieu de résidence et pendant les vacances

		N	Exposition résidentielle à l'UVA (J/cm ²)	Exposition à l'UVA pendant les vacances (J/cm ²)	Exposition totale à l'UVA (J/cm ²)	UVA pendant les vacances/ UVA sur le lieu de résidence
Sexe	Hommes	136	29	92	30	3,1
	Femmes	143	23	90	24	3,9
Groupe d'âge	0-9	55	25	91	27	3,6
	10-19	59	27	95	28	3,5
	20-29	62	25	91	26	3,6
	30-39	32	28	89	29	3,1
	40-49	28	25	85	26	3,3
	50-59	19	32	80	33	2,5
	60-69	24	23	97	24	4,3
Catégorie socioprofessionnelle	Agriculteurs	0	-	-	-	-
	Artisans	5	16	73	17	4,4
	Employés	46	25	90	26	3,6
	Ouvriers	25	34	86	34	2,6
	Intermédiaires	5	13	62	13	4,8
	Cadres	7	30	91	31	3,0
	Etudiants	53	27	98	28	3,6
	Sans profession	54	27	92	28	3,4
	Enfants	84	25	90	26	3,6
Zone de résidence	Nord-ouest	69	23	91	24	4,0
	Nord-est	63	24	88	25	3,60
	Centre	61	27	103	28	3,84
	Sud	44	31	85	32	2,73
	Iles	42	28	81	29	2,89
total		279	26	90	27	3,46

Exposition des vacances

De 2005 à 2009, 288 participants (70%) sont partis au moins une fois en vacances. Beaucoup d'employés (84%) et d'étudiants (81%) ont pris des vacances ailleurs qu'à leur résidence. Les plus de 50 ans sont peu nombreux à être partis (50% pour les 50-59 ans et 55% pour les 60-69 ans), contrairement aux 20-39 ans (80% pour les 20-29 ans et 79% pour les 30-39 ans). Les habitants du sud sont moins nombreux à être partis (57%), et seulement 54% sont partis parmi les habitants de Sardaigne et de Sicile.

Le nombre moyen des vacances parmi les individus ayant eu des vacances au moins une fois est de 2,1 périodes. Le groupe d'âge (erreur de type $3=0,28$), la zone (erreur de type $3=0,65$), la catégorie socioprofessionnelle (erreur de type $3=0,47$) et le sexe (erreur de type $3=0,29$) n'ont pas d'influence sur le nombre de vacances prises.

La durée moyenne des vacances est de 14 jours quelle que soit la zone (erreur de type $3=0,96$). Les participants de 20-29 ans sont partis 12 jours en moyenne et les 50-59 ans 24 jours en moyenne. La différence est significative ($p<0,01$). Les ouvriers sont partis 20 jours.

Durant le suivi, 585 vacances ont eu lieu dans l'hémisphère nord. En prenant en compte seulement ces vacances, les participants italiens sont partis en vacances $1,5^\circ$ plus au sud en moyenne que leur lieu de résidence. Les habitants partent en vacances à une latitude moyenne comprise entre $41,2^\circ$ et $41,9^\circ$ pour chaque zone, soit aux alentours de Naples et de Rome. Les Italiens partent souvent en vacances près des côtes, notamment près de la côte adriatique où l'irradiation UV est forte (Figure 4.2). Et 62% des vacances ont commencé en juillet ou en août, quand l'irradiation UV est encore élevée.

Tableau 4.9 : Nombre et durée annuelle totale des vacances

Table		N total	N (%) avec au moins une période de vacances	Nombre de vacances par participant*	Durée moyenne des vacances (en jours)
Sexe	Hommes	204	139 (68%)	2,0	16
	Femmes	209	149 (71%)	2,1	15
Groupe d'âge	0-9	82	57 (69%)	2,4	17
	10-19	84	60 (71%)	2,0	17
	20-29	81	65 (80%)	2,1	12
	30-39	43	34 (79%)	2,0	15
	40-49	41	29 (71%)	1,6	15
	50-59	40	20 (50%)	2,1	24
	60-69	42	23 (55%)	1,9	13
Catégorie socioprofessionnelle	Agriculteurs	4	0	-	-
	Artisans	6	5 (83%)	1,4	12
	Employés	57	48 (84%)	1,9	15
	Ouvriers	36	26 (72%)	1,9	20
	Intermédiaires	11	5 (45%)	1,4	13
	Cadres	11	7 (64%)	2,1	10
	Etudiants	70	57 (81%)	2,0	12
	Sans profession	93	54 (58%)	2,0	13
	Enfants	125	86 (69%)	2,3	19
Zone de résidence	Nord-ouest	85	71 (83%)	2,0	15
	Nord-est	83	64 (77%)	2,2	16
	Centre	82	63 (77%)	2,1	16
	Sud	83	47 (57%)	1,9	14
	Iles	80	43 (54%)	1,9	15
total		413	288 (70%)	2,1	14

* En prenant en compte les participants étant partis au moins une fois en vacances au cours des cinq années précédant l'interview

Les Italiens passent 61,2 heures par semaine en extérieur en moyenne sur leur lieu de vacances, c'est-à-dire 2,2 fois plus que sur leur lieu de résidence, quel que soit le groupe d'âge (type 3=0,52), le sexe (type 3=0,60) ou la zone de résidence (type 3=0,39). Les étudiants passent beaucoup de temps en extérieur : 68,4 heures par semaine.

En moyenne, les Italiens reçoivent 501 J/cm² d'UVA par an (intervalle de confiance à 95% : 426 J/cm² - 593 J/cm²) et 90,7 J/cm² par jour (intervalle de confiance à 95% : 86,3 J/cm² - 95,3 J/cm²). Les 40-49 ans ont peu cumulé sur l'année (286 J/cm²), contrairement aux 50-59 ans (680 J/cm²). Mais la différence entre ces deux classes d'âge est faiblement significative (p=0,06). Les étudiants ont aussi peu cumulé (386 J/cm²) par rapport aux enfants (680 J/cm²). Les habitants du sud ont cumulé moins de dose UVA (386 J/cm²) que les habitants du centre (677 J/cm²) (p=0,04).

En dose moyenne journalière, les 50-59 ans en ont reçu peu (80,2 J/cm²) et les étudiants en ont reçu beaucoup (98,1 J/cm²). Les habitants du centre en ont reçu un peu plus que les autres (103,2 J/cm²) (erreur de type 3 : 0,04).

Exposition totale

En prenant en compte le rayonnement reçu sur le lieu de résidence et pendant les vacances, les italiens ont cumulé en moyenne 9325 J/cm² (intervalle de confiance à 95% : 8803 J/cm² - 9889 J/cm²) par an et 25,5 J/cm² (intervalle de confiance à 95% : 24,1 J/cm² - 27,1 J/cm²).

Les Italiens ont cumulé 95% de la dose annuelle en moyenne sur le lieu du domicile. Cette proportion va jusqu'à 97% pour les participants de 40-49 ans et les habitants du sud. Les enfants et les habitants du centre de l'Italie ont reçu environ 93% de leur dose annuelle sur le lieu de résidence.

Les Italiens reçoivent 3,5 fois plus de rayonnement UV en une journée pendant les vacances qu'en une journée sur lieu de résidence. Ce ratio est inférieur à 3 pour les 50-59 ans, les ouvriers et les habitants du sud et des îles. Il est de 4,6 pour les 60-69 ans.

La zone de résidence influe sur le fait d'avoir eu des vacances ou non et leur durée, mais pas sur le temps passé en extérieur, que ce soit sur le lieu de résidence ou sur le lieu de vacances.

Pour la population italienne de moins de 70 ans, en prenant en compte la distribution d'âge, de sexe et la répartition sur les cinq zones géographiques, la dose d'UVA cumulée par an et par personne est estimée à 9213 J/cm² (intervalle de confiance à 95% : 8940 J/cm² ; 9486 J/cm²).

4.2.3 Population norvégienne

L'échantillon norvégien composé de 400 individus a été interviewé au mois de mai 2010. Chaque groupe d'âge et de sexe comporte 20 participants.

La distribution géographique de l'échantillon est similaire à celle de la population, à l'exception de Trøndelag qui est surreprésenté dans l'échantillon (Tableau 4.10). Les comtés les plus peuplés de Norvège sont Akershus, Hordaland, Rogaland et Oslo. Ils sont bien représentés dans l'échantillon. Pour simplifier l'analyse, les 19 comtés sont groupés en 5 zones géographiques plus larges. Les comtés d'Akershus et d'Oslo sont inclus dans la zone est, et les comtés d'Hordaland et de Rogaland sont inclus dans la zone ouest.

Tableau 4.10 : Répartition des participants et de la population sur les zones géographiques

Zone	Nombre de participants (%)	Taille de la population (%)
Est	178 (45%)	2 385 010 (50%)
Nord	40 (10%)	463 395 (10%)
Sud	20 (5%)	266 976 (6%)
Trøndelag	59 (15%)	414 965 (9%)
Ouest	99 (25%)	1 259 796 (26%)

Un tiers des participants a déménagé au moins une fois au cours des dix dernières années. 630 résidences sont recensées au total. Seuls les 571 domiciles pour lesquels le lieu et la date sont disponibles sont utilisés pour étudier les comportements.

La géolocalisation des lieux de résidences n'a pas pu être faite de manière automatique avec le programme SAS pour 180 domiciles. Les données ont dû être extraites à la main. Seulement 21 lieux de résidence n'ont pas pu être localisés par la commune. Ces derniers sont localisés par la capitale du pays car il s'agit de domiciles à l'étranger antérieurs au lieu de résidence actuelle.

361 participants, soit 90% de l'échantillon, sont partis en vacances au moins une fois au cours des cinq années précédant l'interview. Parmi les 1 273 périodes de vacances enregistrées, 1 137 ont été utilisées car pour les autres, les dates ou le lieu sont inconnus. Seulement 169 lieux de vacances ont pu être géolocalisés de manière automatique. Parmi les localisations faites manuellement, seuls 122 vacances ont été localisées par la commune et 82 avec le nom d'une île. 705 ont dû être approchées par la capitale du pays de vacances. Les 34 autres sont localisées avec les coordonnées de la région ou de l'état (par exemple aux États-Unis). Certains lieux n'ont pas pu être retrouvés et au final, 1 112 ont pu être géolocalisés et utilisés pour estimer l'exposition à l'UV.

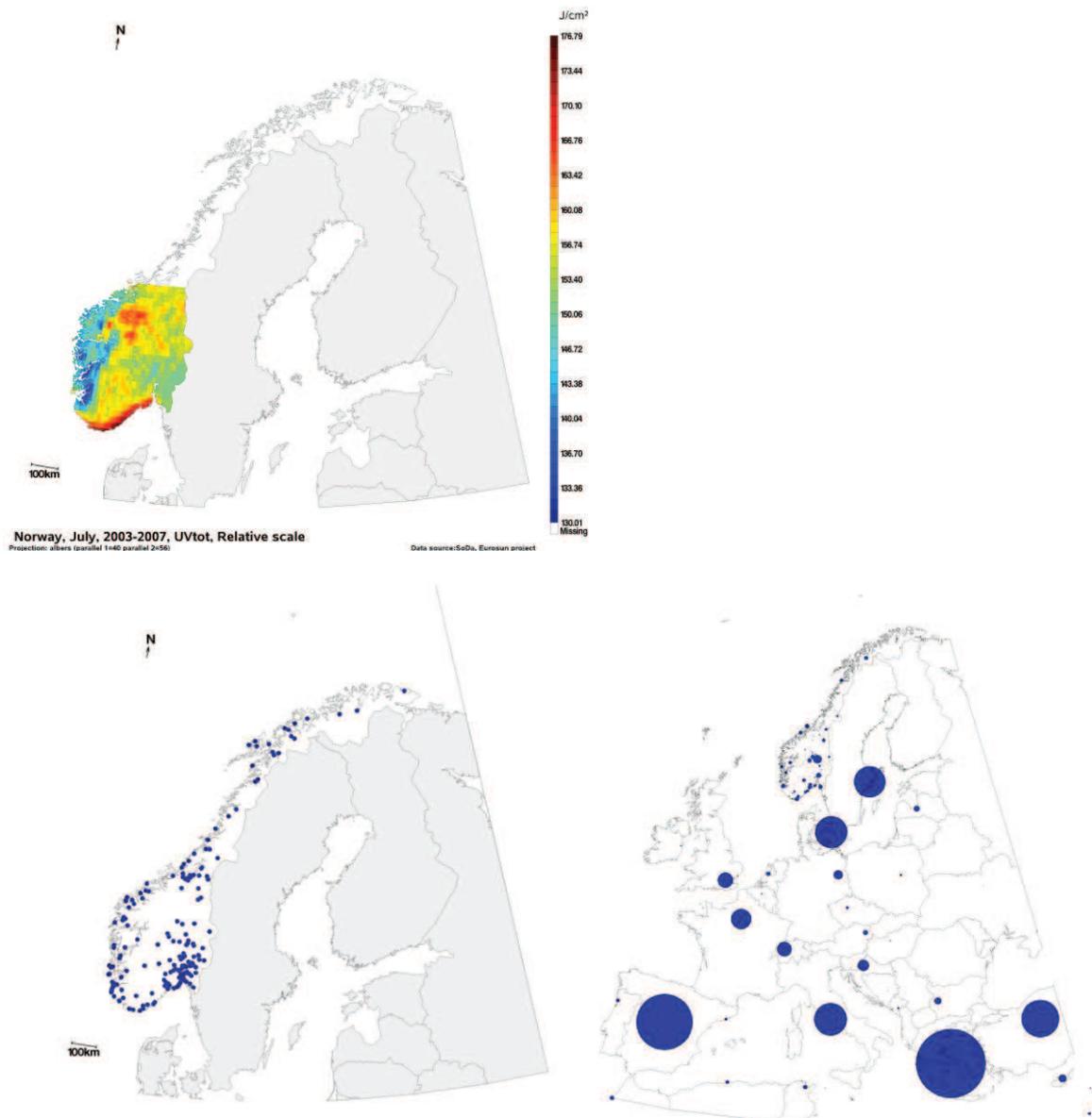


Figure 4.5 : Irradiation UV en Norvège en juillet 2003-2007 (en haut), localisations des résidences actuelles au moment de l'interview (en bas, à gauche) et localisations des vacances en Europe pendant les cinq années précédant l'interview (en bas, à droite). Les localisations des vacances sont représentées par des points de taille proportionnelle au nombre de vacances à cette localisation.

Extrapolation des données manquantes

L'estimation des participants norvégiens a requis une étape supplémentaire à cause du manque de données au nord de l'Europe. Près d'un tiers des résidences sont hors de la zone couverte par les données SoDa. Pour 85% des résidences au nord du 65° de latitude (soit environ la moitié nord de la Norvège), de même que pour la plupart des valeurs d'irradiation en hiver, l'irradiation est inconnue. Par exemple, pour le 1^{er} janvier 2009, 97% des résidences ont une irradiation inconnue.

La proportion des données qui ne sont pas disponibles pour les vacances est plus faible mais s'élève tout de même à 20,5%.

Par conséquent, pour estimer l'exposition des participants norvégiens, les données manquantes doivent être extrapolées. Pour ce faire, les effets de la latitude et de la longitude sur l'irradiation sont intégrés dans un modèle de régression. Ces variables sont transformées avec la fonction sinus pour prendre en compte la sphéricité de la Terre. Un terme d'interaction est ajouté car l'effet de la latitude est différent pour les différentes longitudes en Europe. Une distribution de Gamma a été choisie pour modéliser les doses d'irradiation afin d'obtenir des estimations positives.

Les paramètres du modèle ont été estimés à partir des données de l'atlas pour chaque mois de la période 2003-2007 car celle-ci est incluse dans la période du suivi. Les cartes du mois le plus ensoleillé (juin) et du mois le moins ensoleillé (décembre) de la Figure 4.6 représentent les valeurs disponibles dans la base de données (à gauche) et les estimations (à droite).

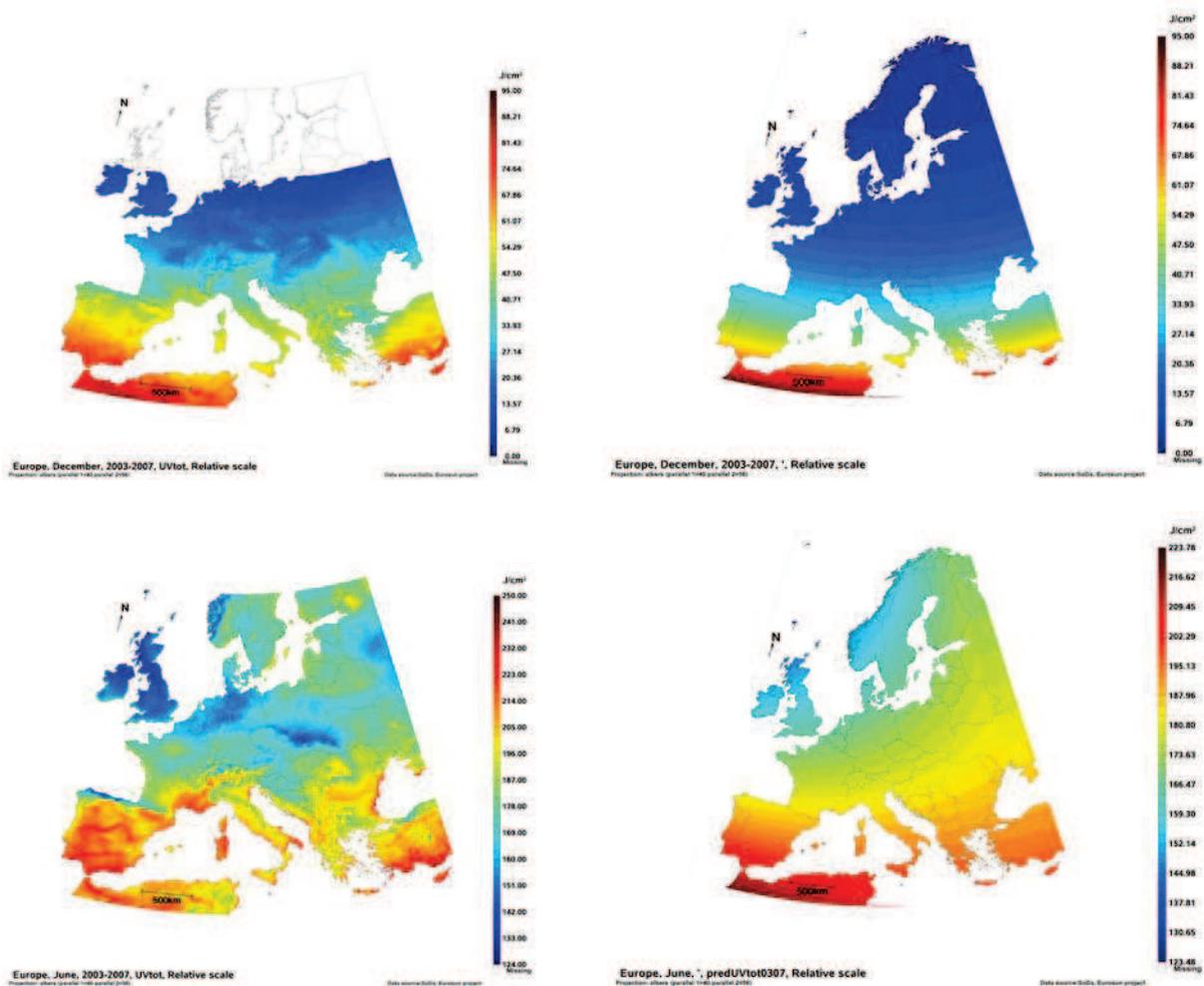


Figure 4.6 : Doses moyennes mensuelles d’UV total issues de la base de données SoDA (cartes de gauche) et des estimations (cartes de droite) pour les mois de décembre (cartes du haut) et pour les mois de juin (cartes du bas)

Des mesures effectuées par la NRPA (Norwegian Radiation Protection Authority), l’autorité nationale norvégienne de protection contre les rayonnements, et mises à notre disposition (Medhaug et coll. 2009), ont servi à la validation du modèle. Ces données sont pondérées par l’effet érythémateux et ne peuvent donc pas être directement comparées aux estimations. De plus, il s’agit de moyennes mensuelles des irradiations journalières en 2005. Les mesures et nos estimations ne peuvent donc pas être comparées directement, cependant elles doivent être corrélées si le modèle est correct.

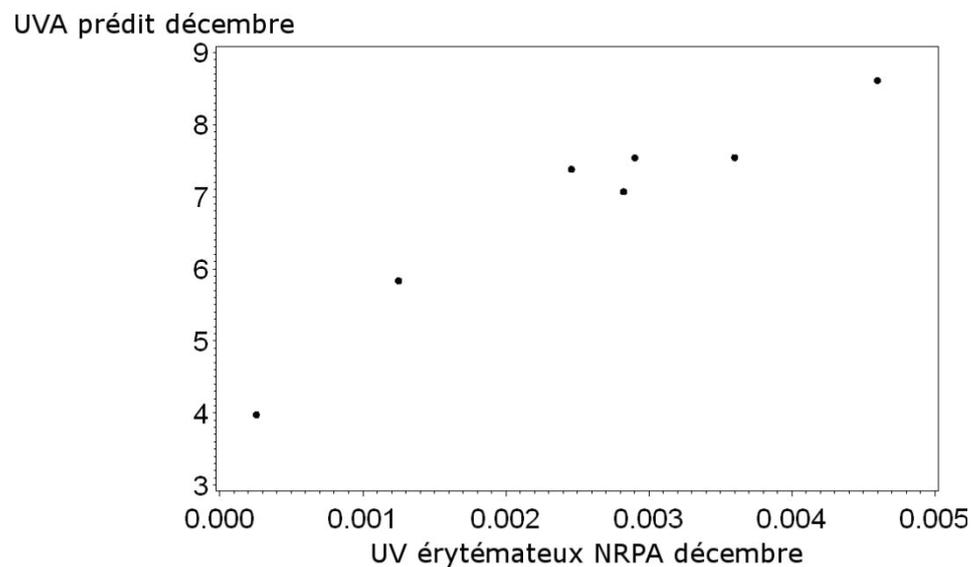
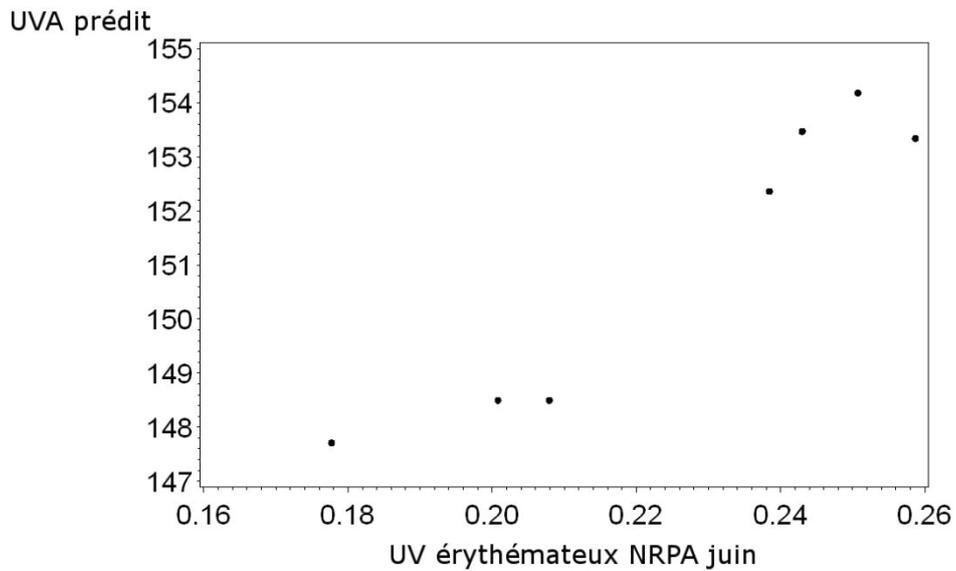


Figure 4.7 : Valeur d'irradiation estimée en fonction des valeurs issues de mesures au sol

La corrélation est forte pour les deux mois (Figure 4.7). Le coefficient de Pearson est 0,96. Cela conforte la validité de nos résultats mais il faut relativiser la corrélation car sept points seulement sont disponibles.

Les données estimées avec ce modèle sont utilisées pour estimer les irradiations reçues par les individus de l'enquête norvégienne. La valeur utilisée est la valeur la plus proche géographiquement du lieu de résidence ou du lieu de vacances des individus.

Ces valeurs sont moins précises car ce sont des estimations issues d'une régression ne prenant pas directement en compte tous les paramètres météorologiques et qu'il s'agit de moyennes mensuelles et non de données journalières.

Exposition résidentielle

Les résultats de l'enquête montrent que les Norvégiens passent 26 heures par semaine en extérieur, en dehors des périodes de vacances. Les hommes sont plus souvent en extérieur (29 heures hebdomadaires) que les femmes (24 heures hebdomadaires). Les ouvriers et les artisans passent plus de 35 heures par semaine en extérieur. Les participants de 5 à 19 ans et les habitants du sud de la Norvège s'exposent plus de 28 heures par semaine pour les loisirs (Tableau 4.11).

Sur le lieu de résidence, l'exposition cumulée annuelle moyenne des participants norvégiens est de 5833 J/cm² (intervalle de confiance 95% : 5465 J/cm² - 6236 J/cm²) et leur exposition journalière moyenne est de 16,3 J/cm² (intervalle de confiance 95% : 15,2 J/cm² - 17,4 J/cm²).

Tableau 4.11 : Temps passé en extérieur par l'échantillon norvégien sur le lieu de résidence et pendant les vacances

	N*	Temps passé en extérieur sur le lieu de résidence (en heures par semaine)	Temps passé en extérieur pendant les vacances (en heures par semaine)	
Groupe d'âge	0-4	40	26,5	28,7
	5-9	40	28,6	36,1
	10-14	40	28,8	35,3
	15-19	40	31,0	35,6
	20-24	40	25,0	33,3
	25-29	40	27,4	41,9
	30-39	40	26,8	37,7
	40-49	40	24,0	28,7
	50-59	40	23,0	28,1
	60-69	40	23,7	34,4
Zone de résidence	Est	178	25,8	34,1
	Nord	40	26,4	30,3
	Sud	20	30,4	35,7
	Trøndelag	59	26,2	32,1
	Ouest	99	26,7	36,5

* La zone de résidence n'est pas connue pour 4 participants

Tableau 4.12 : Exposition cumulative annuelle à l'UVA sur le lieu de résidence et pendant les vacances

		N	Exposition résidentielle à l'UVA	Exposition à l'UVA pendant les vacances	Exposition totale à l'UVA	% résidentielle UVA /totale
Groupes d'âge	0-9	58	6 987	444	7 431	94,0
	10-19	68	6 885	979	7 864	87,6
	20-29	58	4 793	874	5 668	84,6
	30-39	31	5 056	541	5 597	90,3
	40-49	27	4 772	523	5 295	90,1
	50-59	31	5 506	266	5 772	95,4
	60-69	29	4 973	737	5 710	87,1
Zone de résidence	Est	135	5 531	516	6 047	91,5
	Nord	26	7 145	549	7 694	92,9
	Sud	14	7 679	458	8 137	94,4
	Trøndelag	46	4 939	1251	6 190	79,8
	Ouest	81	6 007	688	6 696	89,7
Total		302	5 808	674,22	6 482	89,6

Tableau 4.13 : Exposition cumulative journalière à l'UVA sur le lieu de résidence et pendant les vacances

		N	Exposition résidentielle à l'UVA	Exposition à l'UVA pendant les vacances	Exposition totale à l'UVA	UVA vacances/ UVA résidentielle
Groupe d'âge	0-9	58	19,6	65,4	20,4	3,3
	10-19	68	19,3	64,1	21,5	3,3
	20-29	58	13,4	59,3	15,1	4,4
	30-39	31	14,1	68,3	15,3	4,8
	40-49	27	13,4	55,9	14,5	4,2
	50-59	31	15,3	44,1	15,8	2,9
	60-69	29	14,0	65,1	15,6	4,6
Zone de résidence	Est	135	15,5	57,6	16,4	3,7
	Nord	26	19,9	49,9	21,1	2,5
	Sud	14	21,3	88,6	22,3	4,2
	Trøndelag	46	13,9	66,2	16,7	4,8
	Ouest	81	16,9	62,8	18,1	3,7
Total		302	16,3	76,0	17,6	4,7

Exposition pendant les vacances

Les 361 individus étant partis en vacances pendant les cinq années précédant l'enquête en Norvège sont partis en moyenne 3,2 fois en cinq ans. 867 périodes de vacances (76%) se sont déroulées à l'étranger. Les coordinateurs locaux n'ont pas pris en compte les vacances passées en Norvège en hiver car les individus ne peuvent pas être exposés au soleil.

Tableau 4.14 : Nombre de vacances total et nombre de vacances à l'étranger

	Nombre de participants	Nombre de participants partis en vacances au moins une fois (%)	Nombre de vacances par participant	Nombre de vacances à l'étranger par participant
Agriculteurs	2	2 (100%)	3,50	3,00
Artisans	19	16 (84%)	2,53	1,68
Employés	48	43 (90%)	3,79	2,40
Ouvriers	12	11 (92%)	3,92	2,50
Intermédiaires	45	43 (96%)	3,73	2,62
Cadres	9	9 (100%)	6,00	4,56
Sans profession	1	1 (100%)	3,00	2,00
Autres	36	32 (89%)	2,64	1,78
Etudiants	66	63 (95%)	3,20	2,64
Femmes au foyer	6	5 (83%)	3,00	2,33
Retraités	36	25 (69%)	2,36	1,64
Enfants	120	111 (93%)	2,96	1,77
0-4	40	34 (85%)	1,98	2,3
5-9	40	39 (98%)	3,55	3,6
10-14	40	38 (95%)	3,35	3,5
15-19	40	37 (93%)	2,30	2,5
20-24	40	37 (93%)	3,48	3,8
25-29	40	37 (93%)	2,98	3,2
30-39	40	35 (88%)	3,03	3,5
40-49	40	34 (85%)	4,43	5,2
50-59	40	38 (95%)	3,50	3,7
60-69	40	32 (80%)	3,25	4,1
Est	178	156 (88%)	3,12	2,15
Nord	40	30 (75%)	2,05	1,18
Sud	20	19 (95%)	3,30	2,50
Trøndelag	59	56 (95%)	3,68	2,51
Ouest	99	96 (97%)	3,37	2,32

Les cadres sont partis en vacances environ deux fois plus souvent que les autres (Tableau 4.14) et de nombreuses fois à l'étranger. Les habitants du nord de la Norvège sont moins partis en vacances.

Le temps passé en extérieur a été calculé sur les périodes de vacances les plus récentes pour chaque participant parti en vacances. Comme 94% de ces vacances ont eu lieu en 2008, 2009 ou 2010, elles sont supposées être plus fiables que les précédentes périodes. En effet, les enquêteurs norvégiens ont rapporté que les individus ont eu plus de mal à se souvenir des vacances datant de plus de deux ou trois ans avant l'interview.

Les vacanciers ont passé en moyenne 36 heures hebdomadaires dehors. Les 25-29 ans ont passé beaucoup de temps en extérieur en vacances (Tableau 4.11). Les habitants du nord se sont peu exposés.

La latitude de la période de vacances la plus récente a été comparée à celle de la résidence. En excluant les 12 vacances dans l'hémisphère sud, la latitude moyenne des vacances est de $43,8^\circ$ tandis que la latitude moyenne des résidences est de $61,5^\circ$. Le point le plus au sud de la Norvège se situe à $57,9^\circ$ de latitude, c'est-à-dire que la latitude moyenne de vacances est plus au sud que la Norvège (Figure 4.5).

Les 20-29 ans partent environ 30° plus au sud que leur lieu de résidence. La différence de latitude entre le lieu de vacances et le lieu de résidence est similaire pour les habitants du nord et pour les habitants du sud du pays.

Pendant les vacances, les participants norvégiens ont cumulé en moyenne $674,2 \text{ J/cm}^2$ (intervalle de confiance 95% : $421,4 \text{ J/cm}^2$ - $1177,3 \text{ J/cm}^2$) par an et $76,0 \text{ J/cm}^2$ (intervalle de confiance 95% : $52,5 \text{ J/cm}^2$ - $116,1$) par jour.

Tableau 4.15 : Nombre de vacances et différence moyenne de latitude entre le lieu des vacances les plus récentes et le lieu de résidence

	Nombre de vacances	Différence de latitude (résidence-vacance)		
	0-4	32	14,6	
	5-9	39	12,1	
	10-14	38	16,4	
	15-19	35	16,9	
Groupe d'âge	20-24	34	30,0	
	25-29	35	27,2	
	30-39	35	11,3	
	40-49	34	14,5	
	50-59	38	13,6	
	60-69	31	21,9	
		Est	153	16,8
		Nord	30	16,8
Zone de résidence	Sud	19	18,6	
	Trondeland	53	21,4	
	Ouest	93	16,7	

Exposition totale

Au total, les participants norvégiens ont cumulé en moyenne 6263 J/cm² (intervalle de confiance 95% : 5837 J/cm² - 6733 J/cm²) par an et 17,3 J/cm² (intervalle de confiance 95% : 16,1 J/cm² - 18,6) par jour.

La dose d'irradiation annuelle cumulée est fortement influencée par l'irradiation résidentielle. En moyenne, 90% de la dose d'irradiation UV a été reçu sur le lieu de résidence (Tableau 4.12). Cette proportion est plus faible (80%) pour les habitants de Trondelag et pour les participants de 20 à 29 ans (85%).

La dose journalière reçue pendant les vacances est 4,7 fois supérieure à la dose journalière résidentielle. Ce ratio est de 2,5 seulement pour les habitants du nord qui reçoivent moins d'irradiation pendant les vacances que les autres habitants.

4.3 Comparaison entre les populations

Les trois populations décrites ci-dessus ont des comportements différents vis-à-vis du soleil sur leur lieu de résidence et sur leur lieu de vacances. Les Français privilégient la côte méditerranéenne. Les Italiens partent beaucoup sur la côte adriatique, en particulier la moitié nord de la côte, et le nord-est de la Sardaigne. Les Italiens passent plus de temps en extérieur pendant les vacances et reçoivent une forte dose d'exposition. Les Norvégiens passent plus de temps en extérieur que les Français et les Italiens lorsqu'ils sont sur leur lieu de résidence. Ils partent aussi plus souvent en vacances et plus au sud, souvent à l'étranger dans des lieux ensoleillés.

Cinq autres échantillons de population ont été interviewés dans le cadre du projet EuroSun : Estonie, Allemagne, Écosse, Hongrie et Portugal. L'analyse de ces populations est en cours mais les données d'irradiation UV sur les lieux de résidence et de vacances n'ont pas encore été complètement extraites. Cependant, il est possible dès maintenant de comparer les comportements des huit populations par une analyse discriminante.

Elle permet de décrire les principales caractéristiques des comportements des participants. Cette méthode transforme les variables d'origine, c'est-à-dire les caractéristiques des comportements, en un nombre réduit de nouvelles variables qui décrivent le maximum d'information.

Une étape préliminaire doit définir les variables qui différencient les populations et qui seront introduites dans l'analyse discriminante. Cette étape introduit les variables pas à pas dans le modèle pour déterminer celles qui permettent de maximiser les différences entre les trois populations, en se basant sur un critère de ratio de vraisemblance, le lambda de Wilks. Plus la valeur du lambda de Wilks est faible, meilleur est le modèle. L'étape préliminaire détermine que toutes les variables sont des facteurs discriminant les populations et sont intégrées dans l'analyse discriminante. Les caractéristiques du comportement d'exposition au soleil incluses dans le modèle sont les suivantes : le nombre de vacances, le temps passé en extérieur sur le lieu de résidence, le temps passé en extérieur pendant les vacances, le nombre de vacances à l'étranger et la durée des vacances.

Tableau 4.16 : Principales caractéristiques des comportements des participants.

	Fr	It	No	Es	Al	Ho	Po	Ec
Exposition cumulative annuelle (J/cm ²) Résidence	4 364	9 433	5 808	*	*	*	*	*
Exposition cumulative annuelle (J/cm ²) Vacances	349	501	674	*	*	*	*	*
% dose annuelle résidence/total	92%	95%	90%	*	*	*	*	*
Exposition cumulative journalière (J/cm ²) Résidence	12	26	16	*	*	*	*	*
Exposition cumulative journalière (J/cm ²) Vacances	37	91	76	*	*	*	*	*
Ratio doses journalières vacances/résidence	3,0	3,5	4,7	*	*	*	*	*
% étant parti en vacances	81%	70%	90%	70%	76%	63%	98%	73%
% étant parti en vacances à l'étranger	27%	18%	76%	48%	58%	36%	63%	64%
Différence de latitude lieu de vacances - lieu de résidence	-4°	-1,5°	-15°	*	*	*	*	*
Temps en extérieur (heures/semaine) Résidence	12	21	27	28	17	24	15	20
Temps en extérieur (heures/semaine) Vacances	28	61	37	50	35	46	38	46

* Analyse en cours

Fr : Français ; It : Italiens ; No : Norvégiens ; Es : Estoniens ; Al : Allemands ; Ho : Hongrois ; Po : Polonais ; Ec : Ecosseis.

Tableau 4.17 : Moyennes de variables canoniques par population

	Première variable canonique	Deuxième variable canonique
Estonie	0,52	0,14
France	-0,46	-0,43
Allemagne	-0,25	-0,64
Hongrie	0,02	0,36
Italie	0,36	0,86
Norvège	0,60	-0,05
Portugal	-1,01	0,43
Écosse	0,48	-0,33

Tableau 4.18 : Corrélations entre les variables canoniques et les variables d'origines

	Première variable canonique	Deuxième variable canonique
Nombre de vacances à l'étranger	-0,03	-0,75
Nombre de vacances	-0,79	0,10
Temps passé en extérieur sur le lieu de résidence	0,85	0,31
Temps passé en extérieur pendant les vacances	0,71	0,67
Durée des vacances	0,04	0,18

Seules les vacances ayant commencé dans les deux années précédant l'interview sont prises en compte pour le calcul du nombre de vacances au total et à l'étranger. Cette période est plus fiable que les années précédentes car plus on remonte dans le temps, plus le risque d'oublier des vacances est important.

Chaque nouvelle variable, appelée variable canonique, obtenue suite à l'analyse discriminante correspond à une combinaison des comportements (Tableau 4.18). Seules les deux premières variables canoniques sont suffisamment informatives pour l'analyse de la différence de

comportement entre les populations et sont retenues (Tableau 4.17). La Figure 4.8 représente graphiquement les participants selon ces deux variables canoniques pour chaque échantillon.

La première, représentée sur l'axe horizontal de la figure, discrimine d'une part le Portugal et d'autre part la Norvège, l'Estonie et l'Écosse. La seconde, représentée sur l'axe vertical, discrimine d'une part l'Italie et d'autre part la France et l'Allemagne (Tableau 4.17).

Les résultats s'interprètent avec les corrélations entre les variables d'origines et les variables canoniques. Quand la première variable canonique est positive, cela signifie que les participants passent beaucoup de temps en extérieur sur leur lieu de résidence et pendant les vacances mais que le nombre de vacances est faible (Tableau 4.18). La seconde variable représente un long temps passé en extérieur pendant les vacances et peu de vacances à l'étranger.

Les participants portugais passent peu de temps en extérieur sur le lieu de résidence et pendant les vacances et sont partis souvent en vacances. Les Norvégiens, les Écossais et les Estoniens s'opposent au Portugais (Figure 4.8).

Les Italiens sont peu partis en vacances mais ont passé beaucoup de temps en extérieur, en particulier lorsqu'ils étaient en vacances. Ils s'opposent aux Allemands et aux Français (Figure 4.8), ces derniers étant ceux qui passent le moins de temps à l'extérieur sur leurs lieux de résidence et pendant les vacances.

On peut décrire les comportements de chaque population avec ces variables (Figure 4.8). Par exemple, ceux des Écossais, des Norvégiens et des Estoniens sont en moyenne similaires mais les Écossais ont un comportement plus homogène ; les individus sont moins dispersés.

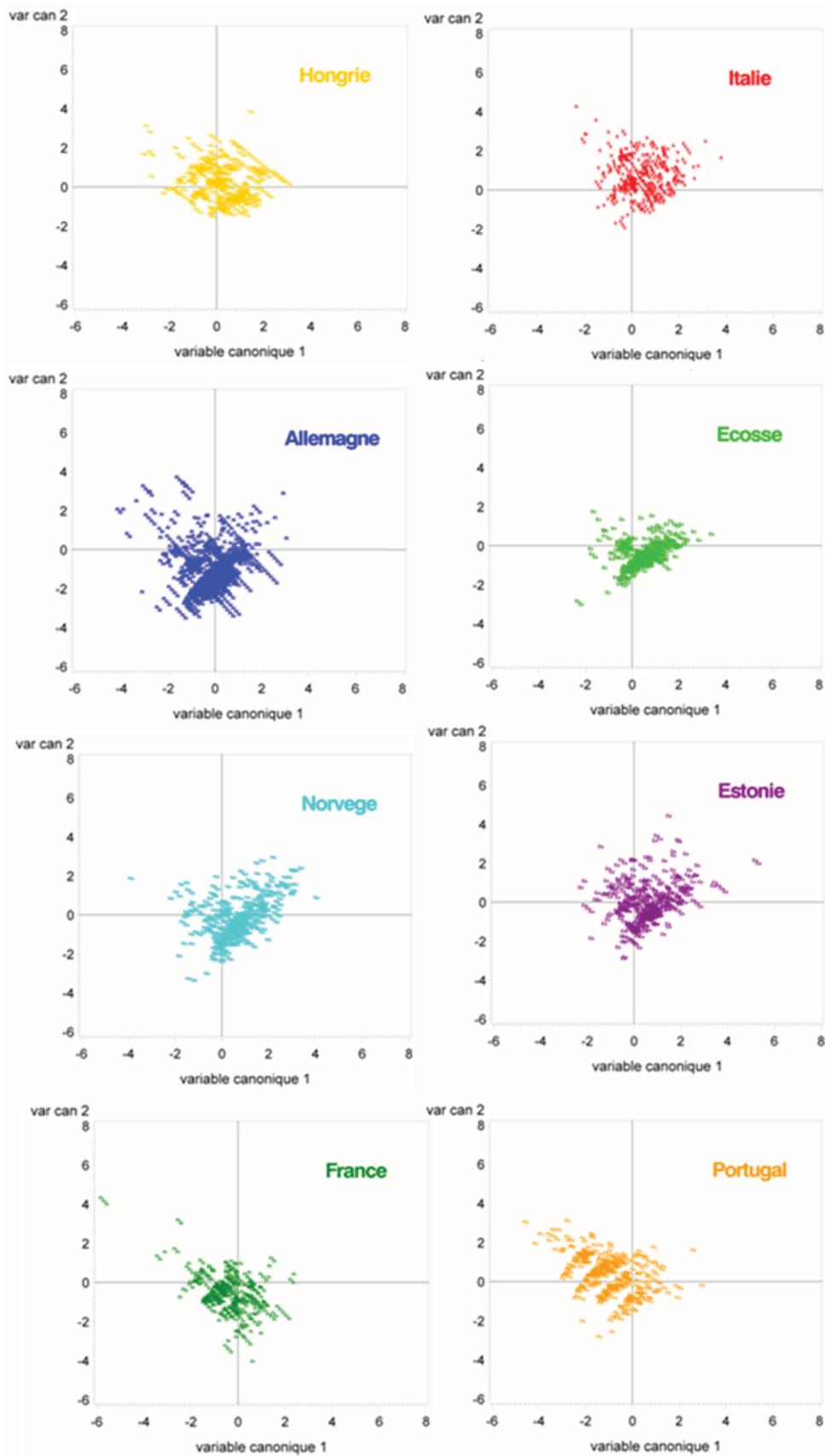


Figure 4.8 : Caractéristiques des vacances en fonction des variables canoniques.

Tableau 4.19 : Moyennes par pays des variables d'origines intégrées dans l'analyse discriminante

	Nombre de vacances à l'étranger	Nombre de vacances	Temps en extérieur résidence (heures/semaines)	Temps en extérieur vacances (heures/semaine)	Durée des vacances (jours)
Estonie	0,7	1,2	28,1	50,0	18,5
France	0,4	1,0	12,6	28,1	14,3
Allemagne	1,0	1,4	17,4	35,2	14,1
Hongrie	0,4	1,1	24,3	46,4	8,3
Italie	0,3	1,0	20,9	61,2	15,4
Norvège	1,0	1,4	26,5	37,1	14,6
Portugal	0,8	2,5	14,9	38,0	14,3
Écosse	0,8	1,0	20,0	45,5	12,9

Tableau 4.20 : Répartition des catégories socioprofessionnelles (%) par pays

	Estonie	France	Allemagne	Hongrie	Italie	Norvège	Portugal	Ecosse
Agriculteurs	0,2%	1%	0,5%	0	1%	0,5%	2%	1%
Artisans	2%	2%	6%	4%	1%	5%	2%	2%
Employés	16%	13%	30%	31%	16%	12%	10%	13%
Ouvriers	8%	8%	4%	1%	10%	3%	7%	11%
Intermédiaires	11%	9%	3%	1%	4%	11%	9%	6%
Cadres	3%	6%	2%	0,5%	3%	2%	6%	2%
Etudiants/ Enfants	30%	30%	51%	35%	35%	47%	38%	45%
Retraités	8%	10%	0	18%	8%	9%	0	9,5%
Sans profession	22%	17%	2%	9%	7%	8%	19%	8,5%
Autres	0	4%	2%	0,5%	15%	3%	7%	2%
Total (fréquence absolue)	403	406	822	400	413	400	403	422

Les différences observées peuvent être dues à des différences entre les catégories socioprofessionnelles entre les populations. La catégorie socioprofessionnelle peut fortement influencer les comportements, notamment au niveau des vacances. En Hongrie, environ 30% de l'échantillon appartient à la catégorie des employés et seulement 1,5% a une profession intermédiaire ou est cadre (Tableau 4.20). Les revenus peuvent expliquer pourquoi la durée moyenne des vacances des Hongrois est de huit jours seulement. Cependant, pour les autres échantillons, la répartition des catégories socioprofessionnelles ne semble pas expliquer le comportement pendant les vacances. En effet, hormis l'échantillon allemand qui compte une forte proportion d'employés, nous ne notons pas de différence entre les échantillons.

Les populations étudiées ont été choisies en fonction de leur localisation en Europe pour représenter au mieux la diversité. Contrairement à ce qui était attendu, il n'a pas été observé d'opposition franche entre les populations nordiques (Norvège, Estonie, Écosse), les populations d'Europe centrale (Hongrie) ou occidentale (France, Allemagne) et méditerranéennes (Italie, Portugal).

4.4 Exposition au soleil et incidence et mortalité des mélanomes cutanés en Europe

Le projet EuroSun a été conçu pour fournir un outil d'analyse du rôle de l'exposition UV solaire dans les pathologies. Le mélanome cutané est l'une des pathologies où l'exposition à l'UV joue un rôle primordial. En Europe, l'incidence des mélanomes cutanés ne montre pas le gradient pôle-équateur observé dans le reste du monde. Nous avons donc cherché si les comportements observés dans notre étude pouvaient rendre compte des différences d'incidence en Europe.

Les taux d'incidence et de mortalité standardisés sur l'âge de la population mondiale pour l'année 2008 peuvent être obtenus à partir de la base GLOBOCAN (Ferlay et coll. 2008). Ils sont représentés dans la Table 4.21 pour les pays inclus dans l'étude. L'incidence et la mortalité des mélanomes cutanés en Europe n'ont pas une répartition géographique similaire à l'irradiation UVA ni UVB terrestre.

Tableau 4.21 : Incidence et mortalité du mélanome malin cutané pour 100 000 personnes-années standardisées sur l'âge avec la population mondiale standard chez les hommes et chez les femmes (Ferlay et coll. 2008)

	Incidence		Mortalité	
	Hommes	Femmes	Hommes	Femmes
Norvège	17,9	16,5	3,8	2,6
France (métropolitaine)	7,4	8,9	1,6	1,0
Italie	9,2	8,7	1,8	1,1
Estonie	5,8	6,7	3,2	1,8
Allemagne	11,9	12,6	1,8	1,1
Hongrie	9,9	6,7	2,5	1,4
Portugal	3,6	5,8	1,2	1,0
Royaume-Uni	11,9	13,2	2,3	1,5

L'analyse discriminante a mis en évidence une variabilité des comportements pendant les vacances et au niveau du temps passé en extérieur sur le lieu de résidence entre les huit populations de l'étude. Nous avons mis ces résultats en lien avec les données de GLOBOCAN pour expliquer la répartition géographique de l'incidence et de la mortalité à travers l'Europe.

La mortalité est élevée en Norvège, en Estonie et au Royaume-Uni. L'étude a montré que les Écossais, les Norvégiens et les Estoniens ont passé de longues heures en extérieur et ont eu peu de vacances hors de la commune de résidence. Cela suggère que ces comportements pourraient être un facteur de risque pour les populations au nord de l'Europe (Royaume-Uni, Estonie et Norvège), qui sont en outre des populations à peau claire, un autre facteur de risque de mélanome.

La moitié des Allemands et des Écossais de l'étude sont partis au moins une fois en vacances à l'étranger et passent plus de temps en extérieur pendant les vacances qu'au quotidien. L'atlas montre que l'irradiation au sol est faible en Allemagne et au Royaume-Uni. Le comportement pendant les vacances ainsi que la sensibilité des populations pourraient expliquer ces forts taux d'incidence et de mortalité. De plus, au niveau des latitudes élevées, la différence d'ensoleillement journalier entre l'été et l'hiver est très grande.

A l'opposé, dans les pays méditerranéens tels que l'Espagne, le Portugal, la France et la Grèce, les taux d'incidence et de mortalité sont faibles. Les populations sont moins sensibles au rayonnement UV. L'étude a montré que les Français et les Portugais passent moins de temps en extérieur que les habitants des pays nordiques. Les Français reçoivent deux fois moins d'irradiation UV que les Norvégiens pendant une journée de vacances.

L'incidence des mélanomes est élevée chez les Italiens mais le taux de mortalité est faible. Ils reçoivent une forte dose d'irradiation toute l'année. Ils partent en vacances peu souvent mais passent beaucoup de temps en extérieur.

En Europe centrale et dans les pays baltes, l'incidence est faible mais la mortalité est élevée. Le ratio mortalité / incidence est plus élevé à l'est de l'Europe et suit un gradient nord-sud (De Vries et coll. 2004). Nous avons vu que les vacances des Hongrois sont peu fréquentes et de courte durée et les Estoniens ont peu de vacances. Ces comportements ne sont pas suffisants pour expliquer cette variabilité du ratio mortalité / incidence.

L'exposition résidentielle et récréationnelle a été quantifiée pour les italiens, les français et les norvégiens ce qui permet de faire directement le lien entre l'exposition et le risque de mélanomes. Les taux d'incidence et de mortalité pour les mélanomes cutanés en Norvège sont deux fois plus élevés que les taux en France et en Italie. D'après notre étude, les Norvégiens ne sont pas plus exposés que les Italiens, bien qu'ils aient passé en moyenne 27 heures par semaine en extérieur et que l'irradiation UV en été soit plus élevée dans les pays scandinaves qu'au centre de l'Europe pendant certaines périodes estivales. Ils ont aussi une exposition légèrement supérieure à celle des Français (Tableau 4.16). Le comportement pendant les vacances pourrait expliquer ces forts taux d'incidence et de mortalité. Les Norvégiens passent près de deux fois plus de temps en extérieur pendant les vacances que sur leur lieu de résidence et ils partent souvent beaucoup plus au sud que leur résidence. La dose d'irradiation journalière récréative est près de cinq fois plus grande que la dose résidentielle.

L'exposition au soleil est différente pour chaque population européenne ce qui peut expliquer en partie les différences des taux d'incidence et de mortalité de mélanomes cutanés (Tableau 4.16) mais il faut aussi prendre en compte la sensibilité au soleil des populations. Par exemple là où les populations ont un phototype sensible, dans le nord de l'Europe, en Allemagne et au Royaume-Uni, les taux d'incidence et de mortalité sont élevés.

4.5 Discussion

4.5.1 Enquête pilote en France

L'exposition à l'UV solaire que l'on cumule sur l'année est principalement due à la zone de résidence. Cette zone influence non seulement l'irradiation sur le lieu de résidence mais aussi le temps passé à l'extérieur et le comportement par rapport aux vacances. Les parisiens reçoivent de faibles doses car ils passent peu de temps à l'extérieur. La zone la plus exposée est le sud-est où les habitants passent beaucoup de temps en extérieur. Les habitants du sud-est reçoivent donc une très forte dose résidentielle. Les participants de 60 à 69 ans reçoivent aussi de fortes doses car ils sont souvent en extérieur. Les estimations de l'exposition résidentielle pour l'échantillon entier et pour les individus étant partis en vacances au moins

une fois sont similaires ; cela signifie que l'exposition résidentielle n'est pas liée au fait d'être parti en vacances ou non.

La dose journalière reçue pendant les vacances est trois fois supérieure à la dose résidentielle journalière. Cela s'explique par les lieux et les dates de vacances. Les vacanciers partent principalement dans des zones plus au sud et près des côtes et souvent en juillet ou en août. Il faut aussi noter que les participants ont passé 2,2 fois plus de temps en extérieur pendant les vacances que le reste du temps.

Les parisiens ont reçu la dose résidentielle la plus faible mais ils ont reçu la dose la plus forte pendant les vacances sur l'année. Au contraire, les habitants de la zone sud-est et les personnes de 60 à 69 ans, bien qu'ils aient cumulé les plus fortes doses sur l'année, n'ont pas reçu de fortes doses pendant les vacances.

Avec la méthode développée dans cette étude, l'exposition à l'UV dans le passé a été estimée pour un grand échantillon et l'exposition de la population française a pu être estimée. Nous avons pu mettre en évidence l'hétérogénéité de l'exposition à l'UV parmi les différents groupes d'âge et les habitants des différentes zones de résidence.

4.5.2 Expositions des individus et des populations en Europe

Les estimations de l'étude en Norvège ont montré une exposition très importante sur le territoire et beaucoup de temps passé en extérieur, ainsi qu'un comportement qui vise à rechercher une forte exposition pendant les vacances (lieux de vacances au sud, beaucoup de temps passé en extérieur). Ces résultats sont cohérents avec des études antérieures. Une étude récente a montré des distributions géographiques de l'irradiation UVA et de l'irradiation UV pondérée par la courbe d'action de l'érythème similaires à ceux de nos résultats, c'est-à-dire une forte irradiation avec un gradient ouest-est (Medhaug, 2009). Elle a aussi montré une similitude entre la distribution géographique des cancers cutanés dans le pays et l'irradiation UVA et UVB au sol. Une autre étude a suggéré que même l'exposition à l'UV sur le lieu de résidence peut être responsable de l'incidence élevée des mélanomes cutanés en Norvège (Bentham, 1996). Cependant, elle propose une deuxième cause. A partir des années 1980, les Norvégiens prennent plus de vacances à l'étranger, plus au sud, ce qui aurait un impact sur les cancers de la peau.

Deux types d'expositions à l'UV peuvent être utilisés dans les études épidémiologiques. La première est l'exposition intermittente. Elle peut être définie comme une exposition de courte durée au rayonnement UV solaire pendant une activité de loisir où l'individu est plus fortement exposé que pendant les activités du quotidien. Elle est assimilée à une forte différence entre l'exposition journalière pendant les vacances et l'exposition journalière résidentielle. D'après les résultats, la dose d'irradiation UV cumulée en une journée est trois fois plus importante pendant les vacances que le reste du temps chez les Italiens et les Français ; l'intensité de l'exposition est plus importante pendant les vacances. Par conséquent, le ratio de la dose journalière reçue pendant les vacances sur la dose journalière résidentielle est un moyen de quantifier l'exposition intermittente. Le second type d'exposition est l'exposition cumulée sur la durée de vie. Il s'agit de l'exposition qu'un individu cumule tout au long de sa vie, en prenant en compte à la fois l'exposition résidentielle et l'exposition des vacances. L'exposition à l'UV cumulée sur une année dépend très fortement de l'exposition résidentielle. Par exemple en France, les habitants de la région sud-est et les personnes de 60 à 69 ans ont reçu une forte dose annuelle même s'ils n'ont reçu qu'une faible dose pendant les vacances car ils sont très exposés sur leur lieu de résidence. Par conséquent, il peut ne pas être nécessaire de prendre en compte les vacances quand l'étude porte sur l'effet de l'exposition cumulée au cours de la vie.

L'incidence des mélanomes cutanés diagnostiqués à travers l'Europe et la mortalité due à ces derniers dépendent du pays. Une simple étude des comportements n'est pas toujours suffisante pour expliquer la variabilité de l'incidence et de la mortalité. Le calcul des expositions au rayonnement UV solaire doit être effectué dans l'ensemble des pays participants à l'étude. Ils ont une bonne répartition en Europe et pourrait participer à une meilleure compréhension du rôle de l'exposition récréative et de l'exposition résidentielle dans le développement des maladies liées à l'UV. Il pourrait notamment permettre d'expliquer le fort ratio mortalité/incidence des mélanomes cutanés en Europe centrale et dans les pays baltes.

De plus, la sensibilité individuelle au soleil est à prendre en compte. Il est par exemple possible que la cause des faibles taux d'incidence et de mortalité dans les pays méditerranéens soit leur phototype moins sensible que les seuls comportements. L'utilisation d'appareils de

bronzage artificiel peut aussi être un facteur de confusion. Il peut être responsable d'un fort taux d'incidence (Héry et coll. 2010).

Enfin, les moyens de protection, tels que les lunettes de soleil ou le port de vêtements couvrants peuvent influencer l'irradiation effectivement reçue par les individus. Ces informations peuvent être incluses dans les questionnaires.

5. Discussion

Conclusions

Nous avons eu l'opportunité de participer au projet EuroSun, projet européen, multicentrique, multidisciplinaire, associant des physiciens spécialistes de la télédétection, des épidémiologistes et des oncologues. L'objectif de ce projet était de développer un outil permettant l'évaluation de l'exposition au rayonnement ultraviolet solaire dans les études épidémiologiques et en santé publique. Dans le cadre de ce projet, notre rôle a été de réaliser l'atlas de l'irradiation UV en Europe à partir des données fournies par l'équipe de Lucien Wald (Ecole des Mines de Paris, Armines), d'analyser des enquêtes en population coordonnées par l'équipe d'Ulrik Ringborg (Karolinska Institute, Stockholm), et d'utiliser des données d'irradiation UV pour l'analyse des variations d'incidence et de mortalité des mélanomes cutanés en Europe.

L'exposition environnementale peut être mesurée avec des instruments dans le cadre d'études épidémiologiques, ou peut être issue d'une base de données ou de questionnaires. La diversité des méthodes empêche la comparaison entre les résultats des différentes études. De plus, les facteurs environnementaux, comme le rayonnement ultraviolet solaire, sont souvent faibles par rapport aux autres facteurs. Il faut donc avoir des données précises pour pouvoir étudier leur rôle dans le développement de maladies.

Les méthodes d'interpolation, à l'origine de certaines bases de données, ont des limites, en particulier pour les localisations éloignées des points de mesures au sol. Si la distance entre le radiomètre et le point de l'estimation se trouve à plus de 34 km du lieu où l'on veut estimer l'irradiation horaire ou à plus de 50 km pour l'irradiation journalière, une estimation faite à

partir de données satellitaires est plus précise que l'interpolation (Perez 1997 ; Zelenka et coll. 1999). Les études reposent sur des données du satellite météorologique géostationnaire GOES-8 de la NASA et les comparaisons ont été faites avec 12 stations localisées dans l'état de New York et du Massachusetts aux États-Unis.

D'autres projets ont déjà fourni des données d'irradiation UV mais les zones géographiques couvertes par les données sont petites ou la période pour laquelle les données sont disponibles est courte. La surveillance des variations temporelles requiert des données sur de longues périodes.

Les mesures du rayonnement UV atteignant la surface terrestre obtenues à partir des données fournies par le satellite permettent de prendre en compte les facteurs influençant l'irradiation UV tels que l'albédo, la nébulosité et l'altitude. L'atlas construit au cours de ce travail contient des cartes de haute résolution géographique car aucune mesure n'a été nécessaire à l'obtention des données. Il peut être utilisé dans le cadre d'études descriptives pour détecter des variations spatio-temporelles de l'irradiation UV qui est un facteur de risque reconnu comme carcinogène. Par ailleurs, la diminution de l'épaisseur de la couche d'ozone au cours du temps pourrait faire augmenter l'irradiation ambiante. Cependant, aucune augmentation n'a été détectée. Le projet COST 726 n'a pas mis non plus en évidence de tendance temporelle globale. Cependant, nos résultats montrent des tendances temporelles pour certaines zones de l'Europe. Par exemple, nous avons observé une augmentation de l'irradiation au nord-est de l'Europe en septembre et dans les pays méditerranéens en été. Ces variations d'irradiation doivent être surveillées car elles peuvent induire des variations du risque de maladies liées au rayonnement UV.

L'atlas met en évidence les zones fortement exposées à l'irradiation UV, pas seulement au niveau des latitudes basses. Les populations au sud des pays nordiques sont sensibles au rayonnement UV et sont fortement exposées.

Les variations saisonnières de l'irradiation sont à l'origine de grandes différences entre l'exposition des individus en été et en hiver, en particulier dans le nord de l'Europe. Le pic saisonnier est plus précoce au nord où l'irradiation commence à être élevée dès le mois de mai. Ces variations sont importantes pour l'étude de l'exposition des individus.

En hiver, une partie des données au nord de l'Europe était manquante dans les données SoDa. Nous avons complété les cartes avec un modèle basé sur la variabilité des données observées pour un mois pour lequel les cartes étaient complètes.

En plus de la surveillance de la dose ambiante de rayonnement UV, l'outil peut combler des besoins pour les études étiologiques. Les enquêtes en population fournissent des données pour reconstruire l'exposition de chaque participant. Comme les informations qu'elles fournissent sont couplées avec les données SoDa, une estimation quantitative et précise de l'exposition peut être faite en suivant les individus sur une large zone géographique. Cela est nécessaire notamment pendant les vacances à l'étranger.

Les données d'irradiation journalière à l'UV utilisées dans les enquêtes en population ont une résolution de 5 km. La large couverture géographique du satellite nous a permis de suivre l'exposition dans les différents lieux de résidence lorsque les individus ont déménagé pendant la période du suivi et pour la plupart des vacances. Nous pouvons détecter les fortes expositions pendant les vacances et calculer les doses annuelles cumulées puis étudier l'effet des expositions intermittentes et chroniques sur la santé. L'exposition professionnelle n'a pas été prise en compte dans ce travail. Toutefois, l'outil permet de le faire en incluant dans le questionnaire des items à propos du ou des emploi(s) des participants au cours de la période du suivi: lieu(x) de travail et temps passé en extérieur selon la saison, éventuels séjours professionnels à l'étranger.

Le manque de données sur l'irradiation UV au nord de la Norvège, en hiver et en été, n'a pas permis de quantifier leur exposition directement avec les données fournies, comme cela a été fait pour les deux autres populations. Cependant, des valeurs manquantes d'irradiation ont été modélisées avec une régression, ce qui a finalement permis d'estimer les expositions des participants norvégiens.

Nous avons reconstruit l'estimation de l'exposition au rayonnement UV sur plusieurs années pour les populations française, italienne et norvégienne. Pour les trois populations, la dose journalière reçue pendant les vacances est de 3 à 4,7 fois supérieure à la dose résidentielle. Et plus de 90% de la dose cumulée annuelle a été reçue sur le lieu de résidence.

Les comportements des huit populations ont été étudiés et la reconstruction de leur exposition est en cours. L'analyse des comportements des différentes populations européennes, bien

distribuées au travers de l'Europe, n'a pas mené à une discrimination entre les différents types de populations européennes (nordiques, méditerranéennes, etc...). Mais l'étude des comportements dans les différentes populations a été mise en perspective avec les données d'incidence et de mortalité. Les résultats peuvent, par exemple, expliquer les forts taux d'incidence et de mortalité observés en Norvège. En effet, les Norvégiens ont reporté avoir passé beaucoup de temps en extérieur et être souvent partis en vacances à l'étranger dans des régions ensoleillées, ce qui peut expliquer les forts taux d'incidence observés. Toutefois, pour étudier le rôle de l'exposition au rayonnement UV solaire dans certaines pathologies, il faut aussi prendre en compte l'utilisation d'appareils de bronzage artificiel qui pourrait être un facteur de confusion. Pour une estimation plus précise de l'exposition, il faudrait la pondérer par la fraction de peau exposée, par exemple en incluant dans le questionnaire des questions sur les habitudes vestimentaires, au quotidien et pendant les vacances.

Les réponses au questionnaire pouvant être biaisées par les limites de mémoire des participants, ou par leur manque d'objectivité, par exemple par le temps passé en extérieur, il peut aussi être envisagé d'observer directement les comportements des individus. Cela peut se faire par exemple en dénombrant les individus portant des moyens de protection (lunette solaire, T-shirt).

Perspectives

La validation d'un outil de l'exposition à l'UV va permettre de nombreux développements. Dans les pathologies comme le lymphôme ou les pathologies oculaires, cet outil va permettre de déterminer l'éventuel rôle de l'exposition à l'UV.

La plupart des études cas-témoins utilisent des variables d'approximation telles que le temps passé en extérieur (Bodiwala et coll. 2004 ; Boffetta et coll. 2008 ; English et coll. 1998), le nombre de vacances au soleil (Chang et coll. 2009 ; Smedby et coll. 2005) ou la volonté de bronzer (Hartge et coll. 2006). Une étude de cohorte de travailleurs suédois salariés en 1960 et / ou 1970 classifiés selon la latitude de leur résidence a analysé le risque de chaque groupe dans différentes maladies (Lymphome non Hodgkinien, leucémie lymphoïde chronique, mélanomes malins et cancers cutanés spino-cellulaires). Cependant, ces mesures ne donnent pas une estimation quantitative de l'exposition mais seulement des approximations. De plus, l'atlas a montré que l'irradiation UV n'était pas toujours corrélée à la latitude.

Pour avoir une mesure quantitative, il faut utiliser soit un réseau de radiomètres déjà existant soit des données de satellite. Les mesures au sol du réseau de radiomètres doivent exister depuis assez longtemps et couvrir une surface suffisante pour être utilisées dans une étude épidémiologique. L'utilisation de ces mesures requiert une étape d'interpolation car le nombre de radiomètres est souvent trop faible pour suivre des individus (Tatalovich et coll. 2006).

Le travail présenté dans cette thèse peut nous fournir les données d'exposition pour les huit populations, comme cela a déjà été fait en France, en Italie et en Norvège. La mise en parallèle dans une étude écologique avec les données de maladies liées à l'UV aidera à une meilleure compréhension des risques liés aux différents comportements.

Deux études menées en France, l'étude ELFE (Etude Longitudinale Française depuis l'Enfance) et l'étude ALIENOR (Antioxydants, Lipides Essentiels, Nutrition et maladies OculaiRes), ont sollicité notre participation et intégré un axe de recherche sur l'exposition au rayonnement UV solaire.

L'étude ELFE vise à suivre le développement d'une cohorte de 20 000 enfants de la naissance à 20 ans (Vandentorren, 2009). L'exposition physique dans l'enfance est un des nombreux axes de recherche de ce projet. Elle sera enregistrée pour les enfants participants à l'étude. Grâce à nos résultats, nous pourrions estimer l'exposition des enfants au rayonnement ultraviolet solaire de même que l'influence de l'exposition in-utero aux UV sur le développement des naevi de l'enfant. Une association physiopathologique pourrait être établie avec la migration des cellules mélanocytaires lors de l'embryogenèse.

Une étude pilote a été réalisée en 2010 sur l'exposition de la mère en vacances pendant la grossesse en utilisant les données de l'atlas. Les doses d'irradiation ne correspondront pas à la valeur des jours exacts de vacances car les bases de données de l'atlas contiennent les moyennes mensuelles. De plus, les valeurs n'étant pas disponibles pour l'année 2010 et l'évolution temporelle de l'irradiation étant assez stable, les valeurs de la période 2003-2007 ont été utilisées. Un questionnaire a été remis aux futures mères pour connaître leur(s) lieu(x) de vacances. Il renseigne sur le lieu, le mois et la durée des vacances ce qui permet d'estimer l'exposition à l'UV à partir des données de l'atlas. La dose UV utilisée pour chaque jour de vacances est la dose mensuelle moyenne correspondant au mois de vacances pour le pixel de

l'atlas le plus proche du lieu de vacances. L'écart maximal entre le pixel de l'atlas et le lieu de vacances est 2,8 km.

Sur l'ensemble de la cohorte, l'exposition de la mère pendant sa grossesse sera reconstruite pendant les vacances mais aussi sur son lieu de résidence. L'exposition des enfants sera calculée à partir des résultats des questionnaires à un an et à deux ans. La période et le lieu de vacances seront renseignés ce qui permettra de connaître la dose reçue par jour pour les deux premières années de vie de l'enfant de la même manière que ce qui a été fait dans le projet EuroSun. La mesure d'exposition aux UV sera affinée avec les habitudes de vie de l'enfant recueillies à partir de questionnaires.

Cette mesure sera également un outil pour suivre l'impact réel de campagne de prévention afin d'adapter les recommandations et actions.

Le projet ALIENOR est géré par l'ISPED (Institut de Santé Publique, d'Epidémiologie et de Développement) à Bordeaux. Il vise en premier lieu à évaluer le risque de maladies oculaires lié à des facteurs nutritionnels (Delcourt, 2010). Cependant, l'exposition à l'ultraviolet solaire est un facteur environnemental important pour le risque de cataractes et elle a été incluse dans l'étude. En utilisant la même méthode que pour le projet ELFE, la donnée d'irradiation UV la plus proche géographiquement des capitales d'un certain nombre de pays et de toutes les préfectures de France ont été extraites des données de l'atlas afin d'estimer la dose d'irradiation UV reçue par les participants.

Notre outil est basé sur des données de satellite qui couvrent presque toute l'Europe et qui sont disponibles depuis 1985. L'atlas peut être suffisant pour fournir des données d'irradiation dans le passé pour des pays où il n'y a pas eu d'enquête pour la période 1988-2007, comme cela est fait pour les projets ELFE et ALIENOR. Il peut aussi permettre d'estimer les données postérieures à 2007. En effet, comme aucune tendance temporelle significative n'a été détectée, ce qui a aussi été le cas dans le projet COST qui est basé sur des données de 1957 à 2002, nous pouvons supposer que l'irradiation restera stable dans les années qui suivent. Cependant, il faut noter que les données de l'atlas sont des moyennes mensuelles de données journalières et non les doses jour par jour.

Le suivi de l'exposition individuelle au rayonnement UV de manière quantitative et de manière similaire pour les différents pays de l'Europe permettra d'étudier les différentes expositions dans les différentes populations et entre les groupes d'individus dans chaque population. Cela servira à mieux comprendre et à quantifier les relations dose-réponse entre les différents types d'exposition et les maladies liées à ces expositions et d'identifier les comportements à risque pour chaque maladie.

6. Références

Adami, J. et coll., 1999. Sunlight and non Hodgkin's lymphoma: a population based cohort study in Sweden. *International Journal of Cancer*, 80(5), 641-645. Available at: [http://doi.wiley.com/10.1002/\(SICI\)1097-0215\(19990301\)80:53.3.CO;2-Q](http://doi.wiley.com/10.1002/(SICI)1097-0215(19990301)80:53.3.CO;2-Q).

Agar, N.S. et coll., 2004. The basal layer in human squamous tumors harbors more UVA than UVB fingerprint mutations: a role for UVA in human skin carcinogenesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(14), 4954-9. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=387355&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Akslen, L. & Hartveit, F., 1988. Cutaneous Melanoma - Season or Invasion? *Acta Dermato-Venereologica*, 68, 390-394.

Akslen, L., 1995. Seasonal Variation in Melanoma Progress. *Journal of the National Cancer institute*, 87(13), 1025-1026.

Albert, M. & Ostheimer, K., 2003. The evolution of current medical and popular attitudes toward ultraviolet light exposure: part 2. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 48(6), 909-18. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12789184>.

Albert, M. & Ostheimer, K., 2003. The evolution of current medical and popular attitudes toward ultraviolet light exposure: part 3. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 49(6), 1096-1106. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0190962203000215>.

Albert, M.R. & Ostheimer, K.G., 2002. The evolution of current medical and popular attitudes toward ultraviolet light exposure: part 1. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 47(6), 930-7. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12451381>.

Armstrong, B.K., 1994. Stratospheric ozone and health. *International journal of epidemiology*, 23(5), 873-85. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7860166>.

Aucamp, P.J., Björn, L.O. & Lucas, R.M., 2011. Questions and answers about the environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2010 assessment. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 10, 301.

Auerbach, H., 1961. Geographic variation in incidence of skin cancer in the United States. *Public health reports*, 76(4), 345-8. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1929697&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Autier, P. & Doré, J., 1998. Influence of sun exposures during childhood and during adulthood on melanoma risk. *International Journal of Cancer*, 77(4), 533-537. Available at: [http://doi.wiley.com/10.1002/\(SICI\)1097-0215\(19980812\)77:43.0.CO;2-7](http://doi.wiley.com/10.1002/(SICI)1097-0215(19980812)77:43.0.CO;2-7).

Autier, P. et coll., 2000. Sunscreen use and intentional exposure to ultraviolet A and B radiation: a double blind randomized trial using personal dosimeters. *British journal of cancer*, 83(9), 1243-8. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2363574&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Autier, P., Boniol, M. & Doré, J., 2011. Is sunscreen use for melanoma prevention valid for all sun exposure circumstances. *Journal of Clinical Oncology*, 29.

Autier, P., Boniol, M. & Doré, J., 2007. Sunscreen use and increased duration of intentional sun exposure: still a burning issue. *International journal of cancer. Journal international du cancer*, 121(1), 1-5. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17415716>.

Bachari, N., Benabadji, N. & Razagui, A., 2001. Estimation et Cartographie des Différentes Composantes du Rayonnement Solaire au Sol à Partir des Images Météosat. *Revue des énergies renouvelables*, 4, 35-47. Available at: http://www.cder.edu.dz/download/Art4-1_4.pdf.

Bakos, L. et coll., 2010. Is season important for the diagnosis of cutaneous melanoma in southern Brazil? A 10-year hospital-based study. *International journal of dermatology*, 49(1), 44-7. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20465610>.

Balch, C.M. et coll., 2009. Final version of 2009 AJCC melanoma staging and classification. *Journal of clinical oncology : official journal of the American Society of Clinical Oncology*, 27(36), 6199-206. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2793035&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Blanc, P. et coll., 2011. The HelioClim Project: Surface Solar Irradiance Data for Climate Applications. *Remote Sensing*, 3(2), 343-361. Available at: <http://www.mdpi.com/2072-4292/3/2/343/>.

Blum, A., Ellwanger, U. & Garbe, C., 1997. Seasonal patterns in the diagnosis of cutaneous malignant melanoma: analysis of the data of the German Central Malignant Melanoma Registry. *British Journal Dermatology*, 136(6), 968-969. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20667841>.

Bodiwala, D. et coll., 2004. Polymorphisms in the vitamin D receptor gene, ultraviolet radiation, and susceptibility to prostate cancer. *Environmental and molecular mutagenesis*, 43(2), 121-7. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14991752>.

Boffetta, P. et coll., 2008. Exposure to ultraviolet radiation and risk of malignant lymphoma and multiple myeloma--a multicentre European case-control study. *International journal of epidemiology*, 37(5), 1080-94. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18511490>.

Boldeman, C. et coll., 1997. Sunbed use in Swedish urban adolescents related to behavioral characteristics. *Preventive medicine*, 26(1), 114-9. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9010906>.

Boldeman, C., Dal, H. & Wester, U., 2004. Swedish pre-school children's UVR exposure - a comparison between two outdoor environments. *Photodermatology, Photoimmunology and Photomedicine*, 20(1), 2-8. Available at: <http://www.blackwell-synergy.com/links/doi/10.1111/j.1600-0781.2004.00069.x>.

Boldemann, C. et coll., 2006. Impact of preschool environment upon children's physical activity and sun exposure. *Preventive medicine*, 42(4), 301-8. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16448688>.

Boniol, M. et coll., 2005. Seasonal variation in the occurrence of cutaneous melanoma in Europe: influence of latitude. An analysis using the EURO CARE group of registries. *European journal of cancer (Oxford, England : 1990)*, 41(1), 126-32. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15617997>.

Boniol, M., Armstrong, B.K. & Doré, J., 2006. Variation in incidence and fatality of melanoma by season of diagnosis in new South Wales, Australia. *Cancer epidemiology, biomarkers & prevention : a publication of the American Association for Cancer Research, cosponsored by the American Society of Preventive Oncology*, 15(3), 524-6. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16537711>.

Braun, M.M. et coll., 1994. Seasonal variation in frequency of diagnosis of cutaneous malignant melanoma. *Melanoma Research*, 4, 235-241.

Brenner, M. & Hearing, V.J., 2008. The protective role of melanin against UV damage in human skin. *Photochemistry and photobiology*, 84(3), 539-49. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2671032&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Bränström, R., Kristjansson, S. & Ullén, H., 2006. Risk perception, optimistic bias, and readiness to change sun related behaviour. *European journal of public health*, 16(5), 492-7. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16195355>.

Bérces, a. et coll., 1999. Biological UV dosimeters in the assessment of the biological hazard from environmental radiation. *Journal of photochemistry and photobiology. B, Biology*, 53(1-3), 36-43. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10672527>.

Börner, F.U., Schütz, H. & Wiedemann, P., 2009. A population-based survey on tanning bed use in Germany. *BMC dermatology*, 9, 6. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2724378&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Cafri, G. et coll., 2009. Investigating the role of appearance-based factors in predicting sunbathing and tanning salon use. *Journal of behavioral medicine*, 32(6), 532-44. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19653089>.

Chaillol, I. et coll., 2011. Seasonality of cutaneous melanoma diagnosis in Northern Ireland with a review. *Melanoma research*, 21(2), 144-51. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21317819>.

Chang, Y. et coll., 2009. Sun exposure and melanoma risk at different latitudes: a pooled analysis of 5700 cases and 7216 controls. *International journal of epidemiology*, 38(3), 814-30. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2689397&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Cockburn, M., Hamilton, A. & Mack, T., 2001. Recall bias in self-reported melanoma risk factors. *American journal of epidemiology*, 153(10), 1021-6. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11384959>.

Costin, G. & Hearing, V.J., 2007. Human skin pigmentation: melanocytes modulate skin color in response to stress. *The FASEB journal : official publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology*, 21(4), 976-94. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17242160>.

Cristofolini, M. et coll., 1993. Analysis of the cost-effectiveness ratio of the health campaign for the early diagnosis of cutaneous melanoma in Trentino, Italy. *Cancer*, 71(2), 370-4. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8422631>.

Crocetti, E. et coll., 2009. Strong seasonality in the diagnosis of skin melanoma in Italy: the Italian Network of Cancer Registries (AIRTUM) study. *Tumori*, 95(6), 665-8. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20210226>.

Cros, S. et coll., 2004. HelioClim : a long-term database on solar radiation for Europe and Africa. In *Sophia*. Freiburg, Germany: PSE GmbH. Available at: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00465572/>.

Curado, M.P. et coll., 2007. *Cancer Incidence in Five Continents, Vol. IX* IARC Scien. IARC, Lyon.

Dadvand, P. et coll., 2011. Measurement errors in the assessment of exposure to solar ultraviolet radiation and its impact on risk estimates in epidemiological studies. *Photochemical & photobiological sciences : Official journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiology*, 10-16. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21465050>.

Davis, K.J. et coll., 2002. Summer Sunburn and Sun Exposure Among US Youths Ages 11 to 18: National Prevalence and Associated Factors. *Pediatrics*, 110(1), 27-35. Available at: <http://pediatrics.aappublications.org/cgi/doi/10.1542/peds.110.1.27>.

De Vries, E. et coll., 2004. Lower incidence rates but thicker melanomas in Eastern Europe before 1992: a comparison with Western Europe. *European journal of cancer*, 40(7), 1045-52. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15093581>.

Diffey, B., 2008. A behavioral model for estimating population exposure to solar ultraviolet radiation. *Photochemistry and photobiology*, 84(2), 371-5. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18208455>.

Diffey, B.L., 2002. Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods (San Diego, Calif.)*, 28(1), 4-13. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12231182>.

Downs, N. & Parisi, A., 2007. Three dimensional visualisation of human facial exposure to solar ultraviolet. *Photochemical & photobiological sciences : Official journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiology*, 6(1), 90-8. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17200743>.

Downs, N.J. & Parisi, A.V., 2009. Ultraviolet exposures in different playground settings: a cohort study of measurements performed in a school population. *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine*, 25(4), 196-201. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19614898>.

Dunne, R., 1999. Polysulphone film as an underwater dosimeter for solar ultraviolet-B radiation in tropical latitudes. *Marine Ecology Progress Series*, 189, 53-63. Available at: <http://www.int-res.com/abstracts/meps/v189/p53-63/>.

El Ghissassi, F. et coll., 2009. A review of human carcinogens—Part D: radiation. *The Lancet Oncology*, 10(8), 751-752. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S147020450970213X>.

El Naggar, S. et coll., 1995. An electronic personal UV-B-dosimeter1. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 31(1-2), 83-86. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/1011134495072162>.

Elwood, J.M. & Lee, J.A., 1974. Trends in mortality from primary tumours of skin in Canada. *Canadian Medical Association journal*, 110(8), 913-5. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1947411&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

English, D.R. et coll., 1997. Sunlight and cancer. *Cancer causes & control : CCC*, 8(3), 271-83. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9498892>.

English, D.R., Armstrong, B.K. & Krickler, a., 1998. Reproducibility of reported measurements of sun exposure in a case-control study. *Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevention*, 7(10), 857-63. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9796629>.

Espinar, B. et coll., 2009. Analysis of the influences of uncertainties in input variables on the outcomes of the Heliosat-2 method. *Solar Energy*, 83(9), 1731-1741. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X09001376>.

Ezzedine, K. et coll., 2008. Artificial and natural ultraviolet radiation exposure: beliefs and behaviour of 7200 French adults. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology : JEADV*, 22(2), 186-94. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18211412>.

Ferlay J, Shin HR, Bray F, Forman D, Mathers C and Parkin DM. GLOBOCAN 2008 v1.2, Cancer Incidence and Mortality Worldwide: IARC CancerBase No. 10 [Internet]. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer; 2010. Available from: <http://globocan.iarc.fr>, accessed on 23/01/2012.

Fekete, a. et coll., 1998. Assessment of the effects of various UV sources on inactivation and photoproduct induction in phage T7 dosimeter. *Photochemistry and photobiology*, 68(4), 527-31. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9796435>.

Fisher, M.S., 1977. Systemic Alteration Induced in Mice by Ultraviolet Light Irradiation and Its Relationship to Ultraviolet Carcinogenesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 74(4), 1688-1692. Available at: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.74.4.1688>.

Furusawa, Y. et coll., 1998. Determination of erythema-effective solar radiation in Japan and Germany with a spore monolayer film optimized for the detection of UVB and UVA--results of a field campaign. *Applied microbiology and biotechnology*, 50(5), 597-603. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9866178>.

Gallagher, R.P. & Lee, T.K., 2006. Adverse effects of ultraviolet radiation: a brief review. *Progress in biophysics and molecular biology*, 92(1), 119-31. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16580054>.

Gandini, S. et coll., 2005. Meta-analysis of risk factors for cutaneous melanoma: II. Sun exposure. *European journal of cancer (Oxford, England : 1990)*, 41(1), 45-60. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15617990>.

Garland, C., 2003. Epidemiologic Evidence for Different Roles of Ultraviolet A and B Radiation in Melanoma Mortality Rates. *Annals of Epidemiology*, 13(6), 395-404. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1047279702004611>.

Gies, P. & Wright, J., 2003. Measured solar ultraviolet radiation exposures of outdoor workers in Queensland in the building and construction industry. *Photochemistry and photobiology*, 78(4), 342-8. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14626661>.

Goulart, J.M. & Wang, S.Q., 2010. Knowledge, motivation, and behavior patterns of the general public towards sun protection. *Photochemical & photobiological sciences : Official journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiology*, 9(4), 432-8. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20354635>.

Grainger, R.G., Basher, R.E. & McKenzie, R.L., 1993. UV-B Robertson-Berger meter characterization and field calibration. *Applied Optics*, 32(3), 343. Available at: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=ao-32-3-343>.

Grandin, L. et coll., 2008. UV radiation exposure, skin type and lymphoid malignancies: results of a French case-control study. *Cancer causes & control : CCC*, 19(3), 305-15. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2323431&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Gschwind, B. et coll., 2006. Converting a successful research project into a sustainable service : the case of the SoDa web service. *Environment*, 21, 1555-1561.

Halliday, G.M. & Rana, S., 2008. Waveband and dose dependency of sunlight-induced immunomodulation and cellular changes. *Photochemistry and photobiology*, 84(1), 35-46. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18173699>.

Hartge, P. et coll., 2006. Ultraviolet radiation, dietary vitamin D, and risk of non-Hodgkin lymphoma (United States). *Cancer causes & control : CCC*, 17(8), 1045-52. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16933055>.

Hinds, M.W., Lee, J. & Kolonel, L.N., 1981. Seasonal patterns of skin melanoma incidence in Hawaii. *American journal of public health*, 71(5), 496-9. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1619721&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Holman, C. & Armstrong, B., 1984. Cutaneous malignant melanoma and indicators of total accumulated exposure to the sun: an analysis separating histogenetic types. *Journal of the National Cancer Institute*, 73(1), 75-82.

Holman, C. & Armstrong, B.K., 1981. RE: "Skin melanoma and seasonal patterns." *American Journal of Epidemiology*, 113, 202. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20673103>.

Holman, C., Armstrong, B.K. & Heenan, P., 1983. The role of sunlight in the etiology of melanoma and other skin cancers. *Journal of the National Cancer Institute*, 71(4), 651-656.

Horneck, G., 1995. Quantification of the biological effectiveness of environmental UV radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 31(1-2), 43-49. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/1011134495071673>.

Hughes, A.M. et coll., 2004. Sun exposure may protect against non-Hodgkin lymphoma: a case-control study. *International journal of cancer. Journal international du cancer*, 112(5), 865-71. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15386383>.

Héry, C. et coll., 2010. A melanoma epidemic in Iceland: possible influence of sunbed use. *American journal of epidemiology*, 172(7), 762-7. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20813801>.

Jayasekara, H. et coll., 2009. Season of diagnosis has no effect on survival from malignant melanoma. *International journal of cancer. Journal international du cancer*, 125(2), 488-90. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19391134>.

John, E.M. et coll., 2004. Residential sunlight exposure is associated with a decreased risk of prostate cancer. *The Journal of steroid biochemistry and molecular biology*, 89-90(1-5), 549-52. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15225836>.

John, E.M. et coll., 2007. Sun exposure, vitamin D receptor gene polymorphisms, and breast cancer risk in a multiethnic population. *American journal of epidemiology*, 166(12), 1409-19. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17934201>.

John, E.M., Koo, J. & Schwartz, G.G., 2007. Sun exposure and prostate cancer risk: evidence for a protective effect of early-life exposure. *Cancer epidemiology, biomarkers & prevention*, 16(6), 1283-6. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17548698>.

Johnsen, B. & Moan, J., 1991. The temperature sensitivity of the Robertson-Berger sunburn meter, model 500. *Journal of photochemistry and photobiology. B, Biology*, 11(3-4), 277-84. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1816363>.

Katsambas, A.D. & Nicolaidou, E., 1996. Cutaneous Malignant Melanoma and Sun Exposure. *Archives of Dermatology*, 132.

Kennedy, C. et coll., 2003. The influence of painful sunburns and lifetime sun exposure on the risk of actinic keratoses, seborrheic warts, melanocytic nevi, atypical nevi, and skin cancer. *The Journal of investigative dermatology*, 120(6), 1087-93. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12787139>.

Khlat, M. et coll., 1992. Mortality from melanoma in migrants to Australia: variation by age at arrival and duration of stay. *American Journal of Epidemiology*, 135, 1103-1113.

Kimlin, M.G., 2008. Geographic location and vitamin D synthesis. *Molecular aspects of medicine*, 29(6), 453-61. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18786559>.

Knuschke, P. & Barth, J., 1996. Biologically weighted personal UV dosimetry. *Journal of photochemistry and photobiology. B, Biology*, 36(1), 77-83. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8988614>.

Kricker, A. & Armstrong, B., 2006. Does sunlight have a beneficial influence on certain cancers? *Progress in biophysics and molecular biology*, 92(1), 132-9. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16595142>.

Kricker, A. et coll., 1993. *Health, solar UV radiation and environmental change*, Lyon: International Agency for Research on Cancer.

Kricker, A., Vajdic, C.M. & Armstrong, B.K., 2005. Reliability and validity of a telephone questionnaire for estimating lifetime personal sun exposure in epidemiologic studies. *Cancer epidemiology, biomarkers & prevention*, 14(10), 2427-32. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16214927>.

Kripke, M. & Fisher, M., 1976. Immunologic parameters of ultraviolet carcinogenesis. *Journal of the National Cancer Institute*, 57(1), 211-5.

Kudish, A. et coll., 2005. Inter-comparison of the solar UVB, UVA and global radiation clearness and UV indices for Beer Sheva and Neve Zohar (Dead Sea), Israel. *Energy*, 30(9), 1623-1641. Available at:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544204002257>.

Køster, B. et coll., 2009. Sunbed use in the Danish population in 2007: a cross-sectional study. *Preventive medicine*, 48(3), 288-90. Available at:
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19154755>.

Lambe, M., Blomqvist, P. & Bellocco, R., 2003. Seasonal variation in the diagnosis of cancer: a study based on national cancer registration in Sweden. *British journal of cancer*, 88, 1358-60. Available at:
<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2741038&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Lea, C.S. et coll., 2007. Ambient UVB and melanoma risk in the United States: a case-control analysis. *Annals of epidemiology*, 17(6), 447-53. Available at:
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17395487>.

Lebert, M., Schuster, M. & Häder, D.P., 2002. The European Light Dosimeter Network: four years of measurements. *Journal of photochemistry and photobiology. B, Biology*, 66(1), 81-7. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11849987>.

Lim, H.W. et coll., 2001. American Academy of Dermatology Consensus Conference on UVA protection of sunscreens: Summary and recommendations. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 44(3), 505-508. Available at:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0190962201458762>.

Luscombe, C.J. et coll., 2001. Exposure to ultraviolet radiation : association with susceptibility and age at presentation with prostate cancer. *The Lancet*, 358, 641-642.

Ma, F. et coll., 2007. Skin cancer awareness and sun protection behaviors in white Hispanic and white non-Hispanic high school students in Miami, Florida. *Archives of dermatology*, 143(8), 983-8. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17709656>.

MacKie, R.M. & Hole, D., 1992. Audit of public education campaign to encourage earlier detection of malignant melanoma. *BMJ (Clinical research ed.)*, 304(6833), 1012-5. Available at:
<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1881745&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

MacKie, R.M., 2006. Long-term health risk to the skin of ultraviolet radiation. *Progress in biophysics and molecular biology*, 92(1), 92-6. Available at:
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16616325>.

Mack, T.M. & Floderus, B., 1991. Malignant melanoma risk by nativity, place of residence at diagnosis, and age at migration. *Cancer Causes and Control*, 2, 401-411.

Marks, R., 1999. Two decades of the public health approach to skin cancer control in Australia: why, how and where are we now? *The Australasian journal of dermatology*, 40(1), 1-5. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10098281>.

Martin, J.M. et coll., 2009. Changes in skin tanning attitudes. Fashion articles and advertisements in the early 20th century. *American journal of public health*, 99(12), 2140-6. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19846688>.

Martínez-Lozano, J.a. et coll., 2002. UV index experimental values during the years 2000 and 2001 from the Spanish broadband UV-B radiometric network. *Photochemistry and photobiology*, 76(2), 181-7. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12194215>.

Matsumura, Y. & Ananthaswamy, H.N., 2004. Toxic effects of ultraviolet radiation on the skin. *Toxicology and applied pharmacology*, 195(3), 298-308. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15020192>.

McPeters, R. et coll., 1998. Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Product User's Guide. , NASA/TP-19(November).

Medhaug, I., Olseth, J.a. & Reuder, J., 2009. UV radiation and skin cancer in Norway. *Journal of photochemistry and photobiology. B, Biology*, 96(3), 232-41. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19628404>.

Meeran, S.M., Punathil, T. & Katiyar, S.K., 2008. IL-12 deficiency exacerbates inflammatory responses in UV-irradiated skin and skin tumors. *The Journal of investigative dermatology*, 128(11), 2716-27. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18509359>.

Miles, a. et coll., 2005. SunSmart? Skin cancer knowledge and preventive behaviour in a British population representative sample. *Health education research*, 20(5), 579-85. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15644381>.

Mills, A., Lee, S. & Sheridan, M., 2005. Development of a novel UV indicator and dosimeter film. *The Analyst*, 130(7), 1046-51. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15965528>.

Miyamura, Y. et coll., 2011. The deceptive nature of UVA tanning versus the modest protective effects of UVB tanning on human skin. *Pigment cell & melanoma research*, 24(1), 136-47. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3021652&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Modos, K. et coll., 1999. The role of the spectral sensitivity curve in the selection of relevant biological dosimeters for solar UV monitoring. *Journal of photochemistry and photobiology. B, Biology*, 53(1-3), 20-5. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10672525>.

Moehrle, M., Soballa, M. & Korn, M., 2003. UV exposure in cars. *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine*, 19(4), 175-81. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12925188>.

Moise, A.F., Gies, H.P. & Harrison, S.L., 1999. Estimation of the annual solar UVR exposure dose of infants and small children in tropical Queensland, Australia. *Photochemistry and photobiology*, 69(4), 457-63. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10212577>.

Molina, M.J. & Rowland, F.S., 1974. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249, 810-812.

Murphy, G.M., 2002. Photoprotection: public campaigns in Ireland and the U.K. *The British journal of dermatology*, 146 Suppl , 31-3. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11966730>.

Narayanan, D.L., Saladi, R.N. & Fox, J.L., 2010. Ultraviolet radiation and skin cancer. *International journal of dermatology*, 49(9), 978-86. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20883261>.

Nikolaou, V. et coll., 2007. Seasonal pattern of the diagnosis of cutaneous melanoma: a hospital-based study in a Mediterranean country. *International journal of dermatology*, 46, 1136-40. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17988331>.

Norval, M., 2006. The mechanisms and consequences of ultraviolet-induced immunosuppression. *Progress in biophysics and molecular biology*, 92(1), 108-18. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16564073>.

O'Riordan, D.L. et coll., 2000. Correlations between reported and measured ultraviolet radiation exposure of mothers and young children. *Photochemistry and Photobiology*, 71(1), 60-4. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10649890>.

Olson, A.L. et coll., 2008. The impact of an appearance-based educational intervention on adolescent intention to use sunscreen. *Health education research*, 23(5), 763-9. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2733802&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Padilla, R.S. et coll., 2010. Gene expression patterns of normal human skin, actinic keratosis, and squamous cell carcinoma: a spectrum of disease progression. *Archives of dermatology*, 146(3), 288-93. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20231500>.

Parisi, A.V. & Kimlin, M.G., 2004. Personal Solar UV Exposure Measurements Employing Modified Polysulphone with an Extended Dynamic Range†¶. *Photochemistry and Photobiology*, 79(5), 411. Available at: [http://www.bioone.org/perlserv/?request=get-abstract&doi=10.1562/0031-8655\(2004\)792.0.CO;2](http://www.bioone.org/perlserv/?request=get-abstract&doi=10.1562/0031-8655(2004)792.0.CO;2).

Parisi, A.V. et coll., 2000. Effect of childhood and adolescent ultraviolet exposures on cumulative exposure in South East Queensland schools. *Photodermatology Photoimmunology & Photomedicine*, 16, 19-24.

Parkin, D.M. et coll., 2002. Global cancer statistics, 2002. *CA: a cancer journal for clinicians*, 55(2), 74-108. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15761078>.

Pearse, A., Gaskell, S. & Marks, R., 1987. Epidermal changes in human skin following irradiation with either UVB or UVA. *The Journal of Investigative Dermatology*, 88, 83-87.

Perez, R., 1997. Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data. *Solar Energy*, 60(2), 89-96. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X96001624>.

Polednak, A.P., 1984. Seasonal patterns in the diagnosis of malignant melanoma of skin and eye in upstate New York. *Cancer*, 54, 2587-94. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6498751>.

Porras, B.H. & Cockerell, C.J., 1997. Cutaneous malignant melanoma: classification and clinical diagnosis. *Seminars in cutaneous medicine and surgery*, 16(2), 88-96. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9220547>.

Puskeppeleit, M. et coll., 1992. Long-Term Dosimetry of Solar UV Radiation in Antarctica with Spores of *Bacillus subtilis*. *Applied and environmental microbiology*, 58(8), 2355-9. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=195786&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Quatresooz, P., Piérard-Franchimont, C. & Piérard, G., 2008. Space-time clustering and seasonality in diagnosing skin cancers in Wallonia (south-east Belgium). *Dermatology*, 217(1), 48-51.

Quintern, L.E. et coll., 1997. Characterization and application of UV detector spore films: the sensitivity curve of a new detector system provides good similarity to the action spectrum for UV-induced erythema in human skin. *Journal of photochemistry and photobiology. B, Biology*, 37(1-2), 158-66. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9043103>.

Rabe, J.H. et coll., 2006. Photoaging: mechanisms and repair. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 55(1), 1-19. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16781287>.

Rajakumar, K. et coll., 2007. SOLAR ultraviolet radiation and vitamin D: a historical perspective. *American journal of public health*, 97(10), 1746-54. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1994178&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Randle, H., 1997. Suntanning: differences in perceptions throughout history. *Mayo clinic proceedings*, 72, 461-6.

Rigollier, C. et coll., 2002. The Operational Calibration of Images Taken in the Visible Channel of the Meteosat Series of Satellites. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(9), 1285-1293. Available at: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0426%282002%29019%3C1285%3ATOCOIT%3E2.0.CO%3B2>.

Rigollier, C., Lefèvre, M. & Wald, L., 2004. The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*, 77(2), 159-169. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X04001082>.

Rivers, J.K. & Gallagher, R.P., 1995. Public education projects in skin cancer. Experience of the Canadian Dermatology Association. *Cancer*, 75(2 Suppl), 661-6. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7804992>.

Robert, C. et coll., 1996. Cell survival and shuttle vector mutagenesis induced by ultraviolet A and ultraviolet B radiation in a human cell line. *The Society for Investigative Dermatology*, 106, 721-728.

Robinson, J.K. et coll., 1997. Summer sun exposure: knowledge, attitudes, and behaviors of Midwest adolescents. *Preventive medicine*, 26(3), 364-72. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9144761>.

Rontó, G., Gáspár, S. & Bérces, A., 1992. Phages T7 in biological UV dose measurements. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 12(3), 285-294. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/101113449285030X>.

Roush, G.C., McKay, L. & Holford, T.R., 1992. A reversal in the long-term increase in deaths attributable to malignant melanoma. *Cancer*, 69(7), 1714-20. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1551056>.

Sabburg, J., Parisi, A.V. & Wong, J., 2001. Effect of cloud on UVA and exposure to humans. *Photochemistry and photobiology*, 74(3), 412-6. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11594054>.

Samarasinghe, V., Madan, V. & Lear, J.T., 2011. Focus on Basal cell carcinoma. *Journal of skin cancer*, 2011, 328615. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2989864&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Schmalwieser, A.W. et coll., 2009. Sensitivity of erythemally effective UV irradiance and daily exposure to temporal variability in total ozone. *Photochemistry and photobiology*, 85(1), 261-71. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18764894>.

Schmid-Wendtner, M. et coll., 2004. Seasonal variations in the diagnosis of cutaneous melanoma. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 50, 679-82. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15097949>.

Schmitt, J. et coll., 2011. Occupational ultraviolet light exposure increases the risk for the development of cutaneous squamous cell carcinoma: a systematic review and meta-analysis. *The British journal of dermatology*, 164(2), 291-307. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21054335>.

Schouten, P.W., Parisi, A.V. & Turnbull, D.J., 2009. Applicability of the polyphenylene oxide film dosimeter to high UV exposures in aquatic environments. *Journal of photochemistry and photobiology. B, Biology*, 96(3), 184-92. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19596202>.

Schouten, P.W., Parisi, A.V. & Turnbull, D.J., 2007. Evaluation of a high exposure solar UV dosimeter for underwater use. *Photochemistry and photobiology*, 83(4), 931-7. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17645666>.

Schwartz, S.M., Armstrong, B.K. & Weiss, N.S., 1987. Seasonal variation in the incidence of cutaneous malignant melanoma: an analysis by body site and histologic type. *American journal of epidemiology*, 126(1), 104-11. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3591775>.

Scotto, J. & Nam, J., 1980. Skin melanoma and seasonal pattern. *American Journal of Epidemiology*, 111(3), 309-314.

Seckmeyer, G. et coll., 2008. Variability of UV irradiance in Europe. *Photochemistry and photobiology*, 84(1), 172-9. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18173717>.

Seckmeyer, G., Erb, R. & Arbold, A., 1996. Transmittance of clouds is wavelength-dependent in the UV-range. *Geophysical Research Letters*, 23(20), 2753-55.

Setlow, R.B., 1974. The wavelengths in sunlight effective in producing skin cancer: a theoretical analysis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 71(9), 3363-6. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=433772&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Severi, G. et coll., 2000. Mortality from cutaneous melanoma: evidence for contrasting trends between populations. *British journal of cancer*, 82(11), 1887-91. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2363233&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Smedby, K.E. et coll., 2005. Ultraviolet radiation exposure and risk of malignant lymphomas. *Journal of the National Cancer Institute*, 97(3), 199-209. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15687363>.

Smith, J., 1989. A solar erythemal (sunburn) radiation dosimeter. *Journal of Photochemistry*, 3.

Smith, T., 1979. Aspects of Australian Medicine The Queensland Melanoma Project-an exercise in health education. *British Medical Journal*, i(January), 253-254.

Snyder, D. & May, M., 1975. Ability of PABA to protect mammalian skin from ultraviolet light-induced skin tumors and actinic damage. *The Journal of Investigative Dermatology*, 65, 543-546.

Solomon, C.C. et coll., 2004. [Melanoma and lifetime UV radiation](#). *Cancer Causes Control*. Nov;15(9):893-902.

Swerdlow, A.J., 1985. Seasonality of presentation of cutaneous melanoma, squamous cell cancer and basal cell cancer in the Oxford Region. *British journal of cancer*, 52(6), 893-900. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1977280&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

Tarasick, D. et coll., 2003. Climatology and Trends of Surface UV Radiation. *Atmosphere-Ocean*, 41(2), 121-138. Available at: <http://cmos.metapress.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.3137/ao.410202>.

Tatalovich, Z. et coll., 2006. The objective assessment of lifetime cumulative ultraviolet exposure for determining melanoma risk. *Journal of photochemistry and photobiology. B, Biology*, 85(3), 198-204. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16963272>.

Thieden, E. et coll., 2004. UV radiation exposure related to age, sex, occupation, and sun behavior based on time-stamped personal dosimeter readings. *Archives of dermatology*, 140(2), 197-203. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14967793>.

Thieden, E., Agren, M.S. & Wulf, H.C., 2001. Solar UVR exposures of indoor workers in a Working and a Holiday Period assessed by personal dosimeters and sun exposure diaries. *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine*, 17(6), 249-55. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11722749>.

Thieden, E., Agren, M.S. & Wulf, H.C., 2000. The wrist is a reliable body site for personal dosimetry of ultraviolet radiation. *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine*, 16(2), 57-61. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10823313>.

Thiel, S., Steiner, K. & Seidlitz, H.K., 1997. Modification of global erythemally effective irradiance by clouds. *Photochemistry and photobiology*, 65(6), 969-73. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9188276>.

Turnbull D.J., Parisi, A.V., 1977, Comparison of the biologically effective UV in the shade for three action spectra. *Environmental Health*, 5 (2), 26-35.

Tyrrell, R.M., 1995. Biological dosimetry and action spectra. *Journal of photochemistry and photobiology. B, Biology*, 31(1-2), 35-41. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8568603>.

Wald, L. et coll., 2010. A preliminary assessment of the quality of surface UV irradiance derived from the HelioClim-3 total solar irradiance. , 1-4.

Wang, S.Q. et coll., 2001. Ultraviolet A and melanoma: a review. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 44(5), 837-46. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11312434>.

Whiteman, D. & Green, a., 1994. Melanoma and sunburn. *Cancer causes & control : CCC*, 5(6), 564-72. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7827244>.

Whiteman, D.C. et coll., 2003. Pathways to Cutaneous Melanoma AND. *Cancer*, 95(11).

Whiteman, D.C., Whiteman, C.A. & Green, A.C., 2001. Childhood sun exposure as a risk factor for melanoma: a systematic review of epidemiologic studies. *Cancer causes & control : CCC*, 12(1), 69-82. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11227927>.

Wright, C.Y. & Reeder, a.I., 2005. Youth solar ultraviolet radiation exposure, concurrent activities and sun-protective practices: a review. *Photochemistry and photobiology*, 81(6), 1331-42. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16354111>.

York, N.R. & Jacobe, H.T., 2010. UVA1 phototherapy: a review of mechanism and therapeutic application. *International journal of dermatology*, 49(6), 623-30. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20618465>.

Young, A.R., 2004. Tanning devices--fast track to skin cancer? *Pigment cell research / sponsored by the European Society for Pigment Cell Research and the International Pigment Cell Society*, 17(1), 2-9. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14717839>.

Young, C., 2009. Solar ultraviolet radiation and skin cancer. *Occupational medicine (Oxford, England)*, 59(2), 82-8. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19233827>.

Zelenka, a. et coll., 1999. Effective Accuracy of Satellite-Derived Hourly Irradiances. *Theoretical and Applied Climatology*, 62(3-4), 199-207. Available at: <http://www.springerlink.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.1007/s007040050084>.

7. Glossaire

Irradiation UV : irradiation au rayonnement ultraviolet.

Phototype : le phototype définit la sensibilité de la peau au soleil.

Angle zénithal solaire : angle formé par la droite Terre-soleil et la droite perpendiculaire à la surface terrestre.

BCC = Cancers basocellulaires : ce sont des cancers cutanés issus des cellules les plus primitives de la peau. Ils sont les plus fréquents des cancers humains, leur mortalité est très faible.

SCC = Cancers spinocellulaires : ce sont des cancers développés à partir des cellules différenciées qui vont donner la couche cornée superficielle de la peau.

Mélanome : tumeur maligne pigmentée issue des cellules pigmentées de la peau. Leur mortalité est de l'ordre de 20 % et leur incidence augmente régulièrement chaque année.

Angle solaire zénithal : l'angle que forme la droite qui relie la surface de la Terre au soleil avec la droite perpendiculaire à la surface de la Terre

Absorption : processus par lequel l'énergie d'un photon est prise par une autre entité. Le photon est détruit par ce processus.

Aérosol : un aérosol est un ensemble de particules en suspension dans l'atmosphère qui peut être d'origine naturelle ou dû à l'activité humaine.

Météosat : satellite géostationnaire envoyé par l'Agence Spatiale Européenne pour surveiller les phénomènes météorologiques

Albédo : L'albédo d'une surface est défini ici comme le rapport entre le rayonnement ultraviolet réfléchi par la surface sur le rayonnement incident. De manière plus générale, il s'agit du rapport entre l'énergie solaire réfléchie par la surface sur l'énergie solaire incidente.

UV-CMF : facteurs de modification des nuages dans le spectre des UV (UV-CMF : UV Cloud Modification Factor)

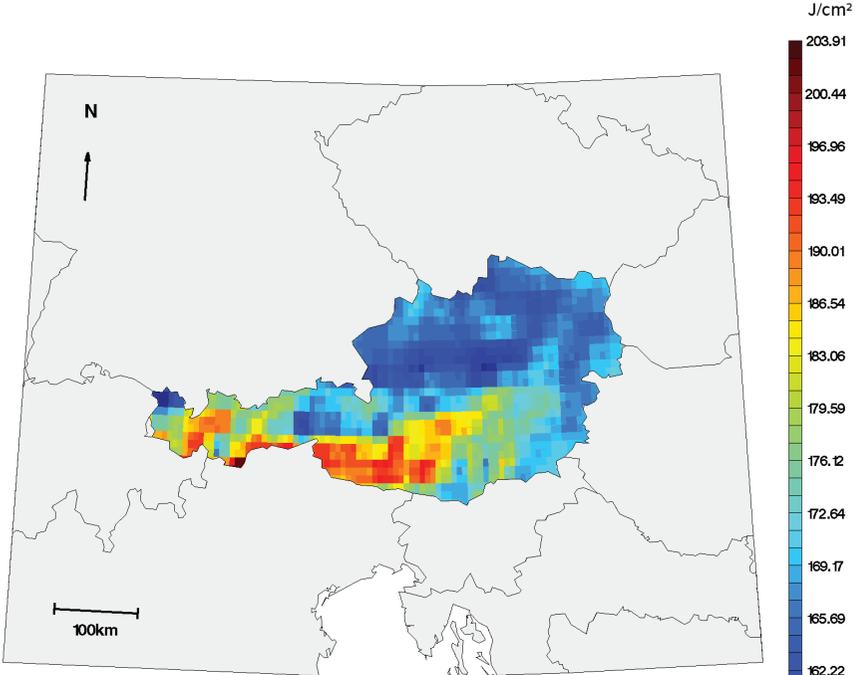
8. Annexes

7.1 Annexe A : Cartographie de l'irradiation journalière UV totale en Europe à l'échelle des pays

L'irradiation UV des pays de l'union européenne, à l'exception de Malte et de Chypre, qui contiennent peu de valeurs d'irradiation UV, sont représentés sur des cartes. Certains pays ont été regroupés pour améliorer la représentation cartographique (les pays du Benelux, les pays baltes et le Royaume-Uni avec l'Irlande). L'irradiation est représentée pour le mois de juin et le mois de novembre sur la période 2003-2007.

Les cartes sont en échelle de couleur relative pour mettre en évidence la répartition géographique de l'irradiation UV. Elles ne peuvent donc pas être comparées entre elles.

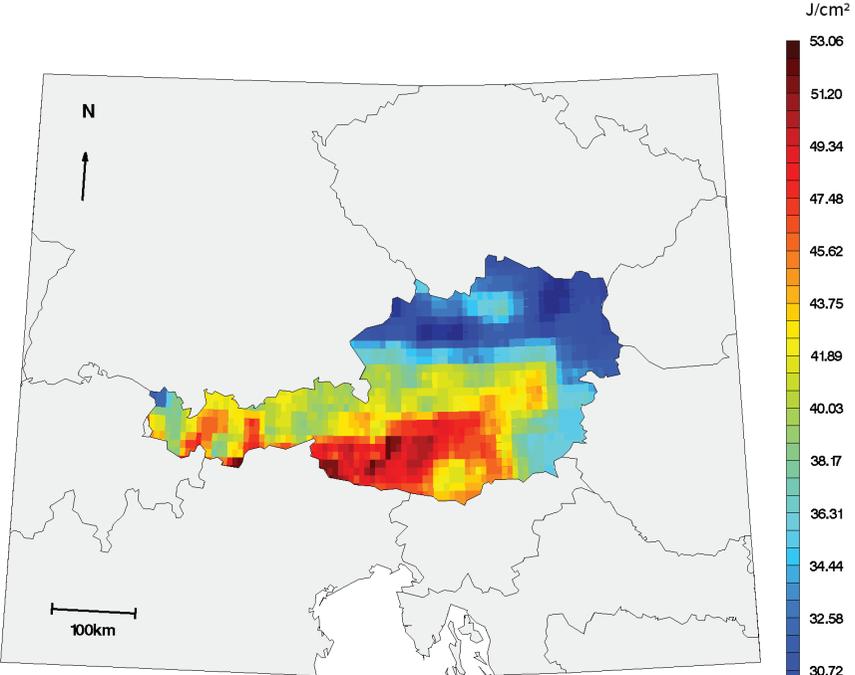
Autriche



Austria, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project

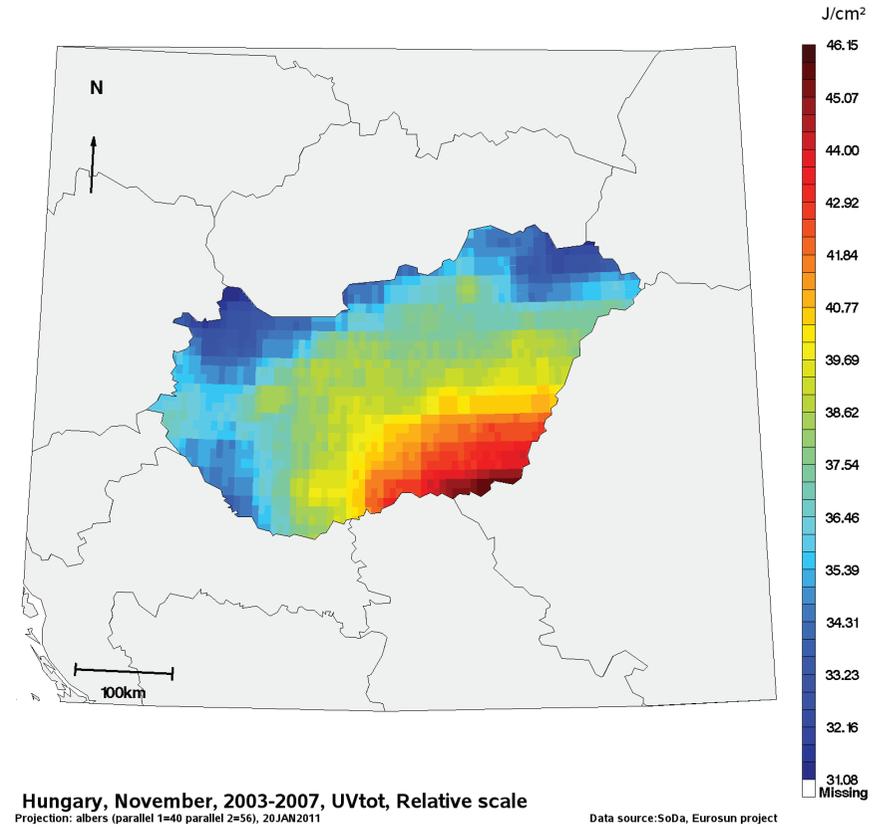
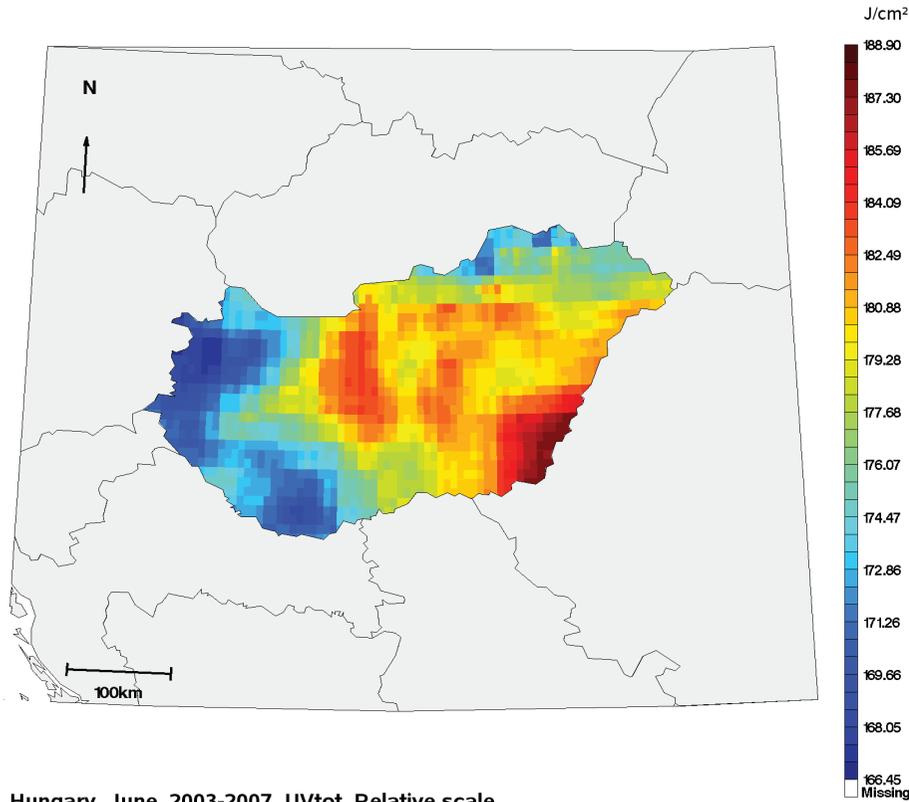


Austria, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale

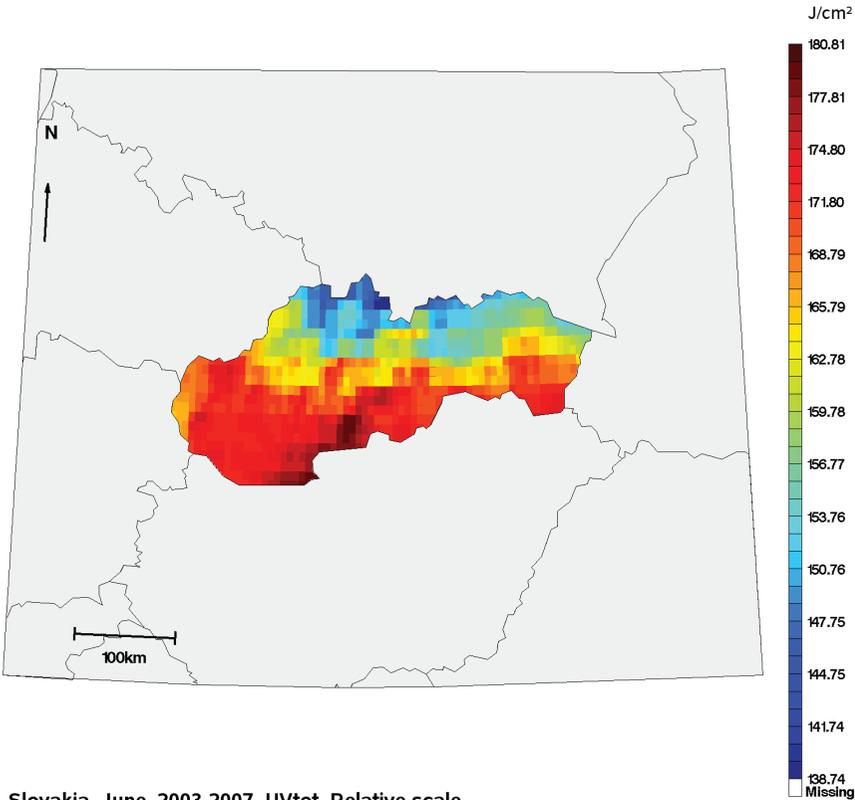
Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project

Hongrie



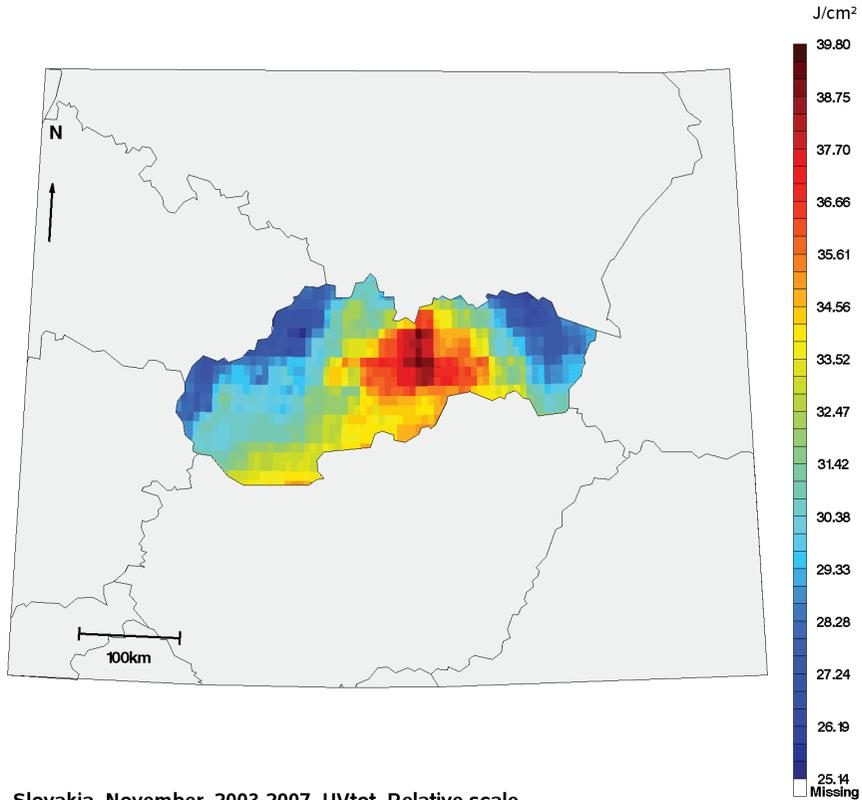
Slovaquie



Slovakia, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 18.JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project

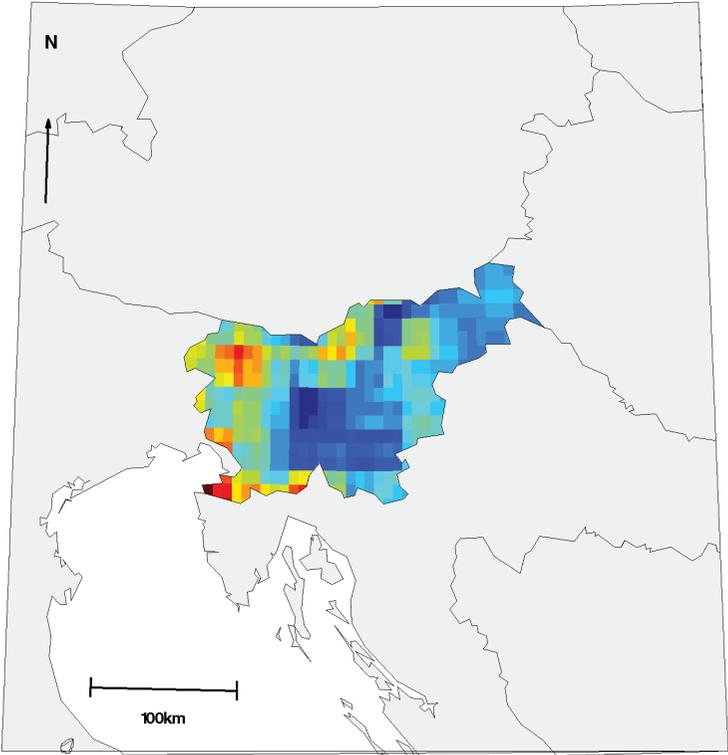


Slovakia, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 18.JAN2011

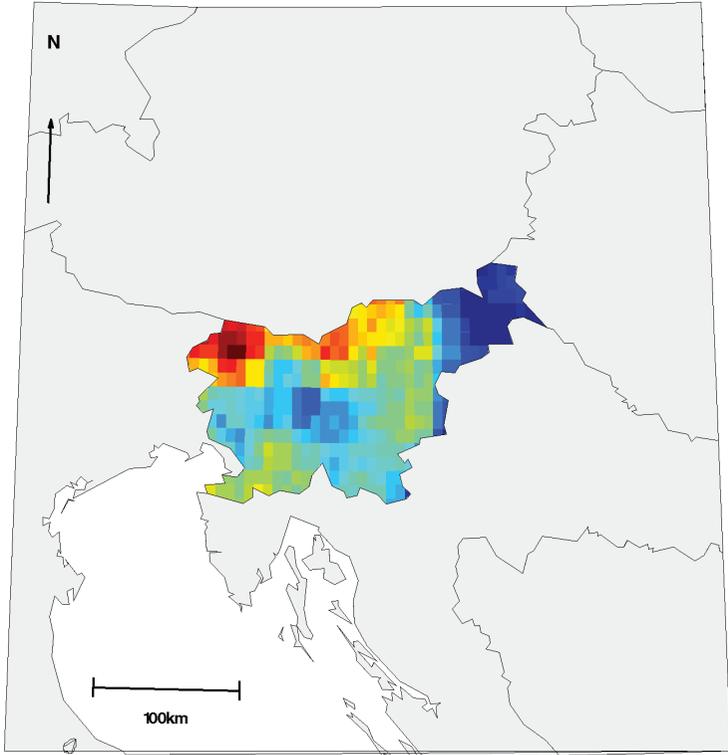
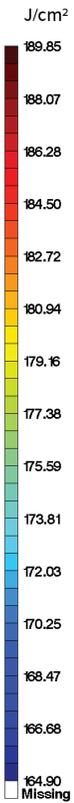
Data source: SoDa, Eurosun project

Slovénie



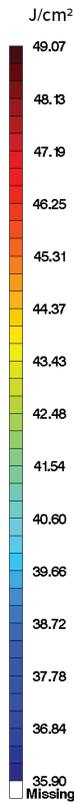
Slovenia, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale
 Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 21.JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project

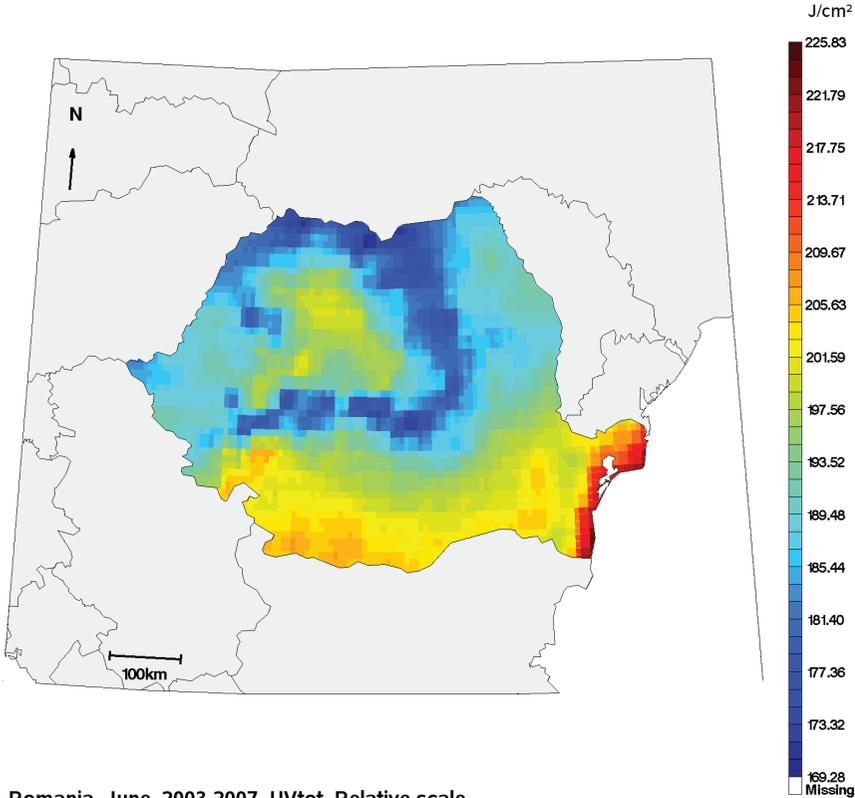


Slovenia, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale
 Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 21.JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project

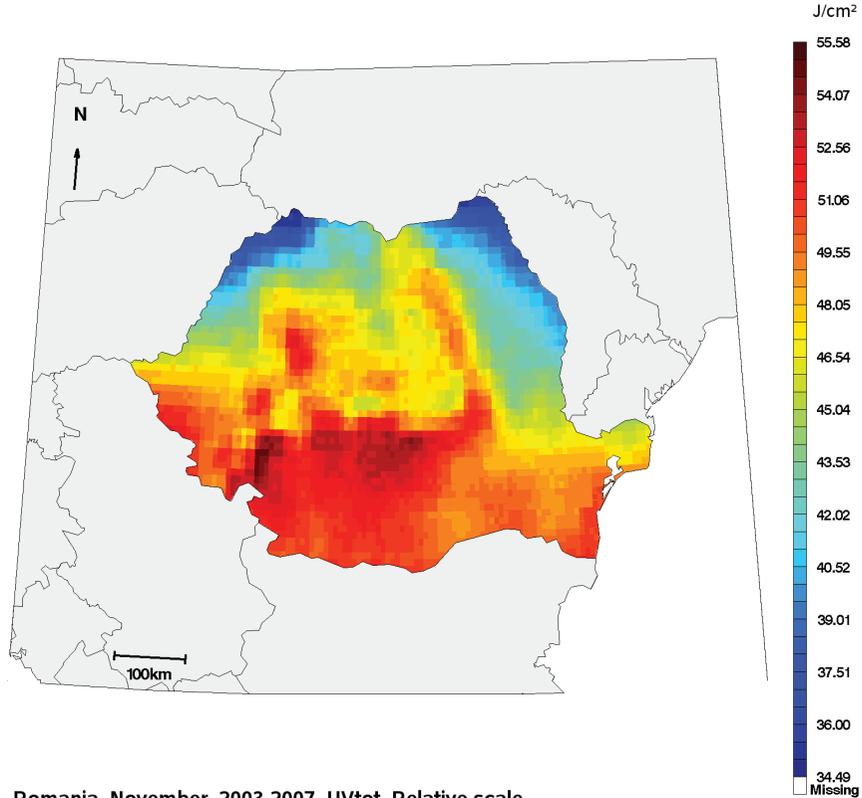


Roumanie



Romania, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale
 Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

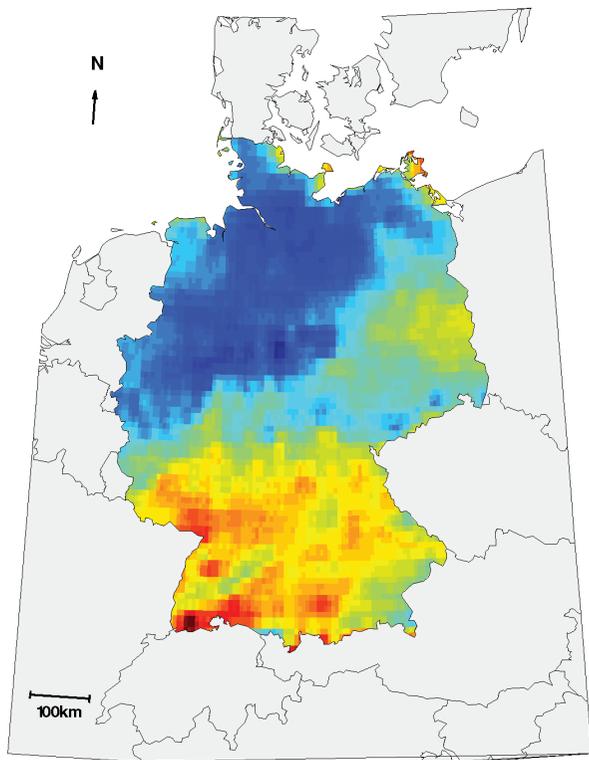
Data source: SoDa, Eurosun project



Romania, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale
 Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

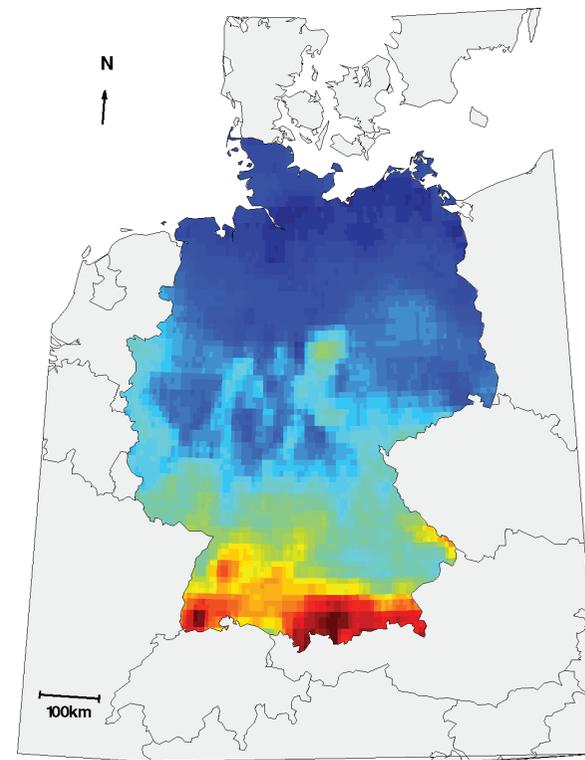
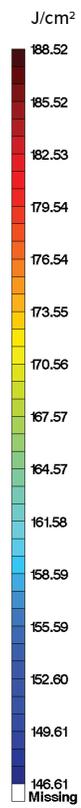
Data source: SoDa, Eurosun project

Allemagne



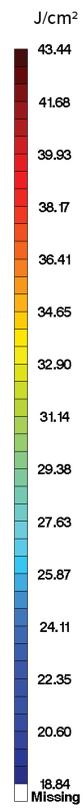
Germany, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale
Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project

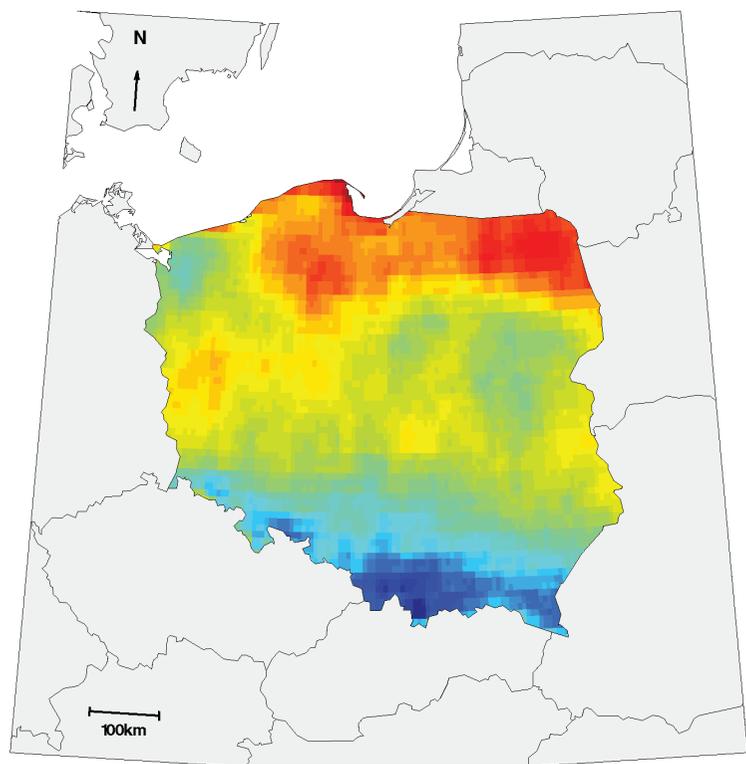


Germany, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale
Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project



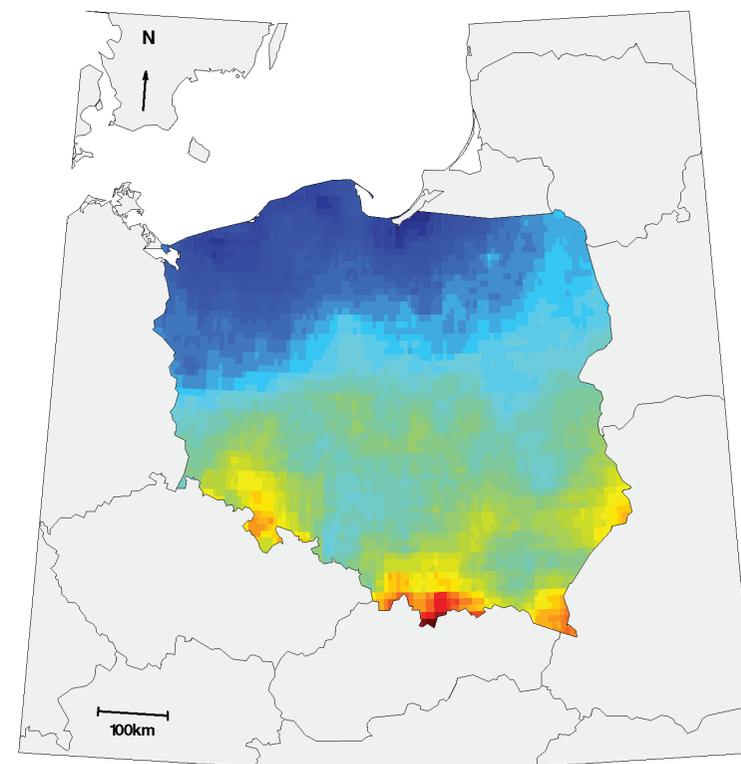
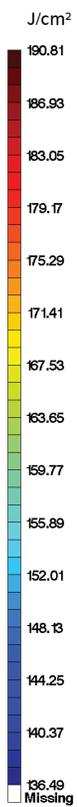
Pologne



Poland, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

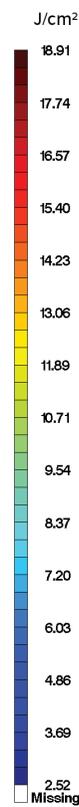
Data source: SoDa, Eurosun project



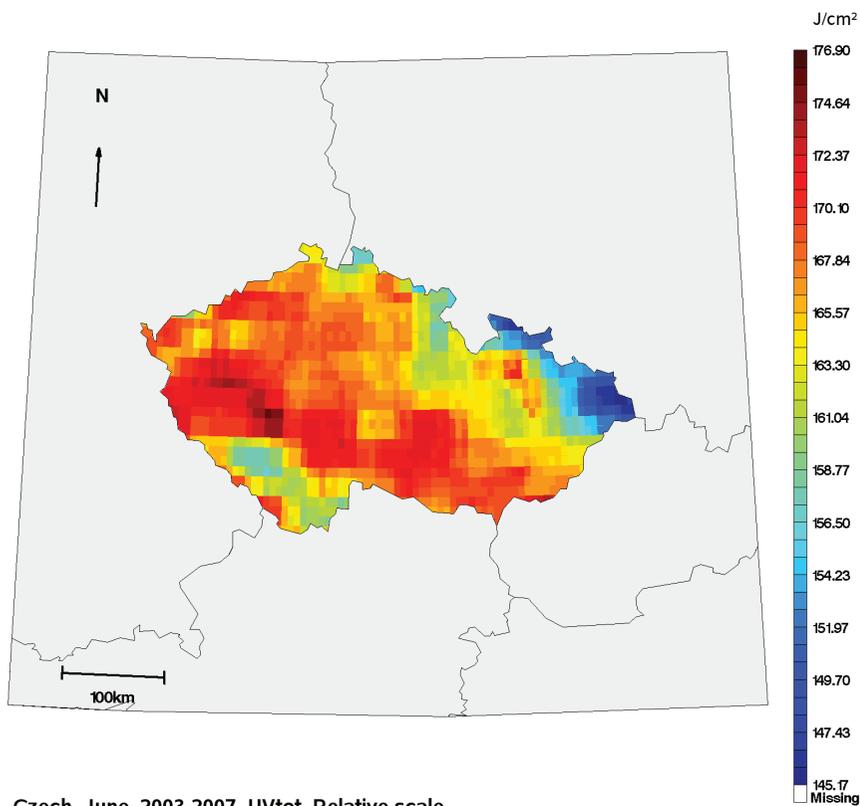
Poland, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project



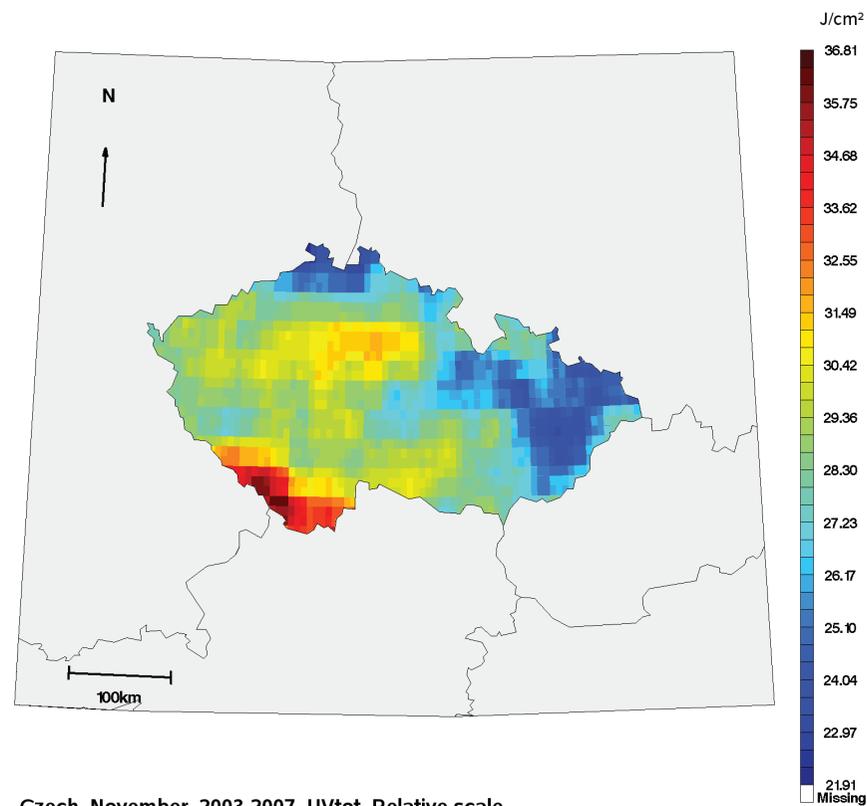
République Tchèque



Czech, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project

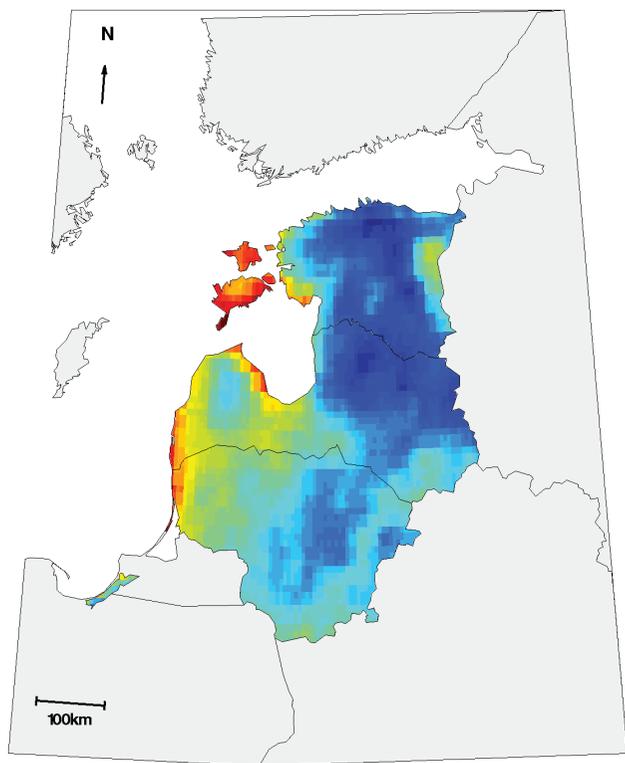


Czech, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

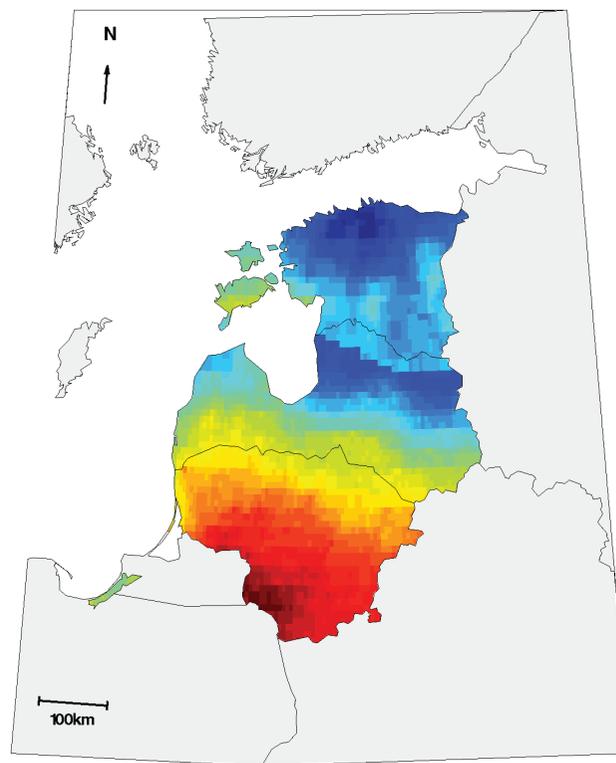
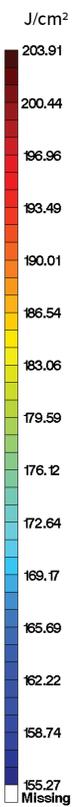
Data source: SoDa, Eurosun project

Pays baltes



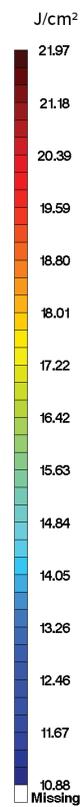
Baltic, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale
 Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 24JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project

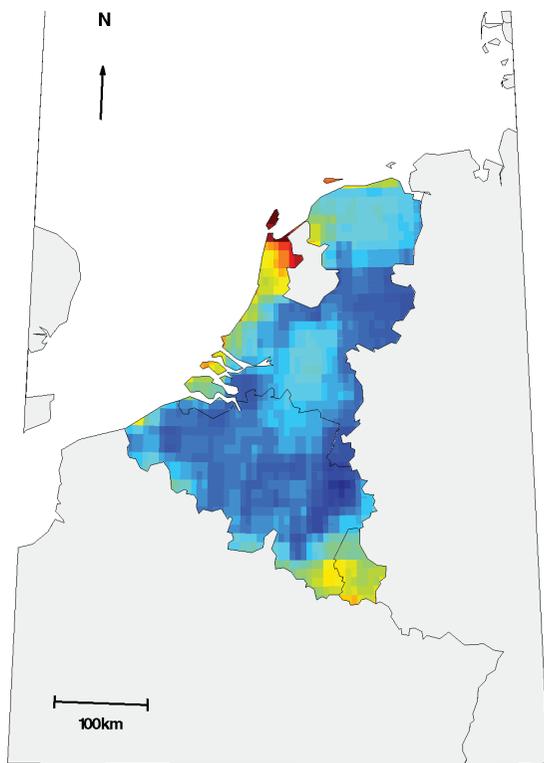


Baltic, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale
 Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 24JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project



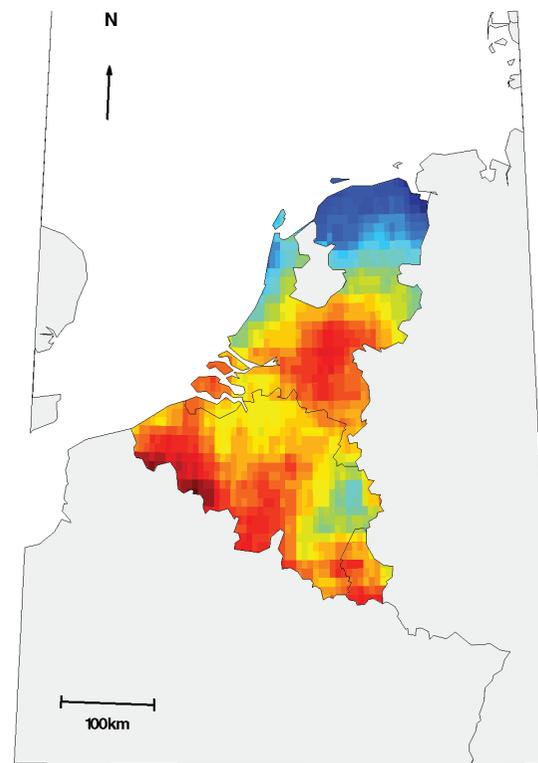
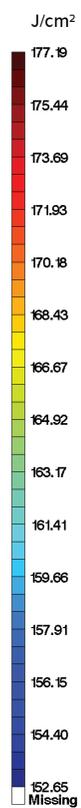
Benelux



Benelux, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 24JAN2011

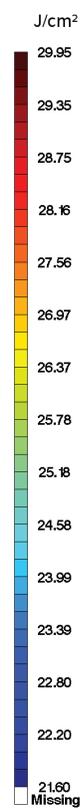
Data source: SoDa, Eurosun project



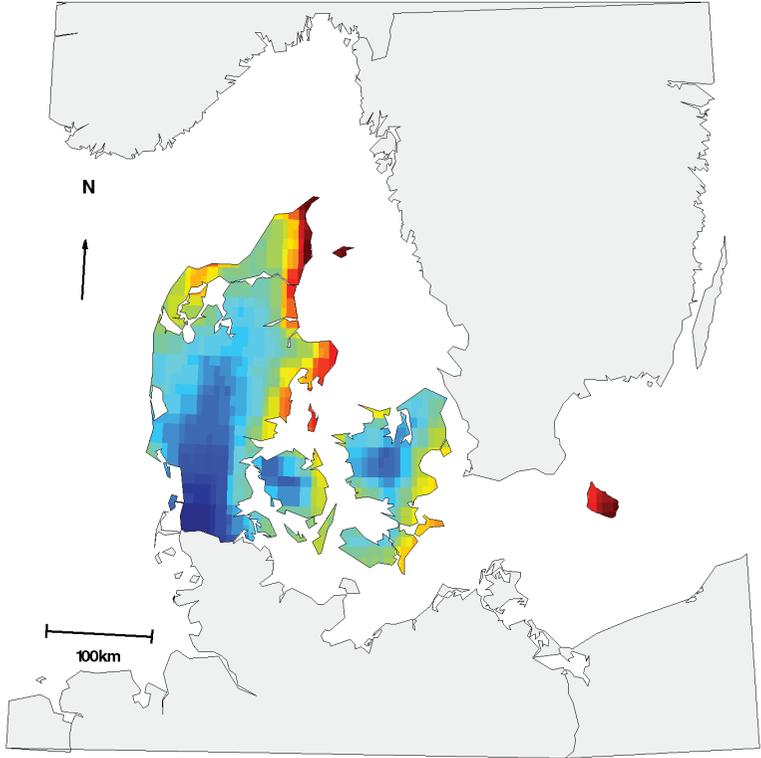
Benelux, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 24JAN2011

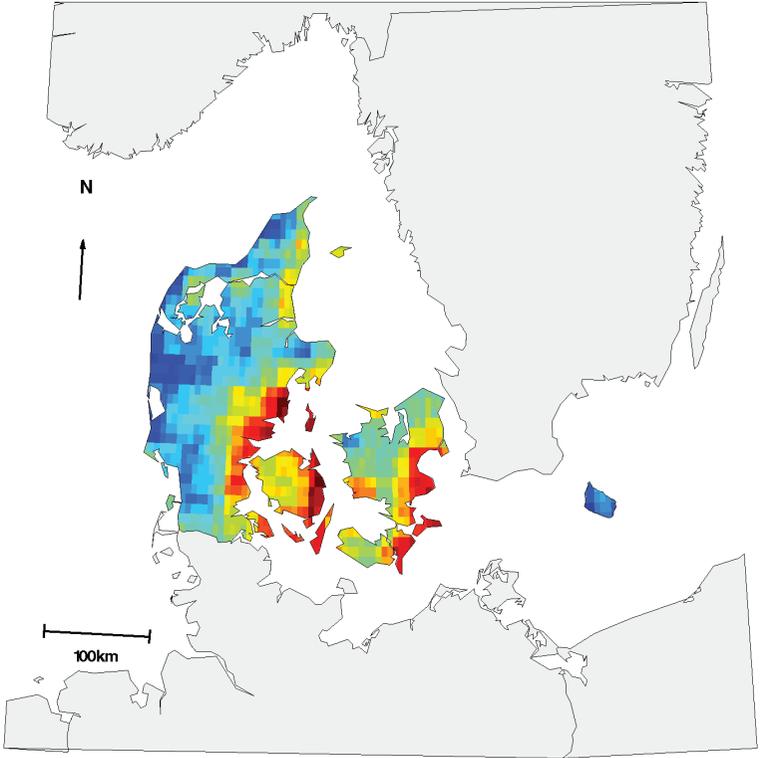
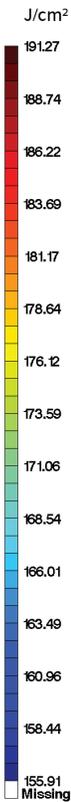
Data source: SoDa, Eurosun project



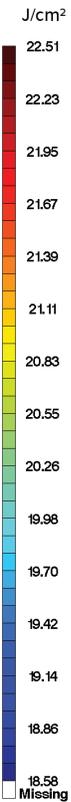
Danemark



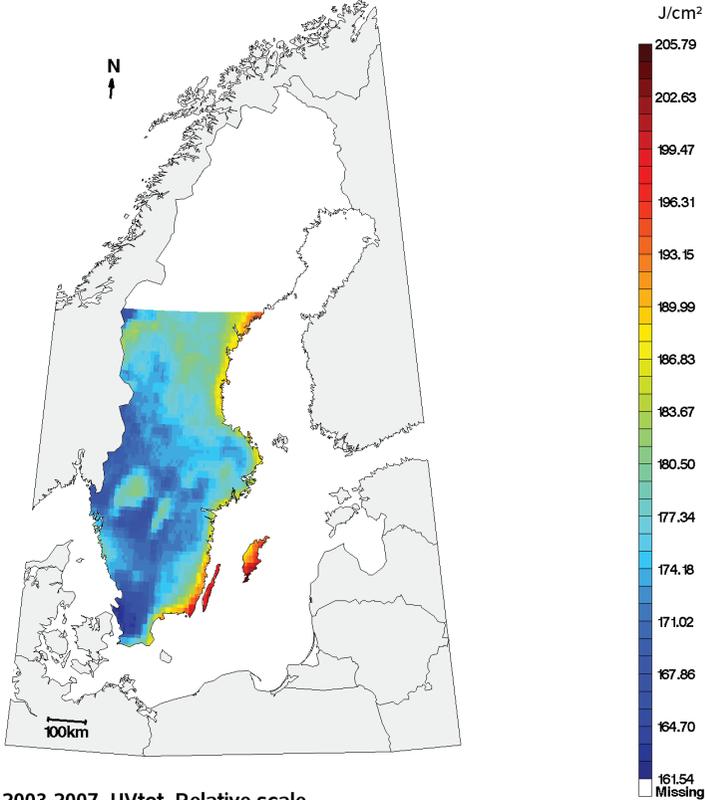
Denmark, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale
 Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011
 Data source: SoDa, Eurosun project



Denmark, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale
 Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011
 Data source: SoDa, Eurosun project



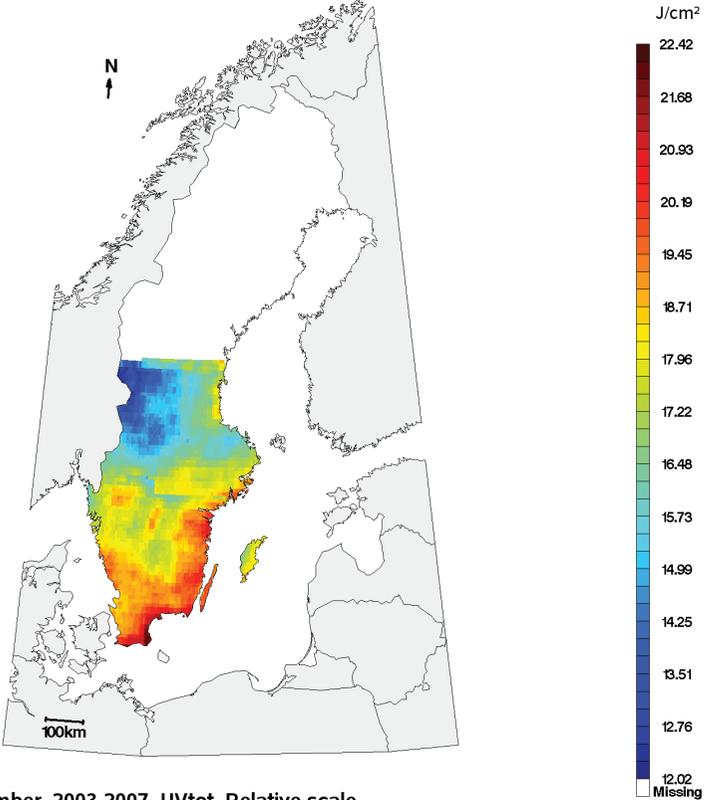
Suède



Sweden, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

Data source:SoDa, Eurosun project

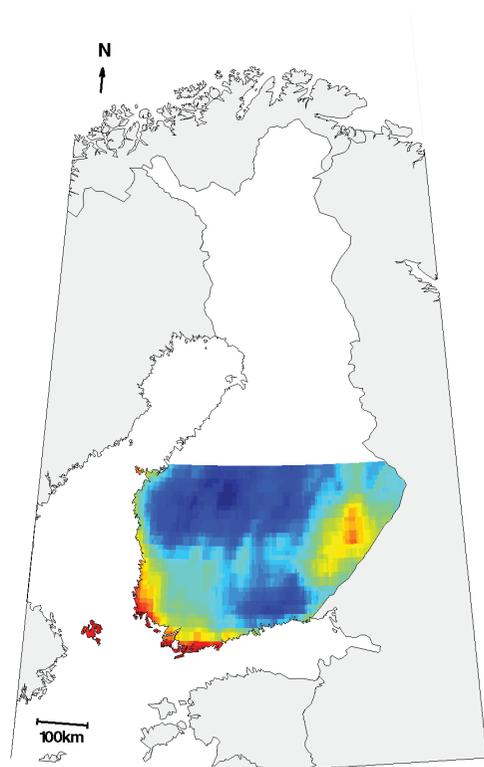


Sweden, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

Data source:SoDa, Eurosun project

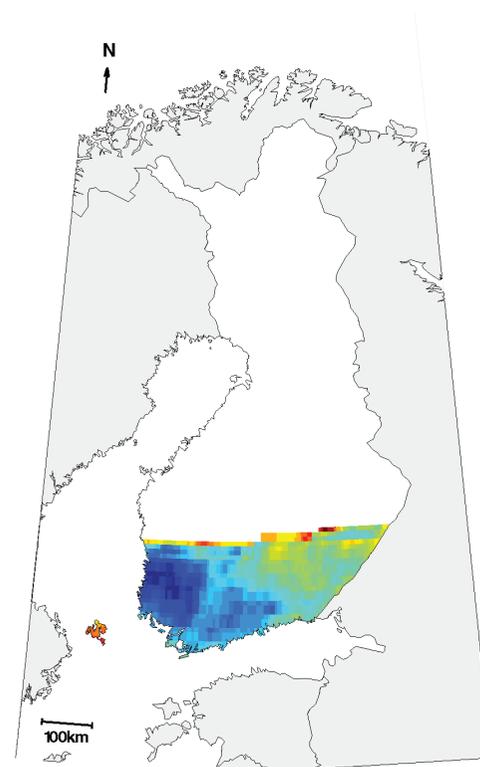
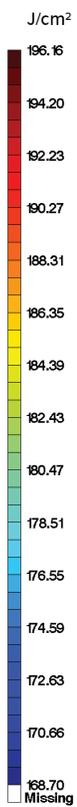
Finlande



Finland, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

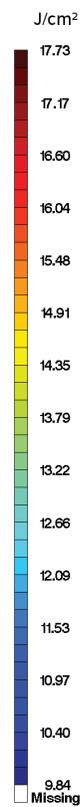
Data source: SoDa, Eurosun project



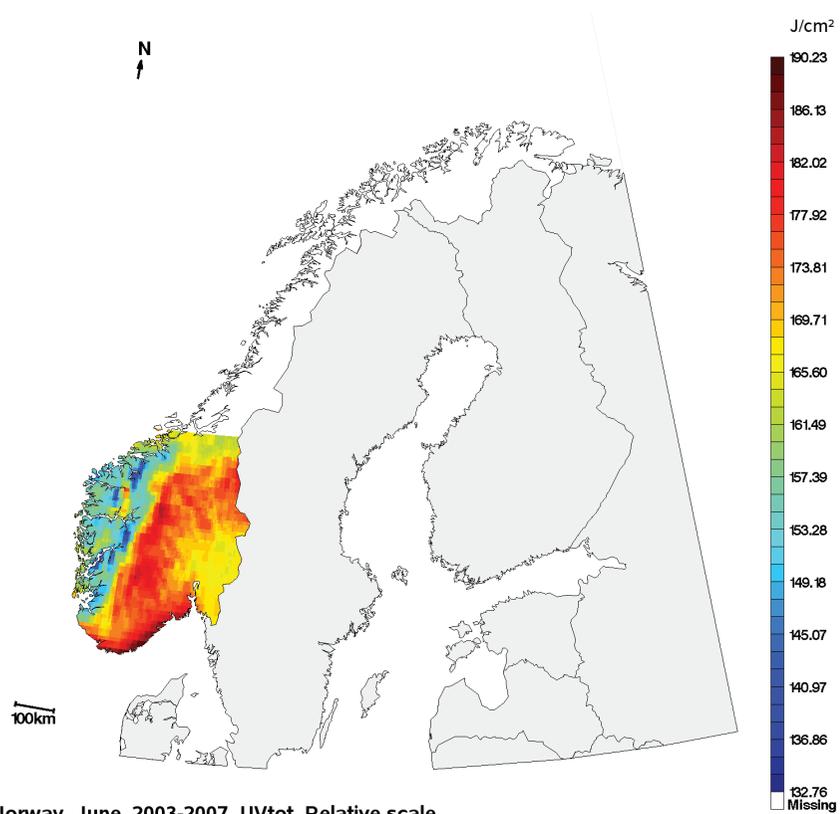
Finland, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project



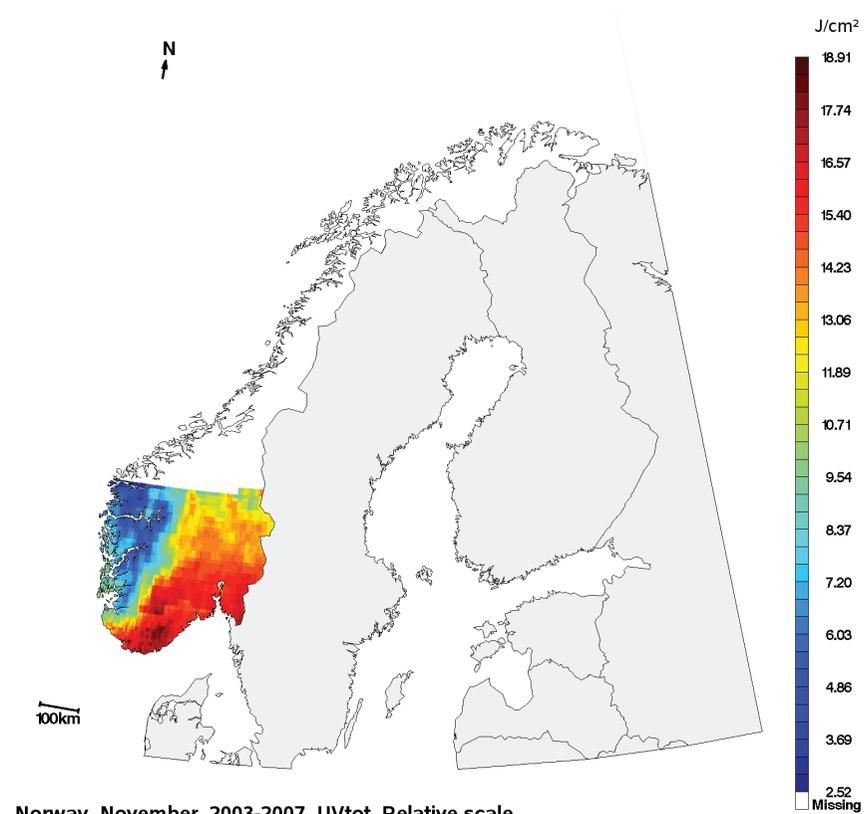
Norvège



Norway, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project

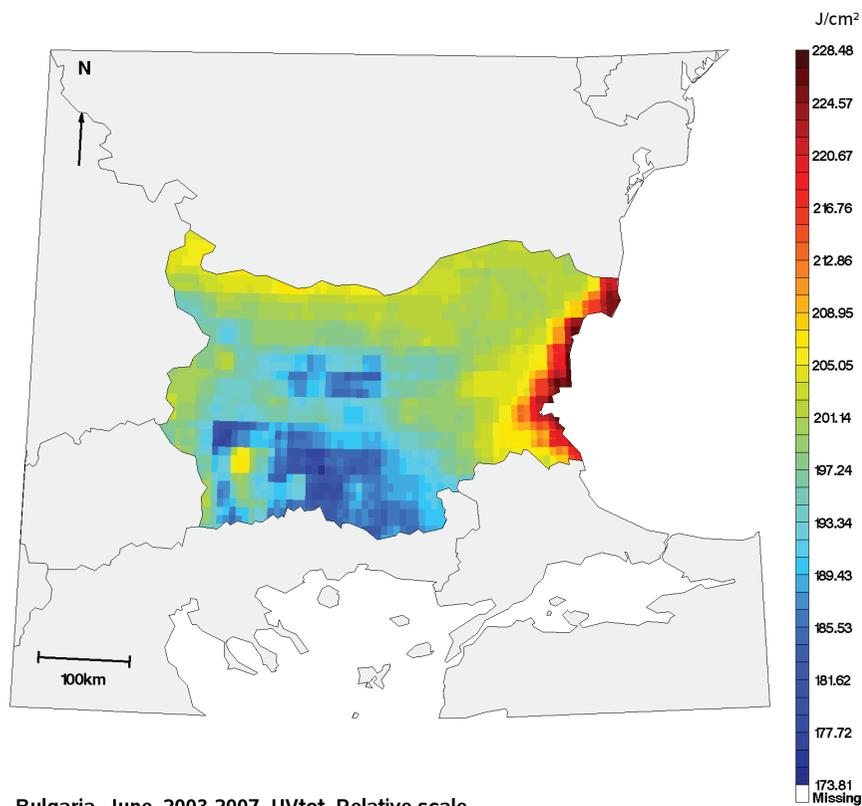


Norway, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project

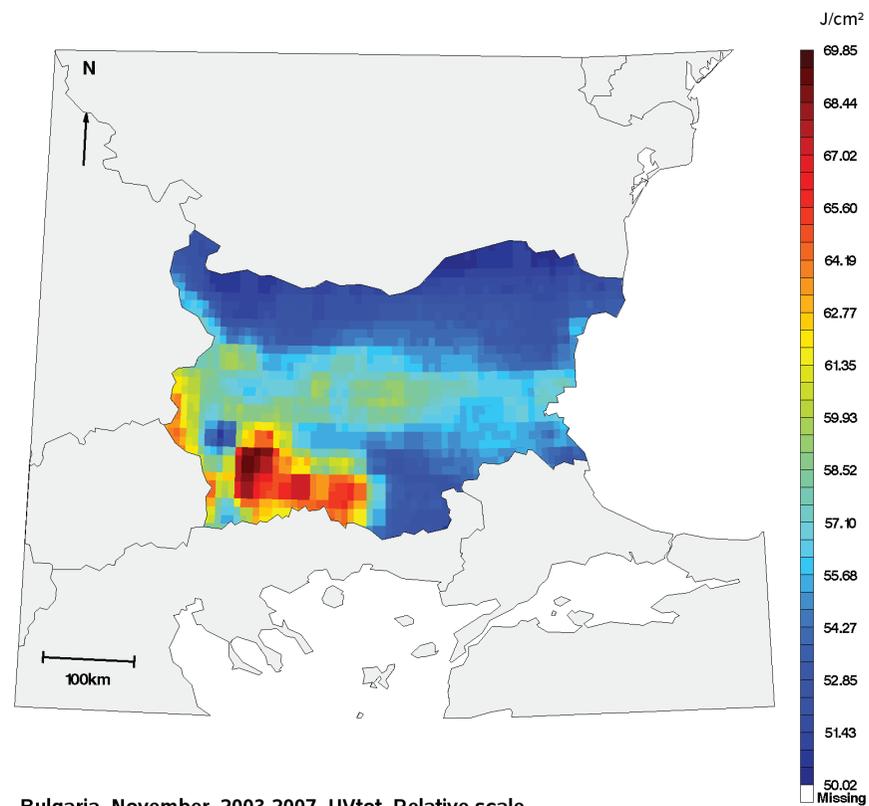
Bulgarie



Bulgaria, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project

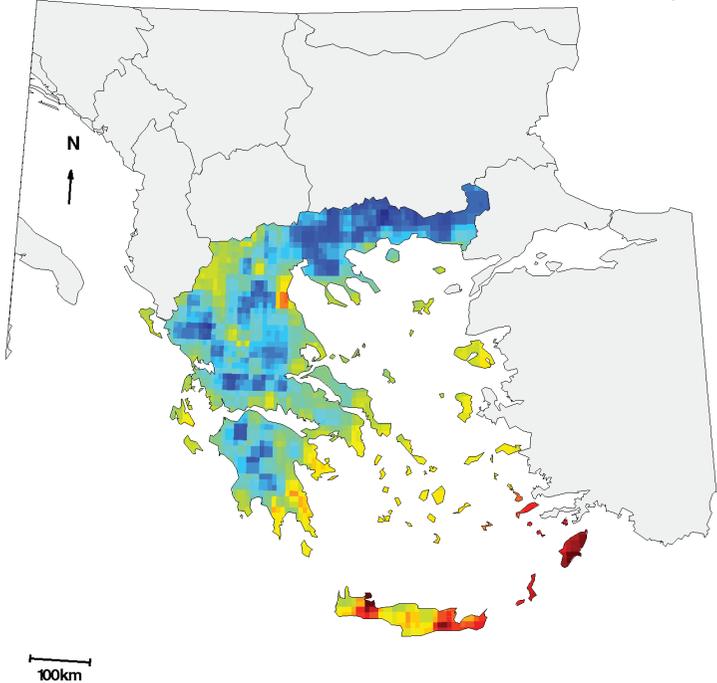


Bulgaria, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

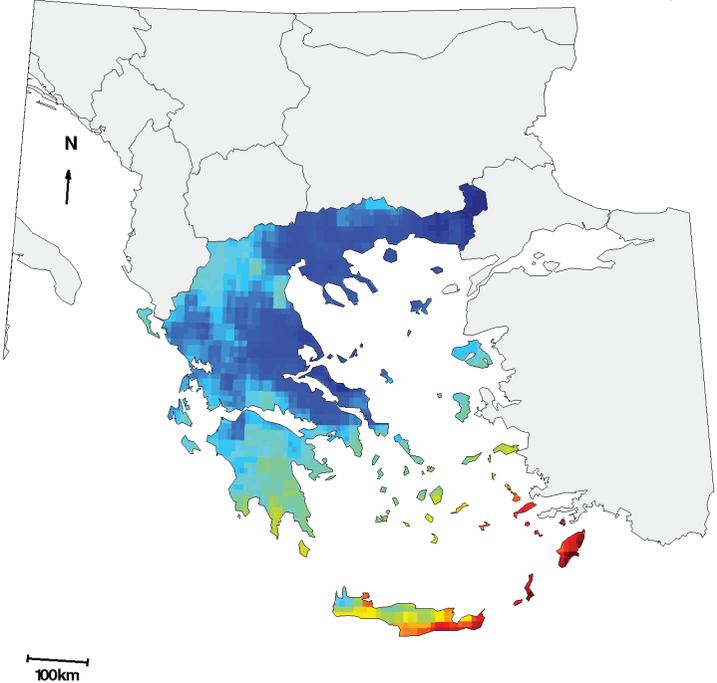
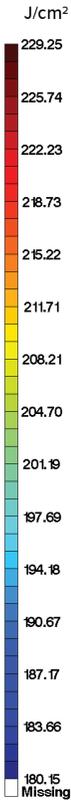
Data source: SoDa, Eurosun project

Grèce



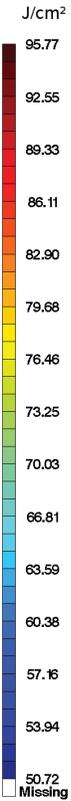
Greece, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale
 Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project

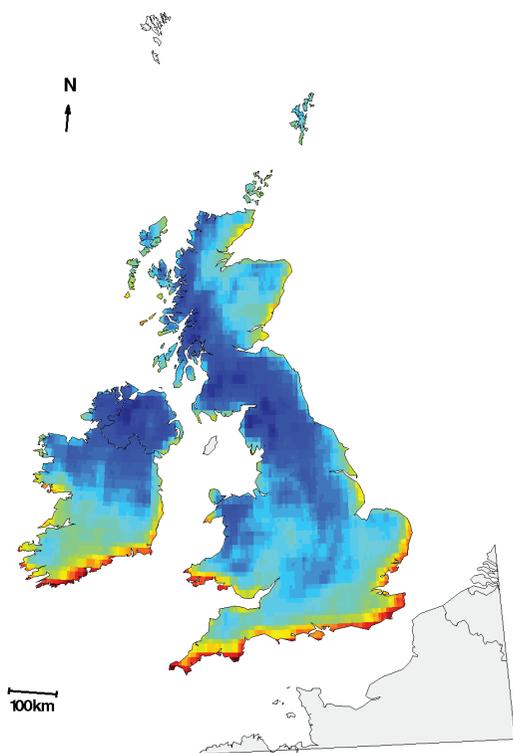


Greece, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale
 Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project

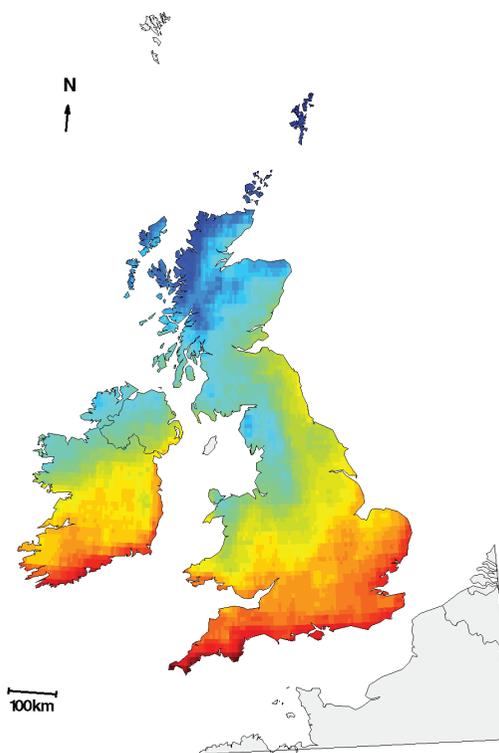
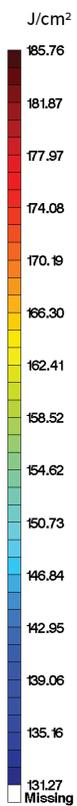


Royaume Uni et Irlande



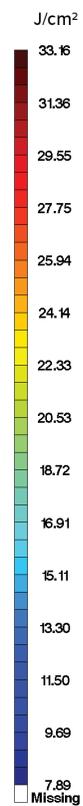
UK_Ireland, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale
Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 24JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project

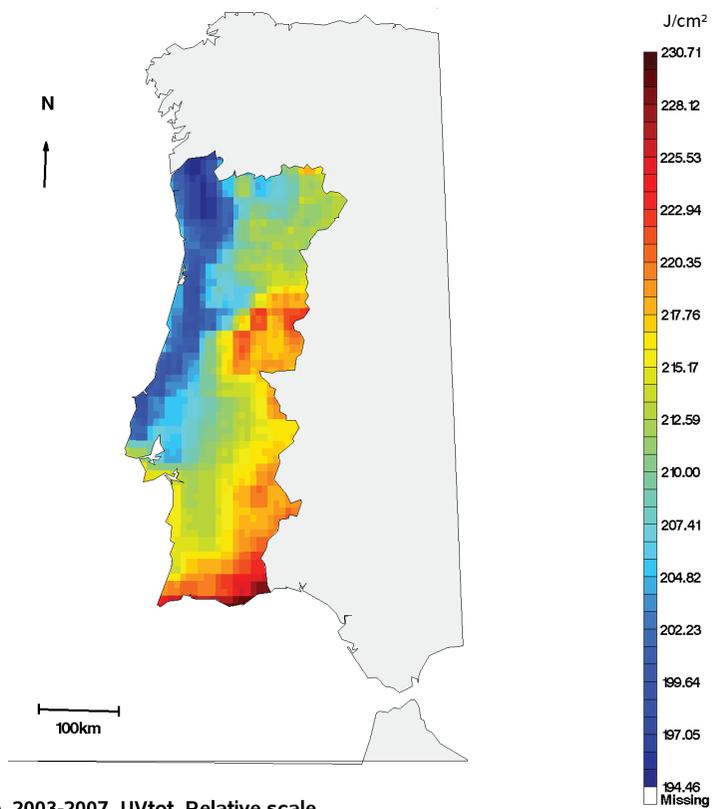


UK_Ireland, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale
Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 24JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project



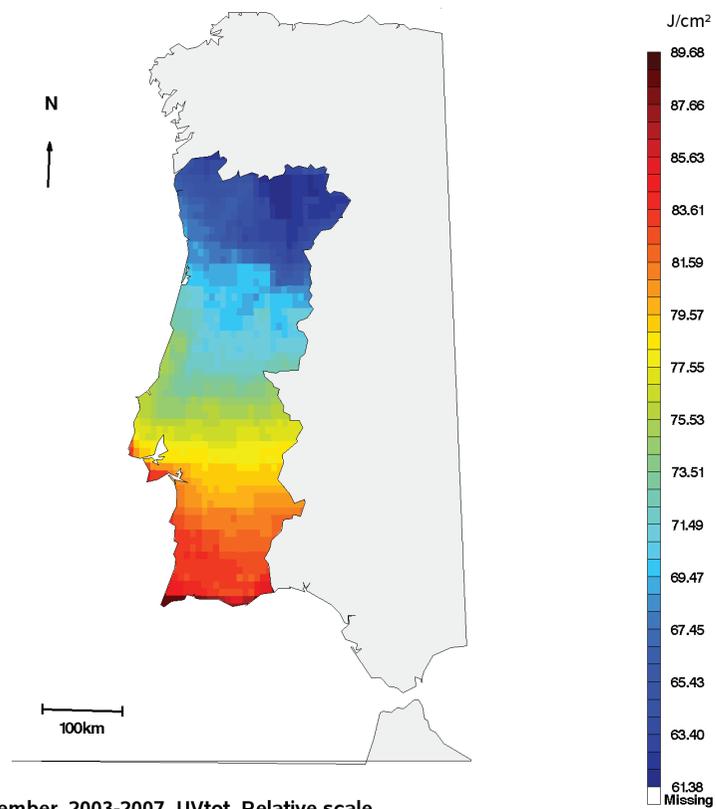
Portugal



Portugal, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

Data source: SoDa, Eurosun project

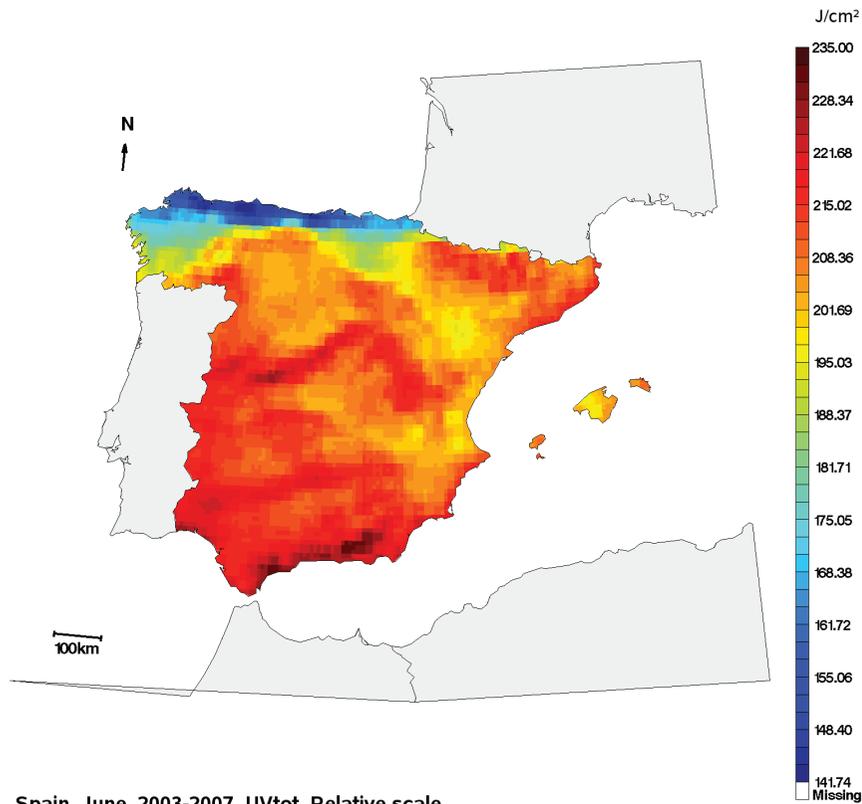


Portugal, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale

Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56), 20JAN2011

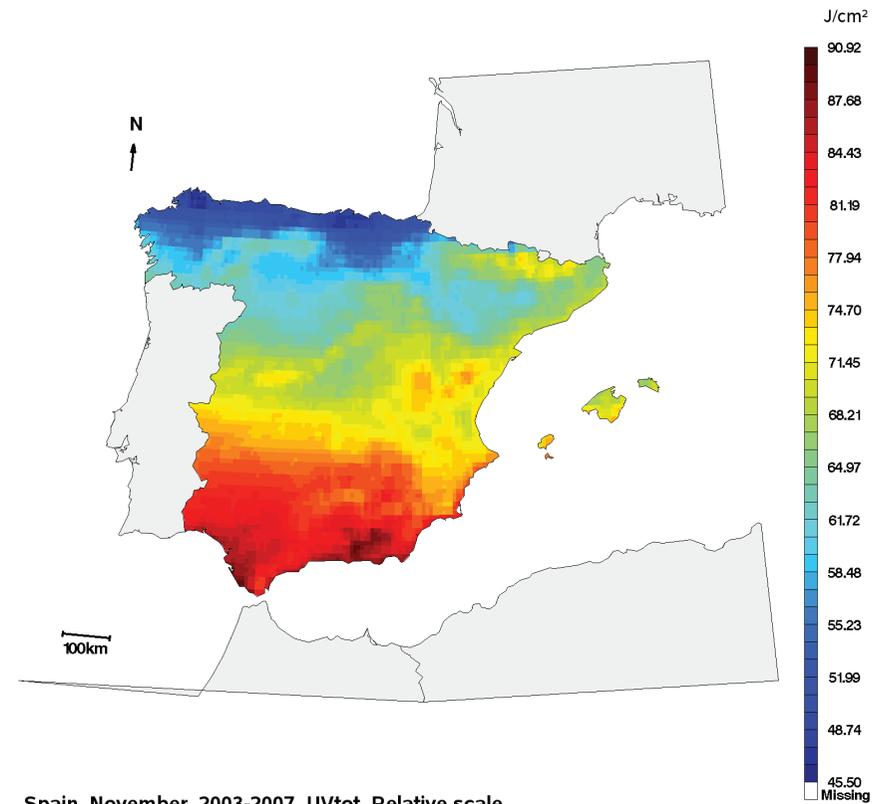
Data source: SoDa, Eurosun project

Espagne



Spain, June, 2003-2007, UVtot, Relative scale
 Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56)

Data source: SoDa, Eurosun project



Spain, November, 2003-2007, UVtot, Relative scale
 Projection: albers (parallel 1=40 parallel 2=56)

Data source: SoDa, Eurosun project

7.2 Annexe B : Questionnaire de l'enquête en population du projet EuroSun

EUROSUN

Quantification of sun exposure in Europe and its effects on health

QUESTIONNAIRE

(English Version 2.0, october 2008)

REGISTRATION FORM

NAME :
FIRST NAME :
ADDRESS : Street.....N° Apt.....
City : Zip Code
Country :
Telephone number :

Persons less than 18 year old :

NAME of the responsible person :
FIRST NAME of the responsible person :

Identification (2 letter Country identification followed by 3-digits ID number)

Country° __ __
Subject number __ __ __

=> ID : [__ __] __ __ __

Exemple : Country : France FR, Subject number : 43, => ID= FR043

ATTENTION !

Treatment of data from this study is ANONYMOUS :

This page is to BE kept by the local investigator and must not be sent for encoding. Only the identification number will be recorded.

I-IDENTIFICATION :

ID : [_] _ _ _

Gender : Male Female

Birth date : _ _ / _ _ / _ _ _ _ (DD/MM/YYYY)

Age category :

0-4 5-9 10-14 15-19 20-24 25-29 30-39 40-49 50-59 60-69

For subjects <18 y.o. : Person responsible and filling the questionnaire :

Mother Father Other : specify.....

Date of interview : _ _ / _ _ / _ _ _ _ (DD/MM/YYYY) telephone face to face

A)- Currently, you are :

- In activity (including housewife)
- Retired
- Unemployed

B)-What is your current occupation ?

- Farmer
- Craftsman, tradesman, small business head
- Employee
- Worker
- Intermediary occupation (school teacher, nurse, social worker, specialised technician)
- Manager, higher managerial staff, liberal profession, secondary school and university professors
- Student
- Without profession
- Other, Specify :

Would you qualify your occupation as a mainly indoor or a mainly outdoor one ?

- outdoor work indoor work

C)-Hair colour : *always choose the darker option*

- Black Dark brown Light brown Auburn Blond Red

D)-Eye colour : *always choose the darker option*

- Black Brown Green Hazel Blue Grey

E)-When you expose your skin to the sun for the first time after the winter, you :

- never burn and always tan
- sometimes burn first, but then always tan well

- always / often burn, then tan lightly
 - always burn and never tan
-

II-MAIN HOME :

A)-Place of main home :

Country :
 Town or Village :
 Department or County or District :
 ZIP Code : _ _ _ _ _

Since (date of moving in) : month....., year.....

The environnement of your main home is :

- rural semi-rural urban

Do you live in a :

- appartement house

B)-During the last 10 years, did you change your main home (change in town or village) ?

- Yes No

If Yes, what have been the places, months and years :

Country :
 Since (date of moving in) :
 Month :year :
 Town or Village :
 Department/County :
 Zip Code :

Country :
 Since (date of moving in) :
 Month :year :
 Town or Village :
 Department/County :
 Zip Code :

Country :
 Since (date of moving in) :
 Month :year :
 Town or Village :
 Department/County :
 Zip Code :

Country :
 Since (date of moving in) :
 Month :year :
 Town or Village :
 Department/County :
 Zip Code :

Country :
 Since (date of moving in) :
 Month :year :
 Town or Village :
 Department/County :
 Zip Code :

Country :
 Since (date of moving in) :
 Month :year :
 Town or Village :
 Department/County :
 Zip Code :

C)-Activities :

According to season, and not during your holidays, how much time do you spend *per week* in outdoor activities (e.g. : sport, gardening, walking, odd jobs, tanning)

Spring : __ h __ min
Summer : __ h __ min
Autumn : __ h __ min
Winter : __ h __ min

III-HOLIDAYS :

Successive places of your holidays :

Please indicate the holiday periods (>a prolonged week-end) that you enjoyed during these last 5 years.

1) From : Day Month Year to : Day Month Year
Total number of days :
Country :

Town or Village :

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :

Zip Code :

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? __ h __ min

2) From : Day Month Year to : Day Month Year
Total number of days :
Country :

Town or Village :

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :

Zip Code :

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? __ h __ min

3) From : Day Month Year to : Day Month Year
Total number of days :
Country :

Town or Village :

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :

Zip Code :

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? __ h __ min

4) From : Day Month Year to : Day Month Year
Total number of days :
Country :

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ _ h _ _ min

5) From : Day Month Year to : Day Month Year

Total number of days :

Country :.....

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ _ h _ _ min

6) From : Day Month Year to : Day Month Year

Total number of days :

Country :.....

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ _ h _ _ min

7) From : Day Month Year to : Day Month Year

Total number of days :

Country :.....

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ _ h _ _ min

8) From : Day Month Year to : Day Month Year

Total number of days :

Country :.....

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ _ h _ _ min

9) From : Day Month Year to : Day Month Year

Total number of days :

Country :.....

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ _ h _ _ min

10) From : Day Month Year to : Day Month Year

Total number of days :

Country :.....

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ _ h _ _ min

11) From : Day Month Year to : Day Month Year

Total number of days :

Country :.....

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ _ h _ _ min

12) From : Day Month Year to : Day Month Year

Total number of days :

Country :.....

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ _ h _ _ min

13) From : Day Month Year to : Day Month Year

Total number of days :

Country :.....

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ _ h _ _ min

14) From : Day Month Year to : Day Month Year

Total number of days :

Country :.....

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ _ h _ _ min

15) From : Day Month Year to : Day Month Year

Total number of days :

Country :.....

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ _ h _ _ min

16) From : Day Month Year to : Day Month Year

Total number of days :

Country :.....

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ _ h _ _ min

17) From : Day Month Year to : Day Month Year

Total number of days :

Country :.....

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ _ h _ _ min

18) From : Day Month Year to : Day Month Year

Total number of days :

Country :.....

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ _ h _ _ min

19) From : Day Month Year to : Day Month Year

Total number of days :

Country :.....

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ h _ min

20) From : Day Month Year to : Day Month Year

Total number of days :

Country :.....

Town or Village :.....

In case of travel to several places : tick the box and indicate the first place of travel

Department/County :.....

Zip Code :.....

During this period, what was your main outdoor activity, and how much time did you spend per week in that outdoor activity? _ h _ min

7.3 Annexe C : Articles publiés et soumis

Article publié :

Chaillol, I. et coll., 2011. Seasonality of cutaneous melanoma diagnosis in Northern Ireland with a review. *Melanoma research*, 21(2), 144-51. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21317819>.

Article soumis :

On the Eurosun UV irradiation database for epidemiology studies in Europe.

Lucien Wald, Philippe Blanc, Mathieu Boniol, Isabelle Chaillol, Marie-Christine Chignol, Jean-François Doré

Soumis à *Photochemistry and Photobiology*