
IMPACTS DE DIFFÉRENTS TYPES DE POLLUTIONS LUMINEUSES SUR LE DÉVELOPPEMENT ET LE COMPORTEMENT DE VOL À LA LUMIÈRE DE DEUX ESPÈCES DE PAPILLONS DE NUIT

Laroy Ludovic

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme
de Master en Biologie des Organismes et Ecologie

Promoteur : Hans Van Dyck (Université catholique de Louvain)
Encadrant : Evert Van de Schoot (Université catholique de Louvain)

Année académique 2023-2024

Table des matières

Table des matières	1
Mise en contexte.....	3
Utilisation ancestrale de la lumière et du cycle jour nuit.	3
Disparition de la nuit	4
Une pollution lumineuse complexe.....	6
Lumière Fixe	6
Attiré par la lumière	7
Perturbation du cycle circadien et lumière constamment allumée	9
Evolution	11
Skyglow.....	12
Lumière inconstante	13
Les pollutions lumineuses chez les papillons de nuit et leurs développements.	14
Buts et Objectifs	17
Matériel et Méthodes.....	18
Espèces d'étude	18
Capture des papillons et début de l'élevage	19
Élevage expérimental	20
Mesure du poids	22
Mesure des mues et stades de vie.....	22
Expérience de vol à la lumière	23
Statistiques	24
Résultats	26
Température et Humidité.....	26
Cycle de développement	27
Nombres de mues	27
Diapause	28
Temps pour entrer en chrysalide	29
Temps en chrysalide	29
Temps pour devenir adulte	30
Poids des chrysalides.....	31
Poids des adultes	33
Poids initiaux.....	34

Quantité de nourriture mangée	34
Poids en fonction du temps	35
Vol à la lumière.....	36
Probabilité de bouger	36
Premier mouvement	37
Probabilité de voler	38
Vol à la lumière.....	38
Discussion	42
Température et humidité.....	42
Cycle de développement	43
Vol à la lumière.....	48
Retour sur expérience.....	51
Conclusions	52
Remerciements	52
Annexes	54
Bibliographie	91

Mise en contexte

Utilisation ancestrale de la lumière et du cycle jour nuit.

Le cycle jour-nuit est l'un des cycles les plus réguliers et prédictibles de la nature, tous les soirs le soleil se couche et tous les matins, il se lève. Les tropiques, de par leur position sur le globe terrestre, inclinaison de ce dernier et le cycle orbital, ont un cycle jour nuit plutôt constant tout au long de l'année tandis que le cycle jour-nuit des milieux tempérés varie tout au long de l'année (Gaston et al., 2013; Tundisi, 1999). Ce qui fait que la durée du jour (ou de la nuit) et sa variation dans la nature sont directement liés à une certaine temporalité dans l'année et donc à une certaine saison (hors région équatoriale) (Gaston et al., 2013). Même la lune possède un cycle régulier dans le temps (B. J. Baker & Richardson, 2006). De plus, cela fait environ 500 millions d'années que les photorécepteurs sont apparus dans l'évolution permettant le développement de la vision et de la détection de la lumière pour les animaux (Hölker, Wolter, et al., 2010).

Cette capacité de voir la différence entre le jour et la nuit et les variations en découlant a permis aux organismes une meilleure régulation du cycle circadien (Bennie et al., 2015; Gaston et al., 2013; Hölker, Wolter, et al., 2010). Le cycle circadien est souvent assimilé à une horloge moléculaire interne à l'organisme de généralement 24h (Hölker, Wolter, et al., 2010) qui est régulé par différents facteurs comme la température ou la lumière (Jayatilaka et al., 2011; van Geffen et al., 2014). Ces indices environnementaux qui régulent le cycle circadien sont parfois appelés « zeitgebers » (Gaston et al., 2013). Ce cycle impacte le métabolisme, la croissance et le comportement des organismes (Hölker, Wolter, et al., 2010). De manière plus précise, chez beaucoup d'animaux (dont l'homme) la synthèse de mélatonine, une hormone très importante, est fortement régulée par ce cycle circadien (Cho et al., 2015; Dauchy et al., 1997; Honnen et al., 2016; Muscogiuri et al., 2022; Tancredi et al., 2022; Touitou et al., 2017). Chez les insectes nocturnes, cette horloge interne détermine aussi: la quantité et période de prise de nourriture (Altermatt & Ebert, 2016; Saunders, 2009), les ovipositions (Nemec, 1969), les accouplements et éclosions (Cooper et al., 2011; Dawson et al., 2001; Niva & Takeda, 2003) ou encore la production de phéromones chez les femelles papillons de nuit (Fatzinger, 1973; Sower et al., 1970).

En plus de cela, beaucoup d'organismes ont adapté leur phénologie en fonction de la durée du jour. En effet, comme la longueur du jour est liée à une certaine temporalité dans l'année, elle peut servir de proxy, d'indice environnemental, aux organismes. Par exemple, certaines plantes sont dites de « jours courts » ou de « jours longs » car elles détectent la durée de la nuit et en fonction de cette dernière fleurissent ou non (Vepsäläinen, 1974). Cela permet une certaine synchronisation avec les pollinisateurs, la saison ou les autres plantes. Un autre exemple typique du monde végétal provient des arbres qui, détectant une baisse de longueur de journée et de température, perdent leurs feuilles en prévision de l'hiver. Au niveau animal, il a été démontré que la durée du jour jouait entre autres sur les mues et le développement embryonnaire (Cooper et al., 2011) et l'entrée en diapause des papillons de nuit (Merckx et al., 2021, 2023; van Geffen et al., 2014; Vepsäläinen, 1974). Tandis que chez certains pucerons (Sanders et al., 2015) et punaises (Niva & Takeda, 2003), des différences dans la durée du jour perçue induisent différentes formes pour un même génotype (polyphénisme). Cependant, certains organismes ne prennent pas la durée du jour ou de la nuit en tant que régulateur du cycle circadien. Un bon exemple sont les animaux polaires qui, de par la position de ces régions sur le globe terrestre, n'ont pas d'alternances entre la nuit et le jour si fréquentes que dans les régions tempérées ou

tropicales (Bloch et al., 2013; Krüll et al., 1985). Certains oiseaux polaires utilisent par exemple le changement de composition de la lumière (en termes de longueur d'onde) (Krüll et al., 1985).

Enfin, d'autres animaux suivent le cycle lunaire concernant leur comportement. Les exemples sont nombreux : les proies diminuant leur activité et les prédateurs augmentant la leur pendant la pleine lune (B. J. Baker & Richardson, 2006; Gaston et al., 2013), des éphémères qui ont tendance à éclore 2 jours après la pleine lune (Corbet et al., 1974) ou encore le comportement et la physiologie des grenouilles qui changent en fonction du cycle lunaire (B. J. Baker & Richardson, 2006). Une grande partie du zooplancton marin combine les deux en prenant en compte autant les cycles lunaires (et leurs différentes intensités de lumière pendant la nuit) que le cycle jour-nuit dans leurs migrations quotidiennes de la profondeur vers la surface (et inversement) pour éviter d'être prédatés (Gliwicz, 1986).

On vient de voir que les cycles lunaires avaient un impact sur les organismes mais le simple fait que la lune soit lumineuse dans une nuit noire est déjà suffisant pour les animaux nocturnes ayant une phototaxie positive (se dirigent vers la lumière) ou négative (évitent la lumière) (Lewanzik & Voigt, 2017; Robinson, 2009; Summers, 1997; Underhill & Höbel, 2018). Une grande partie des grenouilles (Underhill & Höbel, 2018) ainsi que la majorité des papillons de nuit (Nowinszky et al., 2023; Rich & Longcore, 2006) ont par exemple une phototaxie positive. C'est cette phototaxie positive des papillons de nuit qui fait que les pièges lumineux ou qu'une toile blanche étendue furent et sont encore actuellement utilisés par les scientifiques pour les capturer (Gaston et al., 2013; Nabli et al., 1999). Cependant les autres corps célestes sont aussi importants et peuvent servir d'outils d'orientation. La noctuelle fiancée (*Noctua pronuba*), un papillon de nuit, s'oriente en utilisant l'étoile polaire (Sotthibandhu & Baker, 1979) tandis que le bousier *Scarabaeus satyrus* utilise encore plus d'étoiles de la voie lactée (Dacke et al., 2013). D'autres papillons de nuit utilisent les rayons de la lune ou des étoiles en tentant de respecter un angle constant avec ces derniers pour s'orienter (Goldsmith, 1990). Au niveau des oiseaux, le ciel étoilé est potentiellement très utile à leur migration correcte (Cochran et al., 2004; Hölker, Wolter, et al., 2010; Tancredi et al., 2022) et même si beaucoup d'oiseaux possèdent une « boussole magnétique », certains utilisent le ciel étoilé pour la calibrer (Cochran et al., 2004). Cela serait également le cas pour le papillon de nuit bogong (*Agrotis infusa*) qui utiliserait des étoiles (et la lune) et le champ magnétique terrestre pour maintenir son cap durant sa migration (Dreyer et al., 2018). Des fourmis (Hölldobler & Taylor, 1983) et abeilles (Warrant et al., 2006) naviguent dans la canopée en différenciant les branches et feuilles de par leurs silhouettes par rapport au ciel nocturne (moins sombre que les branches). Enfin, la lumière naturelle nocturne possède une polarisation spéciale qui peut être utilisée par certains insectes en tant qu'indice d'orientation ou pour le choix de leur lieu d'oviposition (Horváth et al., 2009; Perkin et al., 2014).

Disparition de la nuit

Ces adaptations à la vie nocturne ont eu le temps de se développer avec des cycles jours-nuits et luminosité nocturne fort constants d'année en année, cependant, le monde est changeant. L'arrivée de l'homme bouleverse les organismes vivants en changeant et créant des écosystèmes entiers par la création de champs ou de villes par exemple (McMahon et al., 2017; Ramalho & Hobbs, 2012). Même les écosystèmes encore vierges d'empreintes humaines sont en réalité affectés par l'homme via le changement climatique d'une vitesse affolante qu'il a provoqué

(AR6 Synthesis Report, 2023). La population humaine ne fait que grandir avec des estimations de 95% de l'augmentation de la population qui ira en ville et 2/3 de la population mondiale vivant en ville en 2050 (McMahon et al., 2017; *United Nations Department of Economic and Social Affairs*, 2018). Les villes vont donc encore et toujours plus augmenter en taille (Kyba et al., 2017; Ramalho & Hobbs, 2012). Mais on sait aussi que les villes altèrent déjà la vie des organismes s'y développant de par leur aspect si différent avec les autres milieux naturels (McMahon et al., 2017; Rivkin et al., 2019). Dans les différences importantes et assez largement étudiées entre le milieu urbain et naturel, nous pouvons notamment noter le bruit et la température qui sont plus élevés en ville (McMahon et al., 2017; Sierro et al., 2017). De plus, il faut savoir que l'homme, avant la révolution industrielle, s'éclairait peu pendant la nuit car la lumière venait de la combustion principalement d'huiles ou de bois qui sont coûteux et pas très efficaces en termes de superficie éclairée (Longcore & Rich, 2004). Cependant, ces sources de lumière sont dépassées et ont laissé place à l'électricité. De nos jours, en ville et sur les routes, la lumière reste présente même la nuit par les différents lampadaires, maisons ou encore voitures (Gaston et al., 2013; Kehoe et al., 2022). La présence de cette lumière augmente la sécurité (routièr e notamment) (Gaston, Gaston, et al., 2015; Kyba et al., 2017), diminue la criminalité (Gaston, Gaston, et al., 2015; Welsh & Farrington, 2008) ou encore augmente l'esthétisme (Gaston, Gaston, et al., 2015). Néanmoins certains points sont débattus (Gaston, Gaston, et al., 2015) et la sécurité pourrait également être atteinte avec des degrés d'illumination plus faible (Kyba et al., 2017).

Cette présence artificielle de lumière pendant la nuit (qui lui vaut son nom de ALAN pour « artificial light at night ») est totalement nouvelle pour les organismes, habitués et adaptés aux nuits sombres, et cela les impacte souvent négativement (voir prochaine section). Les scientifiques étudiant ces phénomènes sont arrivés à une conclusion : l'urbanisation amène une autre sorte de pollution, la pollution lumineuse (Davies & Smyth, 2018; Kyba et al., 2017). De plus, en conséquence de l'augmentation de la population surtout dans les villes, la quantité de routes augmente et avec cela, la quantité de lampadaires également (Gaston & Holt, 2018). Pour donner un ordre d'idée, malgré le fait d'avoir une densité de population assez médiocre (34,28 habitants par kilomètre carré comparés à 380,33 habitants par kilomètre carré pour la Belgique (*Densité De Population Etats Unis Amérique 2021*, 2021)), 20% de la surface des Etats-Unis se trouvent à moins de 125 m d'une route (Riitters & Wickham, 2003). Et mondialement, cela ne fait qu'augmenter. Par exemple, il y eut 35% d'augmentation de kilomètres de routes dans le monde entre 2000 et 2009 pour finir par atteindre 64 millions de kilomètres en 2013 et on devrait encore avoir 25 millions de kilomètres en plus d'ici 2050 (Gaston & Holt, 2018). Selon des estimations, ALAN augmenterait chaque année de 6% (Kyba et al., 2017) (voir Fig. 26 en annexe). De plus, les routes sans lampadaires mais qui peuvent quand même subir de la pollution lumineuse par les voitures passantes (et leurs phares) ne sont pas prises en compte dans ces chiffres car ces sources mobiles et horizontales de lumière sont mal captées par les images satellites (les images satellites étant la base pour établir l'avancée d'ALAN) (Gaston & Holt, 2018).

Enfin, la technologie des diodes électroluminescentes (light-emitting diode ; LED) gagne de plus en plus de terrain à tous les niveaux : lampadaires, voitures, etc (Davies & Smyth, 2018; Gaston et al., 2013; Gaston & Holt, 2018; Kyba et al., 2017). En effet, actuellement, les LED augmenteraient globalement de 11,35% de taille du marché par an (*LED Lighting Market Size & Share Analysis - Industry Research Report*, 2023). Cette technologie est moins énergivore et permet donc de faire des économies d'argent et d'émissions de CO2 (Davies et al., 2013; Gaston

et al., 2013; Kyba et al., 2017) . Cependant, comme la technologie est moins coûteuse, il est tentant de plus allumer les lumières (lampadaires surtout) et donc de faillir à la sobriété potentiellement induite par les anciennes lampes (lampes à sodium) plus coûteuses (Davies & Smyth, 2018; Kyba et al., 2017). De plus, bien que les LED ont des longueurs d'ondes émises réglables, la plupart des LED commercialisées émettent une grande gamme de longueurs d'ondes (c'est un argument de vente pour la visibilité (humaine) que cela offre (Davies & Smyth, 2018)). Cette grande gamme d'ondes émises est potentiellement impactante sur de nombreux organismes (Briscoe & Chittka, 2001; Gaston et al., 2012; Kehoe et al., 2022) (voir Fig. 27 en annexe). En effet, les plantes utilisent principalement de grandes longueurs d'ondes (Bennie et al., 2016) tandis que les insectes nocturnes utilisent beaucoup les petites (Briscoe & Chittka, 2001; Svensson & Rydell, 1998; van Geffen, Van Eck, et al., 2015; van Langevelde et al., 2017). Les lampadaires LED sont aussi beaucoup plus lumineux (5 lux à 3,5 m en dessous du lampadaire et 15 lux quelques centimètres en dessous du lampadaire (Underhill & Höbel, 2018)) que les autres types de lampadaires (voir Fig. 27 en annexe) ainsi que la lumière naturelle nocturne (même si les autres types de lampadaires sont également plus lumineux que la lumière nocturne) qui atteindra maximum 1 lux (Bennie et al., 2016).

Une pollution lumineuse complexe

Nous venons de voir différents aspects de pollution lumineuse mais sa nature en elle-même est également très complexe. En effet, la pollution lumineuse est un terme assez vague et fait référence à différents types de perturbation. Un cas particulier de pollution lumineuse est par exemple celui des grottes où des mousses, fougères, algues, etc. poussent par l'ajout de lumières d'explorations ou touristiques dans un milieu qui était totalement noir avant (Johnson, 1978). Bien que cette prolifération soit intéressante et pose un vrai problème pour les archéologues et géologues (car les plantes pourraient endommager les parois sur lesquelles elles poussent) (Lefèvre & Lefevre, 1974), je ne la développerai pas plus. Dans un but de clarté, je vais dans cette section décrire et différencier les 3 types majeurs de pollution lumineuse : la lumière fixe, le skyglow et enfin les lumières inconstantes (principalement les lampadaires intelligents et les voitures).

Lumière Fixe

La première sorte de pollution lumineuse que je décris ici est la plus connue et intuitive : les lumières fixes. Cette pollution provient d'une source de lumière directe (non réfléchi) immobile qui perturbe les organismes en étant allumée durant la (quasi) totalité de la nuit. L'exemple type sont les insectes nocturnes et surtout les papillons de nuit qui sont attirés et tournent autour des lampadaires (Kehoe et al., 2022). D'ailleurs, la majeure partie de la pollution lumineuse des lumières fixes provient des lampadaires qui sont malheureusement en vue d'augmenter avec l'urbanisation croissante (Gao & O'Neill, 2020; Rivkin et al., 2019).

Dans la littérature, quand on parle de pollution lumineuse autre que le skyglow (voir section « Skyglow »), c'est souvent à cette pollution lumineuse venant d'une source fixe que l'on fait référence. Cependant, même si elle est fortement étudiée et clairement différenciée de la pollution lumineuse du skyglow (Davies & Smyth, 2018; Gaston et al., 2013; Kehoe et al., 2022; Longcore & Rich, 2004) (voir section « Skyglow ») et de la « pollution lumineuse inconstante » (Gaston et al., 2021; Gaston & Holt, 2018; Kehoe et al., 2022) (voir section « Lumière inconstante »), aucun terme particulier ne fait référence à cette pollution lumineuse

provenant de sources fixes. Elle se retrouve régulièrement sous le nom générique de « pollution lumineuse » ou de « ALAN ». J'utiliserai le terme de « pollution (lumineuse) par lumière fixe » ou « pollution lumineuse fixe » pour faire référence à cette pollution lumineuse-ci, que je différencie de la « pollution (lumineuse) par lumières inconstantes » ou « pollution lumineuse inconstante » (voir section « Lumière inconstante »). La pollution par lumière fixe est peut-être bien la plus importante car elle touche énormément d'organismes différents, de manières multiples et avec des effets sur la fitness des individus très élevés. Je vais décrire ces différents impacts dans les prochains paragraphes. Cependant, il est important de noter qu'il y a un manque général d'études et assez peu de preuves (mais voir section « Evolution ») concernant les impacts réels de la pollution lumineuse au niveau populationnel des papillons de nuit (Boyes et al., 2021a; Davies et al., 2013; Davies & Smyth, 2018; Kehoe et al., 2022; Macgregor et al., 2015). Des études récentes tentent de pallier ce problème comme celle de Grenis et al. (2023) par exemple.

Attiré par la lumière

Le premier type de perturbation est le fait d'attirer de manière disproportionnelle les animaux vers la source de lumière à cause de la phototaxie positive de ces derniers comme évoqué plus haut ou parce qu'ils utilisaient habituellement la lune comme indice d'orientation et qu'ils la confondent avec la source de lumière. De plus, l'« open space theory », suppose que beaucoup de papillons de nuit sont attirés par la lumière car ils auraient plus d'avantages à aller dans les prairies fleuries (ouvertes et donc plus lumineuses) que les bois (fermés et donc plus sombres) (Merckx et al., 2023). Il est fort possible que cela soit une des deux raisons citées précédemment qui se passe lorsqu'un lampadaire attire des insectes nocturnes dont une grande partie de papillons de nuit (Frank, 1991; Verheijen, 1960). Le problème majeur est qu'entre une trentaine et quarantaine de pourcents des insectes qui approchent un lampadaire meurent peu de temps après (Rich & Longcore, 2006). Cela peut être par collision (Owens & Lewis, 2018), prédation (Andrew D., 1990) ou encore par surchauffe quand les insectes, attirés par la lumière, se posent sur cette dernière qui est très chaude. Cependant, avec les LED, plus efficaces énergétiquement, ce type de mortalité a tendance à diminuer (Boyes et al., 2021a). Le fait d'être attiré par la source lumineuse ou de la confondre avec un corps céleste servant d'indice d'orientation fait que les papillons commencent à tourner autour de cette source lumineuse pendant un temps indéfini et non-négligeable (R. R. Baker & Sadovy, 1978; Sotthibandhu & Baker, 1979). Quand les papillons de nuit volent en hauteur, proches de la lampe du lampadaire, ils ne peuvent pas effectuer leurs activités normales (nourrissage, reproduction, ...) se situant dans/sur les plantes situées plus bas (Eisenbeis & Hänel, 2009).

Les impacts que cela aurait sur la population ont été regroupés par Macgregor et al (2015) et consolidés par Boyes et al (2021a) sous différentes hypothèses. La première, la perturbation locale (Fig. 1 haut), est qu'un lampadaire attire les papillons mais uniquement en hauteur et sur la zone éclairée. La deuxième (Fig. 1 milieu), l'effet de concentration, est que les papillons des zones non éclairées vont se rapprocher des lampadaires mais que les papillons ne vont pas aller en hauteur et donc effectuer leurs activités (nourrissage, reproduction, ...) normalement. Ils peuvent cependant sortir des zones éclairées. La troisième, le piège écologique (Fig. 1 bas), est la même que la précédente mais les papillons vont être attirés en hauteur et ils ne peuvent pas non plus sortir des zones illuminées (car ils sont trop attirés par la lampe du lampadaire). Même si aucune conclusion nette et précise n'a été tirée sur ces hypothèses dans la littérature, l'effet de la perturbation locale semble être celui le plus proche de la réalité. En effet, les papillons de

nuits volent en hauteur proche des lampes des lampadaires mais ils ne sont attirés vers eux qu'à partir d'environ 3 mètres (R. R. Baker & Sadovy, 1978).

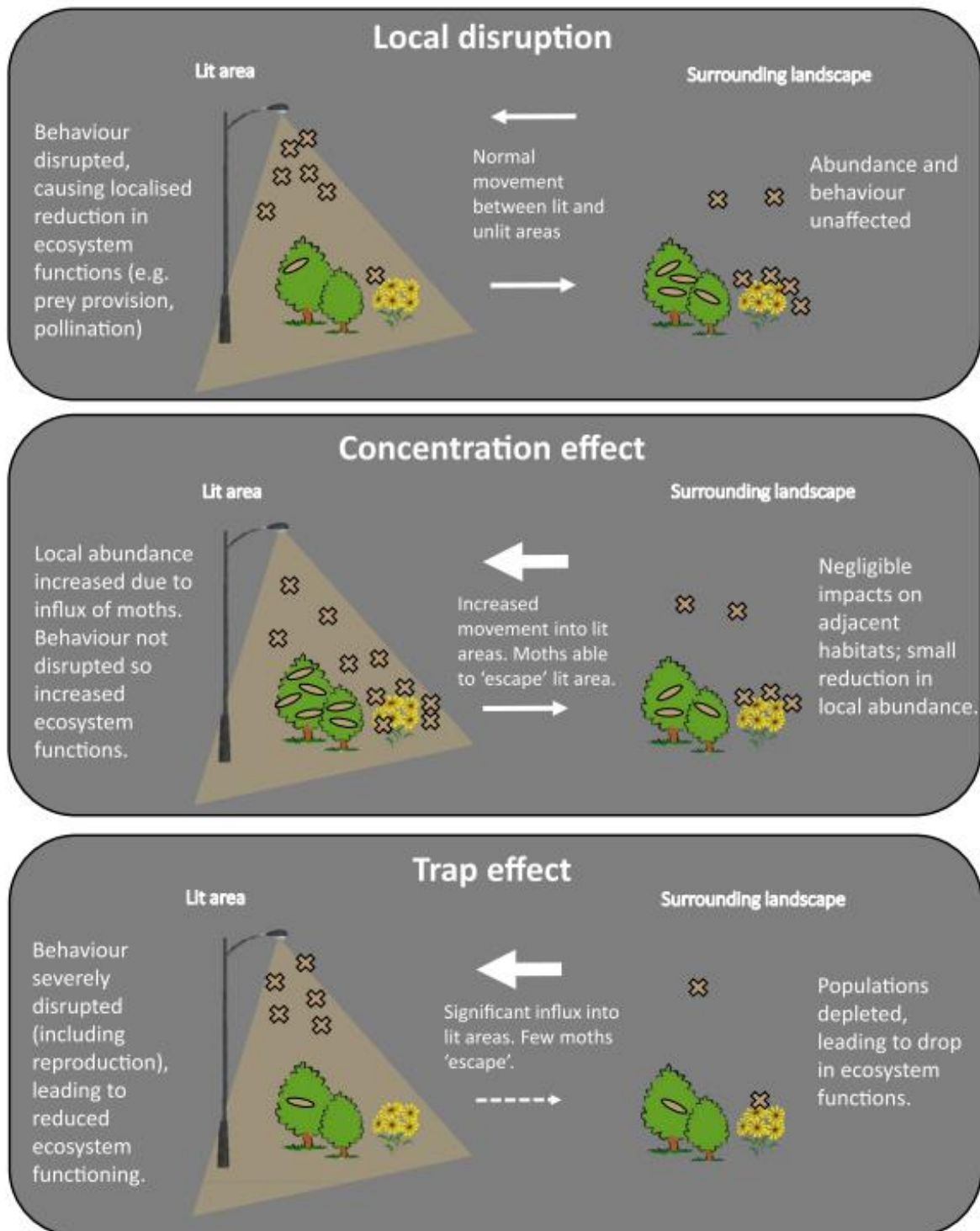


Figure 1 : Différentes hypothèses des impacts d'un lampadaire sur les insectes papillons nocturnes. Les croix représentent des adultes et les ovales représentent des chenilles. (Boyes et al., 2021a).

Nous pouvons également noter que, de manière générale chez les papillons de nuit, les mâles sont plus attirés par la lumière que les femelles (Altermatt et al., 2009; Altermatt & Ebert, 2016; Garris & Snyder, 2010). Néanmoins, il est possible que cet effet soit induit en partie par le fait

que les mâles se dispersent plus que les femelles et ont donc une probabilité plus élevée de croiser une source lumineuse (Altermatt et al., 2009).

Cependant, le fait de se rassembler sous les lumières n'est pas anodin. En effet, cela offre une grosse densité de proies pour les différents prédateurs des insectes nocturnes incluant d'autres insectes (Warren, 1990), amphibiens (González-Bernal et al., 2016) et oiseaux (Fox, 2013; van Langevelde et al., 2017) mais surtout les chauves-souris (Altermatt & Ebert, 2016; Blake et al., 1994; Fox, 2013; Rydell, 1992) et les araignées (Altermatt & Ebert, 2016; Heiling, 1999). On remarque même chez ces trois derniers une préférence pour chasser ou tisser des toiles sous les lumières (surtout des lampadaires) pour avoir accès à cette densité de proies très importante qui résulte en un nombre de proies mangées par unité de temps plus important (B. J. Baker & Richardson, 2006; Blake et al., 1994; Bolliger et al., 2020). Cependant, cela favorise les chauves-souris qui tolèrent la lumière nocturne telles que les pipistrelles communes (*Pipistrellus pipistrellus*), étant plus ou moins fréquentes en ville et en « least concern » sur la liste rouge de l'IUCN, contrairement aux différentes *Myotis*, *Plecotus* ou encore *Rhinolophus* qui ne tolèrent que très peu la lumière nocturne (Bolliger et al., 2020). De plus, le camouflage des papillons de nuit n'est pas du tout adapté aux longueurs d'ondes émises par les LED et encore moins au fait de se poser sur un lampadaire à la place d'un arbre (Rich & Longcore, 2006). Certains auteurs supposent même que les oiseaux prédateurs des papillons de nuit, voyant souvent ces derniers à la lumière des lampadaires, apprendraient à reconnaître leur paterne de camouflage et seraient alors plus efficaces dans la capture de papillons de nuit durant la journée (Rich & Longcore, 2006).

Un autre exemple bien connu et étudiés, notamment par l'intérêt public qu'elles suscitent (Kamrowski et al., 2012), sont les tortues marines. En Australie, ces tortues marines sortant des œufs se dirigent normalement vers la mer qui est plus lumineuse. Cependant, elles se retrouvent attirées par l'éclairage côtier et ne vont donc pas vers la mer mais restent sur la plage augmentant ainsi leur risque de prédation et épuisant leurs maigres réserves. En effet, les sites de pontes des tortues marines se trouvent très fréquemment à proximité des plages touristiques qui sont en partie éclairées la nuit par des lampadaires. Néanmoins, les choses bougent à ce niveau-là car des mesures sont prises pour diminuer la pollution lumineuse comme le changement de la couleur des lampadaires ou des mesures et contrôles spéciaux pour les projets industriels de grande ampleur (Kamrowski et al., 2012).

Enfin, cette capacité à attirer des animaux par une source lumineuse est bien connue et est souvent utilisée par l'homme. Par exemple, les scientifiques ont l'habitude d'utiliser des surfaces blanches éclairées ou des piège lumineux pour attirer les insectes nocturnes (Altermatt & Ebert, 2016; Gaston et al., 2013; Macgregor et al., 2017; Nabli et al., 1999; van Langevelde et al., 2018). C'est également utilisé au niveau de la gestion des ressources naturelles. Un exemple d'utilisation de la phototaxie positive est la mise en place de lumières aux extrémités des échelles à poissons dans le but que ces derniers y aillent plus facilement (Haymes et al., 1984). La phototaxie négative est également utilisée comme dans le cas de placement de lumières à des endroits précis dans le but que le puma, causant des problèmes avec les populations locales, mais fuyant la lumière, n'y aille pas (Beier, 1995).

Perturbation du cycle circadien et lumière constamment allumée

La deuxième perturbation majeure est la perturbation du cycle circadien et de manière générale le fait que la lumière reste constamment allumée. Comme le cycle circadien de beaucoup

d'organismes est régulé par le cycle jour-nuit, la présence continue de lumière artificielle la nuit empêche une bonne détection de ce cycle jour-nuit et donc empêche une bonne régulation du cycle circadien (Bennie et al., 2015; Cho et al., 2015; Muscogiuri et al., 2022; Tancredi et al., 2022; Touitou et al., 2017; van Geffen et al., 2014). Ce phénomène est très répandu dans le règne animal. Par exemple, la synthèse de mélatonine est normalement régulée par le cycle circadien mais, à cause de ALAN, sa production se retrouve modifiée et cause des cancers chez les poissons et oiseaux (Navara & Nelson, 2007) mais également chez les mammifères dont l'homme (Cho et al., 2015; Muscogiuri et al., 2022; Tancredi et al., 2022; West et al., 2011). Chez ce dernier, ALAN cause également des troubles du sommeil (Cho et al., 2015; Muscogiuri et al., 2022; Touitou et al., 2017), aurait des impacts négatifs sur le diabète (Cho et al., 2015; Touitou et al., 2017), l'obésité (Muscogiuri et al., 2022; Tancredi et al., 2022; Touitou et al., 2017), les pathologies cardio-vasculaires (Cho et al., 2015) et enfin, ALAN est fort suspecté de jouer un rôle dans certains troubles mentaux (Cho et al., 2015; Tancredi et al., 2022; Touitou et al., 2017). De manière générale, ce cycle circadien joue sur énormément de paramètres dont nous avons abordé certains. Pour ne citer qu'eux, Owens, A.C.S. et Lewis, S.M (2018), déclarent dans leur review que ce cycle joue chez les insectes nocturnes sur l'émergence quotidienne, la quantité et timing de nourriture ingérée et également les activités liées à la reproduction. Ils déclarent également que les cycles d'éclosion, d'ovipositions et accouplements sont souvent déterminés par la lumière lunaire ou la taille de la durée du jour, ALAN pouvant perturber ces indices. Ces désynchronisations du cycle circadien entraînent une baisse de fitness significative (Xu et al., 2011). Les exemples d'impacts de perturbation du cycle circadien sont encore très nombreux mais ne seront pas plus détaillés ici.

Comme la lumière reste constamment allumée, la différenciation entre jour et nuit devient plus faible et permet des extensions de niches de certaines espèces. Les prédateurs de jour pourraient se retrouver actifs durant la nuit et ceux de nuit ne chasseraient plus (Daly et al., 1992; Sordello, 2017). Le phénomène inverse est également possible avec les proies de jour qui resteraient actives la nuit face à des prédateurs inhabituels et inversement (Hölker, Wolter, et al., 2010; Sanders et al., 2018; Sordello, 2017). Par exemple, un peu de lumière, entre 0,1 à 5 lux, (rappel : lampadaires = jusque 15 lux et la pleine lune = jusque 1 lux) permet de faire doubler l'efficacité des parasitoïdes chez les pucerons (Sanders et al., 2018). Nous pouvons également noter que les papillons de nuit exposés à de la lumière en continu ne montrent plus de comportements anti-prédation (Acharya & Fenton, 1999). Un autre problème fréquemment évoqué est le fait que les femelles papillons de nuit produisent moins de phéromones (Fatzinger, 1973; Sower et al., 1970; van Geffen, Groot, et al., 2015) quand elles sont sous pollution lumineuse et les mâles sont moins attirés par ces mêmes phéromones (van Geffen, Groot, et al., 2015; van Geffen, Van Eck, et al., 2015).

De plus, les changements normalement saisonniers associés à la photopériode sont plus compliqués à détecter sous lumière constante et pourraient donc causer des problèmes comme les transitions entre différents stades de vie des papillons de nuit effectuées trop tôt ou trop tard (Durrant et al., 2018; Schroer et al., 2019; van Geffen et al., 2014). Surtout si d'autres organismes essentiels pour les papillons de nuit (surtout les plantes) se basent sur d'autres indices environnementaux, comme la température, pour déterminer leur propre phénologie (Petanidou et al., 2014). On assisterait alors à un « mismatch ».

Le fait que les différentes sources lumineuses aient différentes longueurs d'ondes a de l'importance (Gaston et al., 2013; van Langevelde et al., 2017). En effet, les papillons soumis

à une lumière constante auront des effets différents en fonction de la longueur d'onde de cette lumière. Par exemple, les papillons de nuit se nourrissent moins que normalement sous lumière artificielle rouge mais encore moins sous lumière blanche et encore moins sous lumière verte (van Langevelde et al., 2017).

Evolution

Ces différents effets sont négatifs pour le maintien de la diversité spécifique des papillons de nuit. Cependant, il a été montré que des papillons de nuit évoluent à la présence d'ALAN avec les populations plus exposées à la lumière artificielle (depuis plusieurs générations) qui sont significativement moins attirées par les sources de lumière comparées aux papillons de la même espèce non soumis à de la pollution lumineuse (Altermatt & Ebert, 2016; Cieraad et al., 2022) (même si Cieraad et al. n'ont pas trouvé d'adaptations des papillons à ALAN). Le fait qu'il y ait évolution pour « contrer ALAN » est un indicateur positif pour la survie des espèces de papillons de nuit (Altermatt & Ebert, 2016; Cieraad et al., 2022) mais la réalité est plus complexe que cela et il y a également d'autres implications.

Premièrement, cela veut dire qu'ALAN a effectivement un effet négatif sur la survie des papillons de nuit et certains scientifiques affirment même que c'est une force de sélection majeure (Altermatt & Ebert, 2016; Cieraad et al., 2022) ou contribuant significativement au déclin des insectes nocturnes (Cieraad et al., 2022; Hölker, Wolter, et al., 2010; Owens et al., 2020; van Langevelde et al., 2017, 2018). Mais les scientifiques se demandent aussi si cette évolution est suffisante pour contrebalancer les effets négatifs d'ALAN et donc préserver ces papillons (Cieraad et al., 2022). Ils se demandent également si ces adaptations, réalisées sous d'anciens lampadaires avec des lampes à sodium, seront toujours autant efficaces avec les nouveaux lampadaires LED (Boyes et al., 2021a). Néanmoins, des exemples d'espèces s'adaptant à un tout nouveau cycle jour-nuit existent. Par exemple, des espèces de papillons de nuit danois ont montré une parfaite adaptation au climat groenlandais très différent en termes de cycle jour-nuit (Dreisig, 1981) et des plantes invasives adaptent également très rapidement leur réponse à la photopériode en fonction de leur nouvel environnement (Urbanski et al., 2012).

Deuxièmement, une réponse « simple » pour éviter les effets négatifs d'ALAN est de diminuer la phototaxie positive (Altermatt & Ebert, 2016; Hölker, Moss, et al., 2010). Cependant, cette phototaxie positive a été sélectionnée dans la nature et devait donc jouer un rôle (Altermatt & Ebert, 2016). L'abandonner ou la diminuer n'est donc certainement pas sans conséquences mais le rapport coût/bénéfice entre la phototaxie positive et les effets négatifs de la pollution lumineuse semble quand même favoriser la disparition de la phototaxie positive (Altermatt & Ebert, 2016). Surtout que les adaptations menant à une diminution de phototaxie positive peuvent tout aussi bien être une modification du traitement de l'information de la présence d'une source lumineuse que la diminution de la qualité ou de la taille de l'œil des papillons (Altermatt & Ebert, 2016). Cette dernière possibilité, malgré ses clairs désavantages, pourrait être sélectionnée dans les populations soumises à la pollution lumineuse (Altermatt & Ebert, 2016). Une autre possibilité mise en avant par Altermatt et Ebert est que les individus étant actifs ou se dispersant le moins peuvent être sélectionnés ce qui amplifierait d'une certaine manière la fragmentation des habitats et la consanguinité sans oublier les impacts liés à la pollinisation. De plus, contrer ALAN ne semble pas si « simple » dans tous les domaines de la vie des papillons de nuit. En effet, une étude récente déclare que certains papillons de nuit ne montrent pas d'adaptations locales en termes d'alimentation ou de comportement d'appel en réponse à ALAN (Cieraad et al., 2022).

Enfin, comme il y a un processus d'évolution pour être moins attiré par la lumière, il faudrait peut-être faire plus attention aux biais que certains pièges ou populations de papillons de nuit peuvent induire. Par exemple, les papillons de nuit capturés à proximité de lumière ou par des pièges lumineux (piège attirant les insectes par une source lumineuse) ne sont pas d'office comparables au reste de la population, surtout vis-à-vis de leur comportement avec la lumière (Altermatt & Ebert, 2016; Nabli et al., 1999).

Comme il y a eu évolution, ces adaptations (de diminution de phototaxie positive par exemple) vont rester dans la population pendant encore des générations même si le problème de pollution lumineuse est réglé demain (Altermatt & Ebert, 2016). Cette rémanence des effets négatifs de la pollution lumineuse sur les organismes amplifie l'importance de protéger les zones encore non touchées par la pollution lumineuse fixe (Altermatt & Ebert, 2016; Gaston et al., 2021; Sordello, 2017).

Skyglow

Les lampadaires, en plus d'avoir beaucoup d'effets néfastes eux-mêmes par pollution lumineuse fixe, participent également au deuxième type de pollution lumineuse : le skyglow. Le skyglow provient de la lumière artificielle dispersée dans les basses couches de l'atmosphère (Falchi et al., 2016; Gaston et al., 2013) qui est ensuite réfléchi vers le sol (Falchi et al., 2016). L'impact principal de ce skyglow est, comme son nom l'indique, que le ciel est plus lumineux ou brillant. Cela rend les corps célestes plus compliqués à visualiser et contribue à la diminution de l'obscurité nocturne (Falchi et al., 2016; Gaston et al., 2013; Gaston & Holt, 2018; Kyba et al., 2017; Longcore & Rich, 2004; Luginbuhl et al., 2014). Le skyglow provient donc des sources de lumières artificielles mais a un impact très étendu, bien plus qu'au niveau de la source de la lumière, et est d'autant plus important qu'il y a de sources de lumières (Luginbuhl et al., 2014). Par exemple, une ville peut créer un skyglow jusqu'à des centaines de kilomètres au-delà des limites de la ville (Biggs et al., 2012; Kyba & Hölker, 2013; Luginbuhl et al., 2014). Le problème devient de plus en plus fréquent avec l'augmentation des lampes LED car ces dernières contribuent plus au skyglow que leurs prédécesseuses (Kyba et al., 2017). La lumière que peut « émettre » le skyglow peut atteindre des valeurs similaires à celles d'une grande pleine lune d'été (Kyba et al., 2011). L'atteinte de ces valeurs est un phénomène régulier sur 23% de la surface des USA, 37% de l'Europe et 5% de la surface mondiale (Rich & Longcore, 2006). Environ 23% de la surface terrestre entre 75°N et 60°S sont considérés comme soumis au skyglow (Falchi et al., 2016).

Les effets du skyglow sont très visibles même pour l'homme. Selon "The New World Atlas of Artificial Sky Brightness", 80% de la population mondiale et 99% de la population européenne ou américaine vivraient sous un ciel pollué en lumière (Falchi et al., 2016; Tancredi et al., 2022). 1/3 des personnes, aujourd'hui, vivent sous un ciel tellement pollué en lumière que cela les empêche de voir correctement la voie lactée (Falchi et al., 2016). C'est un des facteurs expliquant que l'homme semble de plus en plus déconnecté de la nature (Miller, 2005). Ces deux problèmes vont s'amplifier avec l'augmentation de la population en ville. Les astronomes, ayant besoin d'une bonne visibilité du ciel nocturne, ont commencé à alerter sur le problème il y a une cinquantaine d'années (B. J. Baker & Richardson, 2006) et en 2001, 18,7% de la surface de la Terre (en prenant donc en compte les océans également) étaient considérés comme ayant un ciel pollué en lumière selon les standards astronomiques (Cinzano et al., 2001). Le

phénomène prend une telle ampleur que des spots touristiques ont vu le jour de par le fait qu'ils ont un ciel immaculé (Collison & Poe, 2013; Rodrigues et al., 2015). Ces sites ont même droit à des statuts spéciaux de protection afin de préserver leur ciel sombre et donc avec la voie lactée particulièrement bien visible (Collison & Poe, 2013; Rodrigues et al., 2015).

Les exemples des effets du skyglow sur les animaux sont nombreux. Par exemple, des scientifiques qui étudiaient des grenouilles se sont rendu compte que ces dernières arrêtaient de se reproduire les soirs de match de football car le stade à proximité de l'enclos des grenouilles augmentait le skyglow (Buchanan, 1993). Mais un des points sur lequel le skyglow joue de manière importante est l'orientation des animaux nocturnes. Nous pouvons noter la perturbation des insectes utilisant la lumière polarisée naturelle nocturne (Dacke et al., 2013) et des insectes utilisant le ciel étoilé ou la lune pour s'orienter (Durrant et al., 2018; Kyba & Hölker, 2013). Comme nous l'avons vu plus haut, la noctuelle fiancée (*Noctua pronuba*) utilise l'étoile polaire tandis que le papillon de nuit bogong (*Agrotis infusa*) en utiliserait plusieurs (dont la lune) pour leurs orientations respectives. De plus, beaucoup de papillons de nuit utilisent la lune pour « calculer un certain angle » et s'orientent avec cette dernière. N'oublions pas non plus que beaucoup d'oiseaux, notamment migrateurs, utilisent aussi le ciel étoilé (Cochran et al., 2004). Le ciel étant plus lumineux à cause du skyglow, tous ces différents corps célestes sont moins visibles perturbant ainsi l'orientation de ces animaux (Falchi et al., 2016; Gaston et al., 2013). Les populations d'insectes en hautes latitudes seraient cependant moins sensibles au skyglow car les individus auraient évolué pour s'adapter aux nuits plus claires lors des printemps et automnes de ces mêmes latitudes (Merckx et al., 2023).

Néanmoins, dans une optique d'objectivité, il est important de préciser le skyglow pourrait avoir des effets positifs comme pour les insectes qui utilisent le contraste entre les branches et feuilles avec le ciel plus clair de la nuit pour naviguer dans la canopée. Si le ciel est plus lumineux, ce contraste sera amélioré et facilitera donc les organismes (Owens & Lewis, 2018). Par contre, si les arbres sont éclairés par-dessous (des spots lumineux et pas du skyglow donc) pour des raisons esthétiques, alors le contraste se verra diminué voire inversé et cela sera donc détrimentaire pour ces insectes (Owens & Lewis, 2018).

Lumière inconstante

La dernière sorte de pollution lumineuse que je vais détailler provient des sources de lumières inconstantes. Dans le cadre de ce mémoire, sont décrites comme inconstante toutes les sources de lumières qui, contrairement aux sources de pollution lumineuse fixe, ne restent pas constamment allumées durant la nuit. Cela concerne surtout les phares de voitures sur des routes non éclairées ainsi que les lampadaires intelligents. En effet, les voitures passent avec leurs phares éclairant une grande zone qui était dans le noir et une fois la voiture passée et la zone éclairée, la zone replonge dans l'obscurité nocturne normale. Le terme « lampadaire intelligent » correspond lui aux lampadaires qui s'allument que quand il s'avère nécessaire, souvent par la détection de mouvement d'un véhicule ou d'un piéton. Tout comme les voitures, cela provoque un flash lumineux dans une zone qui était sombre et qui repassera sombre peu de temps après.

La différence principale (notamment au niveau des conséquences) entre la pollution lumineuse par lumière inconstante et la pollution lumineuse fixe sont les aspects non continus ou de flashes. Une pollution par lumière fixe pourrait par exemple être considérée comme une pollution

lumineuse par lumière inconstante quand un arbre pousse à côté d'un lampadaire et qu'il y a du vent. Le va-et-vient des feuilles devant la lampe cause alors au niveau du sol des alternances très rapides entre l'obscurité et la lumière vive du lampadaire, un peu comme un lampadaire intelligent ou des phares de voitures (B. J. Baker & Richardson, 2006; Underhill & Höbel, 2018). Cependant, des changements si rapides dans la luminosité, des flashes, demandent aux yeux des animaux un certain temps d'adaptation, similaire à l'homme en allumant la lumière après une nuit dans le noir (B. J. Baker & Richardson, 2006; Underhill & Höbel, 2018). Ce temps d'adaptation peut être très long comme chez la grenouille où il pourrait atteindre plusieurs heures avant que l'œil ne soit à nouveau adapté au noir (car la luminosité naturelle diminue normalement au fur et à mesure du coucher du soleil) (B. J. Baker & Richardson, 2006; Underhill & Höbel, 2018). Cela a des conséquences importantes, par exemple, il a été démontré que les flashes lumineux diminuent significativement les performances d'alimentation ou de chants de la grenouille *Hyla chrysoscelis* (B. J. Baker & Richardson, 2006).

Les flashes induisent aussi des réponses phénologiques. Pour rappel, certaines plantes sont dites de « jours courts » ou de « jours longs » car elles détectent la durée de la nuit et, en fonction de cette dernière, fleurissent ou non (Vepsäläinen, 1974). Si une longue nuit est interrompue en son milieu par un flash lumineux, alors la plante agira comme si elle était en courte nuit et donc « jour long ». Nous savons également que les lumières pulsées sont répulsives pour les organismes avec peu d'évidence d'adaptations à ces dernières (Nemeth & Anderson, 1992). Au niveau des papillons de nuit, nous savons que les adultes deviennent généralement actifs quand la lumière descend en dessous de 1 lux (Dreisig, 1980; Persson, 1971) et que les papillons de nuit qui volent et passent dans une lumière (dans le cas de pollution lumineuse fixe) deviennent inactifs, et ce, par moment durant tout le reste de la nuit (Rich & Longcore, 2006). On peut donc aisément imaginer que de fréquentes lumières intenses perturbent également l'activité des papillons de nuit.

Les pollutions lumineuses chez les papillons de nuit et leurs développements.

Nous avons décidé, dans le cadre de ce mémoire, de travailler sur les impacts des différentes pollutions lumineuses sur le cycle de développement ainsi que le comportement de vol à la lumière des papillons de nuit.

Toutes les adaptations à la vie nocturne que nous avons vues au début de notre introduction ont facilité la vie nocturne jusqu'au point où aujourd'hui 30% des vertébrés et 60% des invertébrés sont nocturnes (Hölker, Moss, et al., 2010; Kyba et al., 2017) dont 75% à 85% des lépidoptères (Kawahara et al., 2018). Cependant, ces insectes sont en très gros déclin autant en abondance qu'en diversité d'espèces (Boyes et al., 2021a; Cieraad et al., 2022; Hallmann et al., 2017; Macgregor et al., 2015; Owens et al., 2020; van Langevelde et al., 2017, 2018). Par exemple, 34% des macro-papillons de nuit de Grande-Bretagne ont significativement décliné entre 1971 et 2016 (*Atlas of Britain & Ireland's Larger Moths*, 2019). Le nombre de raisons de disparition des papillons de nuit est très élevé comme la fragmentation et perte des habitats (Fox, 2013; Fox et al., 2014; Knop et al., 2017; van Langevelde et al., 2018), le changement climatique (Conrad et al., 2002; Fox et al., 2014; Knop et al., 2017; van Langevelde et al., 2018), l'usage de pesticides de manières intensives (Fox et al., 2014; Knop et al., 2017; van Langevelde et al., 2018), la pollution industrielle (van Langevelde et al., 2018), ou encore les espèces invasives et les maladies (Knop et al., 2017). Mais la pollution lumineuse est de plus en plus pointée du

doigt comme une des causes principales du déclin des papillons de nuit (Cieraad et al., 2022; Davies & Smyth, 2018; Hölker, Wolter, et al., 2010; Owens et al., 2020; Owens & Lewis, 2018; van Langevelde et al., 2017, 2018). En effet, les impacts de la pollution lumineuse sur les papillons de nuit sont très nombreux et touchent tout leur cycle de vie (Fig. 2) (Boyes et al., 2021a). Nous savons que les insectes sous pollution lumineuse constante mangent moins qu'en temps normaux (Grenis & Murphy, 2019; van Langevelde et al., 2017). Par exemple, les chenilles sous pollution lumineuse sont de manière générale, pour un même temps de développement, moins lourdes que leurs équivalentes sous contrôle sombre (Grenis & Murphy, 2019; Ismail et al., 1988) (la littérature n'est toutefois pas unanime. Voir Merckx et al. 2023). Ce qui veut dire que les papillons de nuit sous pollution lumineuse, pour atteindre le même poids, devraient passer plus de temps en larve malgré le fait que cela soit le stade le plus dangereux (Grenis & Murphy, 2019; Haynes et al., 2023). Et ce, même sans compter l'augmentation de prédation liée au fait d'être sous pollution lumineuse (Deutsch & Kaiser, 2023;

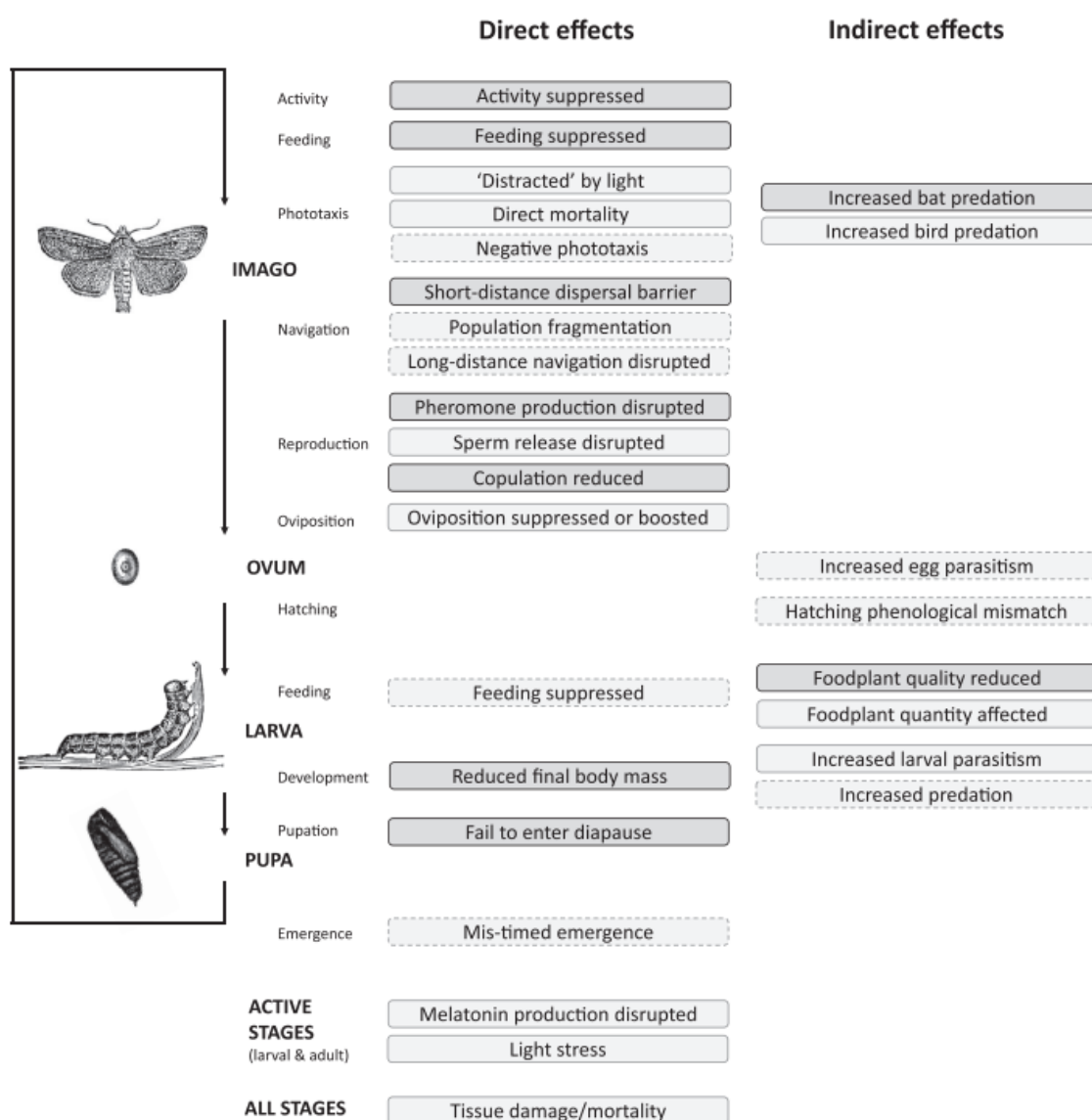


Figure 2 : Impacts directs et indirects de la pollution lumineuse sur le cycle de vie des papillons de nuit. Au plus une boîte est foncée, au plus il y a d'évidences de cet impact (Boyes et al., 2021a).

Grenis & Murphy, 2019). De plus, la pollution lumineuse augmente d'elle-même la mortalité larvaire (Ismail et al., 1988). Cependant, selon plusieurs chercheurs, la lumière artificielle nocturne accélérerait le passage aux différents stades de vie dont surtout l'entrée ou la sortie de diapause (Merckx et al., 2023; van Geffen et al., 2014) ou de chrysalide (Cymborowski & Giebułtowicz, 1976; Péter et al., 2020; van Geffen et al., 2014). Pourtant, cette prise de masse larvaire est très importante dans le nombre de ressources allouables à la reproduction comme la recherche d'un partenaire ou le nombre d'œufs pondables (Grenis & Murphy, 2019). D'ailleurs, le nombre d'œufs pondus par papillon serait diminué en présence de pollution lumineuse (Ismail et al., 1988). Il est important de préciser que le paragraphe ci-dessus ainsi que tous les problèmes déjà abordés plus haut ne constituent pas une liste exhaustive des impacts de la pollution lumineuse sur les papillons de nuit.

Cependant, en plus de représenter une partie non-négligeable de la biodiversité, les papillons de nuit sont d'une très grande importance sur plusieurs points. Premièrement, ils contribuent grandement au service écosystémique de la pollinisation (Hölker, Wolter, et al., 2010; Knop et al., 2017; Macgregor et al., 2017; Singhal et al., 2021; van Langevelde et al., 2018) qui représente environ 361 milliards de dollars (Knop et al., 2017). 88% des angiospermes dépendraient de la pollinisation (Knop et al., 2017) et les papillons de nuit sont les 2^{ème} pollinisateurs les plus importants après les abeilles (Kato & Atsushi, 2004; Ramirez, 2004). Le palmier à huile (*Elaeis guineensis*) (Syed, 1979), d'importance économique majeur, et un gymnosperme (*Gnetum gnemon*) (Kato & Atsushi, 2004) font partie des plus de 75 familles et 300 espèces de plantes pollinisées par les papillons de nuit dont certaines exclusivement par ces derniers (Macgregor et al., 2015). Même les plantes généralistes pouvant être pollinisées autant le jour que la nuit voient un effet significatif d'ALAN sur leur pollinisation, indiquant que la pollinisation de nuit et celle de jour ont des effets complémentaires (Knop et al., 2017). Des effets de la détérioration de la qualité de vie des papillons de nuit pourraient donc être transmis, via la plante, aux pollinisateurs de jour (Knop et al., 2017). Deuxièmement, les papillons de nuit, en plus de servir à la pollinisation de fleurs, servent également de proies à de nombreux prédateurs incluant d'autres insectes (Macgregor et al., 2015), reptiles (Macgregor et al., 2015), amphibiens (González-Bernal et al., 2016; Macgregor et al., 2015) et oiseaux (Macgregor et al., 2015; van Langevelde et al., 2017, 2018) mais surtout les chauves-souris (Altermatt & Ebert, 2016; Blake et al., 1994; Macgregor et al., 2015; Rydell, 1992) et les araignées (Altermatt & Ebert, 2016; Macgregor et al., 2015). Les papillons de nuit sont fort proches de la base de beaucoup de réseaux écologiques et, dans le milieu scientifique, la peur d'un gros effet cascade est importante (Boyes et al., 2021a; Knop et al., 2017; Macgregor et al., 2015; van Langevelde et al., 2018). Même si les papillons de nuit ne s'éteignent pas à cause d'ALAN, une chute drastique de la population des papillons de nuit créerait une perturbation importante dans le ratio proie/prédateur augmentant les risques d'extinctions de l'un des deux (Kehoe et al., 2022; Sordello, 2017).

Bien que le nombre de publication sur la pollution lumineuse ne cesse d'augmenter (Davies & Smyth, 2018), les scientifiques impliqués dans la recherche sur la pollution lumineuse sont nombreux à promouvoir une augmentation du nombre d'études sur le sujet (Boyes et al., 2021a; Cieraad et al., 2022; Davies & Smyth, 2018; Durrant et al., 2018; Sordello, 2017). Même certaines régions de France demandent plus d'études sur la pollution lumineuse afin de l'insérer au mieux dans leur programme de « trame verte et bleue » (Sordello, 2017). De plus, les recherches, quand bien même effectuées sur les papillons de nuit, se concentrent souvent sur les adultes et non les larves (chenilles) (Péter et al., 2020).

Qui plus est, la majorité des études s'intéressant à la pollution lumineuse se concentre sur l'éclairage direct (la pollution lumineuse fixe) (Gaston, Visser, et al., 2015). Selon Kevin J. Gaston, et Lauren A. Holt, malgré le fait que des études se sont penchées sur des sources de pollution lumineuse particulières telles que les tours de communication ou les phares (maritimes) (Jones & Francis, 2003; Longcore et al., 2012), les sources mobiles de pollution lumineuse (les phares de voitures surtout) sont restées virtuellement ignorées. C'est également le cas pour les lampadaires intelligents ou autres sources de pollution lumineuse inconstante. J'ai en effet pu constater ce manque d'études sur le sujet de la pollution lumineuse inconstante dans ma recherche bibliographique. Incorporer ce type de pollution lumineuse à notre expérience peut donc apporter beaucoup au domaine de la pollution lumineuse. Cependant, il est important de préciser que l'expérience réalisée dans le cadre de ce mémoire étudiait la pollution lumineuse fixe d'un lampadaire, la pollution lumineuse inconstante d'un lampadaire intelligent ainsi que le skyglow. La pollution lumineuse inconstante des phares de voitures diverge sur plusieurs points non-négligeables de celle d'un lampadaire intelligent. Des tels différences sont l'intensité lumineuse des phares par rapport aux lampadaires ainsi que l'horizontalité des phares (Gaston & Holt, 2018). C'est donc dans un souci de comparaison avec la simulation d'un lampadaire « classique » que nous avons choisis d'étudier l'effet des lampadaires intelligents et non ceux de phares de voitures (afin d'isoler l'effet de l'inconstance de la lumière nocturne). Néanmoins, nous encourageons évidemment fortement toutes études portant sur la pollution lumineuse des phares de voitures.

Enfin, les papillons de nuit ont également été choisis dans le cadre de ce mémoire car ils sont bien connus (Boyes et al., 2021a) et souvent utilisés dans le cadre d'études sur la pollution lumineuse générale (Boyes et al., 2021a) notamment, car ils sont fort impactés par cette dernière (van Langevelde et al., 2017). Cependant, les stades autres que les adultes n'ont que peu été étudiés (Boyes et al., 2021b), justifiant notre intérêt à étudier tout le cycle de développement. Dans un souci d'objectivité, les papillons de nuit ne sont pas non plus l'espèce parfaite à étudier surtout d'un point de vue pratique. Par exemple, ils ont une vitesse de cycle de développement moyenne (ni aussi rapide que les pucerons ni aussi lents que les oiseaux par exemple).

Buts et Objectifs

L'expérience que nous avons menée est donc consacrée aux impacts des différentes pollutions lumineuses, sur le cycle de développement ainsi que le comportement de vol à la lumière chez de deux espèces de papillons de nuit : *Ochropleura plecta* ainsi que *Agrotis exclamationis* (uniquement la deuxième espèce a été testée au niveau comportemental). Nos hypothèses sur les résultats de cette expérience sont les suivantes :

Concernant le cycle de vie des chenilles et au vu de la littérature sur le sujet, nous supposons que la pollution lumineuse fixe aura des effets négatifs sur le taux de croissance et le poids aux différents stades de développement (Grenis & Murphy, 2019; van Langevelde et al., 2017). De plus, nous nous attendons également à une entrée dans les différents stades de développement plus rapide pour les papillons soumis à cette pollution lumineuse fixe (Cymborowski & Giebułtowicz, 1976; Péter et al., 2020; van Geffen et al., 2014) ainsi qu'un taux de mortalité plus élevé (Ismail et al., 1988). (Le tout comparé au traitement contrôle dans le noir)

Pour la pollution lumineuse inconstante, la littérature ne donne pas d'indications réelles sur les résultats auxquels nous pourrions nous attendre. Il est possible que les papillons de nuit se basent aussi bien sur la présence de lumière pendant la nuit (affectée par le traitement) que sur la présence d'obscurité pendant la nuit (non affectée par le traitement). Vu que la pollution lumineuse fixe a beaucoup d'effets détritmentaires par le fait qu'elle perturbe la reconnaissance du cycle jour-nuit des animaux, nous pouvons hypothétiser que la pollution lumineuse inconstante devrait avoir les mêmes effets mais de manière moins prononcée. Le poids aux différents stades de développement, le taux de croissance, le temps pour atteindre chaque stade de développement et le taux de mortalité devraient être situés entre le contrôle et la pollution lumineuse fixe.

Nous hypothétisons également que si la mère des papillons de nuit étudiés provient d'une population avec beaucoup de skyglow, les impacts des pollutions lumineuses seront amoindris par rapport aux papillons dont la mère provient de population avec peu de skyglow. En effet, il est possible que les papillons soumis à un skyglow important aient évolué et soient moins sensible de manière générale à la luminosité (Altermatt & Ebert, 2016).

Concernant le comportement de vol à la lumière, nous supposons voir apparaître un gradient d'attraction à la lumière inverse à l'exposition lumineuse des papillons de nuit : les papillons subissant la pollution lumineuse fixe devrait être moins attirés par la lumière que ceux qui ont subis la pollution lumineuse inconstante qui eux même devrait être moins attiré par la lumière que le traitement contrôle (dans le noir). En effet, nous pourrions voir un effet d'habituation des individus exposés à la lumière.

Matériel et Méthodes

Espèces d'étude

Lors de nos expériences, nous avons décidé d'utiliser les espèces *Agrotis exclamationis* (Linnaeus, 1758, Lepidoptera : Noctuidae) et *Ochropleura plecta* (Linnaeus, 1761, Lepidoptera : Noctuidae) notamment car ce sont deux papillons de nuit qui se sont souvent retrouvés dans nos pièges lumineux (voir plus loin).

A. exclamationis, également appelée la noctuelle point d'exclamation en français dû aux marques sur ses ailes, est un papillon de nuit très commun en Belgique (De Prins & Steeman, 2023a). Comme nous pouvons le voir sur la figure 3, c'est un papillon de nuit de taille modérée avec une envergure de 30 à 40 mm (*Butterfly Conservation - Heart and Dart*, n.d.; De Prins & Steeman, 2023a). Il est visible en Belgique en vol de fin avril à fin octobre (De Prins & Steeman, 2023a) et est actif la nuit (Barker, 2022). Ses sources principales de nourritures sont le nectar, les fruits et la sève (Barker, 2022). Il est également attiré par la lumière (Barker, 2022; *Butterfly Conservation - Heart and Dart*, n.d.; De Prins & Steeman, 2023a) et les solutions sucrées (De Prins & Steeman, 2023a). Les chenilles sont quant à elles présentes de Juillet à Octobre (*Butterfly Conservation - Heart and Dart*, n.d.) et passent l'hiver



Figure 3 : Photo de *Agrotis exclamationis*. Belgium, AN, Berchem, 1971-05-27, Male. © De Prins Guido. G. & W. De Prins, coll. RBINS

en chrysalides enterrées (Barker, 2022; *Butterfly Conservation - Heart and Dart*, n.d.). Cependant, c'est également un papillon reconnu comme une peste (Baranek et al., 2023) pour les dégâts qu'il cause sur beaucoup de plantes cultivées (Baranek et al., 2023).

O. plecta, le cordon blanc en français, possède beaucoup de caractéristiques en commun avec *A. exclamationis*. Par exemple, les adultes ont plus ou moins la même taille avec une envergure d'une trentaine de millimètres (Fig. 4) (*Butterfly Conservation - Flame Shoulder*, n.d.; De Prins & Steeman, 2023b) et sont également attirés par les solutions sucrées et la lumière (*Butterfly Conservation - Flame Shoulder*, n.d.; De Prins & Steeman, 2023b). De même, il est naturellement bien répandu en Belgique (De Prins & Steeman, 2023b) et est visible en vol de mi-avril à potentiellement fin octobre (De Prins & Steeman, 2023b). Après quoi ils entrent en diapauses enterrées pour passer l'hiver (*Butterfly Conservation - Flame Shoulder*, n.d.; De Prins & Steeman, 2023b). Au niveau de la nourriture, *O. plecta* est assez généraliste et, tout comme *A. exclamationis*, et se nourrit à l'état larvaire notamment de plantes du genre *Plantago* (*Butterfly Conservation - Flame Shoulder*, n.d.; De Prins & Steeman, 2023b).



Figure 4 : Photo de *Ochroleuca plecta*. Belgium, AN, Ekeren, O. Landen, 1991-04-21, Male. © De Prins Guido. G. De Prins, coll. RBINS.

Capture des papillons et début de l'élevage

Pour notre expérience, nous avons capturé des papillons sauvages à l'aide d'un piège de Skinner (avec des lampes de types HPL 125W, Philips) équipé d'une lampe à vapeur de mercure durant le mois de mai et début juillet. Les captures ont été réalisées dans des jardins du Brabant où il y a un skyglow important ainsi que dans des jardins du Luxembourg avec un skyglow moindre (*Light Pollution Map*, 2023) (voir la figure 28 en annexe pour plus de détails). Aucun jardin ne possédait de lampadaires dans les 50 mètres. Durant la même nuit, des volontaires ont également attrapé des papillons de nuits via un seau à LED avec une bande de LED UV (400 nm) inspiré du design de



Figure 5 : Photo d'un seau à LED de la Dutch Butterfly Conservation.

la « Dutch Butterfly Conservation » (Fig. 5). Les femelles des espèces cibles ont été isolées et mises dans des boîtes plastiques avec une feuille de papier absorbant ainsi qu'une solution d'eau et de miel (90% et 10% respectivement) mise dans un Eppendorf. Les boîtes pour toutes les expériences sont des carrés de plus ou moins 10x10 cm pour une hauteur de 5 cm. Les boîtes étaient percées en des multiples points pour permettre la respiration. Ces boîtes étaient mises dans les chambres climatisées (Sanyo modèle MIR-554) en attendant la ponte des femelles. Les paramètres de ces chambres climatisées étaient : une photopériode de 18:6, température de jour de 23°C et température nocturne de 18°C. Les chenilles sortantes des œufs étaient gardées dans les chambres climatisées jusqu'à leur troisième stade de développement. Après, ils étaient mis dans l'élevage expérimental.

Élevage expérimental

L'élevage expérimental se déroulait à l'insectarium de l'UCLouvain, dans les salles numérotées 3 et 4. La température était réglée sur 23°C (5h – 23h) le jour et 18°C la nuit (23h – 5h). Chaque individu était placé dans une boîte plastique individuelle avec un bout de papier absorbant placé au fond de la boîte également. Sur le couvercle de la boîte plastique, le code de l'individu était noté. Par exemple 4AE-26-S2 pour l'individu dans la salle 4, de l'espèce *Agrotis exclamationis* (d'initiales AE), venant de la famille 26, étant dans le traitement de type « smart light » et le 2^{ème} réplica.

Les boîtes étaient placées sur des tables et réparties en 3 traitements différents. Un traitement *Dark* (D) servant de contrôle où aucune lampe n'était allumée représentant la nuit sans lampadaire. Un traitement *Smart light* (S) où une lampe s'allumait et s'éteignait de façon programmée afin d'imiter les lampadaires intelligents (le fonctionnement détaillé est présent

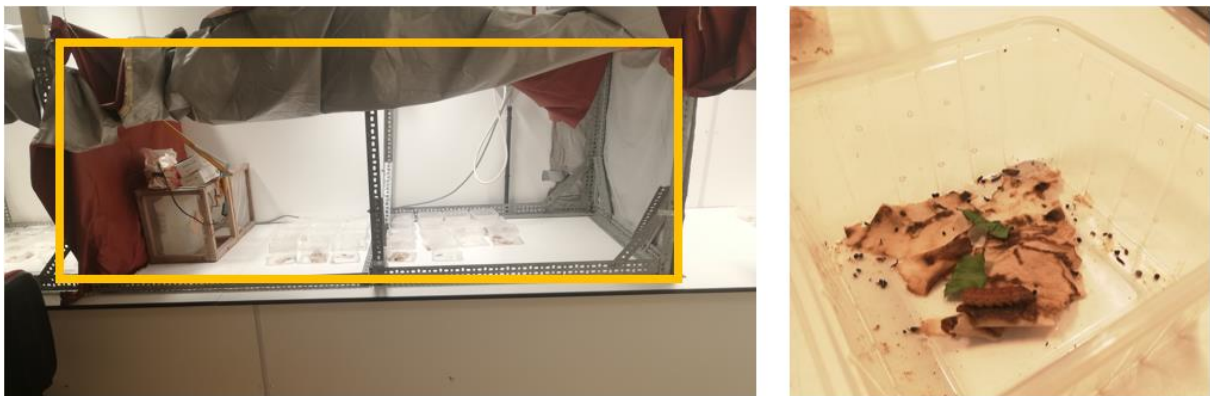


Figure 6 : Visualisation des traitements. À gauche nous voyons une partie de la salle 3 où nous voyons distinctement les murs et les baches servant de séparation. La bâche repliée sur elle-même ne l'était que lorsqu'une personne travaillait sur les individus. Aussi non elle était rabaisée. Le cadre jaune représente une section. On distingue sur la table les boîtes plastiques contenant les individus. À droite nous voyons une boîte contenant 2 morceaux de feuilles ainsi qu'une chenille.

dans les documents annexes au mémoire). Et enfin, le dernier traitement était *Fixed light* (F) qui était une lampe constamment allumée durant la nuit, représentant un lampadaire classique. Les bulbes de ces traitements, ainsi que celui utilisé lors de l'expérience de vol à la lumière, avaient les caractéristiques suivantes : LED, lumière blanche chaude, 2700 K, Phillips (Référence : 8718699764258). Les traitements étaient séparés par des baches mises à la vertical (Fig. 6) sur 2 ou 3 cotés, les autres côtés du traitement étant des murs. Aucun « plafond » propre au traitement n'a été placé afin qu'il y ait toujours un minimum de lumière dans tous les traitements. En effet, la nuit naturelle sans lampadaire n'est pas totalement noire non plus (Longcore & Rich, 2004). Mais ce sont donc les luminaires « basiques » de l'insectarium qui éclairait les différents traitements pendant le jour. Aucune lumière naturelle ne savait rentrer dans la pièce. Les 3 traitements étaient présents dans la salle 3 ainsi que dans la salle 4. Dans la suite de ce texte, je ferai référence au terme « section » pour parler de l'ensemble des individus sur la même table, séparés par les mêmes baches et murs (Fig. 6). Une section est donc la combinaison entre le traitement et la salle dans laquelle ce dernier se trouve. Il y a 6 sections au total (3S, 3F, 3D, 4S, 4F, et 4D). Afin de contrôler ultérieurement pour la température et l'humidité relative, un data logger (enregistrant ces mêmes paramètres toutes les 15 minutes) a été placé dans chacune des sections en étant traité de la même manière que s'il s'agissait d'un individu expérimental. Les data loggers prenaient des données sur la température et l'humidité

relative toutes les 15 minutes durant l'entièreté de l'élevage expérimental. Nous avons remarqué tard dans l'expérience qu'il y avait un problème technique avec le traitement smart de la pièce 3, la lampe ne s'allumait jamais de la nuit. N'ayant aucune preuve quant à l'apparition de ce problème, nous supposons qu'il était présent dès le début de l'expérience. Cela nous a conduits à créer un nouveau traitement : *Mixt-smart*, concernant les individus de l'espèce *A. exclamationis* qui ont été dans un traitement *Dark* une partie de leur cycle de développement (la totalité pour les premiers individus à être devenu adulte) et dans un traitement *Smart* durant la fin de leur cycle de développement. De plus, les individus *O. plecta* étant dans la même section, ayant eu l'expérience plutôt, devraient être déclaré comme ayant été dans un traitement *Dark*. Les individus étaient (initialement) répartis de manière parfaitement égale entre les 6 sections. Cependant, le sexe étant déterminé plus tard dans l'expérience, la répartition des sexes peut être considérée comme aléatoire et non parfaitement égale dans les différents traitements. Il y avait entre 2 et 4 individus par famille (même mère) par section pour un nombre total d'environ 450 individus (200 *O. plecta* et 252 *A. exclamationis*).

Les individus étaient nourris tous les jours avec du plantain lancéolé (*Plantago lanceolata*) récolté sauvagement. Le plantain récolté, s'il n'avait pas été entièrement utilisé le jour même, était conservé pour une utilisation future dans un contenant plastique fermé et humidifié (avec du papier absorbant humide au fond de la boîte). En moyenne, le plantain était utilisé endéans les 50 h après sa récolte. Les individus recevaient un ou des morceaux de feuilles de plantain préalablement découpé pour faire des morceaux d'environ (surface jugée à l'œil lors de la découpe) 3,5 cm². Les nouveaux individus dans les traitements recevaient un morceau de feuille. Chaque jour, un code à deux chiffres était donné par individus en fonction de la quantité mangée par rapport à la veille (premier chiffre) et de la quantité donnée (deuxième chiffre). La quantité donnée était juste le nombre de morceaux de feuilles donné et la quantité mangée était décrite comme ceci :

Code de la quantité mangée	Attribution si	Effet
0	Rien n'a été mangé.	Diminution de 2 morceaux pour le nourrissage.
1	Quelques bouchées ont été mangées seulement (ou environ moins de 10% de la quantité de la veille).	Diminution d'un morceau pour le nourrissage.
2	Une certaine quantité a été mangée (entre 10% et 95% de la quantité de la veille)	Nourrissage identique.
3	La totalité (ou environ plus de 95%) a été mangée.	Augmentation d'un morceau pour le nourrissage.

Ces règles étaient respectées sauf dans certains cas où notre expérience avec les chenilles nous suggérait une légère transgression de ces règles. Par exemple, les individus allant bientôt entrer en chrysalide s'arrêtaient tout d'un coup de manger, le nombre de feuilles données était alors diminué de plus de deux morceaux. Nous avons également rajouté à posteriori des colonnes reprenant la quantité de nourriture mangée chaque jour pour chaque individu. Cette quantité n'a jamais été mesurée directement (cela aurait trop chronophage) mais elle a été estimée par après via les données de nourrissages. Le principe était de multiplier le nombre de morceaux de feuilles données la veille par une certaine valeur en fonction du code de la quantité mangée.

- 0 fait multiplier le nombre de morceaux de feuilles données la veille par 0
- 1 fait multiplier le nombre de morceaux de feuilles données la veille par 0,1

- 2 fait multiplier le nombre de morceaux de feuilles données la veille par 0,6
- 3 fait multiplier le nombre de morceaux de feuilles données la veille par 1

Les feuilles ainsi que les boîtes (et le papier absorbant) étaient humidifiées à l'aide d'un vaporisateur (une à deux pressions faites par jour). Selon nos estimations, la quantité de liquide mise devait être environ égale à 1 ml par jour. Après le nourrissage, les individus étaient replacés au sien d'une section de manière aléatoire.

Lors du passage au stade de chrysalide, les boîtes n'étaient plus qu'humidifiées. Nous pouvions également, dès lors, identifier le sexe des individus. Lors du passage au stade adulte, un mélange de 90% d'eau et 10% de miel liquide était rajouté dans un Eppendorf (mis à la verticale avec du papier collant) ou dans un coton lorsque nous avions plus d'Eppendorfs. La boîte était encore humidifiée quotidiennement et l'Eppendorf (re)rempli lorsque son niveau avait diminué de manière significative (quand il manquait environ 10% de volume ou plus). De plus, durant toute la durée de l'expérience, les boîtes étaient parfois nettoyées (et le papier absorbant changé) quand la quantité d'excréments devenait importante.

Il est important de préciser que les données récoltées pour ce mémoire s'étalent du 27 juin 2023 au 10 novembre 2023 mais que certains individus étaient encore en traitement à ce moment-là. Cela concerne une vingtaine d'individus (si on néglige ceux en diapause) sur les 450 expérimentés et uniquement l'espèce *A. exclamationis*. Pour information, ces individus ainsi que le jeu de donnée complet seront certainement utilisés dans le doctorat de monsieur Van de Schoot.

Mesure du poids

Avant le nourrissage (pour éviter une prise de poids pendant le nourrissage), certains individus étaient pesés. Les individus de l'espèce *O. plecta*, première espèce à avoir participé à l'expérience, étaient pesés à intervalle régulier de 7 jours. Cependant, au vu de la vitesse de développement de cette espèce, nous avons adapté le protocole expérimental pour *A. exclamationis* et fait passer l'intervalle régulier de 7 jours à 5 jours. Les individus étaient également pesés le jour où ils entraient dans l'élevage expérimental. De plus, les chrysalides étaient pesées 4 jours après être apparues afin d'être sûr de leur avoir laissé le temps de sécher et les adultes le premier jour où l'on les voyait. La balance était précise au millionième de gramme ($\pm 0,000001$ gr).

Mesure des mues et stades de vie

Pendant le nourrissage, nous inspections les boîtes pour trouver de potentielle mues. Un individu était déclaré « ayant mué » quand la capsule de la tête était retrouvée. La date à laquelle cette mue était retrouvée était alors notée. Malheureusement, il faut savoir qu'au vu de la taille des capsules de têtes (Fig. 7), certaines mues ont certainement été ratées ou notée quelques jours après avoir été produites. Cependant, comme l'effort de recherche était identique au sein de chaque section, nous pouvons émettre l'hypothèse que si une différence au niveau des mues est mise en évidence, cela devrait être le résultat des traitements et non de la visibilité des capsules de têtes.

La date de passage au stade de chrysalide ou d'adulte ou mort a également été notée de la même manière. Il est important de préciser que toutes ces dates sont le jour où les mues ou passages



Figure 7 : Taille d'une capsule de tête par rapport à un index.

ont été vues. La véritable mue ou passage ont donc certainement eut lieu la veille ou pendant la nuit précédente (surtout que la majorité des nourrissages étaient réalisés le matin). Nous avons également considéré que les chrysalides qui ont très largement dépassé (plus du double) le temps intra-chrysalide moyen et qui n'ont jamais émergées, doivent être entrées en diapause. Au niveau des papillons adultes, *O. plecta* n'a pas subi d'expériences mais sa mortalité a été enregistrée. Les individus *A. exclamationis* n'ont quant à eux été maintenu en vie que 4 jours avant d'être déposé au congélateur pour des mesures ultérieures non décrite ou présentes dans ce mémoire. Cependant, avant d'être mis dans le congélateur, ils ont été utilisés dans l'expérience de vol vers la lumière.

Expérience de vol à la lumière

Ces expériences se déroulaient dans une pièce isolée des lumières extérieures. Il y avait une cage de vol dans le noir avec des caméras infrarouges (Tapo C200, TP-Link) au sol pour suivre les papillons et une lampe allumée mise en hauteur soit à une des extrémités de la cage soit à l'autre (Fig. 8). La cage faisait environ 6 m de long et le diamètre du demi-cercle faisait environ 1m50. Le principe était de déposer une boîte avec un papillon sur le sol et d'ouvrir la boîte. Il y était enregistré le temps mis par le papillon pour faire son premier mouvement ainsi que le temps qu'il mettait à voler jusqu'à la lumière. Si c'était le cas, 5 minutes étaient attendues (le papillon devait alors rester dans la zone éclairée) pour confirmer ce vol jusqu'à la lumière avant

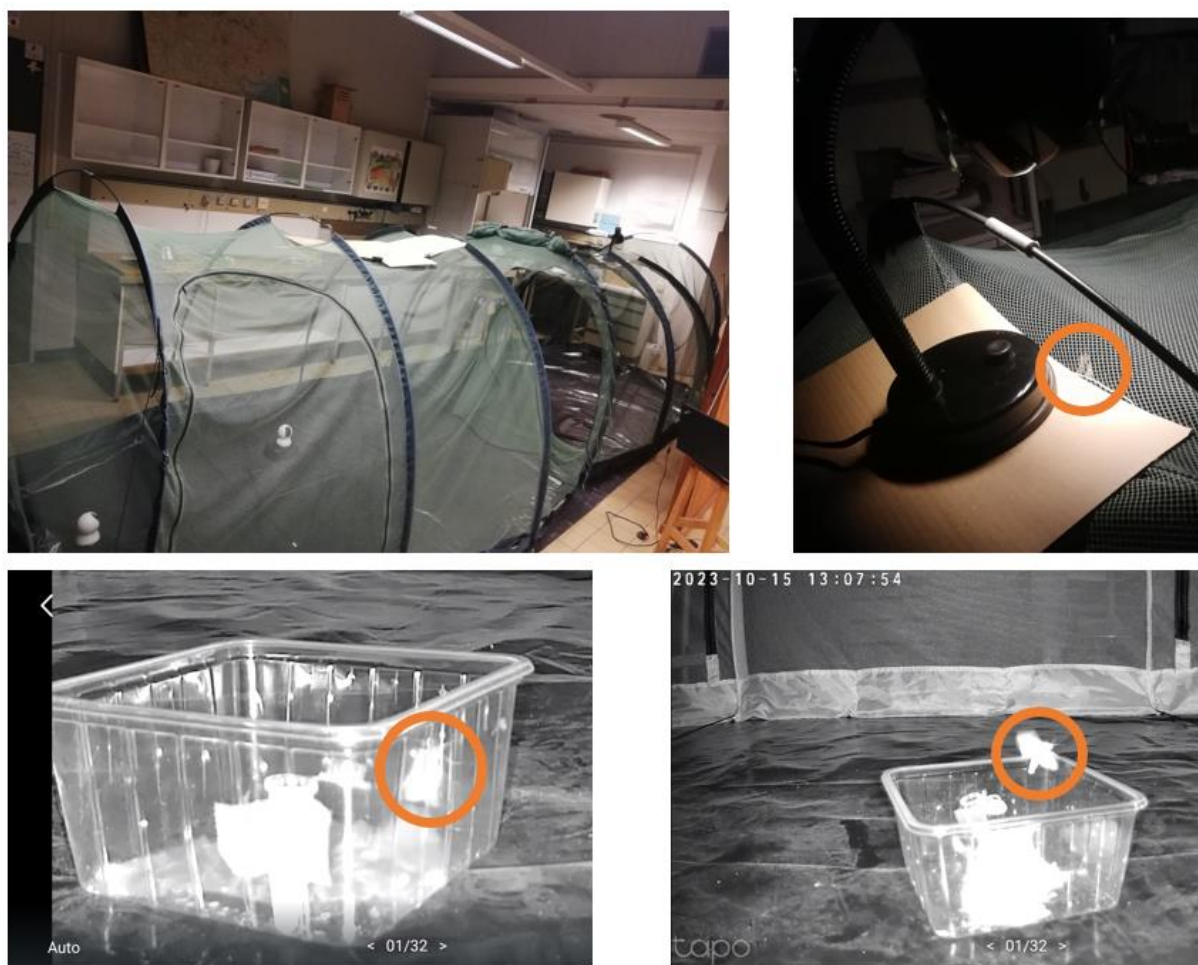


Figure 8 : Photos de l'expérience de vol. En haut à gauche nous voyons la cage de vol avec 2 caméras au sol à l'intérieur et la lampe de l'autre côté. Sur les autres photos des cercles orange ont été dessinés autour des papillons. Sur celle en haut à droite on voit une photo réalisée après un comportement de vol à la lumière. Les deux photos du bas ont été prises par les caméras infrarouge et sur celle de droite le papillon s'apprêtait à décoller.

de clôturer l'expérience. Si le papillon n'avait pas volé jusqu'à la lumière, alors l'expérience était clôturée au bout de 30 minutes. On notait également la position finale du papillon. Les mâles étaient expérimentés en premier (avant les femelles) afin d'éviter que les femelles laissent des phéromones jouant sur l'expérience de vol des mâles. L'expérience devait se dérouler initialement le jour, cependant beaucoup de papillons ne volaient pas du tout dans ces conditions-là. On a donc décidé de faire également des expériences de nuit. La distance entre l'insectarium et la salle où se déroulaient les expériences de vol était importante (un peu plus de 3 minutes de marche) et nous a donc obligés à faire une « pause » une fois arrivé dans la salle de vol dans le but de mesurer l'activité nocturne et non l'activité « après un trajet ». La « pause » était une trentaine de minutes dans l'obscurité avant de commencer à libérer le papillon dans la cage de vol. Ces résultats étaient beaucoup plus encourageants (plus de vols). Nous avons aussi fait une expérience intermédiaire qui était faite le jour mais les papillons restaient environ 30 minutes dans l'obscurité avant de faire l'expérience. Nous avons donc au final trois timings d'expérience, le jour (*Day* dans le jeu de données), la nuit (*Night* dans le jeu de données) et un timing mixte (*Mix* dans le jeu de données). La lampe était régulièrement changée de côté (Nord ou Sud de la cage) afin d'éviter des biais si un côté de la cage était « plus intéressant ». La vitesse de vol vers la lumière a également été calculée a posteriori afin de donner un score aux individus n'ayant pas volé. En effet, lors de nos analyses statistiques, l'absence de valeurs dans la colonne « Temps pour voler à la lumière » pourrait s'avérer problématique et causer des biais dans l'analyse tel que ne prendre en compte que les individus ayant volé jusqu'à la lumière. La vitesse de vol à la lumière était calculée en divisant le temps mis pour voler à la lumière (depuis le début de l'expérience) divisé par la distance entre la boîte de l'individu et la lampe (estimée à 4,5 m). Les individus n'ayant pas volé à la lumière ont obtenu une vitesse de 0.

Statistiques

Premièrement, les résultats des data logger ont été analysés par des anova simple en comparant la température enregistrée une fois avec la pièce dans laquelle l'élevage a été effectué, une fois avec le traitement dans lequel le data logger était présent et une fois avec la section dans laquelle il était. Des post-hoc test de Tukey ont également été fait. La même chose a été réalisée avec l'humidité relative enregistrée à la place de la température.

Sauf précisé autrement, les autres tests statistiques étaient des modèles linéaires mixtes (lmm) réalisés via le package lmerTest avec comme variables explicatives : le traitement (facteur à trois niveaux : *Dark*, *Smart* et *Full*) dans lequel était l'individu, le sexe de l'individu (facteur à 2 niveaux : *Male* ou *Female*), l'espèce de l'individu (facteur à deux niveaux : *OP* ou *AE* correspondant à *O. plecta* et *A. exclamatoris* respectivement) et la région d'où provenait la mère de l'individu (facteur à 2 niveaux, *Luxembourg* (avec peu de skyglow) et *Brabant* (avec un skyglow important)). Nous avons également regardé de potentielles interactions entre les différents facteurs. Ces interactions étaient : entre le sexe et l'espèce, entre la région et l'espèce, entre le traitement et l'espèce, entre le traitement et le sexe, entre le traitement et la région. Nous avons fait des modèles mixtes car il nous semblait important de mettre en tant que variables aléatoires les paramètres suivants : la mère de l'individu, le site d'où provenait la mère de l'individu et la pièce dans laquelle l'individu a été élevé.

Les différentes variables réponses testées étaient : le nombre total de mues (vu que c'est une variable de comptage, un modèle linéaire généralisé mixte (glmm) de poisson a été réalisé à la place du lmm), si les individus étaient rentrés en diapause ou non à la fin de l'expérience (un modèle linéaire généralisé mixte (glmm) binomial été réalisé à la place du lmm), le temps mis

par les individus pour entrer en chrysalide, le temps que les individus sont restés en chrysalide, le temps mis pour les individus pour devenir adulte, la masse des chrysalides (une fois en prenant en compte le temps mis pour entrer en chrysalide (dans les variables explicatives ainsi que les interactions de ce dernier avec les autres variables explicatives) et une fois sans le prendre en compte), la masse des adultes, la masse initiale des individus et la quantité totale de nourriture mangée. Nous avons également fait un modèle linéaire mixte avec les mêmes variables explicatives et aléatoires mais ayant comme variable réponse le poids des chenilles et comme variable explicative supplémentaire le temps depuis la mise en traitement (car les chenilles étaient pesées tous les 5 ou 7 jours) ainsi que les interactions de ce dernier avec les autres variables explicatives.

Concernant les expériences de vol à la lumière, nous avons commencé l'analyse par 2 glmm binomiaux pour observer d'un côté la probabilité de bouger au moins une fois endéans les 30 min de l'expérience et de l'autre côté la probabilité de voler à la lumière endéans les 30 min de l'expérience. Nous avons utilisé les mêmes variables explicatives et aléatoires que celles décrites deux paragraphes plus haut sauf toutes celles se rapportant à l'espèce vu qu'une seule des espèces a été utilisées (*A. exclamationis*) lors des expériences de vol à la lumière. Cependant, deux variables explicatives ont été rajoutées : l'orientation de la lampe (facteur à 2 niveaux : *Nord* ou *Sud*) et le « timing d'expérience de vol à la lumière » représentant le moment de la journée ou l'expérience a été effectuée (facteur à 3 niveaux : *Day*, *Mix* (30 minutes d'obscurité avant de faire l'expérience de jour) et *Night*, représentés par la colonne « Treatment_FTL » dans le jeu de données). Les interactions de chacune de ces 2 variables ont été testées avec les variables explicatives classiques (le traitement, la région et le sexe). Des modèles linéaires mixtes ont également été réalisés suivant le même principe. Les variables réponses de ces modèles linéaires ont été : le temps mis pour faire le premier mouvement, le temps mis pour voler à la lumière (une fois avec la variable explicative « temps mis pour faire le premier mouvement » et une fois sans cette même variable) et la vitesse de vol à la lumière (une fois avec la variable explicative « temps mis pour faire le premier mouvement » et une fois sans cette même variable).

Une fois chaque modèle établi, nous nous sommes penchés sur les hypothèses de ces modèles. La normalité des résidus était donc vérifiée graphiquement (si la normalité des résidus n'était pas bonne, des modifications des données étaient opérées comme rajouter un logarithme), l'homogénéité des variances était également vérifiée et enfin, nous regardions les distances de Cook pour la mise en évidence de potentiel outliers (certains points ont ainsi été retirés mais c'était rare, cela a surtout mis en évidence des erreurs d'encodage qui ont donc été corrigées).

Après cette étape de vérification, le modèle était simplifié afin de retirer les interactions inutiles. Cette simplification se faisait sur base des p-valeurs et de l'AIC (Akaike information criterion) ou, dans le cadre de certains modèles de la pollution lumineuse où il figurait un très grand nombre d'interactions, du BIC (Bayesian information criterion), connu pour défavoriser les modèles forts complexes.

Après simplification des modèles, nous avons regardé quelle colonne traitement utiliser. En effet, à cause de problèmes techniques (voir la section « Élevage expérimental »), nous avons de bonnes raisons de penser que le traitement smart dans la pièce 3 a été défectueux durant la majorité du temps. Cela change donc la moitié de nos individus en traitement *Smart* en un traitement *Mixt-smart* pour l'espèce *A. exclamationis* et en un traitement semblable au

traitement contrôle (*Dark*) pour l'espèce *O. plecta*. Nous avons donc regardé, sur base de l'AIC et des différentes p-valeurs (surtout si *Mixt-smart* avait un effet différent des autres traitements), si un modèle prenant en compte les traitements prévus au départ (« Treatment » dans le jeu de données) expliquait mieux les données qu'un traitement prenant en compte ce qu'il vient d'être expliqué ici (« Treatment_bis » dans le jeu de données).

Le facteur espèce étant souvent significatif (ce qui est logique et prévisible au vu des résultats), nous avons refait les différents tests statistiques en divisant le jeu de données par espèce (un test statistique pour l'espèce *A. exclamatoris* et un test statistique pour l'espèce *O. plecta*).

Tous les tests statistiques ont été réalisés à partir de R version 12.0 avec les packages inclus de base (« base » et « stats » notamment) où les packages autres précisé plus haut dans le texte (lmerTest).

Résultats

Température et Humidité

Au niveau des pièces, nous avons remarqué une différence de température d'environ +0,61°C pour la salle 4 comparé à la salle 3 ainsi qu'une humidité en moyenne inférieur de 4,7% pour la salle 4 (Tableau 1 & 2). Pour les différents traitements, le traitement *Dark* était le plus chaud et sec (0,32°C de plus et 4,75% d'humidité relative en moins que le traitement *Full*) tandis que le traitement *Full* était le plus froid et humide (Tableau 1 & 2). Le plus gros écart de température moyenne était de 0,98°C entre la section 4-*Smart* et la section 3-*Full* (Tableau 1 & 2). Le plus gros écart d'humidité moyenne était de 11,37% d'humidité à nouveau entre la section 4-*Smart* et la section 3-*Full* (Tableau 1 & 2). Tous les résultats présentés dans ce paragraphe étaient hautement significatifs ($p < 2e-16$).

Tableau 1 : Résultats des tests post-hoc de Tukey (honestly significant difference) des données d'humidité relative (% d'humidité relative dans l'air). La colonne élément de comparaison spécifie le facteur sur lequel le test était concentré. La colonne comparaison spécifie les éléments qui étaient comparés entre eux. La colonne différence spécifie quel est la différence entre la moyenne du premier élément de comparaison et la moyenne du deuxième élément de comparaison. Les colonnes borne inférieure et borne supérieure spécifient les bornes inférieures et supérieures de la marge d'erreur de la différence de moyennes pour $\alpha = 5\%$. La colonne p ajusté spécifie la p-valeur ajustée pour ces tests.

Elément de comparaison	Comparaison	Différence	Borne inférieure	Borne supérieure	P ajusté
Pièce	4-3	-4,71382	-5,01353545	-4,41410454	0
Traitement	Smart-Dark	1,21441171	0,77490546	1,65391797	2,83E-10
Traitement	Full-Dark	4,74752239	4,30801614	5,18702865	0
Traitement	Full-Smart	3,53311068	3,0936077	3,97261366	0
Section	3_Smart-3_Dark	7,64156276	6,89383172	8,38929381	0
Section	3_Full-3_Dark	7,69850778	6,95077674	8,44623882	0
Section	4_Dark-3_Dark	1,53832418	0,79058199	2,28606637	6,82E-08
Section	4_Smart-3_Dark	-3,67446103	-4,42219207	-2,92672999	0
Section	4_Full-3_Dark	3,33481531	2,58708427	4,08254635	0
Section	3_Full-3_Smart	0,05694502	-0,69078602	0,80467606	0,99993432
Section	4_Dark-3_Smart	-6,10323858	-6,85098077	-5,35549639	0
Section	4_Smart-3_Smart	-11,3160238	-12,0637548	-10,5682928	0
Section	4_Full-3_Smart	-4,30674745	-5,05447849	-3,55901641	0
Section	4_Dark-3_Full	-6,1601836	-6,90792579	-5,41244141	0

Section	4_Smart-3_Full	-11,3729688	-12,1206999	-10,6252378	0
Section	4_Full-3_Full	-4,36369247	-5,11142351	-3,61596143	0
Section	4_Smart-4_Dark	-5,21278521	-5,9605274	-4,46504302	0
Section	4_Full-4_Dark	1,79649113	1,04874894	2,54423332	1,13E-10
Section	4_Full-4_Smart	7,00927634	6,2615453	7,75700738	0

Tableau 2 : Résultats des tests post-hoc de Tukey (honestly significant difference) des données de températures (°C). La colonne élément de comparaison spécifie le facteur sur lequel le test était concentré. La colonne comparaison spécifie les éléments qui étaient comparés entre eux. La colonne différence spécifie quel est la différence entre la moyenne du premier élément de comparaison et la moyenne du deuxième élément de comparaison. Les colonnes borne inférieure et borne supérieure spécifient les bornes inférieures et supérieures de la marge d'erreur de la différence de moyennes pour $\alpha = 5\%$. La colonne p ajusté spécifie la p-valeur ajustée pour ces tests.

Elément de comparaison	Comparaison	Différence	Borne inférieure	Borne supérieure	P ajusté
Pièce	4-3	0,60581736	0,57562134	0,63601338	0
Traitement	Smart-Dark	-0,11997184	-0,16447105	-0,07547263	7,91E-10
Traitement	Full-Dark	-0,31687043	-0,36136965	-0,27237122	0
Traitement	Full-Smart	-0,19689859	-0,24139747	-0,15239971	2,71E-14
Section	3_Smart-3_Dark	-0,39614145	-0,47197412	-0,32030878	0
Section	3_Full-3_Dark	-0,5797694	-0,65560207	-0,50393672	0
Section	4_Dark-3_Dark	0,24644253	0,17060873	0,32227634	6,47E-14
Section	4_Smart-3_Dark	0,40263295	0,32680028	0,47846562	0
Section	4_Full-3_Dark	0,19246371	0,11663104	0,26829638	7,15E-12
Section	3_Full-3_Smart	-0,18362794	-0,25946062	-0,10779527	7,77E-11
Section	4_Dark-3_Smart	0,64258398	0,56675018	0,71841779	0
Section	4_Smart-3_Smart	0,79877441	0,72294173	0,87460708	0
Section	4_Full-3_Smart	0,58860516	0,51277249	0,66443784	0
Section	4_Dark-3_Full	0,82621193	0,75037813	0,90204573	0
Section	4_Smart-3_Full	0,98240235	0,90656968	1,05823502	0
Section	4_Full-3_Full	0,77223311	0,69640044	0,84806578	0
Section	4_Smart-4_Dark	0,15619042	0,08035662	0,23202422	6,55E-08
Section	4_Full-4_Dark	-0,05397882	-0,12981262	0,02185498	0,32600458
Section	4_Full-4_Smart	-0,21016924	-0,28600191	-0,13433657	1,29E-13

Cycle de développement

Nombres de mues

L'espèce *O. plecta* possède significativement ($p < 2e-16$) moins de mues que l'espèce *A. exclamationis* (Tableau 3 & 4, Fig. 9).

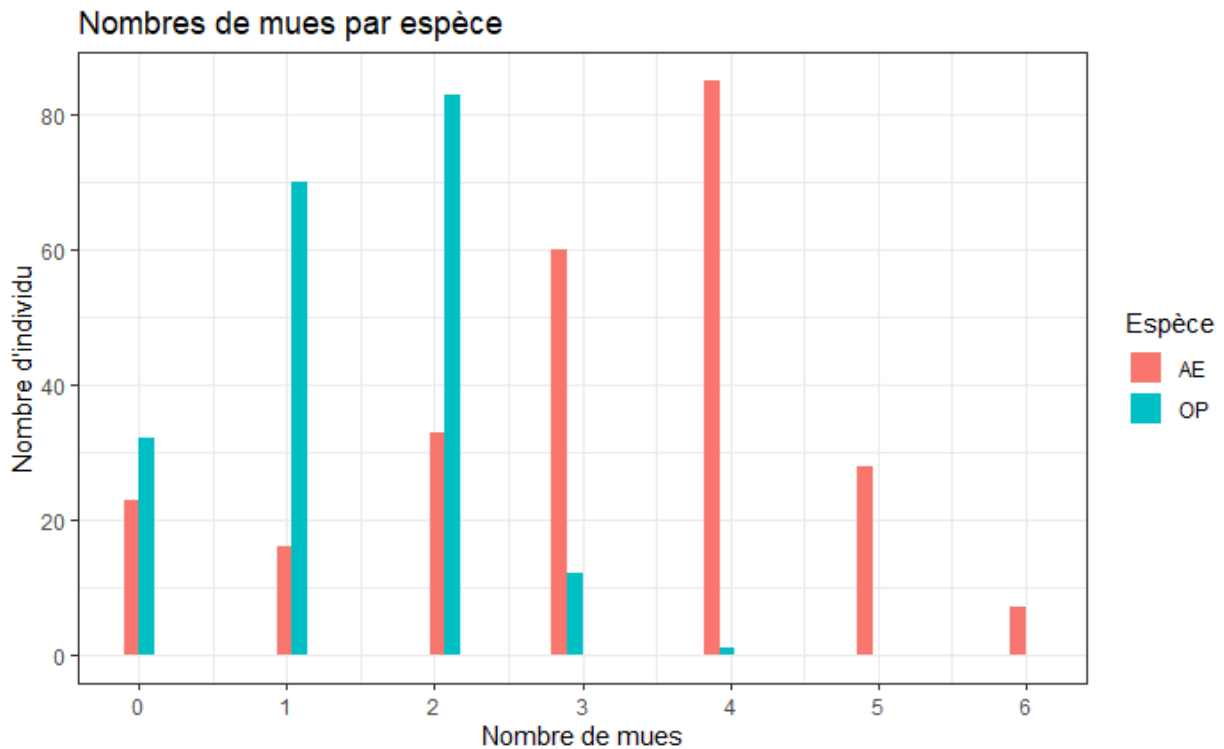


Figure 9 : Nombres de mues par espèce. Nombre d'individus (en axe Y) ayant eu un certain nombre de mues (axe X). *A. exclamatoris* est présenté en rouge et *O. plecta* est présenté en bleu. Les barres représentent le nombre d'individus ayant eu le nombre de mues précisé par l'axe X.

Diapause

Les individus de l'espèce *O. plecta* du traitement *Full* ont quasiment significativement ($p = 0,0539$) une plus faible probabilité d'être en diapause que les individus du traitement *Dark* (Tableau 5 & 6, Fig. 10).

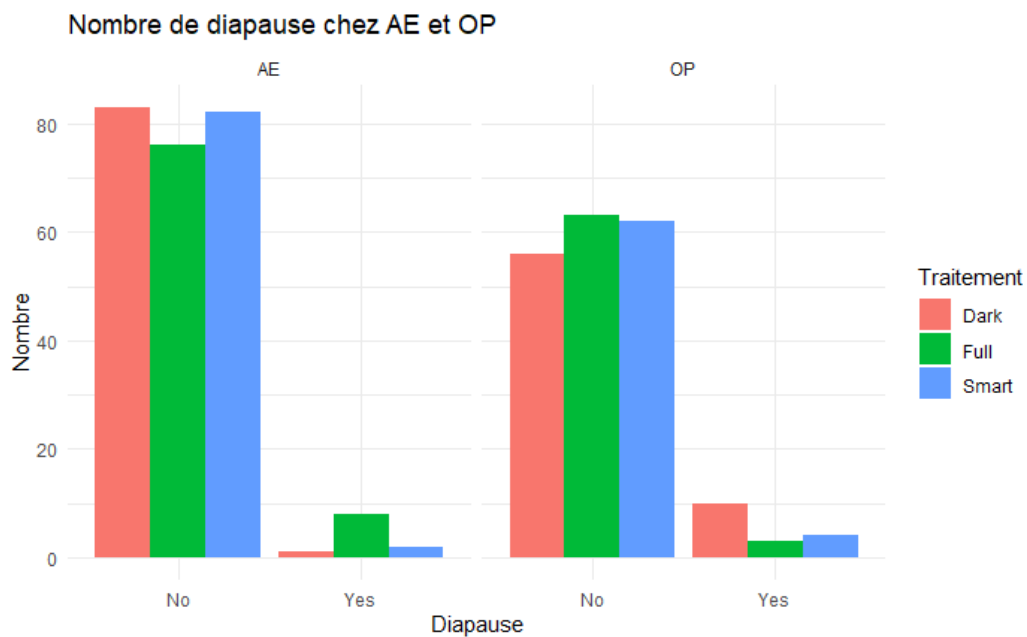


Figure 10 : Nombre de diapauses chez *A. exclamatoris* et *O. plecta*. Le graphique est divisé en deux verticalement avec à gauche l'espèce *A. exclamatoris* et à droite *O. plecta*. Les barres représentent le nombre d'individus (en axe Y) étant rentré en diapause (à droite) ou pas (à gauche). Les individus du traitement *Dark* sont en rouge, ceux du traitement *Full* sont en vert et ceux du traitement *Smart* sont en bleu.

Temps pour entrer en chrysalide

Concernant le temps mis par les individus de l'espèce *O. plecta*, nous pouvons noter la quasi significativité du sexe mâle ($p = 0,0615$) qui met en moyenne 0,67 jours de moins pour entrer en chrysalide (Tableau 7).

Du côté de *A. exclamationis*, les résultats sont plus complexes. Dans le traitement *Full* et *Mixt-smart*, les individus descendants d'une mère provenant de la région luxembourgeoise mettent significativement plus de temps pour entrer en chrysalides que ceux des mêmes traitements mais descendant d'une mère provenant de la région du Brabant (Tableau 8, Fig. 11). Les individus du traitement *Mixt-smart* descendants d'une mère provenant de la région luxembourgeoise mettent significativement plus de temps pour entrer en chrysalides que l'effet de la région luxembourgeoise et du traitement *Mixt-smart* additionné sauf comparé au traitement *Full* (Tableau 8, Fig. 11). Les individus du traitement *Smart* descendants d'une mère provenant de région luxembourgeoise mettent significativement moins de temps pour entrer en chrysalides que l'effet de la région luxembourgeoise et du traitement *Smart* additionné quand ils sont comparés au traitement *Full* ou *Mixt-smart* (Tableau 8, Fig. 11)

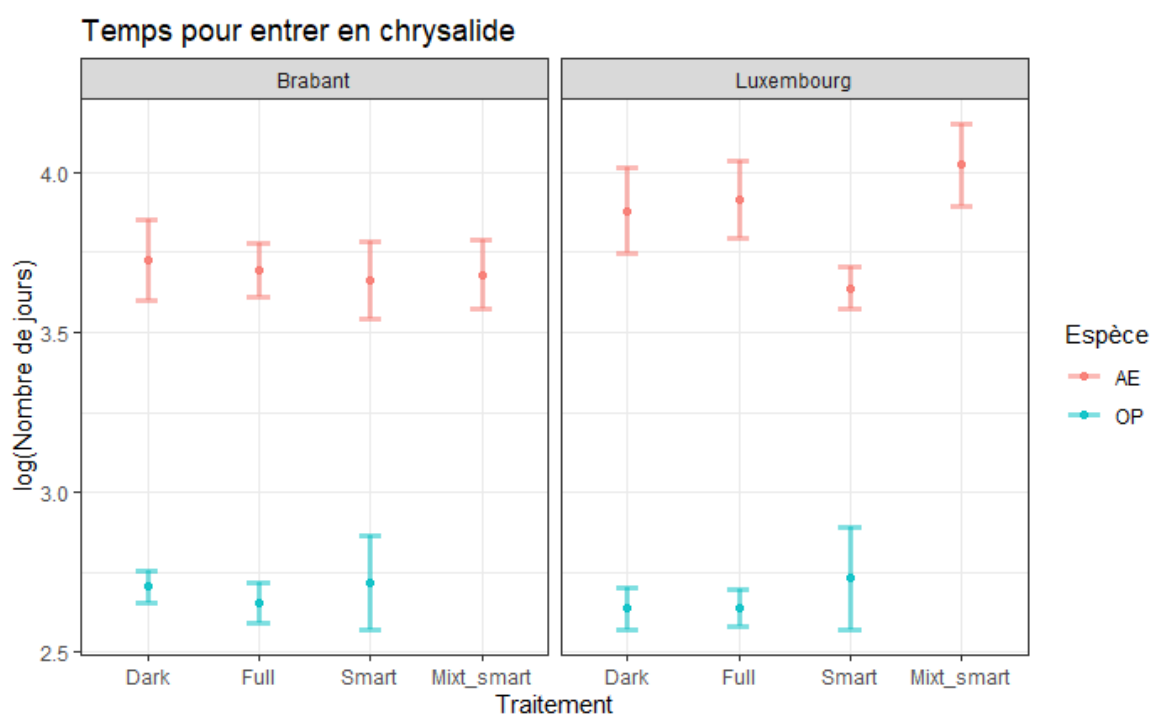


Figure 11 : Temps mis pour entrer en chrysalide. Le graphique est divisé en deux verticalement avec à gauche les individus descendants d'une mère provenant du Brabant et à droite ceux qui descendent d'une mère du Luxembourg. *A. exclamationis* est présenté en rouge et *O. plecta* est présenté en bleu. Les points sont les moyennes et les barres d'erreurs sont les intervalles de confiance pour $\alpha = 5\%$. L'axe Y est le logarithme du nombre de jours mis pour entrer en chrysalide et l'axe X est composé des différents traitements.

Temps en chrysalide

Chez *O. plecta*, les mâles passent significativement plus de temps en chrysalide. Les individus du traitement *Full* passent significativement plus de temps en chrysalide que les individus du traitement *Smart* (Tableau 9, Fig. 12).

Chez *A. exclamationis*, la tendance est légèrement similaire. En effet, les mâles passent significativement plus de temps en chrysalides (Tableau 10, Fig. 12). Les individus du traitement *Full* passent significativement plus de temps en chrysalides que les individus du

traitement *Dark* (Tableau 10, Fig. 12). Les individus du traitement *Mixt-smart* passent significativement plus de temps en chrysalides que s'ils descendent d'une mère qui provient du Luxembourg (Tableau 10, Fig. 12).

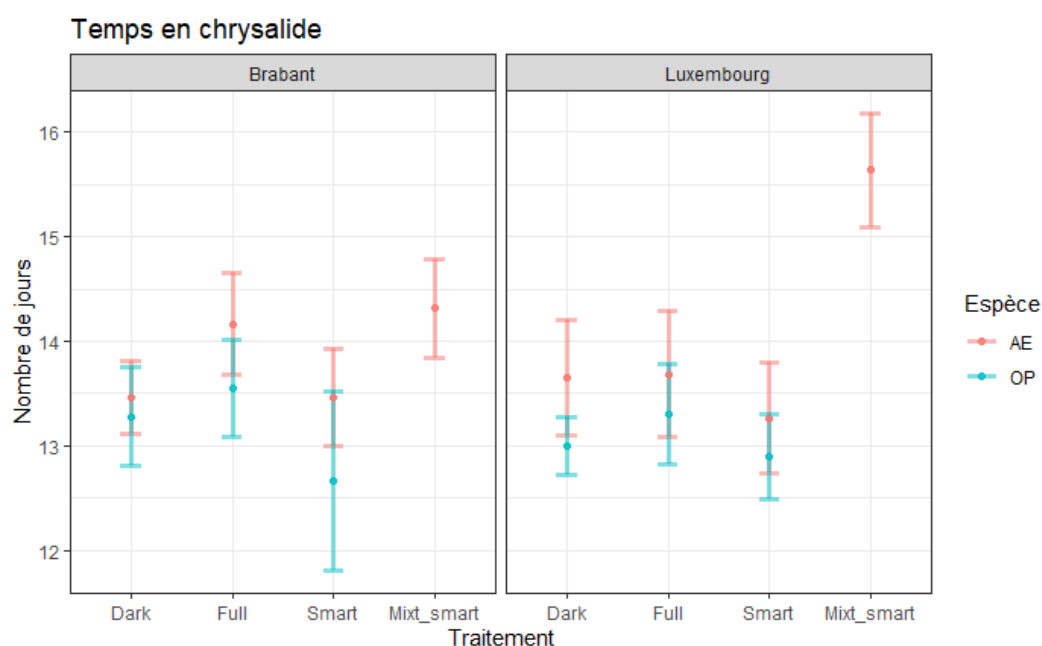


Figure 12 : Temps passé en chrysalide. Le graphique est divisé en deux verticalement avec à gauche les individus descendants d'une mère provenant du Brabant et à droite ceux qui descendent d'une mère du Luxembourg. *A. exclamationis* est présenté en rouge et *O. plecta* est présenté en bleu. Les points sont les moyennes et les barres d'erreurs sont les intervalles de confiance pour $\alpha = 5\%$. L'axe Y est le nombre de jours mis pour entrer en chrysalide et l'axe X est composé des différents traitements.

Temps pour devenir adulte

Le temps mis pour devenir adulte chez les individus d'*O. plecta* est indépendant des différents traitements ou sexes (Tableau 11, Fig. 13).

Pour *A. exclamationis*, les choses sont clairement plus complexes. Les individus du traitement *Full* et *Mixt-smart* mettent significativement plus de temps à atteindre le stade adulte s'ils descendent d'une mère qui provient du Luxembourg (Tableau 12, Fig. 13). Les individus du traitement *Full* descendants d'une mère provenant de région luxembourgeoise mettent significativement plus de temps pour atteindre le stade adulte que l'effet de la région luxembourgeoise et du traitement *Full* additionné sauf quand on le compare au traitement *Smart* (Tableau 12, Fig. 13). Nous pouvons également noter que les individus du traitement *Mixt-smart* descendants d'une mère provenant de la région luxembourgeoise mettent significativement plus de temps pour atteindre le stade adulte que l'effet de la région luxembourgeoise et du traitement *Mixt-smart* additionné sauf quand on le compare au traitement *Full* (Tableau 12, Fig. 13).

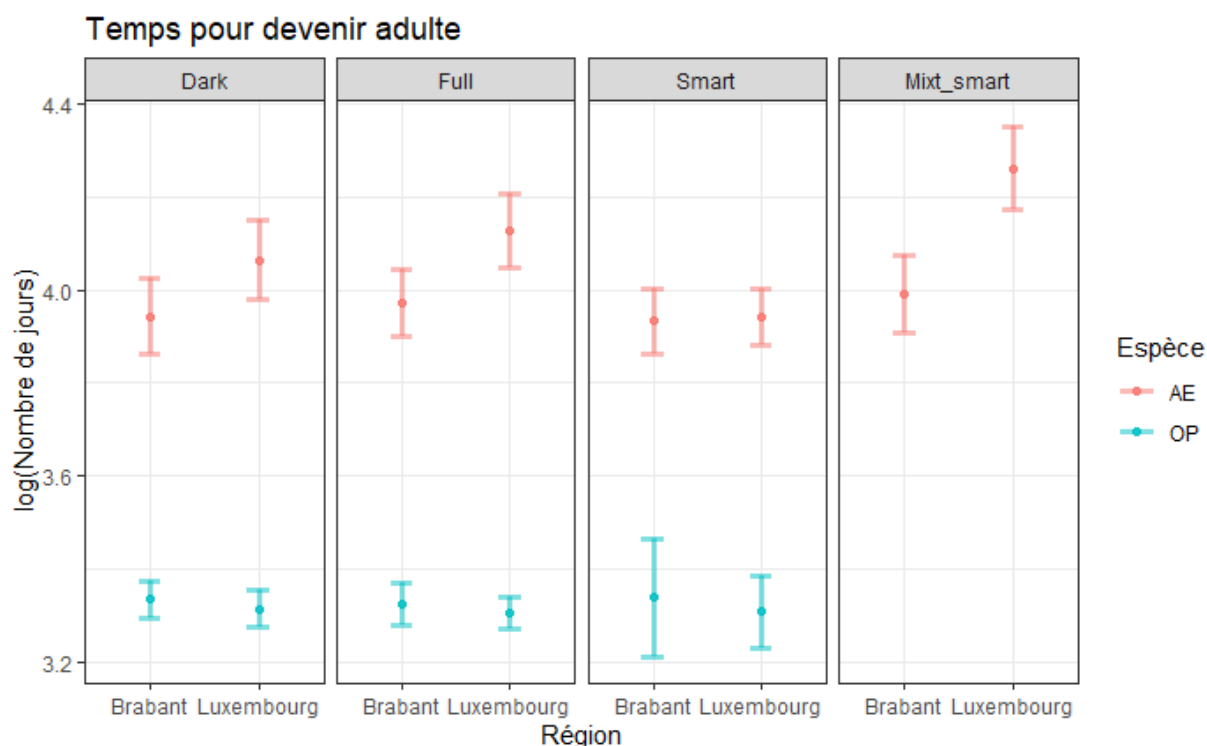


Figure 13 : Temps mis pour atteindre le stade d'adulte. Le graphique est divisé en quatre verticalement avec de gauche à droite : le traitement Dark, le traitement Full, le traitement Smart et le traitement Mixt-smart. Au sein de chaque graphique, les individus descendants d'une mère provenant du Brabant sont à gauche et ceux qui descendent d'une mère du Luxembourg sont à droite. *A. exclamatoris* est présenté en rouge et *O. plecta* est présenté en bleu. Les points sont les moyennes et les barres d'erreurs sont les intervalles de confiance pour $\alpha = 5\%$. L'axe Y est le logarithme du nombre de jours mis pour devenir adulte.

Poids des chrysalides

Lorsque l'on regarde le poids des chrysalides d'*O. plecta* sans prendre en compte le temps passé avant de rentrer en chrysalide, nous obtenons comme résultats : les chrysalides du traitement *Full* sont quasiment significativement ($p = 0,068$) plus lourdes que celles du traitement *Dark* (Tableau 13, Fig. 14). Les mâles sont significativement plus lourds que les femelles dans le traitement *Smart* (Tableau 13 & Fig. 14). Les chrysalides des individus mâles du traitement *Smart* sont significativement plus lourdes que l'effet du sexe mâle et du traitement *Smart* additionné comparé au traitement *Full* (Tableau 13, Fig. 14).

Lorsque l'on prend en compte le temps mis pour entrer en chrysalide, les résultats concernant *O. plecta* sont les suivants. Au plus un individu met du temps pour entrer en chrysalide, au plus sa chrysalide est lourde (Attention tout de même, ce résultat n'est pas parfaitement significatif, sa p-valeur est de 0,0506) (Tableau 14, Fig. 15). Les individus en traitement *Full* ont quasiment significativement ($p = 0,068$) des chrysalides plus lourdes que les individus en traitement *Dark* (Tableau 14). Les chrysalides des individus mâles du traitement *Smart* sont significativement plus lourdes que celles des femelles (Tableau 14).

Si l'on regarde le poids des chrysalides d'*A. exclamatoris* sans prendre en compte le temps passé avant de rentrer en chrysalide, nous obtenons comme résultats : les chrysalides des individus du traitement *Mixt smart* sont significativement plus lourdes que celles du traitement *Smart* (Tableau 15 & Fig. 14). Les chrysalides des individus (mâles et femelles) du traitement *Mixt-smart* sont significativement plus lourdes que celles du traitement *Dark* et *Full*, mais les mâles le sont significativement moins que les femelles (Tableau 15, Fig. 14).

En prenant en compte le temps mis pour entrer en chrysalide, les résultats deviennent : Au plus un individu met du temps pour entrer en chrysalide, au plus sa chrysalide sera lourde (Tableau 16, Fig. 15). Les chrysalides des individus des traitements *Full* et *Smart* sont significativement plus lourdes que celles du traitement *Dark* (Tableau 16). Celles de *Mixt-smart* sont significativement plus lourdes que celles des traitements *Dark*, *Full* et *Smart*, mais les mâles le sont significativement moins que les femelles pour le traitement *Dark* et quasiment significativement ($p = 0,066$) moins pour le traitement *Full* (Tableau 16). Les chrysalides venant d'individus mâles dans le traitement *Dark* sont significativement plus lourdes que celles des femelles (Tableau 16). Les chrysalides des individus descendants d'une mère provenant de la région luxembourgeoise sont quasiment significativement ($p = 0,054$) plus lourdes que celles du Brabant mais ces individus ont significativement moins bien optimisé le temps avant l'entrée en chrysalide pour augmenter la masse finale de la chrysalide (0,0014 g en moins par semaine passée) (Tableau 16).

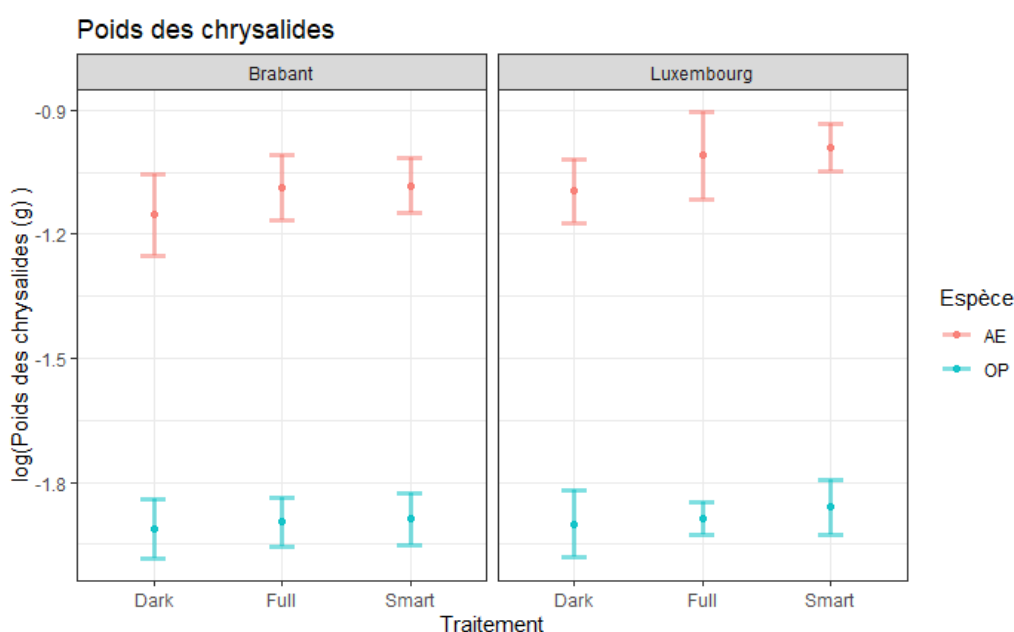


Figure 14 : Poids des chrysalides. Le graphique est divisé en deux verticalement avec à gauche les individus descendants d'une mère provenant du Brabant et à droite ceux qui descendent d'une mère du Luxembourg. *A. exclamationis* est présenté en rouge et *O. plecta* est présenté en bleu. Les points sont les moyennes et les barres d'erreurs sont les intervalles de confiance pour $\alpha = 5\%$. L'axe Y est le logarithme de la masse des chrysalides (exprimée en gramme) et l'axe X est composé des différents traitements.

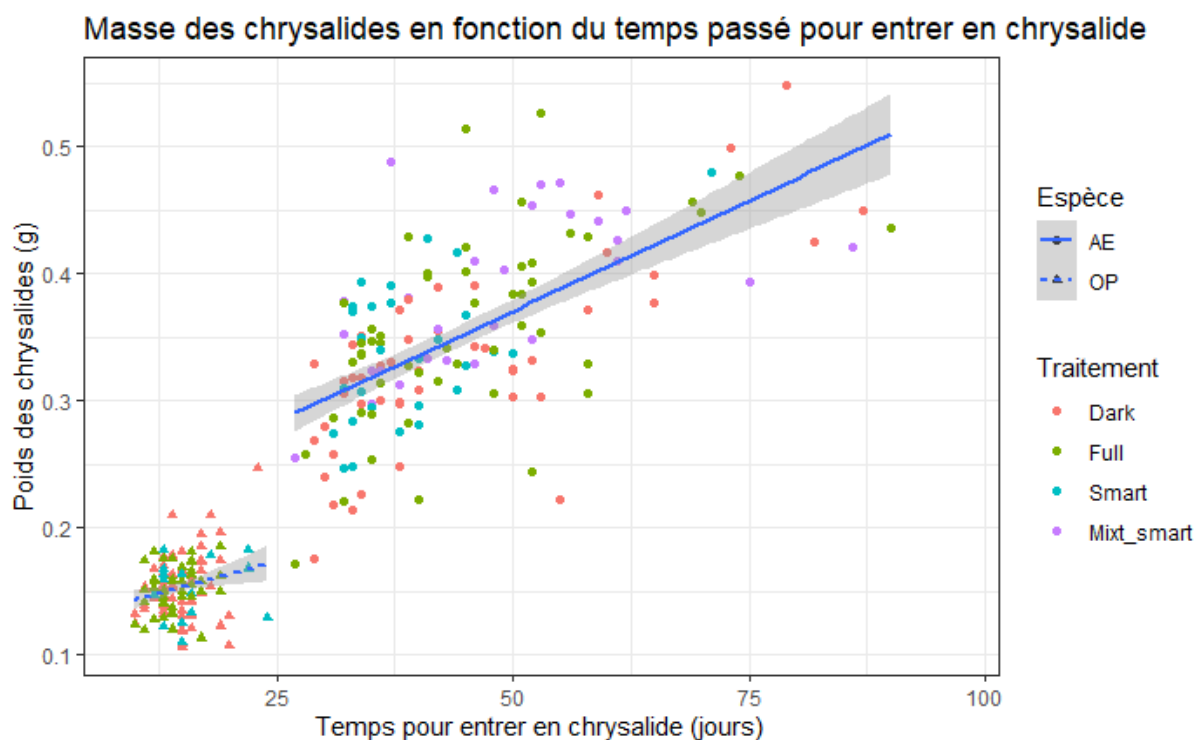


Figure 15 : Régression linéaire du poids des chrysalides en fonction du temps passé pour entrer en chrysalide. L'axe des X correspond au temps mis pour entrer en chrysalide exprimé en jours et l'axe des Y correspond au poids des chrysalides exprimé en grammes. Les individus de l'espèce *A. exclamatoris* sont représentés avec des ronds tandis que ceux de l'espèce *O. plecta* sont représentés avec des triangles. Les individus du traitement *Dark* sont représentés en rouge, ceux du traitement *Full* sont représentés en vert, ceux du traitement *Smart* représentés en bleu et ceux du traitement *Mixt-smart* sont représentés en mauve. Différentes régressions linéaires ont été faites en fonction de l'espèce, en trait plein pour l'espèce *A. exclamatoris* et en pointillés pour l'espèce *O. plecta*. Les intervalles de confiance pour $\alpha = 5\%$ de ces mêmes régressions sont en grisé.

Poids des adultes

Pour *O. plecta*, nous remarquons que les adultes du traitement *Full* sont significativement plus lourds que ceux du traitement *Dark* et que les mâles sont significativement plus légers que les femelles (Tableau 17, Fig. 16).

C'est assez similaire aux résultats obtenus concernant *A. exclamatoris* car : les individus du traitement *Full* sont significativement plus lourds que ceux du traitement *Dark* et les mâles sont significativement plus légers que les femelles dans les traitements *Smart* et *Mixt-smart* (Tableau 18, Fig. 16). Les individus du traitement *Mixt-smart* (non présent chez l'espèce *O. plecta*) sont significativement plus lourds que ceux de n'importe quel autre traitement (Tableau 18, Fig. 16).

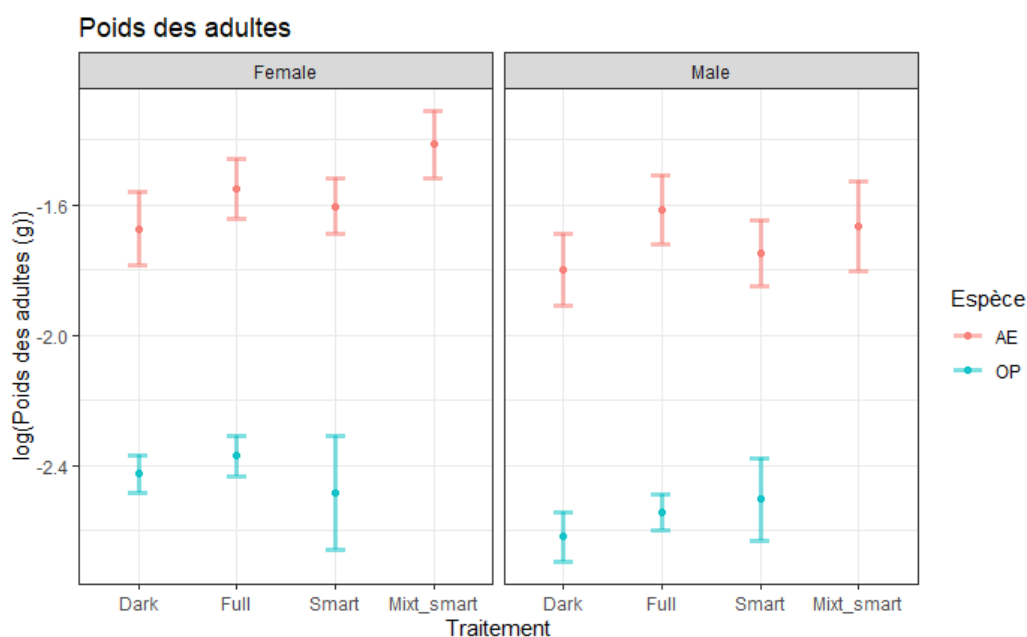


Figure 16 : Poids des adultes. Le graphique est divisé en deux verticalement avec à gauche les individus femelles et à droite les mâles. *A. exclamationis* est présenté en rouge et *O. plecta* est présenté en bleu. Les points sont les moyennes et les barres d'erreurs sont les intervalles de confiance pour $\alpha = 5\%$. L'axe Y est le logarithme de la masse des adultes (exprimée en gramme) et l'axe X est composé des différents traitements.

Poids initiaux

Les poids initiaux des chenilles étaient similaires entre tous les traitements, régions et sexes (Tableau 19 & 20).

Quantité de nourriture mangée

Les résultats concernant la quantité de nourriture mangée pour l'espèce *O. plecta* sont assez clair. La seule chose à noter est que les mâles du traitement *Dark* mangeraient quasiment significativement ($p = 0,0836$) moins que les femelles de ce même traitement (Tableau 21, Fig. 17).

Pour l'espèce *A. exclamationis*, dans le traitement *Mixt-smart*, les individus qui descendent d'une mère qui provenait de la région luxembourgeoise ont mangé significativement plus que ceux dont la mère provenait du Brabant (Tableau 22, Fig. 17).

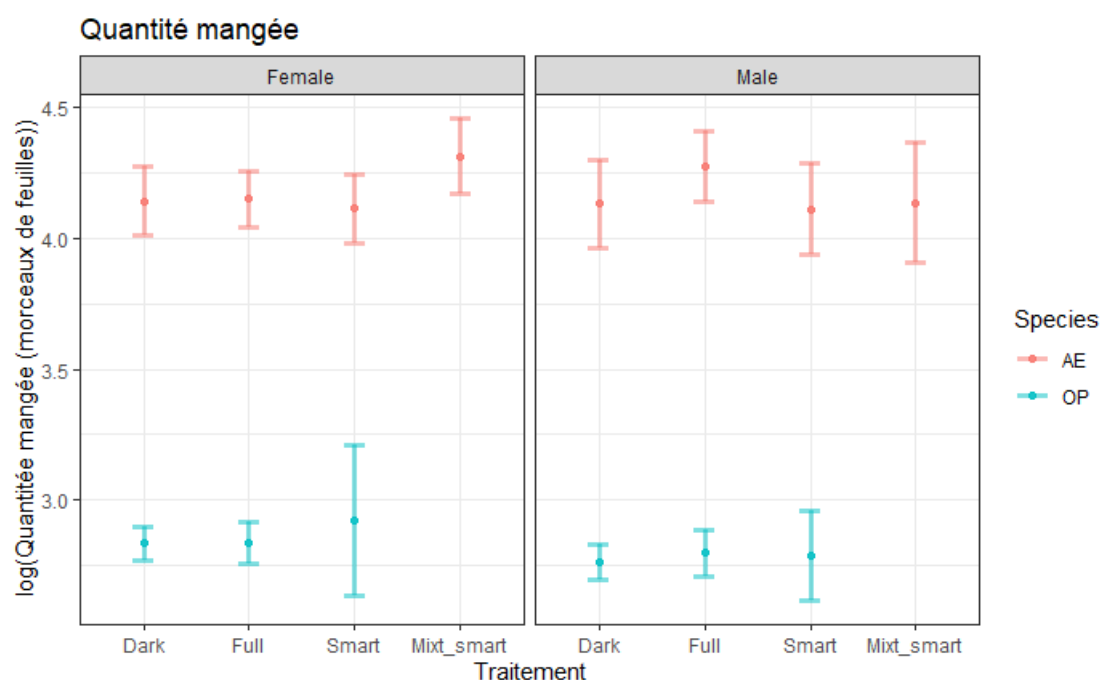


Figure 17 : Quantité mangée. Le graphique est divisé en deux verticalement avec à gauche les individus femelles et à droite les mâles. *A. exclamationis* est présenté en rouge et *O. plecta* est présenté en bleu. Les points sont les moyennes et les barres d'erreurs sont les intervalles de confiance pour alpha = 5%. L'axe Y est le logarithme de la quantité mangée (exprimée en gramme) et l'axe X est composé des différents traitements.

Poids en fonction du temps

La masse des chenilles d'*O. plecta* augmente significativement avec le temps. Les individus du traitement *Dark* sont plus significativement plus lourds que ceux du traitement *Smart* (Tableau 23 & Fig. 10). Nous pouvons également noter que les individus du traitement *Full* sont quasiment significativement ($p = 0,0849$) également plus lourds que ceux du traitement *Smart* (Tableau 23, Fig. 18).

Concernant *A. exclamationis*, nous remarquons tout d'abord, tout comme *O. plecta*, une augmentation significative de la masse au cours du temps (Tableau 24, Fig. 18). À nouveau en accord avec les résultats d'*O. plecta*, les individus du traitement *Smart* sont significativement plus légers que ceux des autres traitements (Tableau 24). Néanmoins, contrairement à *O. plecta*, nous avons des effets de la région (Tableau 24 & Fig. 18). En effet, les individus descendants d'une mère provenant de région luxembourgeoise sont significativement plus légers que ceux dont la mère provient de la région brabançonne sauf pour les individus dans le traitement *Smart* (Tableau 24, Fig. 18). Les individus du traitement *Smart* descendant d'une mère provenant de la région luxembourgeoise sont quasiment significativement ($p = 0,082$) plus lourds que ceux dont la mère provient du Brabant (Tableau 24). Attention cependant, tous les résultats présentés dans cette section (« Poids en fonction du temps ») qui parlent de « plus lourd/léger » concerne l'intercep de la régression linéaire mais les pentes peuvent être différente (et de manière significative pour ceux précisés ci-dessous). Au niveau de la prise de masse en fonction du temps, nous voyons que les individus du traitement *Dark* prennent en moyenne significativement moins de poids par unité de temps que ceux des traitement *Full* et *Mixt-smart* (qui ne sont pas significativement différent entre eux) mais nous voyons également que les individus du traitement *Smart* prennent significativement plus de poids par unité de temps que n'importe quel autre traitement (Tableau 24).

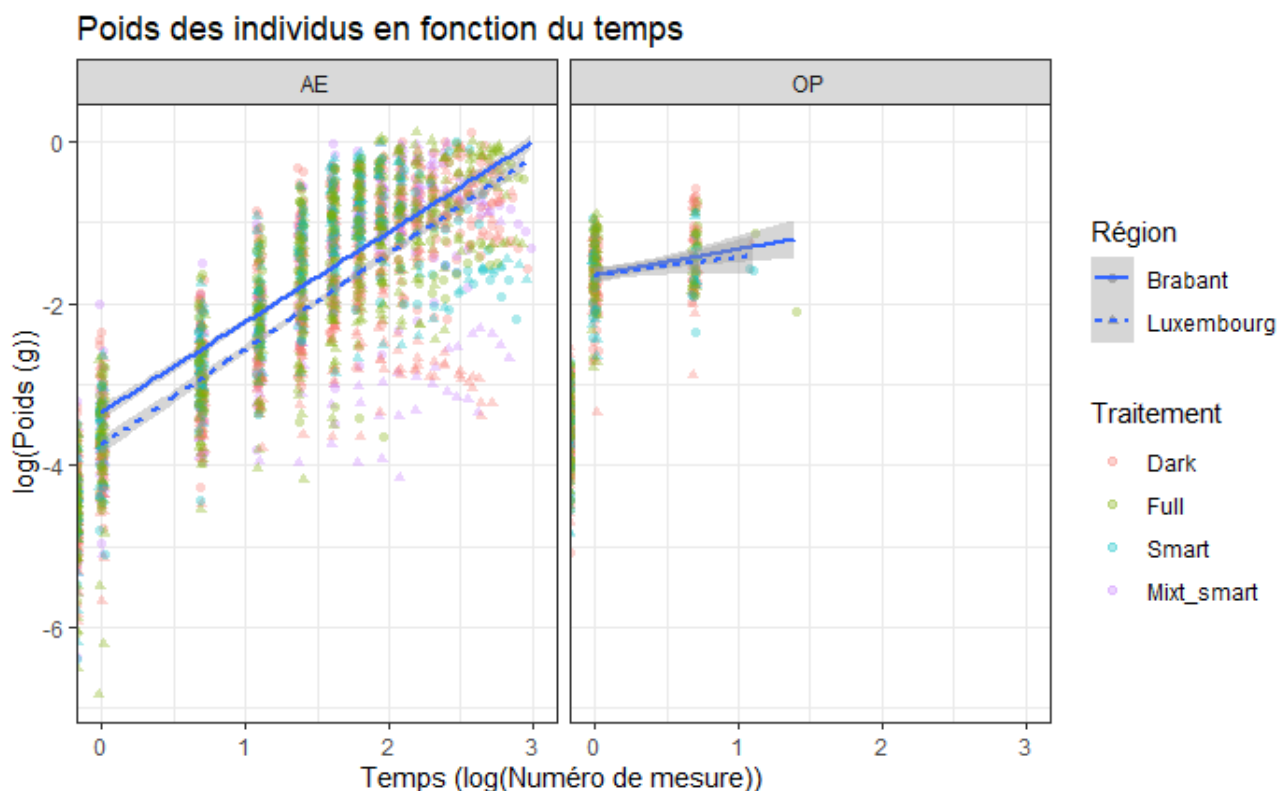


Figure 18 : Régression linéaire du poids des chenilles en fonction du temps. L'axe des X correspond au logarithme du temps exprimé sous forme de numéro de mesure du poids et l'axe des Y correspond au logarithme du poids des chenilles exprimé en grammes. Le graphique est divisé verticalement en deux avec l'espèce *A. exclamatoris* à gauche et l'espèce *O. plecta* à droite. Les individus du traitement Dark sont représentés en rouge, ceux du traitement Full sont représentés en vert, sont du traitement Smart représentés en bleu et ceux du traitement Mixt-smart sont représentés en mauve. Différentes régressions linéaires ont été faites en fonction de la région de provenance de la mère des individus testés. En trait plein pour les individus dont la mère provenait de la région Brabant et en pointillés pour les individus dont la mère provenait de la région Luxembourg. Les intervalles de confiance pour $\alpha = 5\%$ de ces mêmes régressions sont en grisé.

Vol à la lumière

Pour rappel, uniquement l'espèce *A. exclamatoris* a été utilisée pour cette expérience.

Probabilité de bouger

Les individus n'avaient pas de différence significative de probabilité de bouger en fonction de leurs sexes, traitement, timing de passage ou région maternelle lors de l'expérience de vol à la lumière (Tableau 25, Fig. 19).

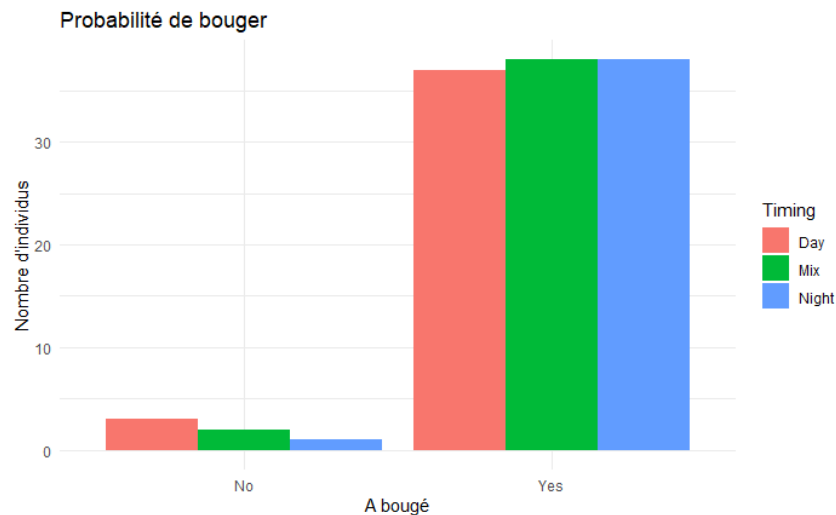


Figure 19 : Nombre d'individus ayant bougé lors de l'expérience de vol à la lumière. Les individus expérimentés durant le jour sont représentés en rouge, ceux expérimentés durant le jour mais avec 30 minutes à l'obscurité sont représentés en vert et ceux expérimentés durant la nuit sont représentés en bleu. Le nombre d'individus ayant bougé est représenté sur la partie droite du graphique tandis que ceux n'ayant pas bougé sont représentés sur la partie gauche du graphique.

Premier mouvement

Les individus qui ont réalisé les expériences pendant la nuit (Timing = *Night*) exécutaient leur premier mouvement significativement plus tôt que les autres individus (Tableau 26, Fig. 20). Aucune différence significative n'a été trouvée entre les individus qui ont réalisé les expériences de jour (Timing = *Day*) ou de jour mais avec une trentaine de minutes passées dans l'obscurité avant (Timing = *Mix*) (Tableau 26, Fig. 20). Les individus du traitement *Mixt-smart* descendants d'une mère qui provient de la région luxembourgeoise mettent significativement moins de temps pour faire leurs premiers mouvements que ceux descendant d'une mère provenant du Brabant (Tableau 26).

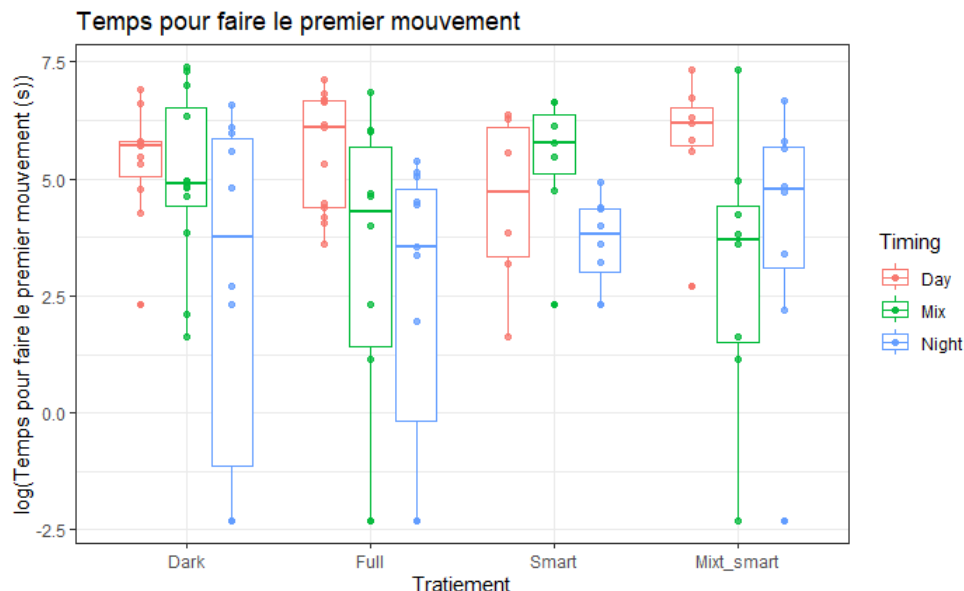


Figure 20 : Temps mis pour faire le premier mouvement lors de l'expérience de vol à la lumière. Les individus expérimentés durant le jour sont représentés en rouge, ceux expérimentés durant le jour mais avec 30 minutes à l'obscurité sont représentés en vert et ceux expérimentés durant la nuit sont représentés en bleu. L'axe des X correspond aux différents traitements et l'axe des Y correspond au temps mis pour faire le premier mouvement exprimé en secondes. Les résultats sont présentés sous forme de « boxplot » classiques et les points sont les observations.

Probabilité de voler

Les individus expérimentés durant la nuit volent significativement plus que ceux expérimentés durant le jour (Tableau 27, Fig. 21). Les individus expérimentés avec le timing mixte (expérience de jour mais avec une trentaine de minutes passées dans l'obscurité avant) ne sont pas significativement différents ni de ceux expérimentés pendant la nuit ni de ceux expérimentés pendant le jour (Tableau 27, Fig. 21).

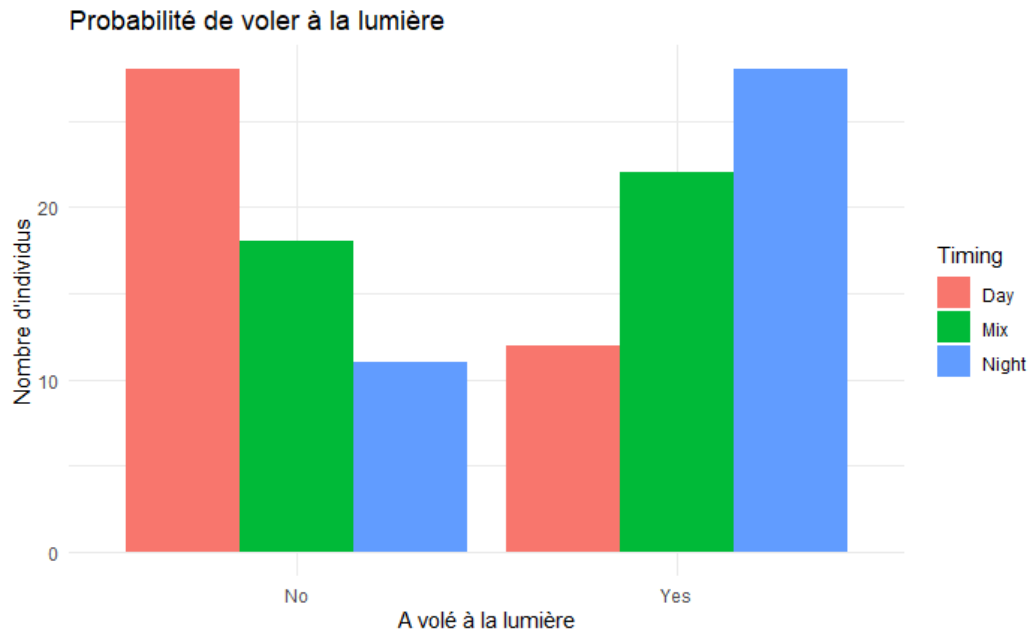


Figure 21 : : Nombre d'individus ayant volé à la lumière lors de l'expérience de vol à la lumière. Les individus expérimentés durant le jour sont représentés en rouge, ceux expérimentés durant le jour mais avec 30 minutes à l'obscurité sont représentés en vert et ceux expérimentés durant la nuit sont représentés en bleu. Le nombre d'individus ayant volé à la lumière est représenté sur la partie droite du graphique tandis que ceux n'ayant pas bougé sont représentés sur la partie gauche du graphique.

Vol à la lumière

Nous pouvons dire que, si on ne prend pas en compte le temps mis pour faire le premier mouvement, les individus expérimentés durant la journée (sans pause dans l'obscurité) mettent significativement moins de temps pour voler à la lumière (Tableau 28, Fig. 22). Les individus du traitement *Full* mettent significativement moins de temps pour voler à la lumière que ceux des traitements *Smart* et *Mixt-smart* (Tableau 28, Fig. 22). Les individus descendants d'une mère provenant du Brabant mettent significativement moins de temps à aller à la lampe quand celle-ci est orientée au Sud (Tableau 28). Les individus du traitement *Smart* et qui descendent d'une mère provenant du Luxembourg mettent significativement moins de temps pour atteindre la lampe (Tableau 28). Les individus du traitement *Mixt-smart* descendants d'une mère provenant de la région luxembourgeoise mettent significativement moins de temps pour voler à la lumière (Tableau 28). Il faut noter que les individus n'ayant pas volé ne se retrouvent pas dans le test que nous venons de décrire car ils n'ont rien dans la colonne « Temps mis pour voler jusqu'à la lampe ».

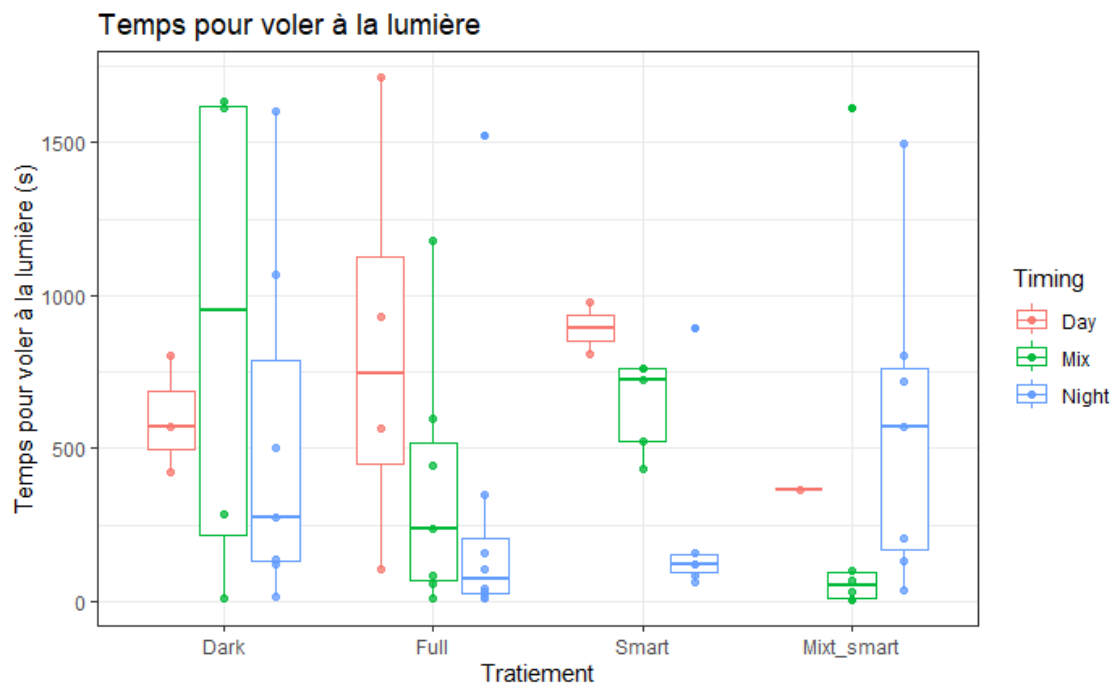


Figure 22 : Temps mis pour voler à la lumière lors de l'expérience de vol à la lumière. Les individus expérimentés durant le jour sont représentés en rouge, ceux expérimentés durant le jour mais avec 30 minutes à l'obscurité sont représentés en vert et ceux expérimentés durant la nuit sont représentés en bleu. L'axe des X correspond aux différents traitements et l'axe des Y correspond au temps mis pour voler à la lumière exprimé en secondes. Les résultats sont présentés sous forme de « boxplot » classiques et les points sont les observations.

Afin de résoudre ce problème d'individus n'ayant pas volé ne se retrouvant pas dans le test, le même test a été réalisé en prenant en compte la vitesse pour atteindre la lumière (à la place du temps pour atteindre la lumière). Les résultats sont les suivants : les individus expérimentés la nuit ou avec le timing mixte (30 min dans l'obscurité avant de faire l'expérience de jour) sont significativement plus rapide que ceux expérimentés le jour (Tableau 29, Fig. 23). Néanmoins, les individus expérimentés de la manière mixte ne sont pas significativement différents de ceux expérimentés la nuit (Tableau 29, Fig. 23). Nous pouvons également noter le fait que les individus du traitement *Full* sont quasiment significativement ($p = 0,0744$) plus rapides que ceux du traitement *Dark* (Tableau 29, Fig. 23).

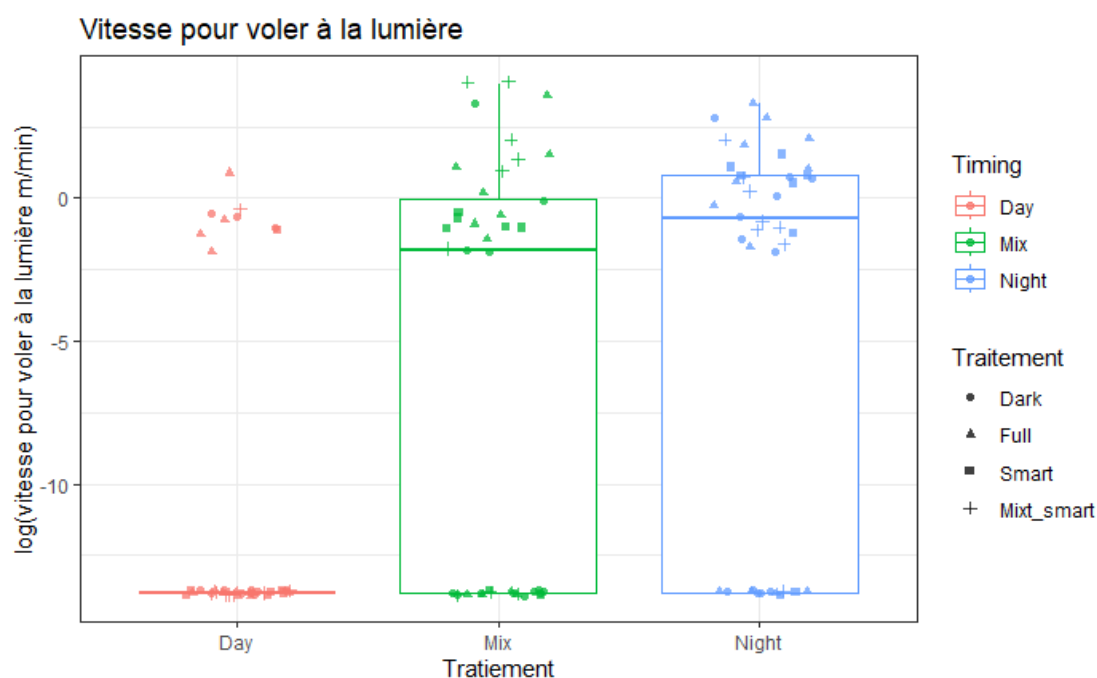


Figure 23 : Vitesse pour voler à la lumière lors de l'expérience de vol à la lumière. Les individus expérimentés durant le jour sont représentés en rouge, ceux expérimentés durant le jour mais avec 30 minutes à l'obscurité sont représentés en vert et ceux expérimentés durant la nuit sont représentés en bleu. L'axe des X correspond aux différents timings d'expérience et l'axe des Y correspond au logarithme de la vitesse pour voler à la lumière exprimée en m/min. Les résultats sont présentés sous forme de « boxplot » classiques et les points sont les observations. Les points ronds représentent les individus qui étaient dans le traitement Dark, les points triangulaires représentent les individus qui étaient en traitement Full, les points carrés représentent les individus qui étaient en traitement Smart et les points en croix sont les individus qui étaient en traitement Mixt-smart.

Enfin, ces 2 tests présentés juste avant ont été (re)réalisés en rajoutant comme variable explicative, le temps mis pour faire le premier mouvement. Le temps de vol pour atteindre la lumière en prenant en compte le temps mis pour faire le premier mouvement comme variable explicative donne les résultats suivants : En moyenne, au plus un individu a bougé rapidement, au plus il volera à la lampe rapidement (Tableau 30, Fig. 24). Les individus expérimentés de jours avec 30 min à l'obscurité sont significativement plus rapides pour atteindre la lampe par rapport aux individus testés à d'autres timings (Tableau 30, Fig. 24). Les individus expérimentés de jours avec 30 min à l'obscurité descendant d'une mère provenant du Luxembourg sont significativement plus lent pour atteindre la lampe par rapport aux mêmes individus descendants d'une mère provenant du Brabant (Tableau 30). Les individus sont quasiment significativement ($p = 0,075$) plus lent pour aller à la lampe quand elle est au Sud (Tableau 30). Les individus descendant d'une mère provenant de la région luxembourgeoise et expérimentés la nuit ou en timing *Mix* sont significativement plus rapide pour voler à la lumière que les mêmes individus descendants d'une mère du Brabant (Tableau 30). Les individus du traitement *Mixt-smart* sont significativement plus rapide pour voler à la lampe que les individus du traitement *Smart* (Tableau 30).

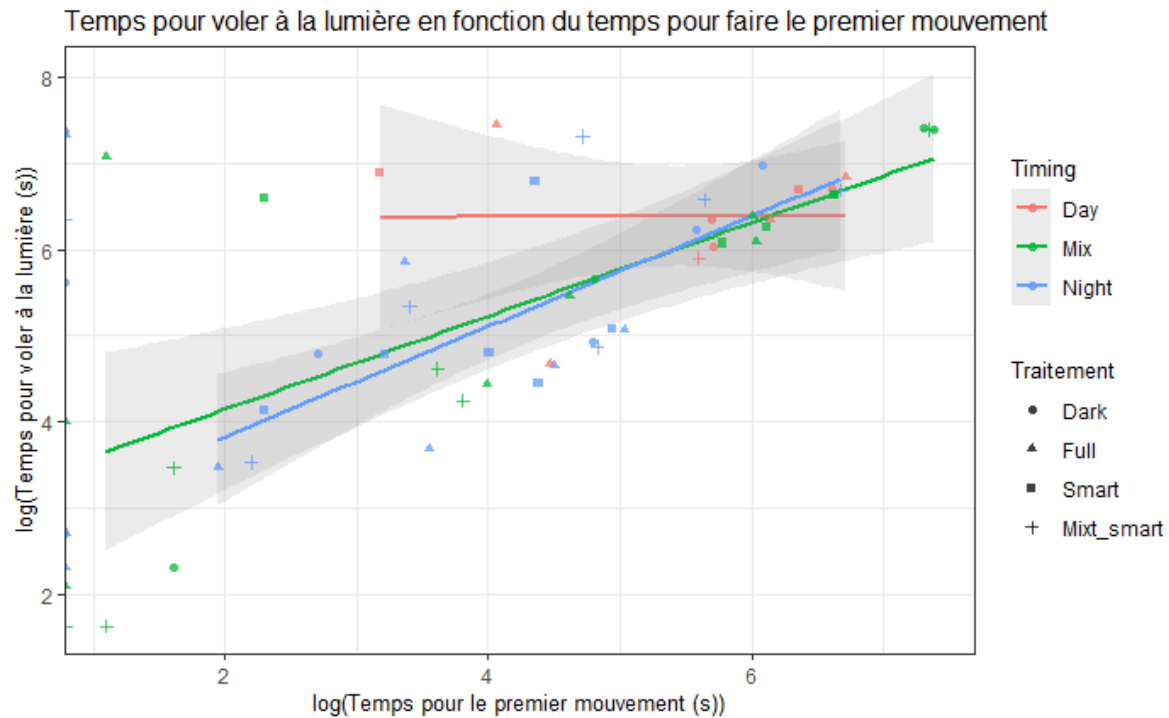


Figure 24 : Temps mis pour voler à la lumière lors de l'expérience de vol à la lumière en fonction du temps mis pour faire le premier mouvement. Les individus expérimentés durant le jour sont représentés en rouge, ceux expérimentés durant le jour mais avec 30 minutes à l'obscurité sont représentés en vert et ceux expérimentés durant la nuit sont représentés en bleu. L'axe des X correspond au temps mis pour faire le premier mouvement et l'axe des Y correspond au logarithme du temps mis pour voler à la lumière exprimé en s. Les points ronds représentent les individus qui étaient dans le traitement Dark, les points triangulaires représentent les individus qui étaient en traitement Full, les points carrés représentent les individus qui étaient en traitement Smart et les points en croix sont les individus qui étaient en traitement Mixt-smart. Différentes régressions linéaires ont été faites en fonction du timing de l'expérience. Les intervalles de confiance pour $\alpha = 5\%$ de ces mêmes régressions sont en grisé.

Le temps mis pour le premier mouvement n'impacte pas la vitesse de vol pour atteindre la lumière (Tableau 31, Fig. 25). Les individus venants du traitement *Full* sont quasiment significativement ($p = 0,075$) plus rapides que ceux du traitement *Dark* (Tableau 31, Fig. 25). Les individus expérimentés durant la nuit ou en timing mixte sont significativement plus rapides que ceux de jour (Tableau 31, Fig. 25). Les individus étants expérimentés dans les conditions mixtes sont plus lents que les individus expérimentés durant la nuit mais pas de manière significative ($p = 0,12$) (Tableau 31, Fig. 25).

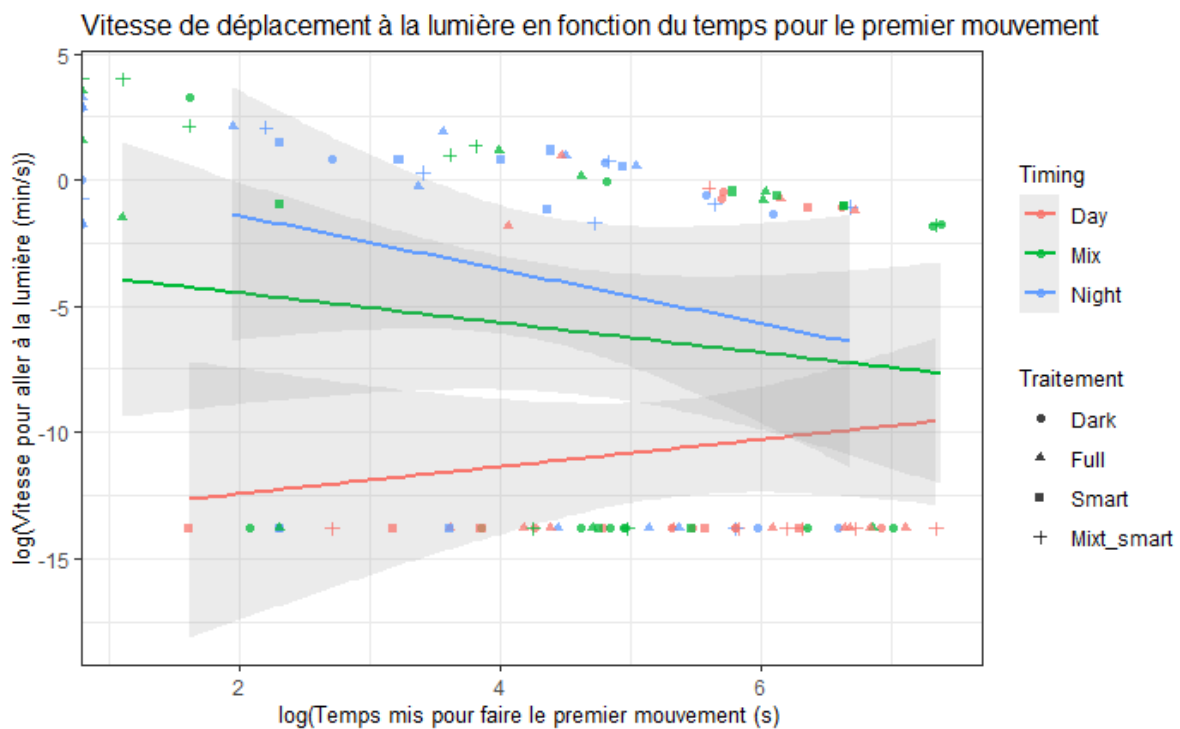


Figure 25 : Vitesse pour voler à la lumière lors de l'expérience de vol à la lumière en fonction du temps mis pour faire le premier mouvement. Les individus expérimentés durant le jour sont représentés en rouge, ceux expérimentés durant le jour mais avec 30 minutes à l'obscurité sont représentés en vert et ceux expérimentés durant la nuit sont représentés en bleu. L'axe des X correspond au logarithme du temps mis pour faire le premier mouvement exprimé en s et l'axe des Y correspond au logarithme de la vitesse pour voler à la lumière exprimée en m/min. Les résultats sont présentés sous forme de « boxplot » classiques et les points sont les observations. Les points ronds représentent les individus qui étaient dans le traitement Dark, les points triangulaires représentent les individus qui étaient en traitement Full, les points carrés représentent les individus qui étaient en traitement Smart et les points en croix sont les individus qui étaient en traitement Mixt-smart. Différentes régressions linéaires ont été faites en fonction du timing de l'expérience. Les intervalles de confiance pour $\alpha = 5\%$ de ces mêmes régressions sont en grisé.

Discussion

Nous allons à présent discuter ces résultats ainsi que notre expérience. Premièrement, nous allons nous pencher sur les données de température et d'humidité récoltées par les data logger. Deuxièmement, nous allons regarder les résultats du cycle de développement en faisant des liens entre les mues, diapauses poids et vitesse des différentes chenilles, chrysalides et adultes. Ensuite, nous aborderons les éléments que l'on peut tirer des expériences de vols avant de passer aux améliorations possibles des expériences réalisées dans le cadre de ce mémoire. Enfin, nous concluons ce mémoire.

Température et humidité

Le premier élément dont nous voudrions parler sont les résultats des data loggers. En effet, il est connu que le développement des chenilles est influencé par la température (Levesque et al., 2002; Moore et al., 2021; Wojda et al., 2020) et l'humidité (Chauvin & Chauvin, 1985; Han et al., 2008; Wojda et al., 2020). Il est donc essentiel que ces paramètres ne penchent pas de trop vers un des traitements. Aussi non, nous n'aurions pas pu interpréter correctement les résultats de ce traitement. Heureusement, les résultats des data loggers ont montrés une assez bonne similarité entre les pièces, traitements et sections. De fait, même si les tests statistiques ont montré des différences hautement significatives, nous estimons que ces différences ne sont pas

(ou pas de trop) biologiquement significatives. La plus grosse différence moyenne entre deux sections était inférieure à 1 °C. Nous pensons qu'il est peu probable que cette différence soit responsable d'effets qui auraient significativement influencé nos résultats même s'il faut garder à l'esprit que cela reste possible (Kaiser et al., 2016). De plus, cette différence concerne deux sections et que les sections n'ont pas été étudiées en tant que tel mais bien les traitements (Même si la section 3_*Smart* est l'entièreté du traitement *Mixt-smart* pour l'espèce *A. exclamationis*). Et la différence maximale entre deux moyennes de température entre des traitements est de 0,32 °C, donc encore plus minime. Les mêmes conclusions peuvent être plus ou moins tirées concernant l'humidité. 11,37% d'écart maximum moyen d'humidité relative entre deux sections (Tableau 1) est élevé et possiblement significatif. Cependant, la différence d'humidité relative moyenne était inférieure à 5% entre le traitement le plus sec et le traitement le plus élevé ce qui, espérons, n'a pas impacté significativement nos résultats. N'oublions pas non plus que les data loggers peuvent également être légèrement imprécis ce qui aurait pu donner de pareils résultats. On aurait théoriquement pu regarder les données des data loggers avant ou après l'expérience en les mettant côte à côte dans une même pièce pour vérifier qu'ils donnaient les mêmes résultats ou mettre plusieurs data loggers dans chaque section mais cela n'était pas possible dans la pratique (en termes de temps et de data loggers à disposition). Nous redoutions également une température plus élevée dans le traitement *Full* et possiblement dans le traitement *Smart* à cause de la température émise par les lampes de ces traitements. Si on regarde les températures moyennes de ces traitements, ce problème ne s'est pas du tout avéré : le traitement *Full* était plus froid que le traitement *Smart* qui était lui-même plus froid que le traitement *Dark*. C'est donc même l'inverse qui s'est produit, possiblement un effet aléatoire de la position dans la pièce. L'efficacité énergétique des lampes LED utilisées était donc bien utile sur ce point. Les chenilles et papillons étant ectotherme, aucun effet de concentration ne devrait avoir joué non plus sur les températures.

Cycle de développement

Le fait qu'aucun des traitements n'ait eu d'effets significatifs sur le nombre de mues indiquerait que les chenilles se sont développées plus ou moins normalement sur ce point, ou en tout cas de manière similaire au contrôle (traitement *Dark*). C'est en tout cas en accord avec la littérature concernant les papillons « de jour » (Haynes et al., 2023). L'espèce *O. plecta*, s'étant développé plus rapidement, possède un moins grand nombre de mues que l'espèce *A. exclamationis*. Mais la figure 9 montre une tendance gaussienne du nombre de mues et ce pour chaque espèce. C'est un résultat intéressant car les papillons font en effet un nombre plus ou moins précis de mues pendant leur développement (avant de rentrer en chrysalide ou en diapause) en fonction de leurs espèces (Fantinou et al., 1996; García-Barros, 2006) même si avoir de la variance dans le nombre de mues d'une espèce n'est pas non plus inhabituel (García-Barros, 2006). Il est important de rappeler qu'un bon nombre de mues ont possiblement été ratées (non vues) lors de nos observations et que les mues réalisées dans l'élevage non-expérimental n'ont pas été comptées (voir section « Matériel et Méthodes »). Le nombre de mues par espèce était donc possiblement une gaussienne bien moins étalée que ce que l'on a observé. Les résultats du nombre de mues doivent être liés avec les résultats de la probabilité de rentrer en diapause car, normalement, ces deux paramètres sont liés (Fantinou et al., 1996; García-Barros, 2006). Et les résultats de la probabilité de rentrer en diapause, tout comme le nombre de mues, n'ont pas démontré de résultats significatifs. Cependant, un effet quasiment significatif ($p = 0,054$) était

présent au niveau de la comparaison entre le traitement *Full* et le traitement *Dark* (plus de diapause dans le traitement *Dark*). Ce résultat n'était présent que chez l'espèce *O. plecta* et visuellement totalement inverse chez l'espèce *A. exclamationis*. De plus, le nombre d'individus rentré en diapause est assez faible, et, comme les diapauses étaient déterminées par le fait que ce soit des chrysalides qui n'ont jamais émergées, nous n'avons pas différencié les chrysalides correctement formées mais mortes, des diapauses. Tout ceci nous fait suggérer qu'il n'y avait pas réellement de différences de probabilité d'entrer en diapause selon nos traitements. Cela n'est pas étonnant car tous nos traitements représentaient l'été en termes de chaleur et de photopériode tandis que les chenilles de manière générale entrent en chrysalides à l'approche de l'hiver pour survivre à ce dernier (Merckx et al., 2023; Milonas & Savopoulou-Soultani, 2004). C'est également le cas pour nos espèces étudiées (voir section « Matériel et Méthodes »). Il est également bien connu du milieu scientifique que changer la photopériode en jours courts (et donc nuit longue) induit l'entrée en diapause chez les chenilles (Merckx et al., 2021, 2023; Milonas & Savopoulou-Soultani, 2004; van Geffen et al., 2014). Vu que nos chenilles ne sont principalement pas rentrées en diapause (y compris le traitement *Full*), et que certains traitements rendaient leurs nuits lumineuses (surtout le traitement *Full* mais aussi le traitement *Smart*), nous supposons que les chenilles de ces deux espèces déterminent leurs entrées en diapause en se basant sur la durée de la nuit (obscurité) et non du jour (lumière). Cela rejoint les résultats obtenus par les équipes de van Geffen (2014) et de Merckx (2023). Nous précisons que cette détermination d'entrée en diapause en se basant sur la durée du jour peut être aussi bien inconscient que conscient. Cependant, nous rappelons que nous n'avons pas étudié directement cette hypothèse et que les températures élevées ou d'autres paramètres ont peut-être joué.

Au niveau du temps de développement, 3 paramètres ont été regardés. Le temps mis pour atteindre la chrysalide, le temps passé dans la chrysalide et enfin le temps pour devenir adulte qui est juste la somme des deux autres. Nous avons remarqué que les mâles mettent quasiment significativement ($p = 0,061$) moins de temps pour entrer en chrysalide (seulement chez *O. plecta*) mais passent plus de temps au sein de cette chrysalide (pour les deux espèces étudiées) ce qui fait qu'au final le temps pour atteindre le stade adulte est le même peu importe le sexe (pour les deux espèces étudiées). Le fait que les mâles entrent en chrysalide plus tôt mais sans effets significatifs en fonction des traitements est assez différent de la littérature. En effet, la littérature décrit plutôt que dans les conditions normales (traitement *Dark* pour notre expérience), le temps mis pour atteindre la chrysalide est similaire entre mâle et femelle (Frago et al., 2009; Merckx et al., 2023; van Geffen et al., 2014). Cependant, dans les conditions de pollution lumineuse fixe (traitement *Full* pour notre expérience), les mâles ont été démontrés comme entrant en chrysalide plus rapidement que les contrôles (traitement *Dark* dans notre expérience), sans effets significatifs sur les femelles (van Geffen et al., 2014). Notons tout de même qu'une étude récente (Haynes et al., 2023) sur le papillon « de jour » monarque (*Danaus plexippus*) n'a, tout comme nous, pas obtenus de différences significatives au niveau du temps de développement pour atteindre la chrysalide quand les individus sont élevés sous pollution lumineuse.

Nos résultats indiquent aussi quelque chose de très intéressant mais que faiblement en accord avec la littérature. Les individus descendants de femelles provenant de région avec peu de skyglow (la région luxembourgeoise) et qui ont été soumis à une pollution lumineuse constante

(traitement *Full*) mettent significativement plus de temps pour entrer en chrysalide, passent significativement plus de temps dans cette chrysalide et mettent plus de temps pour devenir adulte. Néanmoins, ces résultats ne sont valables que pour l'espèce *A. exclamatoris* et indépendants du sexe des individus. C'est en effet très intéressant car cela montre que les individus provenant d'une région avec un haut skyglow (région *Brabant*) ne sont pas significativement différents en termes de vitesse de développement que les individus du traitement contrôle ou du traitement de pollution lumineuse inconstante. Donc, les individus provenant d'une région avec un faible skyglow (région *Luxembourg*) soumis à de la pollution lumineuse fixe auraient un cycle de développement plus lent que les individus du traitement contrôle ou du traitement de pollution lumineuse inconstante. Cela refléterait une sorte d'évolution des populations soumises au skyglow (qui est, pour rappel, en forte corrélation avec la concentration de lampadaires et donc de sources de pollutions lumineuse fixe) qui sont moins impactées par la pollution lumineuse fixe. En effet, similairement à ce qu'a démontré Altermatt et Ebert (2016), les populations qui sont soumises depuis longtemps (plusieurs générations) à un skyglow élevé sont moins impactées par les traitements de pollution lumineuse suggérant que les individus qui étaient fortement affectés par la pollution lumineuse ont été éliminés par sélection naturelle résultant en une évolution de la population. C'est certainement lié au fait que la pollution lumineuse a des effets négatifs sur le fitness des individus (voir introduction). De plus, passer plus de temps en chenille est désavantageux car c'est le stade de vie le plus dangereux (Grenis & Murphy, 2019; Haynes et al., 2023) et ce, même sans compter l'augmentation de prédation liée au fait d'être sous pollution lumineuse (Deutsch & Kaiser, 2023; Grenis & Murphy, 2019). Un effet maternel n'est pas non plus à écarter dans nos résultats vu que nous avons étudié seulement une génération. Ces résultats sont cependant en désaccord avec la littérature qui dit que le cycle de développement est plus rapide chez les individus soumis à de la pollution lumineuse fixe et uniquement pour les mâles (van Geffen et al., 2014). Nous pouvons également noter que le temps passé en chrysalide d'*O. plecta* est plus important quand les individus sont soumis à de la pollution lumineuse fixe que quand ils sont soumis à de la pollution lumineuse inconstante, et ce, de manière indépendante au sexe ou à la région d'où provient la mère. Le fait que les résultats que je viens de citer sont différents en fonction de l'espèce étudiée, reflète un intérêt particulier de tester plus d'espèces.

Pour les résultats concernant les poids, il est préférable et plus simple que les poids initiaux soient plus ou moins similaires entre les différents traitements région et sexe. Ce fut le cas donc on peut considérer que les différences de poids observées plus tard dans le développement sont uniquement dues à ces mêmes traitements, régions et sexes.

Comme on pouvait s'attendre, les masses des chenilles ont en moyenne augmenté au cours du temps. De manière générale, le poids des chenilles soumises à une pollution lumineuse inconstante était plus faible que celles soumises à d'autres traitements. Ces résultats sont similaires à ceux de la littérature concernant la pollution lumineuse fixe (Grenis & Murphy, 2019; van Geffen et al., 2014). Le fait d'observer cela sans observer d'impact du traitement *Full* est assez étonnant. Cela suggérerait que notre traitement de pollution lumineuse fixe n'a pas d'impacts sur le poids des individus, ce qui est contraire à la littérature (Grenis & Murphy, 2019; van Geffen et al., 2014), mais que le traitement de pollution lumineuse inconstante aurait des impacts similaires à ceux de la littérature concernant la pollution lumineuse fixe tout en étant significativement plus impactant que notre traitement de pollution lumineuse fixe.

Cependant, il est important de relativiser les choses car les chenilles de l'espèce *A. exclamationis* du traitement *Smart* avaient un meilleur taux de prise de poids par unité de temps que n'importe quel autre traitement. De plus, les chenilles étant dans le traitement de pollution lumineuse constante ou *Mixt-smart* avaient significativement un meilleur taux de prise de poids par unité de temps que les chenilles du traitement contrôle. C'est clairement opposé à la littérature qui prône aucune différence de taux de croissance mais uniquement une différence de temps de développement qui se conclut par une masse plus faible des individus en pollution lumineuse fixe comparés aux contrôles (Grenis & Murphy, 2019; van Geffen et al., 2014).

Chez *A. exclamationis*, les chenilles provenant de mère venant de région avec un skyglow faible sont plus légères que celles venant de région avec un fort skyglow sauf pour le traitement *Smart*. Ces résultats remettent en question notre hypothèse d'évolution des populations soumises à un fort skyglow car, en moyenne, les chenilles (toutes sauf un seul traitement, le *Smart*, où en plus, l'échantillon était moindre) prennent plus de poids si elles viennent (indirectement) de la région brabançonne. L'effet de la région serait donc peut-être indépendant du traitement appliqué aux individus, reflétant juste des individus qui prennent plus facilement du poids plutôt que des individus qui sont plus adaptés à la pollution lumineuse.

Pour le poids des chrysalides, le fait de faire deux tests par espèce, un avec le temps passé avant de rentrer en chrysalide en tant que variable explicative et l'autre sans le prendre en compte, était une idée intéressante mais les résultats sont revenus quasiment identiques. Une bonne chose à noter est que, comme on pouvait s'y attendre, au plus un individu mettait du temps pour entrer en chrysalide, au plus sa chrysalide était lourde. Bien que la p-valeur de ce paramètre concernant *O. plecta* était juste au-dessus de 0,05 (0,051), on considéra quand même ce paramètre comme significatif. Pour les deux espèces à nouveau, nous observons que les individus exposés à une pollution lumineuse constante ont des chrysalides plus lourdes que celles des individus contrôles. C'est cohérent avec la prise de masse des chenilles discutées juste avant mais c'est donc également à nouveau en désaccord avec la littérature qui suggère que le poids des individus soumis à une pollution lumineuse constante est plus faible (Grenis & Murphy, 2019; van Geffen et al., 2014). Cependant, comme lors du nombre de mues pour atteindre la chrysalide, Haynes et al. (2023) ont obtenu des résultats se rapprochant des nôtres. En effet, bien que leur p-valeur (de 0,162) indiquait des résultats non significativement différents, les chrysalides des individus élevés sous pollution lumineuse étaient plus lourdes que celles élevées dans les conditions contrôles. Néanmoins, il faut préciser qu'ils étudiaient le papillon monarque (*Danaus plexippus*), un papillon de jour.

Uniquement chez *O. plecta* maintenant, nous observons également que, dans le traitement *Smart* les mâles sont plus lourds que les femelles. C'est étonnant car les mâles sont généralement de poids plus faible et ce peu importe le traitement (van Geffen et al., 2014). Mais il ne faut pas oublier que nous avons vu que les mâles de l'espèce *O. plecta* mettent plus de temps à atteindre le stade de chrysalide et que ce temps était positivement corrélé au poids des chrysalides. Et la littérature rapporte que les traitements de pollution lumineuses diminuent la masse des chrysalides mais surtout en diminuant le temps passé avant la chrysalide et non en diminuant le taux de croissance (van Geffen et al., 2014) ce qui serait plus ou moins en accord avec nos observations du temps passé avant de rentrer en chrysalide. De plus, un effet significatif aurait pu se produire par l'aléatoire surtout que notre traitement *Smart*, à cause du

problème technique, détaillé dans le matériel et méthodes, ne comportait qu'une trentaine d'individus.

Cependant, les tendances de l'espèce *O. plecta* ne sont pas entièrement partagées par l'espèce *A. exclamationis*. Cela renforce l'importance de devoir étudier plus d'espèces. Les chrysalides d'*A. exclamationis* du traitement *Mixt-smart*, bien que n'ayant pas passé spécialement plus de temps avant de rentrer en chrysalides, sont plus lourdes que celles du n'importe quel autre traitement (mais les mâles l'étant moins pour le traitement contrôle et le traitement de pollution lumineuse fixe). Aucune recherche scientifique, à notre connaissance, n'a jamais étudié des traitements similaires à notre traitement *Mixt-smart*. D'ailleurs, nous ne voulions pas non-plus de traitement *Mixt-smart* à la base. Il est envisageable que la présence d'obscurité pendant la nuit ait aidé les individus à calibrer leurs cycles circadiens et que l'alternance de lumière par après les ait aidés à mieux manger. Néanmoins, nous pensons qu'il est plus raisonnable de penser que cette p-valeur significative est due à l'aléatoire, surtout quand on sait que le nombre d'individus présents dans ce traitement n'était que d'une petite trentaine. Les chrysalides mâles du traitement contrôle sont plus lourdes que celles des femelles, ce qui est différent de l'espèce *O. plecta* où c'était chez les chrysalides du traitement de pollution lumineuse inconstante que les mâles étaient plus lourds que les femelles. À nouveau, c'est étonnant car la littérature dit que le poids des chrysalides sont plus faibles chez les mâles que chez les femelles (et non l'inverse) et ce peu importe le traitement (van Geffen et al., 2014). Enfin, nous voyons que, de manière générale, les individus descendants de mère provenant de régions fortement émises au skyglow prennent moins de masse par unité de temps que celles provenant du Brabant mais sans interactions avec les traitements. Cela suggère que les individus descendants de populations ayant un fort skyglow ont un meilleur taux de prise de poids mais pas uniquement ceux sous pollution lumineuse. C'est effectivement ce que l'on a observé quand on a regardé la prise de poids par unité de temps, déjà discutée plus haut.

Les mâles adultes sont plus légers que les femelles dans toutes les combinaisons de traitements et espèces et ils le sont de manière significative dans toutes les combinaisons de traitements et espèces sauf deux. Le fait que les adultes mâles soient de manière générale plus légers que les femelles peu importe le traitement est en accord avec la littérature (Ismail et al., 1988; Molleman et al., 2011) (même si Ismail et al. n'ont cependant pas étudié de traitements similaires à notre traitement *Smart*). Tout comme les chrysalides, les adultes du traitement *Mixt-smart* étaient significativement plus lourds que ceux de n'importe quel autre traitement. Toujours tout comme les chrysalides, les adultes des deux espèces étudiées, exposés à une pollution lumineuse constante ont des poids adultes plus élevés que ceux des individus contrôles. Un certain nombre d'études ont mesuré le poids des chenilles et/ou des chrysalides et ont fait des extrapolations en disant que les différences observées à ces niveaux s'observeraient également au stade adulte (voir : Cieraad et al., 2022; Grenis & Murphy, 2019; Van Geffen et al., 2014). Si on se base sur les résultats que je viens de citer, nous pouvons valider ces extrapolations. Néanmoins, nous sommes toujours en décalage avec la littérature qui défend une baisse de poids des adultes quand ils sont soumis à de la pollution lumineuse (Grenis & Murphy, 2019; van Geffen et al., 2014) tandis que nous avons une augmentation. Cependant, relativement peu d'études ont réellement mesuré le poids des adultes. Ismail et al. (1988) par exemple, ont mesuré le poids des adultes (mais malheureusement pas les chenilles ou les chrysalides) dans le cadre d'expériences de pollution lumineuse et n'ont pas trouvé de différence de masse entre

le traitement de pollution lumineuse et le contrôle à l'obscurité. De plus, ces extrapolations ne sont pas toujours vérifiées dans notre expérience non plus. Par exemple, les individus mâles de l'espèce *O. plecta* ont mis moins de temps pour atteindre le stade de chrysalide sans avoir des chrysalides spécialement plus lourdes ou légères de manière générale mais finissent par produire des adultes plus légers. Cela met aussi en évidence que les mâles perdent plus de poids quand ils sont en chrysalides que les femelles, certainement lié au fait qu'ils restent plus longtemps sous cette forme de chrysalide. De plus, Molleman et al. (2011) ont montré que la différence de perte de poids entre les mâles et les femelles est corrélée avec l'importance du dimorphisme sexuel (peu important chez nos espèces) et que cette perte de poids est surtout plastique. Ils suggèrent que cette différence est peut-être liée aux traits d'histoire de vie avec les femelles devant pondre qui ont un plus gros intérêt à prendre/garder du poids (et/ou de l'eau) tandis que les mâles sont généralement meilleurs en vol (pour trouver rapidement des femelles) en ayant un certain avantage à être légers et donc à perdre du poids/de l'eau. Nous pouvons également noter que les chenilles étaient plus légères dans le traitement *Smart* par rapport aux autres traitements mais que cette tendance a disparue ou n'était pas significative lorsque l'on regardait le poids des adultes. Tous ces résultats concernant le poids des adultes sont importants car le poids des paillons de nuits adultes est un très bon indicateur de leurs fitness (Honěk & Honek, 1993; Shirai, 1995). Mais n'oublions pas que la fitness n'a pas été mesurée dans notre expérience. En effet, aucun test statistique n'a été réalisé sur la survie des individus et nos conditions de laboratoires ont empêchés une bonne partie des effets négatifs d'ALAN comme par exemple le taux de prédation plus élevé (voir introduction).

Au niveau de la quantité de nourriture mangée, nous n'avons pas observé de différences significatives en fonction des traitements. Vu que certains traitements (comme par exemple *Full*) ont des chenilles, chrysalides et adultes plus lourds que d'autres traitement (le traitement *Dark* dans cet exemple), nous pouvons suggérer que ces individus prenaient plus de masse pour la même quantité de nourriture mangée et donc qu'ils savaient mieux optimiser la nourriture qu'ils ingéraient dans leurs prises de masse. Néanmoins, nous pensons que l'absence de différences significatives dans ce test est probablement due à la manière dont nous mesurons la quantité mangée. En effet, notre système de score était pratique sur le terrain mais n'était pas très précis. Si un individu mangeait chaque jour 30% de morceaux de feuilles, il aurait obtenu le même score qu'un individu mangeant 60% de morceaux de feuilles. Le test statistique réalisé avait surtout pour but de savoir si, en appliquant notre méthode simple de calcul de quantité mangée, on aurait pu se passer de la mesure des poids des individus. La réponse est clairement négative vu que la quantité mangée donne beaucoup moins de résultats et différents que ceux des poids. De plus, nos résultats de quantité mangée, que nous pensons pas pertinents, ne sont pas en accord avec la littérature qui, de manière logique, prévoit une moins grosse quantité mangée pour les individus plus légers (ceux sous pollution lumineuse dans la littérature) (Cieraad et al., 2022).

Vol à la lumière

Pour rappel, uniquement l'espèce *A. exclamationis* a été utilisée pour l'expérience de vol à la lumière. Au vu de la phototaxie positive de cette espèce (*Butterfly Conservation - Heart and Dart*, n.d.; De Prins & Steeman, 2023a) ainsi que le fait que les individus étudiés descendaient d'une mère capturée à l'aide d'un piège lumineux, nous nous attendions à observer beaucoup

de comportements de vols à la lumière. Ces résultats seront probablement différents si des espèces ayant une phototaxie positive moins importante (voir négative) sont étudiés.

Le temps pour faire le premier mouvement ainsi que la probabilité de bouger des individus ont été mesurés en tant que proxy de l'activité des papillons de nuit dans notre expérience de vol à la lumière. Il en est revenu que, malgré une probabilité de bouger similaire et très élevée entre tous les traitements et timing de vol à la lumière, les individus expérimentés pendant la nuit faisaient leurs premiers mouvements significativement plus tôt que les autres timings d'expérience. De plus, les individus expérimentés durant la nuit ont une plus forte probabilité de voler à la lumière que les individus expérimentés durant le jour. Cela indique que l'activité des papillons de nuit (ou en tout cas pour l'espèce *A. exclamatoris*) est plus élevée durant la nuit que durant le jour. C'est bien entendu en accord avec ce que l'on sait des papillons de nuit. Mais cela reflète aussi l'importance de faire cette expérience de nuit (comme Altermatt et Ebert (2016) ou Cieraad et al. (2022) l'ont fait) ou à différents timings. En effet, il est plausible d'imaginer que les papillons en traitement *Full* ne volent pas spécialement plus à la lumière que les individus en traitement *Dark* mais que si on avait fait l'entièreté des expériences de jour, les papillons du traitement *Dark* (avec un cycle circadien normal) auraient moins volé à la lumière que les individus *Full* (avec un cycle circadien perturbé) simplement car ils sont moins actifs que ces derniers durant le jour. Tester des individus en les mettant d'abord une trentaine de minutes à l'obscurité donne des résultats d'activités compris entre le test des individus de jour et le test des individus de nuit mais pas de manière significative. Quand on regarde les résultats (Fig. 20 & 21), il ne nous semble pas incohérent qu'en augmentant l'échantillon, ces différences deviennent significatives. En tout cas, le timing mixte ne permettait pas de simuler parfaitement une nuit aux individus.

Différents tests ont été réalisés en prenant en compte le temps mis pour voler à la lumière avec ou sans exclusion des individus n'ayant pas volé et avec ou sans prendre en compte le temps mis pour faire le premier mouvement. De manière générale, ces tests donnaient des résultats assez différents. Pour commencer, dans le test de vol à la lumière en ne prenant en compte ni le temps pour faire le premier mouvement ni les individus n'ayant pas volé, on voit que les individus expérimentés en jour mettent significativement moins de temps pour voler à la lumière que ceux expérimentés à d'autres timings. Cet effet est clairement contradictoire avec ce que nous avons observé sur le terrain et est certainement surtout dû au fait que ce test ne prend en compte que les individus qui étaient les plus actifs car uniquement ceux-là ont volé quand ils étaient expérimentés de jour (moins du tiers des individus testés durant le jour ont volé). Sur base de ce fait ainsi que le fait que la plupart des autres résultats de ce modèle ne correspondent pas aux résultats des autres modèles, nous considérons qu'il ne représente pas de manière correcte le comportement de vol à la lumière et décidons donc de ne pas plus en parler dans cette discussion. En effet, si on regarde la vitesse des individus pour rejoindre la lampe (en prenant en compte donc ceux qui n'ont pas volé à la lumière), les individus testés de nuit ou de jours mais avec 30 minutes à l'obscurité volent significativement plus rapidement à la lumière que les individus testés de jours et ce même en prenant en compte le temps mis pour faire le premier mouvement. Ces résultats sont en concordance avec ce qui a été observé ainsi qu'avec les probabilités de voler à la lumière. D'ailleurs, tout comme les probabilités de vol à la lumière, nous ne retrouvons pas de différences significatives entre le timing *Mix* et les autres timings même si nous avons l'impression qu'en augmentant l'échantillon, le timing *Mix* se retrouverait (significativement) entre le timing nocturne et diurne de l'expérience. Ce qui renforce ce que nous avons déjà dit concernant l'importance de faire les tests à différents

timings s'ils ne sont pas tous fait la nuit. Toujours en prenant en compte la vitesse, nous remarquons que les individus du traitement *Full* volent plus rapidement à la lumière que les individus du traitement *Dark*. Bien que ces résultats ne soient pas entièrement totalement significatifs ($p = 0,075$), ils sont présents dans les deux modèles prenant ou non en compte le temps mis pour faire le premier mouvement. Cela ferait sens du point de vue de nos autres résultats qui diffèrent souvent entre le traitement *Full* et le traitement *Dark*. À notre connaissance, aucun article scientifique s'est penché sur le comportement de vol à la lumière suite à des conditions d'élevages avec de la pollution lumineuse. Nous avons seulement Altermatt & Ebert (2016) qui ont observé une diminution du comportement de vol à la lumière pour les individus venants de populations soumises à de fortes pollutions lumineuse par rapport aux individus soumis à de faibles pollutions lumineuses. Cependant, leurs individus ont été prélevés spécialement tôt et élever avec une approche « common garden » pour éviter d'avoir un effet de l'environnement de développement, ce qui est l'opposé de notre expérience. Leurs résultats provenaient donc certainement plus d'un processus évolutif.

Une chose intéressante que nous avons observée est que lorsque l'on prend en compte uniquement les individus qui ont volé à la lumière, au plus ils ont bougé rapidement, au plus rapidement ils ont volé à la lumière. Mais lorsque l'on prend en compte tous les individus, y compris ceux qui n'ont pas volé à la lumière, alors aucun effet significatif du temps mis pour faire le premier mouvement n'apparaît. Ce qui veut dire d'une certaine manière que, les individus, qui ont volé, volent plus rapidement à la lumière s'ils étaient plus actifs (ce qui est logique) mais le fait d'être actif (de bouger rapidement) n'augmente pas nécessairement la probabilité de voler (rapidement) à la lumière. Nous remarquons également que, seulement lorsque l'on prend en compte uniquement les individus qui ont volé à la lumière, ce sont les individus du timing *Mix* qui sont les plus rapides. Néanmoins, ces mêmes individus (du timing *Mix*) provenant indirectement de la région avec un faible skyglow le sont moins (rapides) que ceux provenant indirectement de la région avec un fort skyglow (Nous utilisons le terme « indirectement » car leurs mères proviennent de la région avec un faible skyglow et non eux-mêmes qui sont nés au laboratoire). C'est opposé à nos autres résultats qui disent que, généralement, les individus expérimentés volent plus rapidement à la lumière s'ils proviennent indirectement du Luxembourg (faible skyglow) que s'ils proviennent du Brabant (haut skyglow). Ces résultats sont très intéressants car ils suggèrent, comme Altermatt & Ebert (2016) et donc, comme la littérature, que les populations étant soumises à plus de pollution lumineuse (du skyglow dans notre cas), ont une diminution du comportement de vol à la lumière. Cela étant potentiellement de l'évolution par sélection naturelle lié aux effets négatifs du comportement de vol à la lumière en milieu urbain (Altermatt & Ebert, 2016). Cela pourrait également provenir d'une diminution de la sensibilité à la lumière en réponse aux nuits plus lumineuses des régions au fort skyglow (Altermatt & Ebert, 2016). Nous pouvons noter que les individus du traitement *Mixt-smart* sont significativement plus rapide pour voler à la lampe que les individus du traitement *Smart* dans le test ne prenant en compte uniquement les individus qui ont volé à la lumière. Cependant, nous nous méfions très fortement de cette significativité notamment à cause du faible nombre d'individus dans ces deux traitements qui ont volé à la lumière dans notre expérience (13 pour le traitement *Smart* et 14 pour le traitement *Mixt-smart*). Enfin, il semblerait que les papillons avaient un léger biais pour voler plus rapidement vers la lampe quand celle-ci se trouvait du côté Nord de la pièce. Nous n'avons pas d'explications particulières concernant cet effet. Peut-être qu'il y faisait plus chaud ou que des femelles avaient laissé des phéromones même si l'expérience était conçue pour éviter ce genre de problème (voir

la section « Matériel et méthodes »). En tout cas, cela met en évidence l'intérêt et l'utilité de changer de côté la lampe assez régulièrement.

Retour sur expérience

Cette expérience a été réalisée lors de mon mémoire de master en biologie des organismes et écologie. Malgré mon encadrement, je n'étais qu'un scientifique débutant et si je devais refaire ce mémoire/cette expérience, je modifierais un nombre important de choses.

Premièrement, j'aurais aimé faire beaucoup plus de tests statistiques différents, notamment sur la survie des individus, mais le temps m'a pris de court. En effet, les 21 crédits de cours (sans compter les 22 crédits de mémoire) au Q1 de ma deuxième année de master combinée aux manipulations d'élevages qui se sont terminées (pour moi) le 10 novembre n'ont pas aidé à alléger mon emploi du temps.

Deuxièmement, je pense que nourrir les individus un jour sur deux (ou moins) à la place de tous les jours aurait permis de gagner plus de temps. Effectivement, essentiellement Marine Lonnoy (mémorante travaillant sur les mêmes individus) et moi-même nous sommes partagés les manipulations de l'élevage expérimental et cela nous a pris, selon nos estimations, dans les 270 heures par personnes (sans compter les mesures des poids ou de comportement de vol à la lumière). Rediriger la moitié de ce temps pour faire d'autres choses comme plus de mesures, des mesures différentes ou plus de tests statistiques aurait été utile. Je comprends cependant maintenant à quel point les expériences d'élevages peuvent être chronophage.

Troisièmement, je pense qu'il aurait été préférable de profiter du fait que nos conditions soient entièrement artificielles pour inverser le jour et la nuit dans l'insectarium afin de tester le comportement des papillons quand ils « pensent être en nuit » et que moi, l'expérimentateur, est en jour. En effet, à cause de l'émergence de la majorité des individus *A. exclamatoris* dans un court laps de temps, 3 nuits quasiment blanches d'expériences ont dû être effectuées en une dizaine de jours et 25 heures d'expériences de nuits ont dû être effectuées au total. Si le jour et la nuit de l'insectarium étaient réglés sur l'inverse de jour et de la nuit réelle, toutes les expériences comportementales auraient pu être effectuées de jours pour l'expérimentateur et de nuit pour les papillons. Ce qui aurait facilité la mise en place de plus de tests comportementaux. Le nourrissage n'aurait, je pense, pas été significativement plus complexe vu que les papillons n'avaient que 6 heures de nuits. On aurait donc pu mettre par exemple la nuit des papillons entre 7 h et 13 h, faire les expériences de comportement le matin et s'occuper du nourrissage l'après-midi.

Quatrièmement, il est évident que si les conditions de terrains le permettent (ce qui n'était pas notre cas), avoir l'élevage des papillons à une plus grande proximité des balances ou cages de vols serait plus intéressant surtout pour minimiser la perturbation des papillons avant d'être expérimentés.

Enfin, comme dit plus haut dans la discussion, refaire ces expériences (développement et vol à la lumière) avec d'autres espèces serait utile pour voir si l'on détecte une tendance générale. En effet, il ne serait pas étonnant de voir une tendance à obtenir les mêmes résultats qu'avec *A. exclamatoris* avec d'autres espèces qui sont également attirés par la lumière (nous avons capturé des individus sauvages d'*A. exclamatoris* via des pièges lumineux). Nous pourrions également supposer que des espèces de papillons de nuit ayant une phototaxie positive moins importante (voir négative) donneraient des résultats de vols à la lumière différents et peut-être

même en fonction des conditions d'élevage. De plus, différentes espèces réagissent différemment au skyglow (Grenis et al., 2023) et donc le processus d'évolution potentiellement mis en évidence dans ce mémoire ou dans l'article de Altermatt et Ebert (2016) pourrait n'affecter que certaines espèces.

Conclusions

Nous avons mis en évidence que la pollution lumineuse est plus complexe que nous le pensions. En effet, nous avons montré que, contrairement à la littérature, les individus élevés sous pollution lumineuse fixe mettent plus de temps à se développer (sans faire plus ou moins de mues) résultant en chrysalides et adultes plus lourds que les contrôles. Nous avons également démontré l'évolution possible des populations étant soumises à de forts niveaux de skyglow qui diminuent leurs réponses au traitement de pollution lumineuse (en termes de vitesse de cycle de développement) et volent moins vite à la lumière que les populations soumises à de faibles niveaux de skyglow. Il pourrait donc y avoir une interaction entre différents niveaux de pollution lumineuse ainsi qu'une évolution pour s'adapter à ces dernières. Cependant, à cause de la corrélation positive entre le skyglow et le nombre de sources de pollution lumineuse fixe, l'effet de la concentration de ces mêmes sources de pollution lumineuse fixe n'est pas à exclure concernant la cause de l'évolution. Nous avons aussi mis en évidence que, contrairement à beaucoup de suppositions retrouvées dans la littérature, une masse plus importante de chrysalide pour un certain traitement/paramètre ne résulte pas toujours en un adulte plus lourd pour ce même traitement/paramètre. Les études faisant ce genre d'extrapolations se doivent donc d'être prudentes. Nous avons également démontré que sur la plupart des effets étudiés, la pollution lumineuse inconstante est moins importante que la pollution lumineuse fixe et souvent même similaire à notre traitement contrôle. Ce qui est une bonne nouvelle avec l'insertion des lampadaires intelligents dans les villes qui devrait continuer à augmenter. Nous sommes, à notre connaissance, la première étude sur le comportement de vol à la lumière suivant un élevage sous différentes pollutions lumineuses. Nos résultats indiquent que les papillons qui ont été élevés sous pollution lumineuse fixe sont plus à même de voler vers la lumière que les individus élevés sans pollution lumineuse. Nous avons aussi révélé l'importance de faire les expériences comportementales des papillons de nuit durant la nuit ou au moins à différents timings (dont la nuit) car plonger les individus dans l'obscurité peu de temps avant de réaliser l'expérience de jour crée des résultats plus ou moins à mi-chemin entre les tests comportementaux réalisés le jour et ceux réalisés la nuit. Enfin, nos résultats se sont avérés souvent assez différents en fonction de l'espèce étudiée (*O. plecta* et *A. exclamatoris*) ce qui démontre la nécessité de plus étudier l'impact de la pollution lumineuse sur les papillons de nuit et en faisant notamment varier les espèces sujettes aux études.

Remerciements

Je tiens à remercier plusieurs personnes qui m'auront été très utiles lors de la création de ce mémoire.

Premièrement, j'aimerais remercier Hans Van Dyck qui a accepté de me prendre en tant que mémorant et m'a bien intégré au domaine scientifique et au laboratoire (en m'invitant

notamment aux réunions de ce dernier). Je remercie également monsieur Van Dyck pour son encadrement ainsi que ses nombreux retours sur les différentes parties de ce mémoire.

Deuxièmement, Evert Van de Schoot qui s'est entièrement occupé de la capture des papillons et de l'élevage non-expérimental. Il a également mis en place plus ou moins tout l'élevage expérimental ainsi que l'expérience de vol à la lumière en prêtant notamment une partie de son matériel personnel. Je le remercie également pour ses conseils avisés concernant toutes les « manipulations » ainsi que la rédaction de ce mémoire.

Je remercie aussi Marine Lonnoy, mémorante qui, faisant son mémoire sur un sujet semblable au mien avec les mêmes individus, a réalisée environ la moitié des manipulations de l'élevage expérimental.

Je remercie également Christophe Pels qui a aidé monsieur Van de Schoot dans certaines de ses étapes ainsi que moi-même notamment lors de problèmes rencontrés avec la balance.

Enfin, je remercie tous mes proches qui m'ont soutenu lors de cette année et qui m'ont aidé sur certains aspects. J'en profite aussi pour remercier tous les biologistes et futurs biologistes qui m'ont aidé sur différents points.

Annexes

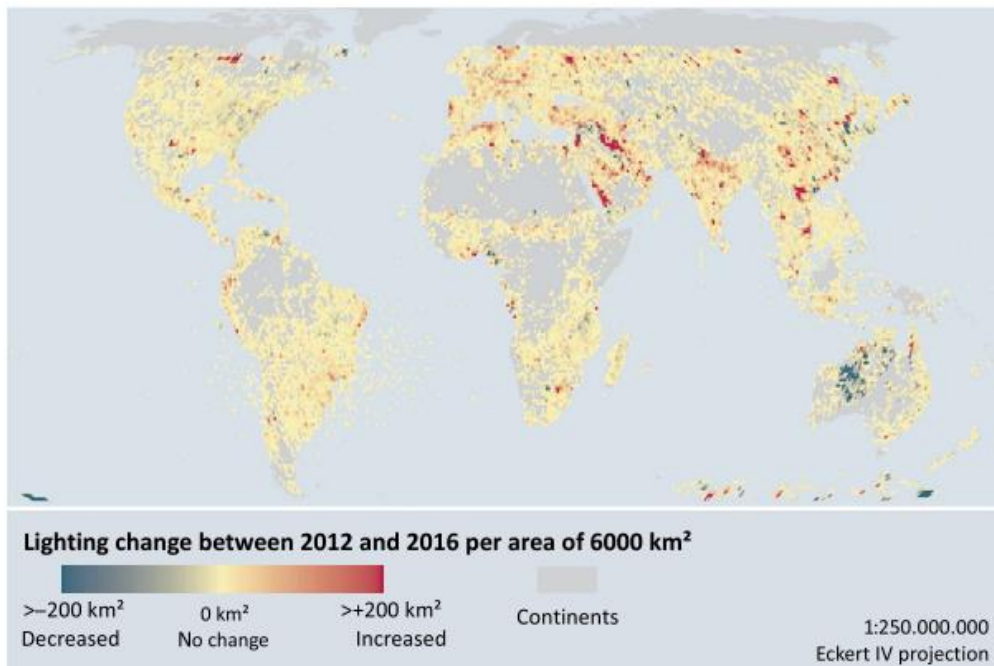


Figure 26 : Changement de superficie éclairée entre 2012 et 2016. Les zones grises ne sont pas éclairées ou pas en manque de données. Au plus la zone est rouge, au plus la superficie éclairée a augmenté. Au plus la zone est bleue, au plus la superficie éclairée a diminué (Kyba et al., 2017).

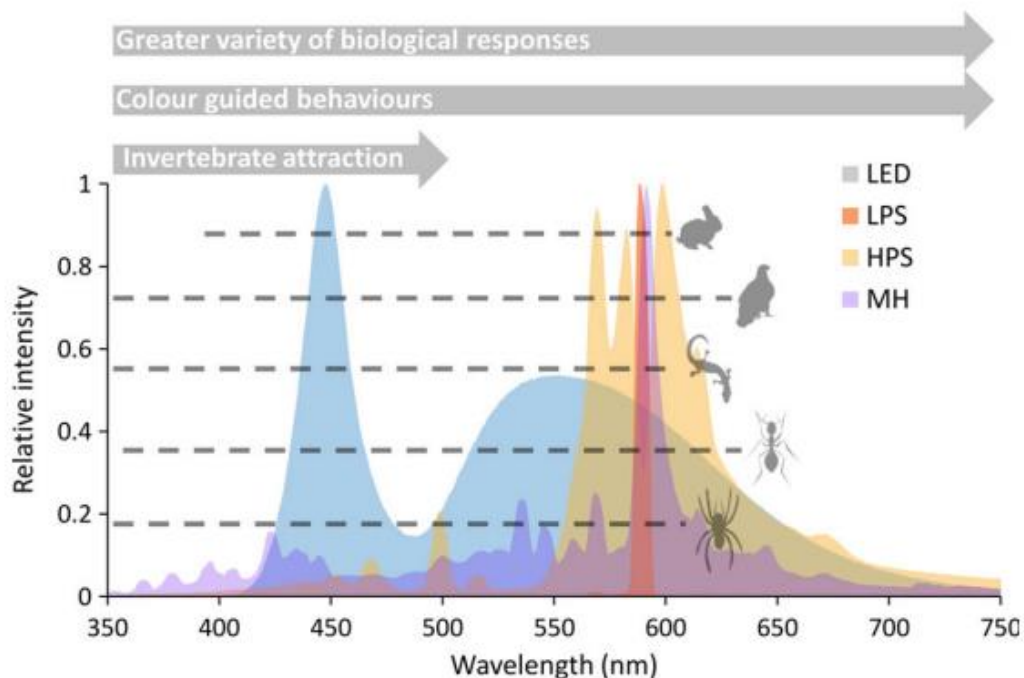


Figure 27 : Intensités, longueurs d'ondes et impacts des différentes lampes fréquemment utilisées dans les lampadaires. HPS (jaune) et LPS (rouge) représentent les lampes sodium à hautes et basses pressions respectivement. MH (mauve) sont les lampes halogènes métalliques et les lampes LED sont mises en bleu. Les flèches grises représentent les longueurs d'ondes auxquelles différentes réponses biologiques sont enregistrées. Les lignes pointillées représentent la gamme de longueurs d'ondes détectable par leur système visuel des différents animaux (mammifères, oiseaux, reptiles, insectes et arachnides respectivement) (Davies & Smyth, 2018).

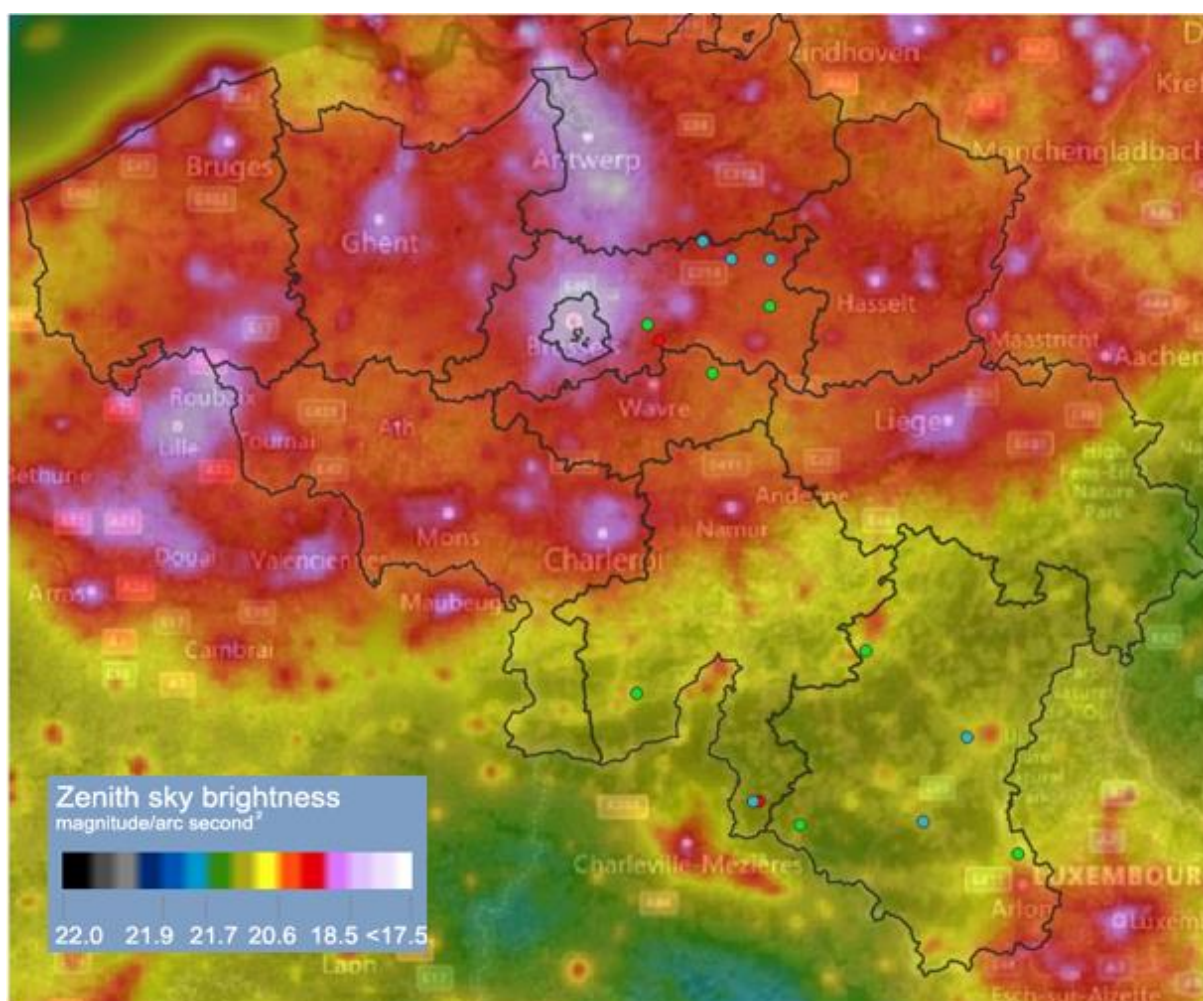


Figure 28 : Carte de la Belgique avec les différentes provinces sur fond de la « light pollution map » (Light Pollution Map, 2023) ainsi que les lieux d'échantillonnages. Les lieux d'échantillonnages sont les différents points de couleur bleue (les deux espèces ont été échantillonnées), rouge (seulement *O. plecta* a été échantillonné) et vert (seulement *A. exclamatoris* a été échantillonné). La couleur de fond représente la pollution lumineuse atmosphérique (skyglow). La légende figure s'y rapportant est en bas à gauche de la figure. Les lieux d'échantillonnages dans les provinces de Namur et du Luxembourg seront décrits comme « Luxembourg » dans la colonne région du jeu de données (bas skyglow) et les lieux d'échantillonnages dans les provinces du Brabant Flamand et du Brabant Wallon seront décrits comme « Brabant » dans la colonne région du jeu de données (haut skyglow).

Tableau 3 : Résultats des glmm poisson pour le nombre total de mues de l'espèce *O. plecta*. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne référence indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	0,48624511	0,13686358	3,55277209	0,00038119
Treatment_bisFull	Dark	-0,04851467	0,14689916	-0,3302583	0,7412048
Treatment_bisSmart	Dark	-0,00391732	0,20557978	-0,01905499	0,98479723
SexMale	Dark	0,01223587	0,19205571	0,06371	0,94920115
RegionLuxembourg	Dark	0,06328792	0,18031791	0,35097968	0,72560359
SexMale: RegionLuxembourg	Dark	-0,04973593	0,26660168	-0,18655521	0,85200938

(Intercept)	Smart	0,48232778	0,2181653	2,21083637	0,02704717
Treatment_bisDark	Smart	0,00391732	0,20557977	0,019055	0,98479723
Treatment_bisFull	Smart	-0,04459735	0,21549281	-0,20695515	0,83604488
SexMale	Smart	0,01223587	0,19205577	0,06370998	0,94920116
RegionLuxembourg	Smart	0,06328792	0,18031794	0,35097962	0,72560364
SexMale: RegionLuxembourg	Smart	-0,04973593	0,26660177	-0,18655515	0,85200944
(Intercept)	Full	0,43773044	0,16583559	2,63954467	0,00830175
Treatment_bisDark	Full	0,04851467	0,14689918	0,33025825	0,74120483
Treatment_bisSmart	Full	0,04459735	0,21549284	0,20695512	0,83604491
SexMale	Full	0,01223587	0,19205579	0,06370997	0,94920116
RegionLuxembourg	Full	0,06328792	0,18031795	0,3509796	0,72560365
SexMale: RegionLuxembourg	Full	-0,04973593	0,26660179	-0,18655514	0,85200944

Tableau 4 : Résultats des glmm poisson pour le nombre total de mues de l'espèce *A. exclamationis*. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne référence indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	1,25339959	0,0960771	13,0457678	6,72E-39
Treatment_bisFull	Dark	-0,07917892	0,10389849	-0,76207961	0,44601249
Treatment_bisSmart	Dark	-0,02560763	0,11909567	-0,21501729	0,82975384
Treatment_bisMixt_smart	Dark	-0,02336661	0,12160714	-0,1921483	0,84762604
SexMale	Dark	-0,02681319	0,11680154	-0,22956196	0,81843217
RegionLuxembourg	Dark	0,10461994	0,1125019	0,92993929	0,35240252
SexMale:RegionLuxembourg	Dark	0,08672455	0,16708977	0,51902971	0,60374002
(Intercept)	Smart	1,22779215	0,11531392	10,6473891	1,79E-26
Treatment_bisDark	Smart	0,02560206	0,11909645	0,21496914	0,82979138
Treatment_bisFull	Smart	-0,0535476	0,12045698	-0,44453709	0,65665432
Treatment_bisMixt_smart	Smart	0,00224773	0,13606054	0,01652005	0,98681951
SexMale	Smart	-0,02682066	0,11680151	-0,22962598	0,81838242
RegionLuxembourg	Smart	0,10459387	0,11250256	0,9297022	0,35252529
SexMale:RegionLuxembourg	Smart	0,08675437	0,16709011	0,51920711	0,60361632
(Intercept)	Full	1,1742453	0,10029374	11,708062	1,16E-31
Treatment_bisDark	Full	0,07914223	0,1038985	0,76172633	0,44622336
Treatment_bisSmart	Full	0,05354127	0,12045695	0,44448468	0,6566922
Treatment_bisMixt_smart	Full	0,05580128	0,12277377	0,45450492	0,64946545
SexMale	Full	-0,02681807	0,11680153	-0,2296038	0,81839965
RegionLuxembourg	Full	0,10460336	0,11250264	0,92978583	0,35248198
SexMale:RegionLuxembourg	Full	0,08674509	0,16709004	0,51915178	0,6036549

Tableau 5 : Résultats des glmm binomiaux pour la probabilité de rentrer en diapause pour l'espèce *O. plecta*. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne référence indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	-1,19221733	0,62888906	-1,89575142	0,05799292
TreatmentFull	Dark	-1,38611177	0,71896149	-1,92793604	0,05386308
TreatmentSmart	Dark	-1,11754792	0,67268265	-1,66133008	0,09664717
SexMale	Dark	-0,2208998	0,564401	-0,39138805	0,69551043
RegionLuxembourg	Dark	-0,45817852	0,74579139	-0,61435212	0,53898267
(Intercept)	Smart	-2,31030709	0,78187425	-2,95483206	0,00312839
TreatmentDark	Smart	1,1173213	0,67267796	1,66100478	0,09671249
TreatmentFull	Smart	-0,26885228	0,82431242	-0,32615338	0,74430831
SexMale	Smart	-0,22121163	0,56443624	-0,39191607	0,69512023
RegionLuxembourg	Smart	-0,45710721	0,74621412	-0,61256843	0,54016174
(Intercept)	Full	-2,57838764	0,81373395	-3,16858801	0,00153181
TreatmentDark	Full	1,38618592	0,71896741	1,9280233	0,05385223
TreatmentSmart	Full	0,26862423	0,82431261	0,32587665	0,74451769
SexMale	Full	-0,22088002	0,56440026	-0,3913535	0,69553596
RegionLuxembourg	Full	-0,45816826	0,74578495	-0,61434367	0,53898825

Tableau 6 : Résultats des glmm binomiaux pour la probabilité de rentrer en diapause pour l'espèce *A. exclamationis*. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne référence indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	-3,47914901	1,32730514	-2,62121265	0,00876176
TreatmentFull	Dark	19,4110552	15811,9564	0,00122762	0,9990205
TreatmentSmart	Dark	20,0856809	15811,9564	0,00127028	0,99898646
SexMale	Dark	-19,3726361	15811,9564	-0,00122519	0,99902244
RegionLuxembourg	Dark	-1,15535807	1,3135667	-0,87955798	0,37909881
SexFemale:Treatment_bisFull	Dark	-17,2008661	15811,9564	-0,00108784	0,99913203
SexFemale:Treatment_bisSmart	Dark	-37,9454603	17564,4364	-0,00216036	0,99827629
SexMale:Treatment_bisSmart	Dark	0,88808426	1,72441415	0,51500636	0,60654857
SexFemale:Treatment_bisMixt_smart	Dark	-38,7121001	19022,2857	-0,00203509	0,99837623
(Intercept)	Smart	-1,2689251	0,887803	-1,42928679	0,15292182
TreatmentDark	Smart	-24,5858405	210236,304	-0,00011694	0,99990669
TreatmentSmart	Smart	0,67479419	1,660676	0,40633706	0,68449496
SexMale	Smart	-2,17193671	1,29180326	-1,68132159	0,09270047
RegionLuxembourg	Smart	-1,15544599	1,31358593	-0,87961203	0,37906952
SexFemale:Treatment_bisDark	Smart	22,3756437	210236,304	0,00010643	0,99991508
SexFemale:Treatment_bisSmart	Smart	-165,443972	15005998,2	-1,10E-05	0,9999912
SexMale:Treatment_bisSmart	Smart	0,8880807	1,72440748	0,51500629	0,60654862

SexFemale:Treatment_bisMixt_smart	Smart	-176,869758	16777216	-1,05E-05	0,99999159
-----------------------------------	-------	-------------	----------	-----------	------------

Tableau 7 : Résultats des lmm pour le temps (jours) mis pour rentrer chrysalide pour l'espèce *O. plecta*. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne référence indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	14,8358273	0,88478062	9,9935241	16,7678031	1,20E-08
Treatment_bisFull	Dark	-0,17255396	0,38316685	123,907326	-0,45033635	0,6532549
Treatment_bisSmart	Dark	0,3866638	0,55272756	124,887166	0,69955585	0,48550568
SexMale	Dark	-0,66840561	0,3542391	124,254186	-1,88687698	0,06151027
RegionLuxembourg	Dark	0,31294714	1,21455705	8,90370608	0,2576636	0,8025228
(Intercept)	Smart	15,2224911	1,00191551	16,2438567	15,1933879	5,03E-11
Treatment_bisDark	Smart	-0,3866638	0,55272756	124,887166	-0,69955585	0,48550568
Treatment_bisFull	Smart	-0,55921775	0,57185097	124,790868	-0,9779082	0,3300117
SexMale	Smart	-0,66840561	0,3542391	124,254186	-1,88687698	0,06151027
RegionLuxembourg	Smart	0,31294714	1,21455705	8,90370609	0,2576636	0,8025228
(Intercept)	Full	14,6632733	0,90953377	11,2159858	16,121747	4,14E-09
Treatment_bisDark	Full	0,17255396	0,38316685	123,907326	0,45033635	0,6532549
Treatment_bisSmart	Full	0,55921775	0,57185097	124,790868	0,9779082	0,3300117
SexMale	Full	-0,66840561	0,3542391	124,254186	-1,88687698	0,06151027
RegionLuxembourg	Full	0,31294714	1,21455705	8,90370609	0,2576636	0,8025228

Tableau 8 : Résultats des lmm pour le temps (jours) mis pour rentrer chrysalide pour l'espèce *A. exclamationis*. Le temps mis pour entrer en chrysalide a subi une transformation logarithmique (en base e). La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne référence indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	3,73022321	0,07267785	15,9275585	51,3254449	4,04E-19
Treatment_bisFull	Dark	-0,02534675	0,05742573	141,055825	-0,4413831	0,65961152
Treatment_bisSmart	Dark	-0,07176979	0,07028877	140,342407	-1,02107055	0,30897791
Treatment_bisMixt_smart	Dark	-0,05576505	0,0689624	142,481416	-0,80862981	0,42007626
SexMale	Dark	0,00483346	0,03624287	147,534799	0,13336308	0,89408797
RegionLuxembourg	Dark	0,1410652	0,10142588	17,4847904	1,39082048	0,18172831
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Dark	0,08332946	0,08899521	144,914259	0,93633649	0,35065775
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Dark	-0,15687059	0,10129398	140,771354	-1,54866643	0,12370718
Treatment_bisMixt_smart: RegionLuxembourg	Dark	0,23498171	0,10553265	144,897884	2,22662573	0,0275153
(Intercept)	Smart	3,65845341	0,08318004	26,7800455	43,9823472	1,65E-26

Treatment_bisDark	Smart	0,07176979	0,07028877	140,342406	1,02107055	0,30897791
Treatment_bisFull	Smart	0,04642305	0,07012368	138,684052	0,66201669	0,50905908
Treatment_bisMixt_smart	Smart	0,01600474	0,07972639	139,234651	0,20074589	0,84119022
SexMale	Smart	0,00483346	0,03624287	147,534799	0,13336308	0,89408797
RegionLuxembourg	Smart	-0,01580539	0,11266332	26,4493198	-0,14028868	0,88949482
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Smart	0,15687059	0,10129398	140,771354	1,54866643	0,12370718
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Smart	0,24020005	0,10075043	140,26883	2,38410948	0,0184588
Treatment_bisMixt_smart: RegionLuxembourg	Smart	0,39185229	0,11576212	141,41941	3,38497841	0,00092155
(Intercept)	Full	3,70487646	0,07289693	16,4583325	50,8234938	1,57E-19
Treatment_bisDark	Full	0,02534675	0,05742573	141,055825	0,4413831	0,65961152
Treatment_bisSmart	Full	-0,04642305	0,07012368	138,684052	-0,66201669	0,50905908
Treatment_bisMixt_smart	Full	-0,0304183	0,06844316	139,646914	-0,44443156	0,65741859
SexMale	Full	0,00483346	0,03624287	147,534799	0,13336308	0,89408797
RegionLuxembourg	Full	0,22439466	0,10068371	17,4264808	2,22870868	0,0392648
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Full	-0,08332946	0,08899521	144,914259	-0,93633649	0,35065775
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Full	-0,24020005	0,10075043	140,26883	-2,38410948	0,0184588
Treatment_bisMixt_smart: RegionLuxembourg	Full	0,15165225	0,10336783	141,401768	1,46711261	0,14456606
(Intercept)	Mixt_smart	3,67445816	0,08172677	25,7928722	44,9602738	4,96E-26
Treatment_bisDark	Mixt_smart	0,05576505	0,0689624	142,481416	0,80862981	0,42007626
Treatment_bisFull	Mixt_smart	0,0304183	0,06844316	139,646914	0,44443156	0,65741859
Treatment_bisSmart	Mixt_smart	-0,01600474	0,07972639	139,234651	-0,20074589	0,84119022
SexMale	Mixt_smart	0,00483346	0,03624287	147,534799	0,13336308	0,89408797
RegionLuxembourg	Mixt_smart	0,3760469	0,11564449	28,8463939	3,25174947	0,00291828
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Mixt_smart	-0,23498171	0,10553265	144,897884	-2,22662573	0,0275153
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Mixt_smart	-0,15165225	0,10336783	141,401768	-1,46711261	0,14456606
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Mixt_smart	-0,39185229	0,11576212	141,41941	-3,38497841	0,00092155

Tableau 9 : Résultats des Imm pour le temps (jours) en chrysalide pour l'espèce *O. plecta*. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne référence indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	13,1595521	0,27128711	10,6422473	48,5078417	7,81E-14
Treatment_bisFull	Dark	0,1938076	0,1874238	107,589573	1,03406076	0,30342649
Treatment_bisSmart	Dark	-0,41761881	0,27141143	109,458784	-1,53869281	0,12676518
SexMale	Dark	0,43773983	0,17606006	110,646314	2,48630967	0,01440167
RegionLuxembourg	Dark	-0,33463563	0,35552577	7,79011795	-0,94124157	0,37484761
(Intercept)	Smart	12,7419333	0,35696189	29,1673264	35,6955006	1,27E-25
Treatment_bisDark	Smart	0,41761881	0,27141143	109,458742	1,53869281	0,12676518
Treatment_bisFull	Smart	0,61142641	0,27459728	108,289262	2,2266295	0,02804197
SexMale	Smart	0,43773983	0,17606006	110,646314	2,48630967	0,01440167
RegionLuxembourg	Smart	-0,33463563	0,35552577	7,79011796	-0,94124157	0,37484761
(Intercept)	Full	13,3533597	0,29264807	14,5442667	45,6294128	4,12E-17
Treatment_bisDark	Full	-0,1938076	0,1874238	107,589573	-1,03406076	0,30342649
Treatment_bisSmart	Full	-0,61142641	0,27459728	108,289271	-2,2266295	0,02804197
SexMale	Full	0,43773983	0,17606006	110,646314	2,48630967	0,01440167
RegionLuxembourg	Full	-0,33463563	0,35552577	7,79011795	-0,94124157	0,37484761

Tableau 10 : Résultats des Imm pour le temps (jours) en chrysalide pour l'espèce *A. exclamatoris*. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne référence indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	13,2970982	0,52861683	1,28897425	25,1545117	0,01080383
Treatment_bisFull	Dark	0,6459053	0,24286223	115,687832	2,65955434	0,00893404
Treatment_bisSmart	Dark	0,52202219	0,30194923	112,881842	1,72884096	0,08657156
Treatment_bisMixt_smart	Dark	0,33982025	0,29253666	122,350649	1,16163303	0,2476457
SexMale	Dark	0,50615463	0,14953536	125,374447	3,38484905	0,00095119
RegionLuxembourg	Dark	0,3184147	0,29174773	59,9018945	1,09140421	0,27946554
Treatment_bisFull:RegionLuxembourg	Dark	-0,72608232	0,37817773	119,272967	-1,91994996	0,05725231
Treatment_bisSmart:RegionLuxembourg	Dark	-0,62324435	0,41151376	113,785957	-1,51451642	0,13266783
Treatment_bisMixt_smart:RegionLuxembourg	Dark	0,94407735	0,42631078	122,436231	2,21452845	0,02864315
(Intercept)	Smart	13,8191204	0,56086166	1,62861852	24,6390891	0,00434396
Treatment_bisDark	Smart	-0,52202219	0,30194923	112,881842	-1,72884096	0,08657156
Treatment_bisFull	Smart	0,12388311	0,31099429	116,462188	0,39834529	0,69110501
Treatment_bisMixt_smart	Smart	-0,18220194	0,37286283	120,441316	-0,48865676	0,6259733

SexMale	Smart	0,50615463	0,14953536	125,374447	3,38484905	0,00095119
RegionLuxembourg	Smart	-0,30482966	0,35222362	96,9262046	-0,86544353	0,38893245
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Smart	0,62324435	0,41151376	113,785957	1,51451642	0,13266783
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Smart	-0,10283796	0,42756986	117,207725	-0,24051733	0,81034942
Treatment_bisMixt_s mart: RegionLuxembourg	Smart	1,56732171	0,46889454	119,030103	3,34258896	0,00110982
(Intercept)	Full	13,9430035	0,53220991	1,32438711	26,1983164	0,0092543
Treatment_bisDark	Full	-0,6459053	0,24286223	115,687832	-2,65955434	0,00893404
Treatment_bisSmart	Full	-0,12388311	0,31099429	116,462188	-0,39834529	0,69110501
Treatment_bisMixt_s mart	Full	-0,30608506	0,2909353	115,466175	-1,05207259	0,29496301
SexMale	Full	0,50615463	0,14953536	125,374447	3,38484905	0,00095119
RegionLuxembourg	Full	-0,40766762	0,31587058	64,9282377	-1,29061598	0,20141386
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Full	0,72608232	0,37817773	119,272967	1,91994996	0,05725231
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Full	0,10283796	0,42756986	117,207725	0,24051733	0,81034942
Treatment_bisMixt_s mart: RegionLuxembourg	Full	1,67015967	0,43689475	118,246137	3,82279637	0,00021204
(Intercept)	Mixt_smar t	13,6369185	0,55396987	1,54968069	24,6167153	0,00538471
Treatment_bisDark	Mixt_smar t	-0,33982025	0,29253666	122,350649	-1,16163303	0,2476457
Treatment_bisFull	Mixt_smar t	0,30608506	0,2909353	115,466175	1,05207259	0,29496301
Treatment_bisSmart	Mixt_smar t	0,18220194	0,37286283	120,441316	0,48865676	0,6259733
SexMale	Mixt_smar t	0,50615463	0,14953536	125,374447	3,38484905	0,00095119
RegionLuxembourg	Mixt_smar t	1,26249205	0,36527472	95,3078102	3,45628091	0,00081968
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Mixt_smar t	-0,94407735	0,42631078	122,436231	-2,21452845	0,02864315
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Mixt_smar t	-1,67015967	0,43689475	118,246137	-3,82279637	0,00021204
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Mixt_smar t	-1,56732171	0,46889454	119,030103	-3,34258896	0,00110982

Tableau 11 : Résultats des lmm pour le temps (jours) mis pour devenir adulte pour l'espèce *O. plecta*. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne reference indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	27,8755795	0,90303034	9,78441906	30,868929	4,44E-11
Treatment_bisFull	Dark	0,08411044	0,84449075	102,980079	0,09959901	0,92085631
Treatment_bisSmart	Dark	-0,42992325	1,28942884	91,591569	-0,33342146	0,73957825

SexMale	Dark	0,15250938	0,64865083	102,797281	0,23511783	0,81458501
RegionLuxembourg	Dark	-0,21574895	1,20429756	10,4767197	-0,1791492	0,86123797
Treatment_bisFull: SexMale	Dark	-0,53129757	0,96995344	103,582246	-0,54775574	0,58503805
Treatment_bisSmart: SexMale	Dark	-0,276006	1,39542799	104,066126	-0,19779308	0,8435928
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Dark	0,32577994	0,93994014	101,045726	0,34659648	0,72961522
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Dark	0,71090868	1,39942205	102,090842	0,50800163	0,61254806
(Intercept)	Smart	27,9973497	1,03317249	14,548382	27,0984273	7,35E-14
TreatmentDark	Smart	-0,4384482	0,88040134	102,889551	-0,49800946	0,61954018
TreatmentFull	Smart	0,00482502	0,92702593	103,820955	0,00520484	0,99585714
SexMale	Smart	-0,70598242	0,76247597	102,738009	-0,92590777	0,35666379
RegionLuxembourg	Smart	0,3419302	1,32353158	13,0908398	0,25834683	0,80015653
TreatmentDark: SexMale	Smart	1,88869432	1,10447721	101,304916	1,71003467	0,09032062
TreatmentFull: SexMale	Smart	0,27217126	1,02728988	102,041561	0,26494105	0,79158932
TreatmentDark: RegionLuxembourg	Smart	-1,12243474	1,082282	101,850655	-1,03710007	0,30214519
TreatmentFull: RegionLuxembourg	Smart	-0,21537925	1,02088488	102,098748	-0,2109731	0,83332877
(Intercept)	Full	28,0021747	1,04720955	16,1114242	26,7398008	8,89E-15
TreatmentDark	Full	-0,44327322	0,90897099	101,343037	-0,48766487	0,62684056
TreatmentSmart	Full	-0,00482502	0,92702593	103,820955	-0,00520484	0,99585714
SexMale	Full	-0,43381117	0,71271518	103,12554	-0,60867395	0,544079
RegionLuxembourg	Full	0,12655094	1,29023868	12,0109191	0,09808336	0,92348395
TreatmentDark: SexMale	Full	1,61652306	1,09079314	104,18586	1,48197032	0,14136653
TreatmentSmart: SexMale	Full	-0,27217126	1,02728988	102,041561	-0,26494105	0,79158932
TreatmentDark: RegionLuxembourg	Full	-0,90705549	1,04625717	100,798393	-0,86695271	0,38802703
TreatmentSmart: RegionLuxembourg	Full	0,21537925	1,02088488	102,098748	0,2109731	0,83332877

Tableau 12 : Résultats des lmm pour le temps (jours) mis pour devenir adulte pour l'espèce *A. exclamatoris*. Le temps mis pour devenir adulte a subi une transformation logarithmique (en base e). La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne reference indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	3,93783199	0,05372966	6,66780872	73,289721	6,07E-11
Treatment_bisFull	Dark	0,01944028	0,03779753	114,68783	0,51432684	0,60801317
Treatment_bisSmart	Dark	0,00552708	0,04643601	112,131751	0,11902572	0,90546796
Treatment_bisMixt_smart	Dark	0,00806843	0,04509883	112,949573	0,17890551	0,85833242
SexMale	Dark	0,03732054	0,02364111	120,643665	1,57862911	0,11703962

RegionLuxembourg	Dark	0,11346955	0,06359356	18,2466826	1,78429314	0,09101423
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Dark	0,04515876	0,05915378	116,783455	0,76341291	0,44675666
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Dark	-0,1037911	0,06412734	113,990567	-1,61851559	0,10831523
Treatment_bisMixt_s mart: RegionLuxembourg	Dark	0,14646528	0,06692477	119,669046	2,18850615	0,03057481
(Intercept)	Smart	3,94335907	0,06083989	10,061802	64,8153565	1,59E-14
Treatment_bisDark	Smart	-0,00552708	0,04643601	112,131751	-0,11902572	0,90546796
Treatment_bisFull	Smart	0,0139132	0,04788865	112,461609	0,29053235	0,77194408
Treatment_bisMixt_s mart	Smart	0,00254135	0,0565384	84,8699576	0,0449491	0,96425348
SexMale	Smart	0,03732054	0,02364111	120,643665	1,57862911	0,11703962
RegionLuxembourg	Smart	0,00967845	0,07017771	26,6699491	0,13791348	0,89134479
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Smart	0,1037911	0,06412734	113,990567	1,61851559	0,10831523
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Smart	0,14894986	0,06644907	116,96651	2,24156429	0,02687582
Treatment_bisMixt_s mart: RegionLuxembourg	Smart	0,25025638	0,07326972	117,544237	3,41554997	0,00087457
(Intercept)	Full	3,95727227	0,05392866	6,87688782	73,3797668	3,28E-11
Treatment_bisDark	Full	-0,01944028	0,03779753	114,68783	-0,51432684	0,60801317
Treatment_bisSmart	Full	-0,0139132	0,04788865	112,461609	-0,29053235	0,77194408
Treatment_bisMixt_s mart	Full	-0,01137185	0,04460159	112,055707	-0,25496517	0,79921736
SexMale	Full	0,03732054	0,02364111	120,643665	1,57862911	0,11703962
RegionLuxembourg	Full	0,15862831	0,06541996	20,9088436	2,42476933	0,02446623
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Full	-0,04515876	0,05915378	116,783455	-0,76341291	0,44675666
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Full	-0,14894986	0,06644907	116,96651	-2,24156429	0,02687582
Treatment_bisMixt_s mart: RegionLuxembourg	Full	0,10130652	0,06795441	117,185793	1,49080128	0,13870056
(Intercept)	Mixt_smar t	3,94590042	0,05829087	8,66766245	67,6932828	4,13E-13
Treatment_bisDark	Mixt_smar t	-0,00806843	0,04509883	112,949573	-0,17890551	0,85833242
Treatment_bisFull	Mixt_smar t	0,01137185	0,04460159	112,055707	0,25496517	0,79921736
Treatment_bisSmart	Mixt_smar t	-0,00254135	0,0565384	84,8699575	-0,0449491	0,96425348
SexMale	Mixt_smar t	0,03732054	0,02364111	120,643665	1,57862911	0,11703962
RegionLuxembourg	Mixt_smar t	0,25993483	0,07167797	28,7747452	3,62642577	0,00110059
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Mixt_smar t	-0,14646528	0,06692477	119,669046	-2,18850615	0,03057481
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Mixt_smar t	-0,10130652	0,06795441	117,185793	-1,49080128	0,13870056

Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Mixt_smar t	-0,25025638	0,07326972	117,544237	-3,41554997	0,00087457
---	----------------	-------------	------------	------------	-------------	------------

Tableau 13 : Résultats des Imm pour les poids (g) des chrysalides de l'espèce *O. plecta*. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne référence indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	0,15186745	0,00689383	13,5932807	22,0294804	4,99E-12
TreatmentFull	Dark	0,00845186	0,00458525	111,147714	1,84327173	0,06795368
TreatmentSmart	Dark	0,00388264	0,00442479	112,44766	0,87747484	0,38209969
SexMale	Dark	-0,00213831	0,00451749	112,735651	-0,47334054	0,63688552
RegionLuxembourg	Dark	-0,00587421	0,00886986	10,2498511	-0,66226608	0,52241212
TreatmentFull: SexMale	Dark	-0,00289035	0,0064351	112,308634	-0,44915303	0,65418681
TreatmentSmart: SexMale	Dark	0,01237303	0,00671755	111,555678	1,84189578	0,06814661
(Intercept)	Smart	0,15575009	0,00700344	14,2606074	22,2390888	1,79E-12
TreatmentDark	Smart	-0,00388264	0,00442479	112,44766	-0,87747484	0,38209969
TreatmentFull	Smart	0,00456922	0,00452301	111,573392	1,01021601	0,31457762
SexMale	Smart	0,01023472	0,00496066	112,329307	2,06317479	0,04140112
RegionLuxembourg	Smart	-0,00587421	0,00886986	10,2498511	-0,66226608	0,52241212
TreatmentDark: SexMale	Smart	-0,01237303	0,00671755	111,555678	-1,84189578	0,06814661
TreatmentFull: SexMale	Smart	-0,01526338	0,00658563	110,955659	-2,31767763	0,02230082
(Intercept)	Full	0,16031931	0,00704383	14,8180278	22,760258	6,13E-13
TreatmentDark	Full	-0,00845186	0,00458525	111,147714	-1,84327173	0,06795368
TreatmentSmart	Full	-0,00456922	0,00452301	111,573392	-1,01021601	0,31457762
SexMale	Full	-0,00502866	0,00448451	111,265633	-1,12134048	0,26455723
RegionLuxembourg	Full	-0,00587421	0,00886986	10,2498511	-0,66226608	0,52241212
TreatmentDark: SexMale	Full	0,00289035	0,0064351	112,308634	0,44915303	0,65418681
TreatmentSmart: SexMale	Full	0,01526338	0,00658563	110,955659	2,31767763	0,02230082

Tableau 14 : Résultats des Imm pour les poids (g) des chrysalides de l'espèce *O. plecta* en prenant en compte le temps (jours) mis pour entrer en chrysalide. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne référence indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	0,13296252	0,01184168	61,5994613	11,2283506	1,54E-16
TT_pupation	Dark	0,00129763	0,00065696	117,95508	1,9751948	0,05058166
TreatmentFull	Dark	0,00832257	0,00452233	110,028139	1,84032952	0,06841489
TreatmentSmart	Dark	0,00302138	0,00438619	110,886805	0,68883835	0,49236376

SexMale	Dark	-0,00190013	0,00445755	111,656764	-0,42627321	0,67072944
RegionLuxembourg	Dark	-0,0069337	0,00895872	10,0167957	-0,77396117	0,45683179
TreatmentFull: SexMale	Dark	-0,00199712	0,00636497	111,090764	-0,31376702	0,7542864
TreatmentSmart: SexMale	Dark	0,01320864	0,00663865	110,202619	1,98965669	0,04910575
(Intercept)	Smart	0,14128509	0,01198663	63,6911364	11,7868894	1,18E-17
TT_pupation	Smart	0,00129763	0,00065696	117,955078	1,9751948	0,05058166
TreatmentDark	Smart	-0,00832257	0,00452233	110,028139	-1,84032952	0,06841489
TreatmentSmart	Smart	-0,00530119	0,00447601	110,140025	-1,18435813	0,23882087
SexMale	Smart	-0,00389725	0,0044596	110,208746	-0,87390249	0,38407166
RegionLuxembourg	Smart	-0,0069337	0,00895872	10,0167956	-0,77396117	0,45683179
TreatmentDark: SexMale	Smart	0,00199712	0,00636497	111,090764	0,31376702	0,7542864
TreatmentSmart: SexMale	Smart	0,01520576	0,00649505	109,861452	2,34112977	0,02102926
(Intercept)	Full	0,1359839	0,01225892	67,3987174	11,0926521	7,50E-17
TT_pupation	Full	0,00129763	0,00065696	117,955082	1,9751948	0,05058166
TreatmentDark	Full	-0,00302138	0,00438619	110,886805	-0,68883835	0,49236376
TreatmentFull	Full	0,00530119	0,00447601	110,140025	1,18435813	0,23882087
SexMale	Full	0,01130851	0,00492208	110,740441	2,29750771	0,02346891
RegionLuxembourg	Full	-0,0069337	0,00895872	10,0167957	-0,77396117	0,45683179
TreatmentDark: SexMale	Full	-0,01320864	0,00663865	110,202619	-1,98965669	0,04910575
TreatmentFull: SexMale	Full	-0,01520576	0,00649505	109,861452	-2,34112977	0,02102926

Tableau 15 : Résultats des lmm pour les poids (g) des chrysalides de l'espèce A. exclamationis. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne référence indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	0,31768777	0,01867902	17,4655998	17,0077305	2,61E-12
Treatment_bisFull	Dark	0,02024788	0,01594034	139,663529	1,27022903	0,20611512
Treatment_bisSmart	Dark	0,01732172	0,01744408	141,721782	0,99298516	0,32240955
Treatment_bisMixt_smart	Dark	0,07808369	0,01887122	142,688894	4,13771246	5,97E-05
SexMale	Dark	0,02696883	0,01722325	143,882597	1,56583867	0,11958311
RegionLuxembourg	Dark	0,02217831	0,02172206	9,67201079	1,02100416	0,33211103
Treatment_bisFull: SexMale	Dark	-0,00044943	0,02392421	141,91322	-0,01878572	0,98503843
Treatment_bisSmart: SexMale	Dark	-0,05456098	0,02884039	146,305545	-1,89182534	0,06049034
Treatment_bisMixt_smart:SexMale	Dark	-0,06275453	0,02857574	143,939336	-2,19607694	0,02968718
(Intercept)	Smart	0,33500948	0,02008303	23,8200387	16,6812224	1,22E-14

Treatment_bisDark	Smart	-0,01732172	0,01744408	141,721782	-0,99298516	0,32240955
Treatment_bisFull	Smart	0,00292616	0,01748156	140,618688	0,16738557	0,86730716
Treatment_bisMixt_smart	Smart	0,06076197	0,01980121	138,188503	3,0685988	0,00258897
SexMale	Smart	-0,02759214	0,02303768	146,896488	-1,19769614	0,23296433
RegionLuxembourg	Smart	0,02217831	0,02172206	9,67201079	1,02100416	0,33211103
Treatment_bisDark: SexMale	Smart	0,05456098	0,02884039	146,305545	1,89182534	0,06049034
Treatment_bisFull: SexMale	Smart	0,05411154	0,02847726	145,207243	1,90016681	0,05939349
Treatment_bisMixt_smart: SexMale	Smart	-0,00819356	0,03190984	143,692041	-0,25677217	0,79772195
(Intercept)	Full	0,33793565	0,01881294	18,2838612	17,9629383	4,57E-13
Treatment_bisDark	Full	-0,02024788	0,01594034	139,663529	-1,27022903	0,20611512
Treatment_bisSmart	Full	-0,00292616	0,01748156	140,618688	-0,16738557	0,86730716
Treatment_bisMixt_smart	Full	0,05783581	0,01876867	140,13905	3,08150786	0,00248003
SexMale	Full	0,0265194	0,01672606	140,309076	1,58551374	0,11510088
RegionLuxembourg	Full	0,02217831	0,02172206	9,67201078	1,02100416	0,33211103
Treatment_bisDark: SexMale	Full	0,00044943	0,02392421	141,91322	0,01878572	0,98503843
Treatment_bisSmart: SexMale	Full	-0,05411154	0,02847726	145,207243	-1,90016681	0,05939349
Treatment_bisMixt_smart: SexMale	Full	-0,0623051	0,02807869	141,212963	-2,21894572	0,02808619
(Intercept)	Mixt_smart	0,39577146	0,02125099	28,4735608	18,6236682	1,75E-17
Treatment_bisDark	Mixt_smart	-0,07808369	0,01887122	142,688894	-4,13771246	5,97E-05
Treatment_bisFull	Mixt_smart	-0,05783581	0,01876867	140,13905	-3,08150786	0,00248003
Treatment_bisSmart	Mixt_smart	-0,06076197	0,01980121	138,188503	-3,0685988	0,00258897
SexMale	Mixt_smart	-0,0357857	0,02264848	143,319886	-1,580049	0,11630014
RegionLuxembourg	Mixt_smart	0,02217831	0,02172206	9,67201078	1,02100416	0,33211103
Treatment_bisDark: SexMale	Mixt_smart	0,06275453	0,02857574	143,939336	2,19607694	0,02968718
Treatment_bisFull: SexMale	Mixt_smart	0,0623051	0,02807869	141,212963	2,21894572	0,02808619
Treatment_bisSmart: SexMale	Mixt_smart	0,00819356	0,03190984	143,692041	0,25677217	0,79772195

Tableau 16 : Résultats des lmm pour les poids (g) des chrysalides de l'espèce *A. exclamationis* en prenant en compte le temps (jours) mis pour entrer en chrysalide. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne reference indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	0,16366193	0,02480986	85,5570805	6,59664936	3,33E-09
TT_pupation	Dark	0,00353544	0,00047375	146,727548	7,46260035	6,90E-12
Treatment_bisFull	Dark	0,02744232	0,01329226	136,983813	2,06453314	0,04085362
Treatment_bisSmart	Dark	0,03580659	0,01466539	141,189296	2,44157114	0,01586039
Treatment_bisMixt_smart	Dark	0,07348589	0,01614641	141,72522	4,55122155	1,14E-05
SexMale	Dark	0,03419787	0,01451018	142,991658	2,356819	0,01978842
RegionLuxembourg	Dark	0,06938792	0,03556047	97,1624351	1,9512654	0,05390552
Treatment_bisFull: SexMale	Dark	-0,01683948	0,02002274	140,113645	-0,84101789	0,40177091
Treatment_bisSmart: SexMale	Dark	-0,06133254	0,02405488	146,310996	-2,54969252	0,01181097
Treatment_bisMixt_smart: SexMale	Dark	-0,06048429	0,02396436	143,104699	-2,52392696	0,01269705
TT_pupation: RegionLuxembourg	Dark	-0,00141172	0,0007084	148,821784	-1,99284351	0,04810705
(Intercept)	Smart	0,19946852	0,02474354	91,8954745	8,06143861	2,70E-12
TT_pupation	Smart	0,00353544	0,00047375	146,727548	7,46260035	6,90E-12
Treatment_bisDark	Smart	-0,03580659	0,01466539	141,189296	-2,44157114	0,01586039
Treatment_bisFull	Smart	-0,00836428	0,01472515	139,098006	-0,56802663	0,57093267
Treatment_bisMixt_smart	Smart	0,0376793	0,01747122	137,658423	2,15664989	0,03277007
SexMale	Smart	-0,02713468	0,01907281	146,155358	-1,42268885	0,15695722
RegionLuxembourg	Smart	0,06938792	0,03556047	97,1624349	1,9512654	0,05390552
Treatment_bisDark: SexMale	Smart	0,06133254	0,02405488	146,310996	2,54969252	0,01181097
Treatment_bisFull: SexMale	Smart	0,04449306	0,02363276	144,042509	1,88268537	0,06175971
Treatment_bisMixt_smart: SexMale	Smart	0,00084825	0,02655888	142,430757	0,03193857	0,97456575
TT_pupation: RegionLuxembourg	Smart	-0,00141172	0,0007084	148,821784	-1,99284351	0,04810705
(Intercept)	Full	0,19110425	0,02389907	79,9013082	7,99630512	8,28E-12
TT_pupation	Full	0,00353544	0,00047375	146,727548	7,46260035	6,90E-12
Treatment_bisDark	Full	-0,02744232	0,01329226	136,983813	-2,06453314	0,04085362
Treatment_bisSmart	Full	0,00836428	0,01472515	139,098006	0,56802663	0,57093267
Treatment_bisMixt_smart	Full	0,04604357	0,01593078	138,612072	2,89022676	0,00446993
SexMale	Full	0,01735838	0,01401441	137,870652	1,23860961	0,21759481
RegionLuxembourg	Full	0,06938792	0,03556047	97,162435	1,9512654	0,05390552
Treatment_bisDark: SexMale	Full	0,01683948	0,02002274	140,113645	0,84101789	0,40177091
Treatment_bisSmart: SexMale	Full	-0,04449306	0,02363276	144,042509	-1,88268537	0,06175971

Treatment_bisMixt_s mart:SexMale	Full	-0,0436448	0,02359112	139,263849	-1,85005234	0,06642532
TT_pupation: RegionLuxembourg	Full	-0,00141172	0,0007084	148,821784	-1,99284351	0,04810705
(Intercept)	Mixt_smar t	0,23714782	0,02529652	97,7324253	9,37472091	2,82E-15
TT_pupation	Mixt_smar t	0,00353543	0,00047375	146,727548	7,46260035	6,90E-12
Treatment_bisDark	Mixt_smar t	-0,07348589	0,01614641	141,725220	-4,55122154	1,14E-05
Treatment_bisFull	Mixt_smar t	-0,04604357	0,01593078	138,612071	-2,89022676	0,00446992
Treatment_bisSmart	Mixt_smar t	-0,03767929	0,01747121	137,658422	-2,15664989	0,03277007
SexMale	Mixt_smar t	-0,02628642	0,01883597	142,122246	-1,39554328	0,16502865
RegionLuxembourg	Mixt_smar t	0,06938791	0,03556047	97,1624349	1,95126539	0,05390551
Treatment_bisDark: SexMale	Mixt_smar t	0,06048428	0,02396435	143,104699	2,52392695	0,01269705
Treatment_bisFull: SexMale	Mixt_smar t	0,04364480	0,02359111	139,263848	1,85005234	0,06642531
Treatment_bisSmart: SexMale	Mixt_smar t	-0,00084825	0,02655887	142,430756	-0,03193856	0,97456575
TT_pupation: RegionLuxembourg	Mixt_smar t	-0,00141172	0,00070839	148,821783	-1,99284350	0,04810704

Tableau 17 : Résultats des lmm pour les poids (g) des adultes de l'espèce *O. plecta*. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne reference indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	0,09044537	0,00314413	4,35069882	28,7664437	3,94E-06
Treatment_bisFull	Dark	0,00550131	0,00264682	112,218247	2,07846207	0,03994684
Treatment_bisSmart	Dark	0,0049703	0,00403842	63,5793017	1,23075392	0,22294874
SexMale	Dark	-0,01368007	0,00243988	115,800568	-5,60685584	1,42E-07
RegionLuxembourg	Dark	-0,00395853	0,00323078	9,08221685	-1,22525418	0,25130391
(Intercept)	Smart	0,09541567	0,00457854	15,1941478	20,8397696	1,36E-12
Treatment_bisDark	Smart	-0,0049703	0,00403842	63,5793018	-1,23075392	0,22294874
Treatment_bisFull	Smart	0,00053101	0,00399417	96,4737189	0,13294581	0,89451315
SexMale	Smart	-0,01368007	0,00243988	115,800568	-5,60685584	1,42E-07
RegionLuxembourg	Smart	-0,00395853	0,00323078	9,08221686	-1,22525418	0,25130391
(Intercept)	Full	0,09594668	0,00348177	6,94018569	27,5568391	2,39E-08
Treatment_bisDark	Full	-0,00550131	0,00264682	112,218247	-2,07846207	0,03994684
Treatment_bisSmart	Full	-0,00053101	0,00399417	96,4737188	-0,13294581	0,89451315
SexMale	Full	-0,01368007	0,00243988	115,800568	-5,60685584	1,42E-07
RegionLuxembourg	Full	-0,00395853	0,00323078	9,08221685	-1,22525418	0,25130391

Tableau 18 : Résultats des lmm pour les poids (g) des adultes de l'espèce *A. exclamationis*. La masse des adultes a subi une transformation logarithmique (en base e). La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne reference indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	-1,70140218	0,06048811	13,1817926	-28,1278797	3,71E-13
Treatment_bisFull	Dark	0,12437656	0,05823008	120,582109	2,13595028	0,03470522
Treatment_bisSmart	Dark	0,07785512	0,06214195	92,4949657	1,25285919	0,21341511
Treatment_bisMixt_smart	Dark	0,26691817	0,0678116	50,0274288	3,93617265	0,00025622
SexMale	Dark	-0,08842911	0,0611208	127,633355	-1,4467924	0,15040657
RegionLuxembourg	Dark	0,06640668	0,06608856	10,2264447	1,00481357	0,33816967
Treatment_bisFull:SexMale	Dark	0,01268444	0,0869623	122,878086	0,14586137	0,88426984
Treatment_bisSmart:SexMale	Dark	-0,09682214	0,10471684	129,282455	-0,92460904	0,35689191
Treatment_bisMixt_smart:SexMale	Dark	-0,18313901	0,10231763	129,075001	-1,78990662	0,07581346
(Intercept)	Smart	-1,62354706	0,06741287	12,8727001	-24,0836352	4,34E-12
Treatment_bisDark	Smart	-0,07785512	0,06214195	92,4949654	-1,25285919	0,21341511
Treatment_bisFull	Smart	0,04652144	0,06525671	39,6726816	0,71289895	0,48008071
Treatment_bisMixt_smart	Smart	0,18906305	0,07381461	12,5008762	2,56132298	0,02428139
SexMale	Smart	-0,18525125	0,08483119	130,189599	-2,18376344	0,03077161
RegionLuxembourg	Smart	0,06640668	0,06608856	10,2264447	1,00481356	0,33816967
Treatment_bisDark:SexMale	Smart	0,09682214	0,10471684	129,282455	0,92460904	0,35689191
Treatment_bisFull:SexMale	Smart	0,10950658	0,10555701	128,54859	1,03741645	0,3014893
Treatment_bisMixt_smart:SexMale	Smart	-0,08631687	0,11566096	127,531736	-0,74629221	0,45686441
(Intercept)	Full	-1,57702562	0,06331804	15,1482512	-24,9064178	1,04E-13
Treatment_bisDark	Full	-0,12437656	0,05823008	120,582109	-2,13595028	0,03470522
Treatment_bisSmart	Full	-0,04652144	0,06525671	39,6726815	-0,71289895	0,48008071
Treatment_bisMixt_smart	Full	0,14254161	0,06847112	107,593425	2,08177704	0,0397352
SexMale	Full	-0,07574467	0,06221452	117,904242	-1,21747578	0,22585432
RegionLuxembourg	Full	0,06640668	0,06608856	10,2264447	1,00481356	0,33816967
Treatment_bisDark:SexMale	Full	-0,01268444	0,0869623	122,878086	-0,14586137	0,88426984
Treatment_bisSmart:SexMale	Full	-0,10950658	0,10555701	128,54859	-1,03741645	0,3014893
Treatment_bisMixt_smart:SexMale	Full	-0,19582345	0,10119096	124,019583	-1,93518714	0,05524378
(Intercept)	Mixt_smart	-1,43448401	0,07060546	14,5158999	-20,3169001	4,56E-12
Treatment_bisDark	Mixt_smart	-0,26691817	0,0678116	50,0274285	-3,93617265	0,00025622

Treatment_bisFull	Mixt_smart	-0,14254161	0,06847112	107,593425	-2,08177704	0,0397352
Treatment_bisSmart	Mixt_smart	-0,18906305	0,07381461	12,5008762	-2,56132298	0,02428139
SexMale	Mixt_smart	-0,27156812	0,08069655	127,312703	-3,36530036	0,001011
RegionLuxembourg	Mixt_smart	0,06640668	0,06608856	10,2264447	1,00481356	0,33816967
Treatment_bisDark: SexMale2	Mixt_smart	0,18313901	0,10231763	129,075001	1,78990662	0,07581346
Treatment_bisFull: SexMale	Mixt_smart	0,19582345	0,10119096	124,019583	1,93518714	0,05524378
Treatment_bisSmart: SexMale	Mixt_smart	0,08631687	0,11566096	127,531736	0,74629221	0,45686441

Tableau 19 : Résultats des lmm pour les poids (g) initiaux de l'espèce *O. plecta*. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne reference indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	0,03641841	0,00440893	9,95568221	8,26014911	9,14E-06
Treatment_bisFull	Dark	-0,00053507	0,00329515	121,757241	-0,16238028	0,87127557
Treatment_bisSmart	Dark	-0,00841305	0,00480052	125,473009	-1,75252675	0,08212597
SexMale	Dark	-0,00100905	0,00303522	120,63641	-0,33244726	0,74012853
RegionLuxembourg	Dark	-0,00382639	0,00585214	7,75392184	-0,65384408	0,53211934
Treatment_bisFull: SexMale	Dark	0,00109733	0,00477537	121,972295	0,22978919	0,8186405
Treatment_bisSmart: SexMale	Dark	0,01032674	0,0068679	124,352313	1,5036232	0,13521391
(Intercept)	Smart	0,02800536	0,00599032	30,6920492	4,67510207	5,55E-05
Treatment_bisDark	Smart	0,00841305	0,00480052	125,473009	1,75252675	0,08212597
Treatment_bisFull	Smart	0,00787798	0,00508898	124,449688	1,54804718	0,12415022
SexMale	Smart	0,00931768	0,00610906	124,377624	1,52522275	0,12974236
RegionLuxembourg	Smart	-0,00382639	0,00585214	7,75392183	-0,65384408	0,53211934
Treatment_bisDark: SexMale	Smart	-0,01032674	0,0068679	124,352313	-1,5036232	0,13521391
Treatment_bisFull: SexMale	Smart	-0,00922941	0,00711544	123,630243	-1,29709669	0,19701334
(Intercept)	Full	0,03588334	0,00480904	14,1870005	7,46164639	2,82E-06
Treatment_bisDark	Full	0,00053507	0,00329515	121,757241	0,16238028	0,87127558
Treatment_bisSmart	Full	-0,00787798	0,00508898	124,449688	-1,54804719	0,12415022
SexMale	Full	8,83E-05	0,00368747	123,086873	0,02393941	0,98093971
RegionLuxembourg	Full	-0,00382639	0,00585214	7,75392208	-0,65384408	0,53211934
Treatment_bisDark: SexMale	Full	-0,00109733	0,00477537	121,972295	-0,22978919	0,8186405
Treatment_bisSmart: SexMale	Full	0,00922941	0,00711544	123,630243	1,2970967	0,19701334

Tableau 20 : Résultats des lmm pour les poids (g) initiaux de l'espèce *A. exclamationis*. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne référence indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	0,01401899	0,00193438	11,4023498	7,24727547	1,35E-05
Treatment_bisFull	Dark	-0,00151527	0,00159941	144,675095	-0,94739763	0,34501594
Treatment_bisSmart	Dark	-0,00019205	0,00178889	136,154136	-0,10735946	0,91466185
Treatment_bisMixt_smart	Dark	-0,00135992	0,0019894	95,8864867	-0,68358339	0,49588685
SexMale	Dark	0,00167829	0,0017376	148,07944	0,96586572	0,33568615
RegionLuxembourg	Dark	-0,00025863	0,0021302	12,5965988	-0,12141211	0,90527999
Treatment_bisFull: SexMale	Dark	0,00014819	0,00244194	142,968741	0,06068697	0,95169326
Treatment_bisSmart: SexMale	Dark	-0,00394274	0,00293633	149,982923	-1,34274582	0,18138291
Treatment_bisMixt_smart:SexMale	Dark	0,00089659	0,00290944	147,158561	0,30816636	0,75839152
(Intercept)	Smart	0,01382694	0,0021517	14,1944403	6,42604836	1,48E-05
Treatment_bisDark	Smart	0,00019205	0,00178889	136,154136	0,10735946	0,91466185
Treatment_bisFull	Smart	-0,00132322	0,00184299	86,9679858	-0,71797512	0,47469694
Treatment_bisMixt_smart	Smart	-0,00116786	0,00221481	41,46048	-0,52729764	0,60079735
SexMale	Smart	-0,00226446	0,00236122	150,761948	-0,95902135	0,33908345
RegionLuxembourg	Smart	-0,00025863	0,0021302	12,5965988	-0,12141211	0,90527999
Treatment_bisDark: SexMale	Smart	0,00394274	0,00293633	149,982923	1,34274582	0,18138291
Treatment_bisFull:SexMale	Smart	0,00409094	0,00291534	149,945302	1,40324379	0,16261155
Treatment_bisMixt_smart:SexMale	Smart	0,00483933	0,00326742	146,683111	1,48108713	0,14072824
(Intercept)	Full	0,01250372	0,00196992	12,1420584	6,34733205	3,49E-05
Treatment_bisDark	Full	0,00151527	0,00159941	144,675095	0,94739763	0,34501594
Treatment_bisSmart	Full	0,00132322	0,00184299	86,9679858	0,71797512	0,47469694
Treatment_bisMixt_smart	Full	0,00015536	0,0019236	135,43643	0,0807628	0,93574982
SexMale	Full	0,00182648	0,00170128	142,48312	1,07359198	0,28482044
RegionLuxembourg	Full	-0,00025863	0,0021302	12,5965988	-0,12141211	0,90527999
Treatment_bisDark: SexMale	Full	-0,00014819	0,00244194	142,968741	-0,06068697	0,95169326
Treatment_bisSmart: SexMale	Full	-0,00409094	0,00291534	149,945302	-1,40324379	0,16261155
Treatment_bisMixt_smart:SexMale	Full	0,0007484	0,0028697	144,873469	0,26079284	0,7946226
(Intercept)	Mixt_smart	0,01265907	0,00227481	16,6810409	5,56488708	3,67E-05
Treatment_bisDark	Mixt_smart	0,00135992	0,0019894	95,8864867	0,68358339	0,49588685

Treatment_bisFull	Mixt_smart	-0,00015536	0,0019236	135,43643	-0,0807628	0,93574982
Treatment_bisSmart	Mixt_smart	0,00116786	0,00221481	41,4604799	0,52729764	0,60079735
SexMale	Mixt_smart	0,00257488	0,00231455	145,471895	1,11247691	0,26776817
RegionLuxembourg	Mixt_smart	-0,00025863	0,0021302	12,5965988	-0,12141211	0,90527999
Treatment_bisDark: SexMale2	Mixt_smart	-0,00089659	0,00290944	147,158561	-0,30816636	0,75839152
Treatment_bisFull: SexMale	Mixt_smart	-0,0007484	0,0028697	144,873469	-0,26079284	0,7946226
Treatment_bisSmart: SexMale	Mixt_smart	-0,00483933	0,00326742	146,683111	-1,48108713	0,14072824

Tableau 21 : Résultats des lmm pour la quantité de nourriture mangée (exprimée en morceaux de feuilles, voire matériel et méthode) de l'espèce *O. plecta*. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne reference indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	18,1273333	1,16190935	11,0405417	15,6013318	7,19E-09
Treatment_bisFull	Dark	-0,03363087	1,01636632	119,063827	-0,03308932	0,97365877
Treatment_bisSmart	Dark	1,19332307	1,49621205	119,11142	0,7975628	0,42671135
SexMale	Dark	-1,31715659	0,75492669	118,12777	-1,74474768	0,08362955
RegionLuxembourg	Dark	-1,14003702	1,60942189	10,1772489	-0,70835188	0,49463104
Treatment_bisFull: SexMale	Dark	0,25236977	1,1881265	119,347123	0,21240985	0,83214966
Treatment_bisSmart: SexMale	Dark	1,02761472	1,7549765	120,245366	0,5855433	0,5592798
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Dark	1,00691238	1,16539216	118,42889	0,86401163	0,38932807
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Dark	-1,32092535	1,7534389	119,291906	-0,75333412	0,45273339
(Intercept)	Smart	19,3206564	1,72003179	45,5664705	11,2327321	1,01E-14
Treatment_bisDark	Smart	-1,19332307	1,49621205	119,11142	-0,7975628	0,42671135
Treatment_bisFull	Smart	-1,22695394	1,61114417	119,346768	-0,76154199	0,44783562
SexMale	Smart	-0,28954186	1,56953387	119,964779	-0,18447634	0,85395128
RegionLuxembourg	Smart	-2,46096237	2,12402765	29,5654021	-1,1586301	0,25588031
Treatment_bisDark: SexMale	Smart	-1,02761472	1,7549765	120,245366	-0,5855433	0,5592798
Treatment_bisFull: SexMale1	Smart	-0,77524495	1,81268838	119,645445	-0,4276769	0,66965515
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Smart	1,32092535	1,7534389	119,291906	0,75333412	0,45273339
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Smart	2,32783773	1,81890339	119,261949	1,27980284	0,20309846
(Intercept)	Full	18,0937024	1,29568184	17,2493164	13,9646184	7,80E-11
Treatment_bisDark	Full	0,03363087	1,01636632	119,063827	0,03308932	0,97365877
Treatment_bisSmart	Full	1,22695394	1,61114417	119,346767	0,76154199	0,44783562
SexMale	Full	-1,06478681	0,91834915	120,308139	-1,15945751	0,24856574

RegionLuxembourg	Full	-0,13312464	1,67621512	12,0965912	-0,07941978	0,93799748
Treatment_bisDark: SexMale	Full	-0,25236977	1,1881265	119,347123	-0,21240985	0,83214966
Treatment_bisSmart: SexMale	Full	0,77524495	1,81268838	119,645444	0,4276769	0,66965515
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Full	-1,00691238	1,16539216	118,42889	-0,86401163	0,38932807
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Full	-2,32783773	1,81890339	119,261949	-1,27980284	0,20309846

Tableau 22 : Résultats des lmm pour la quantité de nourriture mangée (exprimée en morceaux de feuilles, voire matériel et méthode) de l'espèce *A. exclamationis*. La quantité de nourriture mangée a subi une transformation logarithmique (en base e). La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne reference indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	4,106394	0,08561289	15,5123352	47,9646684	2,74E-18
Treatment_bisFull	Dark	0,05809839	0,06515423	135,887294	0,89170558	0,374127
Treatment_bisSmart	Dark	-0,03344552	0,0796196	135,136945	-0,42006644	0,67510406
Treatment_bisMixt_smart	Dark	-0,0425494	0,07853939	137,509698	-0,54175878	0,58886144
SexMale	Dark	-0,03579517	0,04134108	140,628326	-0,86584985	0,38804728
RegionLuxembourg	Dark	0,15684732	0,12062528	17,567279	1,30028563	0,21030443
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Dark	0,01780822	0,101502	139,322942	0,17544701	0,86098314
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Dark	-0,0619817	0,11482139	135,161704	-0,53980973	0,5902165
Treatment_bisMixt_smart: RegionLuxembourg	Dark	0,26337094	0,12034512	139,403954	2,18846383	0,03030111
(Intercept)	Smart	4,07294848	0,09748866	24,905981	41,7786895	1,39E-24
Treatment_bisDark	Smart	0,03344556	0,0796196	135,136951	0,42006699	0,67510366
Treatment_bisFull	Smart	0,09154391	0,07919645	132,914789	1,15590923	0,24979183
Treatment_bisMixt_smart	Smart	-0,00910392	0,09012808	133,371384	-0,1010109	0,9196935
SexMale	Smart	-0,03579516	0,04134108	140,628331	-0,86584952	0,38804746
RegionLuxembourg	Smart	0,09486548	0,13309492	25,5491919	0,7127656	0,48245035
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Smart	0,06198166	0,11482138	135,161708	0,53980939	0,59021674
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg1	Smart	0,07978993	0,1140848	134,470676	0,69939142	0,48551548
Treatment_bisMixt_smart: RegionLuxembourg	Smart	0,32535261	0,1312269	135,418884	2,4793134	0,01439135
(Intercept)	Full	4,16449239	0,08668944	16,6406865	48,03921	2,74E-19
Treatment_bisDark	Full	-0,05809835	0,06515423	135,887299	-0,89170491	0,37412736
Treatment_bisSmart	Full	-0,09154391	0,07919645	132,914789	-1,15590923	0,24979183
Treatment_bisMixt_smart2	Full	-0,10064783	0,07745395	133,582489	-1,29945378	0,19602639
SexMale	Full	-0,03579516	0,04134108	140,628331	-0,86584952	0,38804746

RegionLuxembourg	Full	0,17465541	0,12124671	18,5493524	1,44049611	0,16639372
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Full	-0,01780827	0,101502	139,322943	-0,17544747	0,86098277
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Full	-0,07978993	0,1140848	134,470676	-0,69939142	0,48551548
Treatment_bisMixt_s mart:RegionLuxembo urg	Full	0,24556268	0,11729647	135,175629	2,09352147	0,03817077
(Intercept)	Mixt_smar t	4,0638446	0,09676953	25,6396391	41,9950856	3,63E-25
Treatment_bisDark	Mixt_smar t	0,0425494	0,07853939	137,509698	0,54175878	0,58886144
Treatment_bisFull	Mixt_smar t	0,10064779	0,07745395	133,582485	1,29945329	0,19602655
Treatment_bisSmart	Mixt_smar t	0,00910388	0,09012808	133,371378	0,10101049	0,91969383
SexMale	Mixt_smar t	-0,03579517	0,04134108	140,628326	-0,86584985	0,38804728
RegionLuxembourg	Mixt_smar t	0,42021826	0,13726665	28,7312819	3,06132821	0,00474422
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Mixt_smar t	-0,26337094	0,12034512	139,403954	-2,18846383	0,03030111
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Mixt_smar t	-0,24556271	0,11729648	135,175627	-2,09352167	0,03817075
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Mixt_smar t	-0,32535264	0,13122691	135,41888	-2,4793135	0,01439135

Tableau 23 : Résultats des lmm pour le poids (g) en fonction du temps (numéro de mesure, voire matériel et méthode) de l'espèce *O. plecta*. Le poids a subi une transformation sous forme de racine carée. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne reference indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	0,22072428	0,02075025	10,6726738	10,6371886	5,17E-07
Time	Dark	0,18493218	0,00663145	322,797574	27,8871458	5,65E-88
Treatment_bisFull	Dark	-0,00485299	0,01523559	318,107209	-0,31853004	0,75029194
Treatment_bisSmart	Dark	-0,04458678	0,02207485	202,786525	-2,01979989	0,04472
SexMale	Dark	-0,01376382	0,01378701	322,491729	-0,99831815	0,31887358
RegionLuxembourg	Dark	-0,01413091	0,02473058	8,2915448	-0,57139422	0,58288578
Treatment_bisFull: SexMale	Dark	0,0302829	0,02210077	326,195627	1,37021938	0,17156071
Treatment_bisSmart: SexMale	Dark	0,04704252	0,03094036	330,561769	1,52042558	0,12935996
(Intercept)	Smart	0,17613751	0,02767511	28,4229471	6,36447289	6,45E-07
Time	Smart	0,18493218	0,00663145	322,797579	27,8871464	5,65E-88
Treatment_bisDark	Smart	0,04458678	0,02207485	202,78653	2,01979957	0,04472003
Treatment_bisFull	Smart	0,03973378	0,02298754	306,923595	1,72849235	0,08490568
SexMale	Smart	0,03327869	0,02743256	330,000962	1,21310927	0,22595568
RegionLuxembourg	Smart	-0,01413092	0,0247306	8,29153489	-0,57139418	0,58288582
Treatment_bisDark:	Smart	-0,04704251	0,03094036	330,561769	-1,52042527	0,12936004

SexMale						
(Intercept)	Full	0,21587129	0,0225005	14,9652481	9,59406746	8,77E-08
Time	Full	0,18493218	0,00663145	322,797572	27,8871454	5,65E-88
Treatment_bisDark	Full	0,00485299	0,01523559	318,107207	0,31852999	0,75029198
Treatment_bisSmart	Full	-0,03973379	0,02298754	306,923591	-1,72849294	0,08490557
SexMale	Full	0,01651908	0,01716214	328,492166	0,9625304	0,33649124
RegionLuxembourg	Full	-0,01413091	0,02473058	8,29155072	-0,57139424	0,58288576
Treatment_bisDark: SexMale	Full	-0,0302829	0,02210077	326,195626	-1,37021936	0,17156072
Treatment_bisSmart: SexMale	Full	0,01675962	0,0321488	328,800635	0,52131415	0,60249888
(Intercept)	Smart	0,17613751	0,02767511	28,4229471	6,36447289	6,45E-07

Tableau 24 : Résultats des Imm pour le poids (g) en fonction du temps (numéro de mesure, voire matériel et méthode) de l'espèce *A. exclamatoris*. Le poids a subi une transformation logarithmique (en base e) et le temps a subi une transformation logarithmique (en base e). Vu que le temps, exprimé en numéro de mesure, possède « 0 » dans les valeurs possibles (le poids initial), les numéros de mesures ont été additionnés à 1 au sein de la transformation logarithmique. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne référence indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	-4,44361062	0,08976811	21,4943447	-49,5009914	1,22E-23
log(Time + 1)	Dark	1,91333827	0,04842567	1490,12099	39,5108277	3,62E-234
Treatment_bisFull	Dark	-0,0825923	0,06026461	1500,63377	-1,3704943	0,17073762
Treatment_bisSmart	Dark	-0,30684313	0,08021559	1023,06237	-3,82523073	0,00013856
Treatment_bisMixt_s mart	Dark	-0,03446372	0,07332039	613,465178	-0,47004282	0,63849147
SexMale	Dark	-0,06647218	0,04528792	1501,49311	-1,46776819	0,14237664
RegionLuxembourg	Dark	-0,23506408	0,10640073	13,9736182	-2,20923367	0,04436
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Dark	-0,07319669	0,0687745	1502,57903	-1,0642999	0,28736386
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Dark	0,44695597	0,08058614	1503,01309	5,54631335	3,44E-08
Treatment_bisMixt_s mart: RegionLuxembourg	Dark	-0,15058163	0,08088341	1502,89824	-1,86171232	0,06283873
SexFemale:Time	Dark	-0,0632639	0,01159606	1497,79216	-5,45563953	5,70E-08
SexMale:Time	Dark	-0,05270663	0,01235103	1499,65244	-4,26738877	2,10E-05
Treatment_bisFull: Time	Dark	0,03069469	0,00946266	1495,29475	3,24377072	0,00120563
Treatment_bisSmart: Time	Dark	0,08002726	0,01398014	1492,62092	5,72435477	1,25E-08
Treatment_bisMixt_s mart:Time	Dark	0,03637843	0,011411	1492,23637	3,18801523	0,00146224
(Intercept)	Smart	-4,75045375	0,1016436	33,3335217	-46,7363763	5,71E-32
log(Time + 1)	Smart	1,91333827	0,04842567	1490,12099	39,5108277	3,62E-234
Treatment_bisDark	Smart	0,30684313	0,08021559	1023,06235	3,82523073	0,00013856
Treatment_bisFull	Smart	0,22425083	0,0800151	850,971125	2,80260625	0,00518435

Treatment_bisMixt_smart	Smart	0,27237941	0,09140829	189,997501	2,97981069	0,00326108
SexMale	Smart	-0,06647218	0,04528792	1501,49311	-1,46776819	0,14237664
RegionLuxembourg	Smart	0,21189189	0,11562848	19,7005829	1,83252338	0,08203339
Treatment_bisDark:RegionLuxembourg	Smart	-0,44695597	0,08058614	1503,01309	-5,54631335	3,44E-08
Treatment_bisFull:RegionLuxembourg	Smart	-0,52015266	0,08064792	1489,13361	-6,44967257	1,51E-10
Treatment_bisMixt_smart:RegionLuxembourg	Smart	-0,59753761	0,09143161	1501,35835	-6,53535031	8,67E-11
SexFemale:Time	Smart	0,01676337	0,01710556	1493,63679	0,97999509	0,32724725
SexMale:Time	Smart	0,02732064	0,01800815	1495,10793	1,51712612	0,12944625
Treatment_bisDark:Time	Smart	-0,08002726	0,01398014	1492,62092	-5,72435477	1,25E-08
Treatment_bisFull:Time	Smart	-0,04933258	0,01429126	1491,86546	-3,45194085	0,00057212
Treatment_bisMixt_smart:Time	Smart	-0,04364884	0,01547772	1488,91049	-2,82010692	0,00486439
(Intercept)	Full	-4,52620292	0,09045632	22,3956247	-50,0374423	1,75E-24
log(Time + 1)	Full	1,91333827	0,04842567	1490,12099	39,5108277	3,62E-234
Treatment_bisDark	Full	0,0825923	0,06026461	1500,63377	1,3704943	0,17073762
Treatment_bisSmart	Full	-0,22425083	0,0800151	850,971141	-2,80260625	0,00518435
Treatment_bisMixt_smart	Full	0,04812858	0,07220033	753,829415	0,66659773	0,50523308
SexMale	Full	-0,06647218	0,04528792	1501,49311	-1,46776819	0,14237664
RegionLuxembourg	Full	-0,30826077	0,10709831	14,6867677	-2,87829738	0,01168544
Treatment_bisDark:RegionLuxembourg	Full	0,07319669	0,0687745	1502,57903	1,0642999	0,28736386
Treatment_bisSmart:RegionLuxembourg	Full	0,52015266	0,08064792	1489,13361	6,44967257	1,51E-10
Treatment_bisMixt_smart:RegionLuxembourg	Full	-0,07738494	0,07914219	1501,52959	-0,97779634	0,32833257
SexFemale:Time	Full	-0,03256921	0,01262522	1493,7072	-2,57969446	0,00998359
SexMale:Time	Full	-0,02201194	0,01268556	1495,58449	-1,73519633	0,08291203
Treatment_bisDark:Time	Full	-0,03069469	0,00946266	1495,29475	-3,24377072	0,00120563
Treatment_bisSmart:Time	Full	0,04933258	0,01429126	1491,86546	3,45194086	0,00057212
Treatment_bisMixt_smart:Time	Full	0,00568374	0,01185777	1491,37488	0,47932595	0,63177704
(Intercept)	Mixt_smart	-4,47807434	0,09875517	29,3273392	-45,3452161	1,03E-28
log(Time + 1)	Mixt_smart	1,91333827	0,04842567	1490,12099	39,5108277	3,62E-234
Treatment_bisDark	Mixt_smart	0,03446372	0,07332039	613,465161	0,47004282	0,63849147
Treatment_bisFull	Mixt_smart	-0,04812858	0,07220033	753,829386	-0,66659774	0,50523308
Treatment_bisSmart	Mixt_smart	-0,27237941	0,09140829	189,997496	-2,97981069	0,00326108

SexMale	Mixt_smart	-0,06647218	0,04528792	1501,49311	-1,46776819	0,14237664
RegionLuxembourg	Mixt_smart	-0,38564572	0,11541376	19,4542091	-3,34141884	0,00334594
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Mixt_smart	0,15058163	0,08088341	1502,89824	1,86171232	0,06283873
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Mixt_smart	0,07738494	0,07914219	1501,52959	0,97779634	0,32833257
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Mixt_smart	0,59753761	0,09143161	1501,35834	6,53535031	8,67E-11
SexFemale:Time	Mixt_smart	-0,02688547	0,01411815	1492,69888	-1,90432009	0,0570606
SexMale:Time	Mixt_smart	-0,0163282	0,01497297	1493,40299	-1,09051201	0,27566358
Treatment_bisDark: Time	Mixt_smart	-0,03637843	0,011411	1492,23637	-3,18801523	0,00146224
Treatment_bisFull: Time	Mixt_smart	-0,00568374	0,01185777	1491,37488	-0,47932595	0,63177704
Treatment_bisSmart: Time	Mixt_smart	0,04364884	0,01547772	1488,91049	2,82010692	0,00486439

Tableau 25 : Résultats des glmm binomiaux pour la probabilité de bouger lors de l'expérience de vol à la lumière. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne référence treatment indique le traitement qui a été utilisée comme référence dans le modèle. La colonne référence timing indique le timing d'expérience de vol à la lumière qui a été utilisée comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference treatment	Reference timing	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	Day	2,38994718	1,2335716	1,93742072	0,05269394
Treatment_bisFull	Dark	Day	0,70103522	1,31398957	0,53351658	0,59367604
Treatment_bisSmart	Dark	Day	0,34755372	1,35072672	0,25730869	0,79694049
Treatment_bisMixt_smart	Dark	Day	-0,30424928	1,11228105	-0,27353633	0,78444097
SexMale	Dark	Day	1,29656383	1,15395156	1,12358601	0,26118869
RegionLuxembourg	Dark	Day	0,30877122	1,19414293	0,25857141	0,79596594
Treatment_FTLMix	Dark	Day	0,46373246	1,47245952	0,31493733	0,75280924
Treatment_FTLNight	Dark	Day	1,37247763	1,52017638	0,90284104	0,36661027
Light_orientationSouth	Dark	Day	-0,65288097	0,97004477	-0,6730421	0,50092051
(Intercept)	Smart	Day	2,73624233	1,47825083	1,85100003	0,06416955
Treatment_bisDark	Smart	Day	-0,34778545	1,35073979	-0,25747776	0,79680998
Treatment_bisFull	Smart	Day	0,35459372	1,51930459	0,23339212	0,81545693
Treatment_bisMixt_smart	Smart	Day	-0,65279213	1,35024942	-0,48346041	0,62876887
SexMale	Smart	Day	1,29684091	1,15408161	1,12369949	0,26114053
RegionLuxembourg	Smart	Day	0,3092299	1,18382955	0,26121151	0,7939294
Treatment_FTLMix	Smart	Day	0,46533856	1,46045445	0,31862586	0,75001024
Treatment_FTLNight	Smart	Day	1,37388716	1,51647105	0,90597652	0,36494828
Light_orientationSouth	Smart	Day	-0,65215228	0,96889003	-0,67309216	0,50088866
(Intercept)	Full	Day	3,09088929	1,41715086	2,18105875	0,02917907
Treatment_bisDark	Full	Day	-0,70820467	1,31258381	-0,53955006	0,58950737
Treatment_bisSmart	Full	Day	-0,37264111	1,50846987	-0,24703252	0,80488306

Treatment_bisMixt_smart	Full	Day	-1,00861608	1,3214784	-0,76324825	0,44531536
SexMale	Full	Day	1,28284901	1,14737401	1,11807397	0,2635354
RegionLuxembourg	Full	Day	0,28620511	1,12051331	0,25542321	0,79839624
Treatment_FTLMix	Full	Day	0,46814331	1,40488191	0,3332261	0,73896362
Treatment_FTLNight	Full	Day	1,36392641	1,51578064	0,89981781	0,36821722
Light_orientationSouth	Full	Day	-0,66666371	0,958399	-0,69560142	0,48667848
(Intercept)	Mixt_smart	Day	2,08737528	1,33009567	1,56934221	0,11656822
Treatment_bisDark	Mixt_smart	Day	0,30385726	1,11176276	0,27331124	0,78461397
Treatment_bisFull2	Mixt_smart	Day	1,00852646	1,32367743	0,76191256	0,44611219
Treatment_bisSmart	Mixt_smart	Day	0,65018499	1,34939317	0,4818351	0,62992309
SexMale	Mixt_smart	Day	1,29528502	1,1535125	1,12290506	0,26147782
RegionLuxembourg	Mixt_smart	Day	0,30273094	1,14238661	0,26499867	0,79101048
Treatment_FTLMix	Mixt_smart	Day	0,46916723	1,40780635	0,3332612	0,73893712
Treatment_FTLNight	Mixt_smart	Day	1,37820101	1,49865606	0,91962462	0,35776896
Light_orientationSouth	Mixt_smart	Day	-0,65461682	0,96430252	-0,67885006	0,49723287
(Intercept)	Dark	Mixt	2,8706792	1,77309809	1,61901884	0,10544321
Treatment_bisFull	Dark	Mixt	0,70482267	1,31484251	0,53605102	0,59192329
Treatment_bisSmart	Dark	Mixt	0,35170083	1,34998447	0,26052213	0,79446105
Treatment_bisMixt_smart	Dark	Mixt	-0,30358479	1,111623	-0,2731005	0,78477596
SexMale	Dark	Mixt	1,29478221	1,15382549	1,12216468	0,26179243
RegionLuxembourg	Dark	Mixt	0,29402888	1,13351317	0,25939609	0,79532965
Treatment_FTLDay	Dark	Mixt	-0,47862131	1,39614354	-0,34281669	0,73173637
Treatment_FTLNight	Dark	Mixt	0,90427448	1,32296236	0,68352245	0,49427677
Light_orientationSouth	Dark	Mixt	-0,65707842	0,96342412	-0,68202405	0,49522374
(Intercept)	Dark	Night	3,75994224	1,93759542	1,94051978	0,05231655
Treatment_bisFull	Dark	Night	0,70331055	1,312693	0,53577687	0,59211277
Treatment_bisSmart	Dark	Night	0,35556588	1,35104251	0,2631789	0,79241269
Treatment_bisMixt_smart	Dark	Night	-0,30136339	1,11122631	-0,27119893	0,78623803
SexMale5	Dark	Night	1,30108209	1,15445131	1,1270134	0,25973682
RegionLuxembourg	Dark	Night	0,30155504	1,16158557	0,25960639	0,7951674
Treatment_FTLDay	Dark	Night	-1,37633734	1,50636863	-0,91367897	0,36088556
Treatment_FTLMix	Dark	Night	-0,90584887	1,32857618	-0,68181929	0,49535322
Light_orientationSouth	Dark	Night	-0,65005094	0,96585333	-0,67303277	0,50092644

Tableau 26 : Résultats des Imm pour le temps (s) mis pour faire le premier mouvement lors de l'expérience de vol à la lumière. Le temps mis pour faire le premier mouvement a subi une transformation logarithmique (en base e). Comme il y avait des « 0 », le temps mis pour faire le premier mouvement a été additionné à 0,1 au sein du logarithme. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne reference treatment indique le traitement qui a été utilisée comme référence dans le modèle. La colonne reference timing indique le timing d'expérience de vol à la lumière qui a été utilisée comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference treatment	Reference timing	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	Day	5,20898012	0,70700757	35,2567725	7,36764411	1,23E-08
Treatment_bisFull	Dark	Day	0,23182364	0,73977035	98,9629209	0,31337244	0,75465724
Treatment_bisSmart	Dark	Day	0,24188874	0,99496813	98,1196289	0,24311204	0,80842612
Treatment_bisMixt_smart	Dark	Day	1,14296628	0,81719444	96,3528289	1,39864666	0,16512952
RegionLuxembourg	Dark	Day	0,34090623	0,92375074	36,1953698	0,36904569	0,71424379
Treatment_FTLMix	Dark	Day	-0,78392393	0,62695949	91,4544008	-1,25035818	0,21435854
Treatment_FTLNight	Dark	Day	-2,20681582	0,5749289	98,4100131	-3,8384152	0,00021898
Treatment_bisFull:egionLuxembourg	Dark	Day	-2,10832679	1,13503729	100,28576	-1,85749562	0,06617486
Treatment_bisSmart:RegionLuxembourg	Dark	Day	-0,14942658	1,30887408	97,8477409	-0,11416421	0,90934155
Treatment_bisMixt_smart:egionLuxembourg	Dark	Day	-3,2354144	1,28352958	99,198364	-2,52071666	0,01330571
(Intercept)	Smart	Day	5,45086887	0,97418209	72,1342157	5,59532853	3,73E-07
Treatment_bisDark	Smart	Day	-0,24188876	0,99496814	98,1196279	-0,24311207	0,8084261
Treatment_bisFull	Smart	Day	-0,01006511	0,99761872	98,2601116	-0,01008913	0,99197063
Treatment_bisMixt_smart	Smart	Day	0,90107754	1,06369228	99,134463	0,84712238	0,39896738
RegionLuxembourg	Smart	Day	0,19147958	1,13874805	65,943159	0,16814921	0,86698056
Treatment_FTLMix	Smart	Day	-0,78392388	0,62695949	91,4543978	-1,25035811	0,21435856
Treatment_FTLNight	Smart	Day	-2,20681579	0,5749289	98,4100117	-3,83841515	0,00021898
Treatment_bisDark:RegionLuxembourg	Smart	Day	0,14942661	1,30887409	97,8477401	0,11416423	0,90934153
Treatment_bisFull:RegionLuxembourg	Smart	Day	-1,95890018	1,30342952	97,8740381	-1,50288154	0,1360894
Treatment_bisMixt_smart:RegionLuxembourg	Smart	Day	-3,08598778	1,45517156	100,530301	-2,12070375	0,03640696
(Intercept)	Full	Day	5,44080387	0,6527678	36,5409037	8,33497589	5,65E-10
Treatment_bisDark	Full	Day	-0,23182546	0,73977063	98,9628525	-0,31337478	0,75465547
Treatment_bisSmart	Full	Day	0,01006589	0,99761917	98,2600372	0,01008991	0,99197001
Treatment_bisMixt_smart	Full	Day	0,91114224	0,80335768	95,5251539	1,13416757	0,25956245
RegionLuxembourg	Full	Day	-1,76742355	0,90895156	39,7432948	-1,94446395	0,05894094
Treatment_FTLMix	Full	Day	-0,78391903	0,62695895	91,4541146	-1,25035145	0,21436099
Treatment_FTLNight	Full	Day	-2,20681243	0,57492865	98,4098872	-3,83841098	0,00021898
Treatment_bisDark:RegionLuxembourg	Full	Day	2,10832564	1,13503755	100,285728	1,85749418	0,06617506

Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Full	Day	1,95889641	1,30343015	97,873959	1,50287793	0,13609034
Treatment_bisMixt_s mart: RegionLuxembourg	Full	Day	-1,12708697	1,24215201	99,0296692	-0,90736638	0,36641578
(Intercept)	Mixt_s mart	Day	6,35194909	0,74093019	49,9955445	8,57293872	2,19E-11
Treatment_bisDark	Mixt_s mart	Day	-1,14295248	0,81718992	96,3531131	-1,39863751	0,16513225
Treatment_bisFull	Mixt_s mart	Day	-0,91114641	0,80335241	95,5246684	-1,13418022	0,25955718
Treatment_bisSmart	Mixt_s mart	Day	-0,90108868	1,06368922	99,1272337	-0,84713529	0,39896037
RegionLuxembourg	Mixt_s mart	Day	-2,89448552	1,11942274	54,9215833	-2,58569476	0,01240164
Treatment_FTLMix	Mixt_s mart	Day	-0,78397127	0,62696479	91,45715	-1,25042313	0,21433484
Treatment_FTLNight	Mixt_s mart	Day	-2,20684857	0,57493134	98,4112217	-3,83845588	0,00021895
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Mixt_s mart	Day	3,23543188	1,28352512	99,1987773	2,52073905	0,01330491
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Mixt_s mart	Day	1,12709382	1,24214696	99,0301012	0,90737559	0,36641092
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Mixt_s mart	Day	3,08603076	1,45516896	100,530513	2,12073708	0,03640408
(Intercept)	Dark	Mixt	4,42505594	0,72378101	33,8523669	6,11380497	6,24E-07
Treatment_bisFull	Dark	Mixt	0,23182349	0,73977032	98,9629261	0,31337226	0,75465738
Treatment_bisSmart	Dark	Mixt	0,24188854	0,9949681	98,1196357	0,24311185	0,80842627
Treatment_bisMixt_s mart	Dark	Mixt	1,14296618	0,81719441	96,3528361	1,3986466	0,16512954
RegionLuxembourg	Dark	Mixt	0,34090655	0,923751	36,1953125	0,36904593	0,71424361
Treatment_FTLDay	Dark	Mixt	0,78392431	0,62695954	91,4544229	1,2503587	0,21435835
Treatment_FTLNight	Dark	Mixt	-1,42289177	0,54503066	100,007244	-2,61066371	0,01042576
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Dark	Mixt	-2,10832688	1,13503727	100,285762	-1,85749573	0,06617484
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Dark	Mixt	-0,14942637	1,30887404	97,8477472	-0,11416406	0,90934167
Treatment_bisMixt_s mart: RegionLuxembourg	Dark	Mixt	-3,23541454	1,28352955	99,1983676	-2,52071684	0,0133057
(Intercept)	Dark	Night	3,00216417	0,72233142	37,8437471	4,1562143	0,00017814
Treatment_bisFull	Dark	Night	0,23182349	0,73977032	98,9629261	0,31337226	0,75465738
Treatment_bisSmar	Dark	Night	0,24188854	0,9949681	98,1196357	0,24311185	0,80842627
Treatment_bisMixt_s mart	Dark	Night	1,14296618	0,81719441	96,3528361	1,3986466	0,16512954
RegionLuxembourg	Dark	Night	0,34090655	0,923751	36,1953125	0,36904593	0,71424361
Treatment_FTLDay	Dark	Night	2,20681609	0,57492892	98,4100228	3,83841552	0,00021898
Treatment_FTLMix	Dark	Night	1,42289177	0,54503066	100,007244	2,61066371	0,01042576
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Dark	Night	-2,10832688	1,13503727	100,285762	-1,85749573	0,06617484
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Dark	Night	-0,14942637	1,30887404	97,8477472	-0,11416406	0,90934167

Treatment_bisMixt_smart: RegionLuxembourg	Dark	Night	-3,23541454	1,28352955	99,1983676	-2,52071684	0,0133057
--	------	-------	-------------	------------	------------	-------------	-----------

Tableau 27 : Résultats des glmm binomiaux pour la probabilité de voler lors de l'expérience de vol à la lumière. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne reference treatment indique le traitement qui a été utilisée comme référence dans le modèle. La colonne reference timing indique le timing d'expérience de vol à la lumière qui a été utilisée comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference treatment	Reference timing	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	Day	-1,70818207	0,76787408	-2,22456012	0,02611078
TreatmentFull	Dark	Day	0,36930513	0,59248248	0,62331823	0,53307542
TreatmentSmart	Dark	Day	0,41817856	0,54311956	0,76995672	0,44132557
SexMale	Dark	Day	0,16060774	0,47317386	0,33942648	0,73428847
RegionLuxembourg	Dark	Day	0,79438443	0,77657103	1,02293854	0,30633691
Treatment_FTLMix	Dark	Day	1,2481414	0,75919724	1,64402783	0,10017045
Treatment_FTLNight	Dark	Day	2,20382701	0,75918518	2,90288468	0,00369743
Light_orientationSouth	Dark	Day	0,21734635	0,4846267	0,44848199	0,65380538
(Intercept)	Smart	Day	-1,28980852	0,76786135	-1,67974142	0,09300764
TreatmentDark	Smart	Day	-0,41758429	0,54309236	-0,76890105	0,44195205
TreatmentFull	Smart	Day	-0,04827865	0,57011725	-0,08468197	0,93251423
SexMale	Smart	Day	0,15991746	0,47314915	0,33798531	0,73537425
RegionLuxembourg	Smart	Day	0,79303464	0,77668686	1,0210481	0,30723165
Treatment_FTLMix	Smart	Day	1,2486072	0,75915567	1,64473143	0,10002521
Treatment_FTLNight	Smart	Day	2,20405499	0,75918938	2,90316889	0,00369407
Light_orientationSouth	Smart	Day	0,21776865	0,48462963	0,44935066	0,65317872
(Intercept)	Full	Day	-1,33524134	0,78839396	-1,69362198	0,09033714
TreatmentDark	Full	Day	-0,37139783	0,592453	-0,62688151	0,53073691
TreatmentSmart	Full	Day	0,04569628	0,57023566	0,08013577	0,93612927
SexMale	Full	Day	0,16096395	0,47317032	0,34018184	0,7337196
RegionLuxembourg	Full	Day	0,79223946	0,77796101	1,01835368	0,30850991
Treatment_FTLMix	Full	Day	1,25115029	0,75764237	1,65137319	0,0986624
Treatment_FTLNight	Full	Day	2,20909842	0,75844858	2,91265418	0,00358371
Light_orientationSouth	Full	Day	0,21641938	0,48443036	0,44675025	0,6550554
(Intercept)	Dark	Mixt	-0,45875517	0,91251432	-0,50273751	0,61514884
TreatmentFull	Dark	Mixt	0,37046921	0,59249682	0,62526784	0,53179528
TreatmentSmart	Dark	Mixt	0,41768627	0,54310364	0,76907286	0,44185006
SexMale	Dark	Mixt	0,1603905	0,47316868	0,33897108	0,73463152
RegionLuxembourg	Dark	Mixt	0,79272459	0,77701617	1,02021633	0,30762587
Treatment_FTLDay	Dark	Mixt	-1,24990425	0,75906936	-1,64662719	0,0996347
Treatment_FTLNight	Dark	Mixt	0,95692403	0,59366486	1,61189265	0,1069853
Light_orientationSouth	Dark	Mixt	0,21708684	0,4846296	0,44794383	0,65419373
(Intercept)	Dark	Night	0,49531468	0,90485524	0,5473966	0,58410629
TreatmentFull	Dark	Night	0,3694649	0,59249035	0,62357961	0,5329037
TreatmentSmart	Dark	Night	0,41854049	0,54313731	0,77059793	0,44094529
SexMale	Dark	Night	0,16046284	0,4731862	0,33911141	0,7345258

RegionLuxembourg	Dark	Night	0,79445786	0,77651493	1,02310699	0,30625726
Treatment_FTLDay	Dark	Night	-2,20360487	0,75924185	-2,90237541	0,00370344
Treatment_FTLMix	Dark	Night	-0,95585953	0,59375152	-1,60986455	0,10742743
Light_orientationSouth	Dark	Night	0,2174584	0,48464629	0,44869506	0,65365165

Tableau 28 : Résultats des Imm pour le temps (s) mis pour voler à la lumière lors de l'expérience de vol à la lumière. Le temps mis pour voler à la lumière a subi une transformation logarithmique (en base e). Comme il y avait des « 0 », le temps mis pour voler à la lumière a été additionné à 0,1 au sein du logarithme. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne reference indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. La colonne reference timing indique le timing d'expérience de vol à la lumière qui a été utilisée comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference treatment	Reference timing	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	Day	7,53714193	0,75782692	43,3927013	9,94572999	9,21E-13
Treatment_bisFull	Dark	Day	-0,88941822	0,81755564	43,6587339	-1,08789931	0,28260898
Treatment_bisSmart	Dark	Day	0,9772394	0,89607776	42,0433459	1,09057433	0,28167121
Treatment_bisMixt_smart	Dark	Day	0,88725055	0,83690042	42,3947804	1,06016262	0,2950734
SexMale	Dark	Day	0,15493598	0,38162994	45,0761929	0,40598488	0,6866746
RegionLuxembourg	Dark	Day	-1,74556014	0,8448226	43,9986866	-2,06618541	0,04472916
Treatment_FTLMix	Dark	Day	-1,49843344	0,59972172	44,8219042	-2,49854791	0,01620539
Treatment_FTLNight	Dark	Day	-1,47100875	0,5557108	46,5590808	-2,64707603	0,01104281
Light_orientationSouth	Dark	Day	-1,72211064	0,62915747	39,9618256	-2,73716953	0,00920467
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Dark	Day	1,03699516	1,02202479	40,3721885	1,01464776	0,31631624
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Dark	Day	-0,17897237	1,15037277	40,7547664	-0,15557772	0,87713393
Treatment_bisMixt_smart: RegionLuxembourg	Dark	Day	-2,06869213	1,09239816	39,7405055	-1,89371623	0,06555869
RegionLuxembourg:Light_orientationSouth	Dark	Day	2,8082442	0,79812881	43,4809606	3,51853507	0,00103049
(Intercept)	Smart	Day	8,51438133	0,8397396	42,75772	10,1393115	6,04E-13
Treatment_bisDark	Smart	Day	-0,9772394	0,89607776	42,0433458	-1,09057433	0,28167121
Treatment_bisFull	Smart	Day	-1,86665762	0,86139168	43,1593289	-2,16702538	0,03579662
Treatment_bisMixt_smart	Smart	Day	-0,08998886	0,899277	45,1547621	-0,10006801	0,92073331
SexMale	Smart	Day	0,15493598	0,38162994	45,0761929	0,40598488	0,6866746
RegionLuxembourg	Smart	Day	-1,92453251	0,91578427	46,9173681	-2,10151297	0,04099343
Treatment_FTLMix	Smart	Day	-1,49843344	0,59972172	44,8219042	-2,49854791	0,01620539
Treatment_FTLNight	Smart	Day	-1,47100875	0,5557108	46,5590808	-2,64707603	0,01104281
Light_orientationSouth	Smart	Day	-1,72211064	0,62915747	39,9618256	-2,73716953	0,00920467
Treatment_bisDark: RegionLuxembourg	Smart	Day	0,17897237	1,15037277	40,7547663	0,15557772	0,87713393
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Smart	Day	1,21596753	1,05951878	42,2493979	1,1476602	0,25756612

Treatment_bisMixt_smart:RegionLuxembourg	Smart	Day	-1,88971976	1,16430448	43,8413282	-1,62304602	0,11174946
RegionLuxembourg:Light_orientationSouth	Smart	Day	2,8082442	0,79812881	43,4809606	3,51853507	0,00103049
(Intercept)	Full	Day	6,64772371	0,82966899	46,5213679	8,01250114	2,62E-10
Treatment_bisDark	Full	Day	0,88941822	0,81755564	43,6587339	1,08789931	0,28260898
Treatment_bisSmart	Full	Day	1,86665762	0,86139168	43,159329	2,16702538	0,03579662
Treatment_bisMixt_smart	Full	Day	1,77666877	0,76135134	45,9640694	2,33357277	0,024047
SexMale	Full	Day	0,15493598	0,38162994	45,0761929	0,40598488	0,6866746
RegionLuxembourg	Full	Day	-0,70856498	0,8425465	45,11672	-0,84098027	0,40479425
Treatment_FTLMix	Full	Day	-1,49843344	0,59972172	44,8219042	-2,49854791	0,01620539
Treatment_FTLNight	Full	Day	-1,47100875	0,5557108	46,5590808	-2,64707603	0,01104281
Light_orientationSouth	Full	Day	-1,72211064	0,62915747	39,9618256	-2,73716953	0,00920467
Treatment_bisDark:RegionLuxembourg	Full	Day	-1,03699516	1,02202479	40,3721885	-1,01464776	0,31631624
Treatment_bisSmart:RegionLuxembourg	Full	Day	-1,21596753	1,05951878	42,2493979	-1,1476602	0,25756612
Treatment_bisMixt_smart:RegionLuxembourg	Full	Day	-3,10568729	0,98691235	44,0550887	-3,14687247	0,00295725
RegionLuxembourg:Light_orientationSouth	Full	Day	2,8082442	0,79812881	43,4809606	3,51853507	0,00103049
(Intercept)	Mixt_smart	Day	8,42439248	0,87690029	45,4555225	9,60701303	1,62E-12
Treatment_bisDark	Mixt_smart	Day	-0,88725055	0,83690042	42,3947804	-1,06016262	0,2950734
Treatment_bisFull	Mixt_smart	Day	-1,77666877	0,76135134	45,9640694	-2,33357277	0,024047
Treatment_bisSmart	Mixt_smart	Day	0,08998886	0,899277	45,1547625	0,10006801	0,92073331
SexMale	Mixt_smart	Day	0,15493598	0,38162994	45,0761929	0,40598488	0,6866746
RegionLuxembourg	Mixt_smart	Day	-3,81425227	0,9680899	46,408036	-3,93997735	0,00027239
Treatment_FTLMix	Mixt_smart	Day	-1,49843344	0,59972172	44,8219042	-2,49854791	0,01620539
Treatment_FTLNight	Mixt_smart	Day	-1,47100875	0,5557108	46,5590808	-2,64707603	0,01104281
Light_orientationSouth	Mixt_smart	Day	-1,72211064	0,62915747	39,9618256	-2,73716953	0,00920467
Treatment_bisDark:RegionLuxembourg	Mixt_smart	Day	2,06869213	1,09239816	39,7405055	1,89371623	0,06555869
Treatment_bisFull:RegionLuxembourg	Mixt_smart	Day	3,10568729	0,98691235	44,0550887	3,14687247	0,00295725
Treatment_bisSmart:RegionLuxembourg	Mixt_smart	Day	1,88971976	1,16430448	43,8413282	1,62304602	0,11174946
RegionLuxembourg:Light_orientationSouth	Mixt_smart	Day	2,8082442	0,79812881	43,4809606	3,51853507	0,00103049
(Intercept)	Dark	Mixt	6,03870849	0,65494337	43,6249234	9,22019939	8,34E-12
Treatment_bisFull	Dark	Mixt	-0,88941822	0,81755564	43,6587339	-1,08789931	0,28260898

Treatment_bisSmart	Dark	Mixt	0,9772394	0,89607776	42,0433459	1,09057433	0,28167121
Treatment_bisMixt_smart	Dark	Mixt	0,88725055	0,83690042	42,3947804	1,06016262	0,2950734
SexMale	Dark	Mixt	0,15493598	0,38162994	45,0761929	0,40598488	0,6866746
RegionLuxembourg	Dark	Mixt	-1,74556014	0,8448226	43,9986866	-2,06618541	0,04472916
Treatment_FTLDay	Dark	Mixt	1,49843344	0,59972172	44,8219042	2,49854791	0,01620539
Treatment_FTLNight	Dark	Mixt	0,02742469	0,41243507	46,5643186	0,06649457	0,94726877
Light_orientationSouth	Dark	Mixt	-1,72211064	0,62915747	39,9618256	-2,73716953	0,00920467
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Dark	Mixt	1,03699516	1,02202479	40,3721885	1,01464776	0,31631624
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Dark	Mixt	-0,17897237	1,15037277	40,7547664	-0,15557772	0,87713393
Treatment_bisMixt_smart: RegionLuxembourg	Dark	Mixt	-2,06869213	1,09239816	39,7405055	-1,89371623	0,06555869
RegionLuxembourg:Light_orientationSouth	Dark	Mixt	2,8082442	0,79812881	43,4809606	3,51853507	0,00103049
(Intercept)	Dark	Night	6,06613318	0,64972624	46,0004719	9,33644485	3,45E-12
Treatment_bisFull	Dark	Night	-0,88941822	0,81755564	43,6587339	-1,08789931	0,28260898
Treatment_bisSmart	Dark	Night	0,9772394	0,89607776	42,043346	1,09057433	0,28167121
Treatment_bisMixt_smart	Dark	Night	0,88725055	0,83690042	42,3947805	1,06016262	0,2950734
SexMale	Dark	Night	0,15493598	0,38162994	45,0761929	0,40598488	0,6866746
RegionLuxembourg	Dark	Night	-1,74556014	0,8448226	43,9986866	-2,06618541	0,04472916
Treatment_FTLDay	Dark	Night	1,47100875	0,5557108	46,5590808	2,64707603	0,01104281
Treatment_FTLMix	Dark	Night	-0,02742469	0,41243507	46,5643186	-0,06649457	0,94726877
Light_orientationSouth	Dark	Night	-1,72211064	0,62915747	39,9618256	-2,73716953	0,00920467
Treatment_bisFull: RegionLuxembourg	Dark	Night	1,03699516	1,02202479	40,3721885	1,01464776	0,31631624
Treatment_bisSmart: RegionLuxembourg	Dark	Night	-0,17897237	1,15037277	40,7547664	-0,15557772	0,87713393
Treatment_bisMixt_smart: RegionLuxembourg	Dark	Night	-2,06869213	1,09239816	39,7405055	-1,89371623	0,06555869
RegionLuxembourg:Light_orientationSouth	Dark	Night	2,8082442	0,79812881	43,4809606	3,51853507	0,00103049

Tableau 29 : Résultats des lmm pour la vitesse (m/min) de vol à la lumière lors de l'expérience de vol à la lumière. La vitesse pour voler à la lumière a subi une transformation logarithmique (en base e). Comme il y avait des « 0 », la vitesse pour voler à la lumière a été additionné à 0,000001 au sein du logarithme. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne reference indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. La colonne reference timing indique le timing d'expérience de vol à la lumière qui a été utilisée comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference treatment	Reference timing	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	Day	-12,8495902	1,88770019	15,5638588	-6,80700795	4,88E-06
Treatment_bisFull	Dark	Day	2,57721223	1,42896748	96,9975604	1,80354855	0,07440655
Treatment_bisSmart	Dark	Day	1,60590394	1,63584184	36,4837596	0,98169878	0,33271382
Treatment_bisMixt_smart	Dark	Day	2,18386424	1,57163791	9,4352227	1,38954668	0,19658024
SexMale	Dark	Day	0,23867254	1,1496956	95,1867178	0,20759629	0,8359877
RegionLuxembourg	Dark	Day	2,70645662	1,9236511	6,62081472	1,40693737	0,20461233
Treatment_FTLMix	Dark	Day	4,17537943	1,59939128	105,954771	2,61060535	0,01034729
Treatment_FTLNight	Dark	Day	6,39673622	1,49942559	108,759682	4,26612449	4,26E-05
Light_orientationSouth	Dark	Day	-0,06975921	1,12241965	98,321727	-0,06215074	0,95056896
(Intercept)	Smart	Day	7,14281887	0,72520826	46,2869951	9,84933466	6,15E-13
Treatment_bisDark	Smart	Day	-0,26708495	0,60957676	47,3748092	-0,43814818	0,66327028
Treatment_bisFull	Smart	Day	-0,94037594	0,59262731	46,8636571	-1,58679144	0,1192851
Treatment_bisMixt_smart	Smart	Day	-0,84174787	0,64254707	48,8346743	-1,31001744	0,1963189
SexMale	Smart	Day	0,06061995	0,64048997	46,8526326	0,09464622	0,92499946
RegionLuxembourg	Smart	Day	-0,53400451	0,48138281	20,0878741	-1,10931362	0,28039922
Treatment_FTLMix	Smart	Day	-1,14284077	0,66356562	48,5005321	-1,72227245	0,09139243
Treatment_FTLNight	Smart	Day	-1,03359639	0,615665	49,7417255	-1,67882924	0,09945756
Light_orientationSouth	Smart	Day	-0,19803859	0,56667872	47,2000092	-0,34947243	0,72828912
(Intercept)	Full	Day	-11,2436862	2,08452316	17,0102063	-5,39388886	4,84E-05
Treatment_bisDark	Full	Day	-1,60590394	1,63584184	36,483761	-0,98169878	0,33271382
Treatment_bisFull2	Full	Day	0,97130829	1,67628851	44,480073	0,57943981	0,56521581
Treatment_bisMixt_smart	Full	Day	0,57796029	1,82838306	2,11320293	0,3161046	0,78043426
SexMale	Full	Day	0,23867254	1,1496956	95,1867179	0,20759629	0,8359877
RegionLuxembourg	Full	Day	2,70645662	1,9236511	6,62081472	1,40693737	0,20461233
Treatment_FTLMix	Full	Day	4,17537943	1,59939128	105,954771	2,61060535	0,01034729
Treatment_FTLNight	Full	Day	6,39673622	1,49942559	108,759682	4,26612449	4,26E-05
Light_orientationSouth	Full	Day	-0,06975921	1,12241965	98,3217271	-0,06215074	0,95056896
(Intercept)	Mixt_smart	Day	-10,6657259	2,06590377	7,61295633	-5,16274093	0,00100563
Treatment_bisDark	Mixt_smart	Day	-2,18386425	1,57163791	9,43522282	-1,38954669	0,19658024
Treatment_bisFull	Mixt_smart	Day	0,39334798	1,5821624	8,81767093	0,24861416	0,80935273

Treatment_bisSmart	Mixt_smart	Day	-0,57796032	1,82838305	2,11320281	-0,31610461	0,78043425
SexMale	Mixt_smart	Day	0,23867254	1,1496956	95,1867179	0,20759629	0,8359877
RegionLuxembourg	Mixt_smart	Day	2,70645662	1,9236511	6,62081481	1,40693737	0,20461233
Treatment_FTLMix	Mixt_smart	Day	4,17537943	1,59939128	105,954771	2,61060535	0,01034729
Treatment_FTLNight	Mixt_smart	Day	6,39673622	1,49942559	108,759683	4,26612449	4,26E-05
Light_orientationSouth	Mixt_smart	Day	-0,06975921	1,12241965	98,3217272	-0,06215074	0,95056896
(Intercept)	Dark	Mixt	-8,67421076	2,05704954	17,2312588	-4,21682151	0,00056486
Treatment_bisFull	Dark	Mixt	2,57721223	1,42896748	96,9975602	1,80354855	0,07440655
Treatment_bisSmart	Dark	Mixt	1,60590394	1,63584184	36,4837584	0,98169878	0,33271382
Treatment_bisMixt_smart	Dark	Mixt	2,18386423	1,57163791	9,43522226	1,38954667	0,19658024
SexMale	Dark	Mixt	0,23867254	1,1496956	95,1867175	0,20759629	0,8359877
RegionLuxembourg	Dark	Mixt	2,70645662	1,9236511	6,62081463	1,40693737	0,20461233
Treatment_FTLDay	Dark	Mixt	-4,17537943	1,59939128	105,954771	-2,61060535	0,01034729
Treatment_FTLNight	Dark	Mixt	2,22135679	1,3993185	104,90285	1,58745618	0,11541906
Light_orientationSouth	Dark	Mixt	-0,06975921	1,12241965	98,3217269	-0,06215074	0,95056896
(Intercept)	Dark	Night	-6,45285397	2,00062454	17,1199759	-3,22541977	0,00493294
Treatment_bisFull	Dark	Night	2,57721223	1,42896748	96,9975609	1,80354855	0,07440655
Treatment_bisSmart	Dark	Night	1,60590395	1,63584184	36,4837636	0,98169878	0,33271382
Treatment_bisMixt_smart	Dark	Night	2,18386423	1,57163791	9,43522417	1,38954667	0,19658024
SexMale	Dark	Night	0,23867254	1,1496956	95,1867181	0,20759629	0,8359877
RegionLuxembourg	Dark	Night	2,70645663	1,9236511	6,62081481	1,40693737	0,20461233
Treatment_FTLDay	Dark	Night	-6,39673622	1,49942559	108,759683	-4,26612449	4,26E-05
Treatment_FTLMix	Dark	Night	-2,22135679	1,3993185	104,90285	-1,58745618	0,11541906
Light_orientationSouth	Dark	Night	-0,06975921	1,12241965	98,3217272	-0,06215074	0,95056896

Tableau 30 : Résultats des lmm pour le temps (s) mis pour voler à la lumière lors de l'expérience de vol à la lumière en prenant en compte le temps (s) mis pour faire le premier mouvement. Le temps mis pour voler à la lumière a subi une transformation logarithmique (en base e). Comme il y avait des « 0 », le temps mis pour voler à la lumière a été additionné à 0,1 au sein du logarithme. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne reference indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. La colonne reference timing indique le timing d'expérience de vol à la lumière qui a été utilisée comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference treatment	Reference timing	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	Day	4,46323886	0,7238143	42,5924788	6,1662762	2,17E-07
First_move	Dark	Day	0,00321052	0,0005462	45,3793363	5,8779665	4,61E-07
Treatment_bisFull	Dark	Day	-0,1547091	0,4459508	46,7048466	-0,34691966	0,73021
Treatment_bisSmart	Dark	Day	0,62398852	0,49362347	46,4771663	1,26409816	0,21249793

Treatment_bisMixt_smart	Dark	Day	-0,72986305	0,49394613	45,1199217	-1,47761668	0,14645727
RegionLuxembourg	Dark	Day	1,10870039	0,82957579	38,5746579	1,33646667	0,18922688
Treatment_FTLMix	Dark	Day	-1,81870094	0,7098137	38,8390325	-2,56222292	0,01439439
Treatment_FTLNight	Dark	Day	1,05192961	0,68142525	41,2126319	1,54371975	0,130301
Light_orientationSouth	Dark	Day	0,63761415	0,3502739	48,3426426	1,8203302	0,0749023
RegionLuxembourg: Treatment_FTLMix	Dark	Day	0,54511933	1,04149893	43,6512788	0,52339884	0,60334387
RegionLuxembourg: Treatment_FTLNight	Dark	Day	-2,55425487	0,97489741	46,2340992	-2,62002427	0,01185581
(Intercept)	Smart	Day	5,08722738	0,65437588	40,9190037	7,77416701	1,38E-09
First_move	Smart	Day	0,00321052	0,0005462	45,3793363	5,8779665	4,61E-07
Treatment_bisDark	Smart	Day	-0,62398852	0,49362347	46,4771662	-1,26409816	0,21249793
Treatment_bisFull	Smart	Day	-0,77869762	0,45376659	46,9076418	-1,71607525	0,09274673
Treatment_bisMixt_smart	Smart	Day	-1,35385157	0,50406391	48,6512049	-2,68587287	0,00986721
RegionLuxembourg	Smart	Day	1,10870039	0,82957579	38,574658	1,33646667	0,18922688
Treatment_FTLMix	Smart	Day	-1,81870094	0,7098137	38,8390327	-2,56222292	0,01439439
Treatment_FTLNight	Smart	Day	1,05192961	0,68142525	41,212632	1,54371975	0,130301
Light_orientationSouth	Smart	Day	0,63761415	0,3502739	48,3426426	1,8203302	0,0749023
RegionLuxembourg: Treatment_FTLMix	Smart	Day	0,54511933	1,04149893	43,651279	0,52339884	0,60334387
RegionLuxembourg: Treatment_FTLNight	Smart	Day	-2,55425487	0,97489741	46,2340993	-2,62002427	0,01185581
(Intercept)	Full	Day	4,30852976	0,65456562	41,1846073	6,58227327	6,30E-08
First_move	Full	Day	0,00321052	0,0005462	45,3793363	5,8779665	4,61E-07
Treatment_bisDark	Full	Day	0,1547091	0,4459508	46,7048466	0,34691966	0,73021
Treatment_bisSmart	Full	Day	0,77869762	0,45376659	46,907642	1,71607525	0,09274673
Treatment_bisMixt_smart	Full	Day	-0,57515395	0,45063159	48,8322907	-1,27632852	0,20787637
RegionLuxembourg	Full	Day	1,10870039	0,82957579	38,5746579	1,33646667	0,18922688
Treatment_FTLMix	Full	Day	-1,81870094	0,7098137	38,8390326	-2,56222292	0,01439439
Treatment_FTLNight	Full	Day	1,05192961	0,68142525	41,212632	1,54371975	0,130301
Light_orientationSouth	Full	Day	0,63761415	0,3502739	48,3426426	1,8203302	0,0749023
RegionLuxembourg: Treatment_FTLMix	Full	Day	0,54511933	1,04149893	43,6512787	0,52339884	0,60334387
RegionLuxembourg: Treatment_FTLNight	Full	Day	-2,55425487	0,97489741	46,2340992	-2,62002427	0,01185581
(Intercept)	Mixt_smart	Day	3,73337582	0,75551124	43,4146328	4,94152255	1,20E-05
First_move	Mixt_smart	Day	0,00321052	0,0005462	45,3793363	5,8779665	4,61E-07
Treatment_bisDark	Mixt_smart	Day	0,72986305	0,49394613	45,1199224	1,47761668	0,14645727
Treatment_bisFull	Mixt_smart	Day	0,57515395	0,45063159	48,8322905	1,27632852	0,20787637
Treatment_bisSmart	Mixt_smart	Day	1,35385157	0,50406391	48,6512095	2,68587287	0,00986721

RegionLuxembourg	Mixt_s mart	Day	1,10870039	0,82957579	38,5746582	1,33646667	0,18922688
Treatment_FTLMix	Mixt_s mart	Day	-1,81870094	0,7098137	38,8390327	-2,56222292	0,01439439
Treatment_FTLNight	Mixt_s mart	Day	1,05192961	0,68142525	41,2126323	1,54371975	0,130301
Light_orientationSou th	Mixt_s mart	Day	0,63761415	0,3502739	48,3426426	1,8203302	0,0749023
RegionLuxembourg: Treatment_FTLMix	Mixt_s mart	Day	0,54511933	1,04149893	43,6512789	0,52339884	0,60334387
RegionLuxembourg: Treatment_FTLNight	Mixt_s mart	Day	-2,55425487	0,97489741	46,2340994	-2,62002427	0,01185581
(Intercept)	Dark	Mixt	2,64453792	0,73061578	46,1457854	3,61960141	0,00073017
First_move	Dark	Mixt	0,00321052	0,0005462	45,3793362	5,8779665	4,61E-07
Treatment_bisFull	Dark	Mixt	-0,1547091	0,4459508	46,7048466	-0,34691966	0,73021
Treatment_bisSmart	Dark	Mixt	0,62398852	0,49362347	46,4771662	1,26409816	0,21249793
Treatment_bisMixt_s mart	Dark	Mixt	-0,72986305	0,49394613	45,1199213	-1,47761668	0,14645727
RegionLuxembourg	Dark	Mixt	1,65381972	0,65925143	31,1147087	2,50863272	0,01754049
Treatment_FTLDay	Dark	Mixt	1,81870094	0,7098137	38,8390326	2,56222292	0,01439439
Treatment_FTLNight	Dark	Mixt	2,87063055	0,71574263	48,8963349	4,0107022	0,00020678
Light_orientationSou th	Dark	Mixt	0,63761415	0,3502739	48,3426426	1,8203302	0,0749023
RegionLuxembourg: Treatment_FTLDay	Dark	Mixt	-0,54511933	1,04149893	43,6512789	-0,52339884	0,60334387
RegionLuxembourg: Treatment_FTLNight	Dark	Mixt	-3,09937419	0,84136154	45,4581734	-3,68376024	0,00060918
(Intercept)	Dark	Night	5,51516848	0,53027355	48,989298	10,4006102	5,39E-14
First_move	Dark	Night	0,00321052	0,0005462	45,3793363	5,8779665	4,61E-07
Treatment_bisFull	Dark	Night	-0,1547091	0,4459508	46,7048466	-0,34691966	0,73021
Treatment_bisSmart	Dark	Night	0,62398852	0,49362347	46,4771665	1,26409816	0,21249793
Treatment_bisMixt_s mart	Dark	Night	-0,72986305	0,49394613	45,1199234	-1,47761668	0,14645727
RegionLuxembourg	Dark	Night	-1,44555447	0,49588966	34,5349139	-2,91507281	0,00620413
Treatment_FTLDay	Dark	Night	-1,05192961	0,68142525	41,2126321	-1,54371975	0,130301
Treatment_FTLMix	Dark	Night	-2,87063055	0,71574263	48,8963349	-4,0107022	0,00020678
Light_orientationSou th	Dark	Night	0,63761415	0,3502739	48,3426426	1,8203302	0,0749023
RegionLuxembourg: Treatment_FTLDay	Dark	Night	2,55425487	0,97489741	46,2340993	2,62002427	0,01185581
RegionLuxembourg: Treatment_FTLMix	Dark	Night	3,09937419	0,84136154	45,4581735	3,68376024	0,00060918

Tableau 31 : Résultats des lmm pour la vitesse (m/min) de vol à la lumière lors de l'expérience de vol à la lumière en prenant en compte le temps (s) mis pour faire le premier mouvement. La vitesse pour voler à la lumière a subi une transformation logarithmique (en base e). Comme il y avait des « 0 », la vitesse pour voler à la lumière a été additionné à 0,000001 au sein du logarithme. La colonne variable explicative indique le paramètre (la variable explicative) du modèle analysé. Les paramètres présents sont tous les paramètres qui n'ont pas été retirés lors de la simplification du modèle (et donc présent dans le modèle final). La colonne reference indique le traitement qui a été utilisé comme référence dans le modèle. La colonne reference timing indique le timing d'expérience de vol à la lumière qui a été utilisée comme référence dans le modèle. Les zones grisées servent uniquement à aider à visualiser le passage à un nouveau modèle (avec une autre référence).

Variable explicative	Reference treatment	Reference timing	Estimate	Std. Error	df	t.value	Pr(> z)
(Intercept)	Dark	Day	-13,4170967	2,12169633	24,4974474	-6,3237592	1,41E-06
First_move	Dark	Day	0,00124435	0,00176082	92,2757739	0,7066903	0,48153966
Treatment_bisFull	Dark	Day	2,73472712	1,5196166	93,6630245	1,79961651	0,07514111
Treatment_bisSmart	Dark	Day	1,01315676	1,71433853	91,8979789	0,5909899	0,55597798
Treatment_bisMixt_smart	Dark	Day	2,55079817	1,64491425	92,0786742	1,55071802	0,1243997
SexMale	Dark	Day	-0,10313424	1,18671244	90,5514003	-0,08690753	0,93093691
RegionLuxembourg	Dark	Day	3,26822226	1,840014	7,44948057	1,77619423	0,11637735
Treatment_FTLMix	Dark	Day	4,7996538	1,67941807	86,7318237	2,85792674	0,00533809
Treatment_FTLNight	Dark	Day	7,10957036	1,63917635	87,3796156	4,33728216	3,85E-05
Light_orientationSouth	Dark	Day	-0,09579473	1,17613367	90,3924387	-0,08144885	0,93526508
(Intercept)	Smart	Day	-12,40394	2,25875757	32,5097071	-5,49148794	4,53E-06
First_move	Smart	Day	0,00124435	0,00176082	92,2757738	0,7066903	0,48153966
Treatment_bisDark	Smart	Day	-1,01315676	1,71433853	91,8979772	-0,5909899	0,55597798
Treatment_bisFull	Smart	Day	1,72157035	1,71934161	92,0716373	1,00129628	0,3193079
Treatment_bisMixt_smart	Smart	Day	1,53764141	1,87020497	94,894145	0,82217801	0,41303669
SexMale	Smart	Day	-0,10313424	1,18671244	90,5514003	-0,08690753	0,93093691
RegionLuxembourg	Smart	Day	3,26822226	1,840014	7,44948054	1,77619423	0,11637735
Treatment_FTLMix	Smart	Day	4,7996538	1,67941807	86,7318237	2,85792674	0,00533809
Treatment_FTLNight	Smart	Day	7,10957036	1,63917635	87,3796154	4,33728216	3,85E-05
Light_orientationSouth	Smart	Day	-0,09579473	1,17613367	90,3924387	-0,08144884	0,93526508
(Intercept)	Full	Day	-10,6823696	2,03361533	26,782549	-5,25289589	1,58E-05
First_move	Full	Day	0,00124435	0,00176082	92,2757738	0,7066903	0,48153966
Treatment_bisDark	Full	Day	-2,73472712	1,5196166	93,6630245	-1,79961651	0,07514111
Treatment_bisSmart	Full	Day	-1,72157035	1,71934161	92,0716369	-1,00129628	0,3193079
Treatment_bisMixt_smart	Full	Day	-0,18392895	1,63854499	87,2635404	-0,11225139	0,9108819
SexMale	Full	Day	-0,10313424	1,18671244	90,5514003	-0,08690753	0,93093691
RegionLuxembourg	Full	Day	3,26822226	1,840014	7,44948054	1,77619423	0,11637735
Treatment_FTLMix	Full	Day	4,7996538	1,67941807	86,7318237	2,85792674	0,00533809
Treatment_FTLNight	Full	Day	7,10957036	1,63917635	87,3796155	4,33728216	3,85E-05
Light_orientationSouth	Full	Day	-0,09579473	1,17613367	90,3924386	-0,08144885	0,93526508
(Intercept)	Mixt_smart	Day	-10,8662986	2,25804475	36,1013929	-4,81226006	2,65E-05

First_move	Mixt_s mart	Day	0,00124435	0,00176082	92,2757739	0,7066903	0,48153966
Treatment_bisDar	Mixt_s mart	Day	-2,55079817	1,64491425	92,0786767	-1,55071802	0,1243997
Treatment_bisFull	Mixt_s mart	Day	0,18392895	1,63854499	87,2635514	0,11225139	0,9108819
Treatment_bisSmart	Mixt_s mart	Day	-1,53764141	1,87020497	94,8942073	-0,82217801	0,41303669
SexMale	Mixt_s mart	Day	-0,10313424	1,18671244	90,5514003	-0,08690753	0,93093691
RegionLuxembourg	Mixt_s mart	Day	3,26822226	1,840014	7,44948056	1,77619423	0,11637735
Treatment_FTLMix	Mixt_s mart	Day	4,7996538	1,67941807	86,7318237	2,85792674	0,00533809
Treatment_FTLNight	Mixt_s mart	Day	7,10957036	1,63917635	87,3796156	4,33728216	3,85E-05
Light_orientationSou th	Mixt_s mart	Day	-0,09579473	1,17613367	90,3924387	-0,08144884	0,93526508
(Intercept)	Dark	Mixt	-8,61744293	2,22144789	24,5917492	-3,87920103	0,00069075
First_move	Dark	Mixt	0,00124435	0,00176082	92,2757739	0,7066903	0,48153966
Treatment_bisFull	Dark	Mixt	2,73472712	1,5196166	93,6630245	1,79961651	0,07514111
Treatment_bisSmart	Dark	Mixt	1,01315676	1,71433853	91,8979803	0,5909899	0,55597798
Treatment_bisMixt_s mart	Dark	Mixt	2,55079817	1,64491425	92,0786785	1,55071802	0,1243997
SexMale	Dark	Mixt	-0,10313424	1,18671244	90,5514003	-0,08690753	0,93093691
RegionLuxembourg	Dark	Mixt	3,26822226	1,840014	7,44948058	1,77619423	0,11637735
Treatment_FTLDay	Dark	Mixt	-4,7996538	1,67941807	86,7318237	-2,85792674	0,00533809
Treatment_FTLNight	Dark	Mixt	2,30991656	1,48925792	93,9184292	1,55105205	0,12425257
Light_orientationSou th	Dark	Mixt	-0,09579473	1,17613367	90,3924387	-0,08144884	0,93526508
(Intercept	Dark	Night	-6,30752637	2,08064164	21,0304778	-3,03152944	0,00633996
First_move	Dark	Night	0,00124435	0,00176082	92,2757739	0,7066903	0,48153966
Treatment_bisFull	Dark	Night	2,73472712	1,5196166	93,6630245	1,79961651	0,07514111
Treatment_bisSmart	Dark	Night	1,01315676	1,71433853	91,8979776	0,5909899	0,55597798
Treatment_bisMixt_s mart	Dark	Night	2,55079817	1,64491425	92,0786696	1,55071802	0,1243997
SexMale	Dark	Night	-0,10313424	1,18671244	90,5514003	-0,08690753	0,93093691
RegionLuxembourg	Dark	Night	3,26822226	1,840014	7,44948056	1,77619423	0,11637735
Treatment_FTLDay	Dark	Night	-7,10957036	1,63917635	87,3796155	-4,33728216	3,85E-05
Treatment_FTLMix	Dark	Night	-2,30991656	1,48925792	93,9184292	-1,55105206	0,12425257
Light_orientationSou th	Dark	Night	-0,09579473	1,17613367	90,3924387	-0,08144884	0,93526508

Bibliographie

- Acharya, L., & Fenton, M. B. (1999). Bat attacks and moth defensive behaviour around street lights. *Canadian Journal of Zoology*, 77(1), 27–33. <https://doi.org/10.1139/z98-202>
- Altermatt, F., Baumeyer, A., & Ebert, D. (2009). Experimental evidence for male biased flight-to-light behavior in two moth species. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 130(3), 259–265. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2008.00817.x>
- Altermatt, F., & Ebert, D. (2016). Reduced flight-to-light behaviour of moth populations exposed to long-term urban light pollution. *Biology Letters*, 12(4), 20160111. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0111>
- Andrew D., W. (1990). Predation of five species of Noctuidae at ultraviolet light by the western yellowjacket (Hymenoptera: Vespidae). *Journal of The Lepidopterists Society*, 44, 32.
- AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 — IPCC. (2023). <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- Atlas of Britain & Ireland's larger moths*. (2019). Pisces publications.
- Baker, B. J., & Richardson, J. M. L. (2006). The effect of artificial light on male breeding-season behaviour in green frogs, *Rana clamitans melanota*. *Canadian Journal of Zoology*, 84(10), 1528–1532. <https://doi.org/10.1139/z06-142>
- Baker, R. R., & Sadovy, Y. (1978). The distance and nature of the light-trap response of moths. *Nature*, 276(5690), 818–821. <https://doi.org/10.1038/276818a0>
- Baranek, J., Jakubowska, M., & Gabala, E. (2023). Insecticidal activity of *Bacillus thuringiensis* towards *Agrotis exclamationis* larvae—A widespread and underestimated pest of the Palearctic zone. *PLOS ONE*, 18(3), e0283077. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283077>
- Barker, M. (2022, December 2). *Heart and Dart - Agrotis exclamationis: Moth Species Summary - Moths of Britain*. <https://mothsofbritain.com/agrotis-exclamationis/>

- Beier, P. (1995). Dispersal of Juvenile Cougars in Fragmented Habitat. *The Journal of Wildlife Management*, 59(2), 228. <https://doi.org/10.2307/3808935>
- Bennie, J., Davies, T. W., Cruse, D., & Gaston, K. J. (2016). Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *Journal of Ecology*, 104(3), 611–620. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12551>
- Bennie, J., Duffy, J., Davies, T., Correa-Cano, M., & Gaston, K. (2015). Global Trends in Exposure to Light Pollution in Natural Terrestrial Ecosystems. *Remote Sensing*, 7(3), 2715–2730. <https://doi.org/10.3390/rs70302715>
- Biggs, J. D., Fouché, T., Bilki, F., & Zadnik, M. G. (2012). Measuring and mapping the night sky brightness of Perth, Western Australia: *Night sky brightness of Perth. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 421(2), 1450–1464. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20416.x>
- Blake, D., Hutson, A. M., Racey, P. A., Rydell, J., & Speakman, J. R. (1994). Use of lamplit roads by foraging bats in southern England. *Journal of Zoology*, 234(3), 453–462. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1994.tb04859.x>
- Bloch, G., Barnes, B. M., Gerkema, M. P., & Helm, B. (2013). Animal activity around the clock with no overt circadian rhythms: Patterns, mechanisms and adaptive value. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1765), 20130019. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.0019>
- Bolliger, J., Hennen, T., Wermelinger, B., Bösch, R., Pazur, R., Blum, S., Haller, J., & Obrist, M. K. (2020). Effects of traffic-regulated street lighting on nocturnal insect abundance and bat activity. *Basic and Applied Ecology*, 47, 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.06.003>
- Boyes, D. H., Evans, D. M., Fox, R., Parsons, M. S., & Pocock, M. J. O. (2021a). Is light pollution driving moth population declines? A review of causal mechanisms across the

- life cycle. *Insect Conservation and Diversity*, 14(2), 167–187.
<https://doi.org/10.1111/icad.12447>
- Boyes, D. H., Evans, D. M., Fox, R., Parsons, M. S., & Pocock, M. J. O. (2021b). Street lighting has detrimental impacts on local insect populations. *Science Advances*, 7(35), eabi8322.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.abi8322>
- Briscoe, A. D., & Chittka, L. (2001). The evolution of color vision in insects. *Annual Review of Entomology*, 46(1), 471–510. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.46.1.471>
- Buchanan, B. W. (1993). Effects of enhanced lighting on the behaviour of nocturnal frogs. *Animal Behaviour*, 45(5), 893–899. <https://doi.org/10.1006/anbe.1993.1109>
- Butterfly Conservation—Flame Shoulder*. (n.d.). Retrieved October 27, 2023, from <https://butterfly-conservation.org/moths/flame-shoulder>
- Butterfly Conservation—Heart and Dart*. (n.d.). Retrieved October 26, 2023, from <https://butterfly-conservation.org/moths/heart-and-dart>
- Chauvin, G., & Chauvin, J. (1985). The influence of relative humidity on larval development and energy content of *Galleria mellonella* (L.) (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Stored Products Research*, 21(2), 79–82. [https://doi.org/10.1016/0022-474X\(85\)90025-6](https://doi.org/10.1016/0022-474X(85)90025-6)
- Cho, Y., Ryu, S.-H., Lee, B. R., Kim, K. H., Lee, E., & Choi, J. (2015). Effects of artificial light at night on human health: A literature review of observational and experimental studies applied to exposure assessment. *Chronobiology International*, 32(9), 1294–1310.
<https://doi.org/10.3109/07420528.2015.1073158>
- Cieraad, E., van Grunsven, R. H. A., van der Sman, F., Zwart, N., Musters, Kees. J. M., Strange, E., van Langevelde, F., & Trimbos, K. B. (2022). Lack of local adaptation of feeding and calling behaviours by *Yponomeuta cagnagellus* moths in response to artificial light

- at night. *Insect Conservation and Diversity*, 15(4), 445–452.
<https://doi.org/10.1111/icad.12568>
- Cinzano, P., Falchi, F., & Elvidge, C. D. (2001). The first World Atlas of the artificial night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 328(3), 689–707.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04882.x>
- Cochran, W. W., Mouritsen, H., & Wikelski, M. (2004). Migrating Songbirds Recalibrate Their Magnetic Compass Daily from Twilight Cues. *Science*, 304(5669), 405–408.
<https://doi.org/10.1126/science.1095844>
- Collison, F. M., & Poe, K. (2013). “Astronomical Tourism”: The Astronomy and Dark Sky Program at Bryce Canyon National Park. *Tourism Management Perspectives*, 7, 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.tmp.2013.01.002>
- Conrad, K. F., Woiwod, I. P., & Perry, J. N. (2002). Long-term decline in abundance and distribution of the garden tiger moth (*Arctia caja*) in Great Britain. *Biological Conservation*, 106(3), 329–337. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(01\)00258-0](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(01)00258-0)
- Cooper, C. B., Voss, M. A., Ardia, D. R., Austin, S. H., & Robinson, W. D. (2011). Light increases the rate of embryonic development: Implications for latitudinal trends in incubation period: Light and embryo metabolism. *Functional Ecology*, 25(4), 769–776.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2011.01847.x>
- Corbet, S. A., Sellick, R. D., & Willoughby, N. G. (1974). Notes on the biology of the mayfly *Povilla adusta* in West Africa. *Journal of Zoology*, 172(4), 491–502.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1974.tb04381.x>
- Cymborowski, B., & Giebułtowiec, J. M. (1976). Effect of photoperiod on development and fecundity in the flour moth, *Ephesia kuehniella*. *Journal of Insect Physiology*, 22(9), 1213–1217. [https://doi.org/10.1016/0022-1910\(76\)90096-2](https://doi.org/10.1016/0022-1910(76)90096-2)

- Dacke, M., Baird, E., Byrne, M., Scholtz, C. H., & Warrant, E. J. (2013). Dung Beetles Use the Milky Way for Orientation. *Current Biology*, 23(4), 298–300.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.12.034>
- Daly, M., Behrends, P. R., Wilson, M. I., & Jacobs, L. F. (1992). Behavioural modulation of predation risk: Moonlight avoidance and crepuscular compensation in a nocturnal desert rodent, *Dipodomys merriami*. *Animal Behaviour*, 44(1), 1–9.
[https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(05\)80748-1](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(05)80748-1)
- Dauchy, R. T., Sauer, L. A., Blask, D. E., & Vaughan, G. M. (1997). Light contamination during the dark phase in “photoperiodically controlled” animal rooms: Effect on tumor growth and metabolism in rats. *Laboratory Animal Science*, 47(5), 511–518.
- Davies, T. W., Bennie, J., Inger, R., Ibarra, N. H., & Gaston, K. J. (2013). Artificial light pollution: Are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions? *Global Change Biology*, 19(5), 1417–1423. <https://doi.org/10.1111/gcb.12166>
- Davies, T. W., & Smyth, T. (2018). Why artificial light at night should be a focus for global change research in the 21st century. *Global Change Biology*, 24(3), 872–882.
<https://doi.org/10.1111/gcb.13927>
- Dawson, A., King, V. M., Bentley, G. E., & Ball, G. F. (2001). Photoperiodic Control of Seasonality in Birds. *Journal of Biological Rhythms*, 16(4), 365–380.
<https://doi.org/10.1177/074873001129002079>
- De Prins, W., & Steeman, C. (2023a). *Catalogue of the Lepidoptera of Belgium*.
<https://projects.biodiversity.be/lepidoptera/species/5358/>
- De Prins, W., & Steeman, C. (2023b). *Catalogue of the Lepidoptera of Belgium*.
<https://projects.biodiversity.be/lepidoptera/species/4274/>
- Deitsch, J. F., & Kaiser, S. A. (2023). Artificial light at night increases top-down pressure on caterpillars: Experimental evidence from a light-naïve forest. *Proceedings of the Royal*

- Society B: Biological Sciences*, 290(1994), 20230153.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2023.0153>
- Densité De Population Etats Unis DAmérique 2021*. (2021). PopulationPyramid.net.
<https://populationpyramid.net/fr/population-densite/etats-unis-damerique/2021/>
- Dreisig, H. (1980). The importance of illumination level in the daily onset of flight activity in nocturnal moths. *Physiological Entomology*, 5(4), 327–342.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.1980.tb00243.x>
- Dreisig, H. (1981). Daily flight activity of moths in the continuous daylight of the arctic summer. *Ecography*, 4(1), 36–42. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.1981.tb00978.x>
- Dreyer, D., Frost, B., Mouritsen, H., Günther, A., Green, K., Whitehouse, M., Johnsen, S., Heinze, S., & Warrant, E. (2018). The Earth's Magnetic Field and Visual Landmarks Steer Migratory Flight Behavior in the Nocturnal Australian Bogong Moth. *Current Biology*, 28(13), 2160-2166.e5. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.05.030>
- Durrant, J., Botha, L. M., Green, M. P., & Jones, T. M. (2018). Artificial light at night prolongs juvenile development time in the black field cricket, *Teleogryllus commodus*. *Journal of Experimental Zoology Part B: Molecular and Developmental Evolution*, 330(4), 225–233. <https://doi.org/10.1002/jez.b.22810>
- Eisenbeis, G., & Hänel, A. (2009). Light pollution and the impact of artificial night lighting on insects. In M. J. McDonnell, A. K. Hahs, & J. H. Breuste (Eds.), *Ecology of Cities and Towns* (1st ed., pp. 243–263). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511609763.016>
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K., Portnov, B. A., Rybnikova, N. A., & Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2(6), e1600377. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>

- Fantinou, A. A., Tsitsipis, J. A., & Karandinos, M. G. (1996). Effects of Short- and Long-Day Photoperiods on Growth and Development of *Sesamia nonagrioides* (Lepidoptera: Noctuidae). *Environmental Entomology*, 25(6), 1337–1343. <https://doi.org/10.1093/ee/25.6.1337>
- Fatzinger, C. W. (1973). Circadian Rhythmicity of Sex Pheromone Release by *Dioryctria abietella* (Lepidoptera: Pyralidae (Phycitinae)) and the Effect of a Diel Light Cycle on Its Precopulatory Behavior¹. *Annals of the Entomological Society of America*, 66(5), 1147–1153. <https://doi.org/10.1093/aesa/66.5.1147>
- Fox, R. (2013). The decline of moths in Great Britain: A review of possible causes. *Insect Conservation and Diversity*, 6(1), 5–19. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4598.2012.00186.x>
- Fox, R., Oliver, T. H., Harrower, C., Parsons, M. S., Thomas, C. D., & Roy, D. B. (2014). Long-term changes to the frequency of occurrence of British moths are consistent with opposing and synergistic effects of climate and land-use changes. *Journal of Applied Ecology*, 51(4), 949–957. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12256>
- Frago, E., Selfa, J., Pujade-Villar, J., Guara, M., & Bauce, É. (2009). Age and size thresholds for pupation and developmental polymorphism in the browntail moth, *Euproctis chrysorrhoea* (Lepidoptera: Lymantriidae), under conditions that either emulate diapause or prevent it. *Journal of Insect Physiology*, 55(10), 952–958. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2009.06.013>
- Frank, K. D. (1991). Impact of Outdoor Lighting on Moths. *International Astronomical Union Colloquium*, 112, 51–51. <https://doi.org/10.1017/S0252921100003687>
- Gao, J., & O'Neill, B. C. (2020). Mapping global urban land for the 21st century with data-driven simulations and Shared Socioeconomic Pathways. *Nature Communications*, 11(1), 2302. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15788-7>

- García-Barros, E. (2006). Number of larval instars and sex-specific plasticity in the development of the small heath butterfly, *Coenonympha pamphilus* (Lepidoptera: Nymphalidae). *European Journal of Entomology*, 103(1), 47–53. <https://doi.org/10.14411/eje.2006.007>
- Garris, H. W., & Snyder, J. A. (2010). Sex-Specific Attraction of Moth Species to Ultraviolet Light Traps. *Southeastern Naturalist*, 9(3), 427–434. <https://doi.org/10.1656/058.009.0302>
- Gaston, K. J., Ackermann, S., Bennie, J., Cox, D. T. C., Phillips, B. B., Sánchez de Miguel, A., & Sanders, D. (2021). Pervasiveness of Biological Impacts of Artificial Light at Night. *Integrative and Comparative Biology*, 61(3), 1098–1110. <https://doi.org/10.1093/icb/icab145>
- Gaston, K. J., Bennie, J., Davies, T. W., & Hopkins, J. (2013). The ecological impacts of nighttime light pollution: A mechanistic appraisal: Nighttime light pollution. *Biological Reviews*, 88(4), 912–927. <https://doi.org/10.1111/brv.12036>
- Gaston, K. J., Davies, T. W., Bennie, J., & Hopkins, J. (2012). REVIEW: Reducing the ecological consequences of night-time light pollution: options and developments. *Journal of Applied Ecology*, 49(6), 1256–1266. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02212.x>
- Gaston, K. J., Gaston, S., Bennie, J., & Hopkins, J. (2015). Benefits and costs of artificial nighttime lighting of the environment. *Environmental Reviews*, 23(1), 14–23. <https://doi.org/10.1139/er-2014-0041>
- Gaston, K. J., & Holt, L. A. (2018). Nature, extent and ecological implications of night-time light from road vehicles. *Journal of Applied Ecology*, 55(5), 2296–2307. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13157>

- Gaston, K. J., Visser, M. E., & Hölker, F. (2015). The biological impacts of artificial light at night: The research challenge. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1667), 20140133. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0133>
- Gliwicz, Z. M. (1986). A Lunar Cycle in Zooplankton. *Ecology*, 67(4), 883–897. <https://doi.org/10.2307/1939811>
- Goldsmith, T. H. (1990). Optimization, Constraint, and History in the Evolution of Eyes. *The Quarterly Review of Biology*, 65(3), 281–322. <https://doi.org/10.1086/416840>
- González-Bernal, E., Greenlees, M. J., Brown, G. P., & Shine, R. (2016). Toads in the backyard: Why do invasive cane toads (*Rhinella marina*) prefer buildings to bushland? *Population Ecology*, 58(2), 293–302. <https://doi.org/10.1007/s10144-016-0539-0>
- Grenis, K., & Murphy, S. M. (2019). Direct and indirect effects of light pollution on the performance of an herbivorous insect. *Insect Science*, 26(4), 770–776. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.12574>
- Grenis, K., Nufio, C., Wimp, G. M., & Murphy, S. M. (2023). Does artificial light at night alter moth community composition? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 378(1892), 20220365. <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0365>
- Hallmann, C. A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., Stenmans, W., Müller, A., Sumser, H., Hörren, T., Goulson, D., & De Kroon, H. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLOS ONE*, 12(10), e0185809. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>
- Han, R., Parajulee, M., He, Z., & Ge, F. (2008). Effects of environmental humidity on the survival and development of pine caterpillars, *Dendrolimus tabulaeformis* (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Insect Science*, 15(2), 147–152. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7917.2008.00195.x>

- Haymes, G. T., Patrick, P. H., & Onisto, L. J. (1984). Attraction of Fish to Mercury Vapour Light and Its Application in a Generating Station Forebay. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 69(6), 867–876. <https://doi.org/10.1002/iroh.19840690610>
- Haynes, K. J., Miller, G. D., Serrano-Perez, M. C., Hey, M. H., & Emer, L. K. (2023). Artificial light at night increases the nighttime feeding of monarch butterfly caterpillars without affecting host plant quality. *Basic and Applied Ecology*, 72, 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2023.07.007>
- Heiling, A. M. (1999). Why Do Nocturnal Orb-Web Spiders (Araneidae) Search for Light? *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 46(1), 43–49.
- Hölker, F., Moss, T., Griefahn, B., Kloas, W., Voigt, C. C., Henckel, D., Hänel, A., Kappeler, P. M., Völker, S., Schwöpe, A., Franke, S., Uhrlandt, D., Fischer, J., Klenke, R., Wolter, C., & Tockner, K. (2010). The Dark Side of Light: A Transdisciplinary Research Agenda for Light Pollution Policy. *Ecology and Society*, 15(4), art13. <https://doi.org/10.5751/ES-03685-150413>
- Hölker, F., Wolter, C., Perkin, E. K., & Tockner, K. (2010). Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(12), 681–682. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.007>
- Hölldobler, B., & Taylor, R. W. (1983). A behavioral study of the primitive ant *Nothomyrmecia macrops* Clark. *Insectes Sociaux*, 30(4), 384–401. <https://doi.org/10.1007/BF02223970>
- Honěk, A., & Honek, A. (1993). Intraspecific Variation in Body Size and Fecundity in Insects: A General Relationship. *Oikos*, 66(3), 483. <https://doi.org/10.2307/3544943>
- Honnen, A.-C., Johnston, P. R., & Monaghan, M. T. (2016). Sex-specific gene expression in the mosquito *Culex pipiens* f. *Molestus* in response to artificial light at night. *BMC Genomics*, 17(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-2336-0>

- Horváth, G., Kriska, G., Malik, P., & Robertson, B. (2009). Polarized light pollution: A new kind of ecological photopollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(6), 317–325. <https://doi.org/10.1890/080129>
- Ismail, I. I., El-Nahal, A. K. M., Kamel, A. H., & Mostafa, T. S. (1988). Effect of Light on the Development of the Angoumois Grain Moth, *Sitotroga Cerealella* Olivier (Lepidoptera: Gelechiidae). *International Journal of Tropical Insect Science*, 9(01), 27–29. <https://doi.org/10.1017/S1742758400009978>
- Jayatilaka, P., Narendra, A., Reid, S. F., Cooper, P., & Zeil, J. (2011). Different effects of temperature on foraging activity schedules in sympatric *Myrmecia* ants. *Journal of Experimental Biology*, 214(16), 2730–2738. <https://doi.org/10.1242/jeb.053710>
- Johnson, K. (1978). Control of Lampenflora at Waitomo Caves, New Zealand. *Australasian Cave and Karst Management Association*.
- Jones, J., & Francis, C. M. (2003). The effects of light characteristics on avian mortality at lighthouses. *Journal of Avian Biology*, 34(4), 328–333. <https://doi.org/10.1111/j.0908-8857.2003.03183.x>
- Kaiser, A., Merckx, T., & Van Dyck, H. (2016). The Urban Heat Island and its spatial scale dependent impact on survival and development in butterflies of different thermal sensitivity. *Ecology and Evolution*, 6(12), 4129–4140. <https://doi.org/10.1002/ece3.2166>
- Kamrowski, R., Limpus, C., Moloney, J., & Hamann, M. (2012). Coastal light pollution and marine turtles: Assessing the magnitude of the problem. *Endangered Species Research*, 19(1), 85–98. <https://doi.org/10.3354/esr00462>
- Kato, M., & Atsushi, K. (2004). Plant-Pollinator Interactions in New Caledonia Influenced by Introduced Honey Bees. *American Journal of Botany*, 91(11), 1814–1827.

- Kawahara, A. Y., Plotkin, D., Hamilton, C. A., Gough, H., St Laurent, R., Owens, H. L., Homziak, N. T., & Barber, J. R. (2018). Diel behavior in moths and butterflies: A synthesis of data illuminates the evolution of temporal activity. *Organisms Diversity & Evolution*, 18(1), 13–27. <https://doi.org/10.1007/s13127-017-0350-6>
- Kehoe, R., Sanders, D., & van Veen, F. J. (2022). Towards a mechanistic understanding of the effects of artificial light at night on insect populations and communities. *Current Opinion in Insect Science*, 53, 100950. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2022.100950>
- Knop, E., Zoller, L., Ryser, R., Gerpe, C., Hörler, M., & Fontaine, C. (2017). Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature*, 548(7666), 206–209. <https://doi.org/10.1038/nature23288>
- Krüll, F., Demmelmeier, H., & Remmert, H. (1985). On the circadian rhythm of animals in high polar latitudes. *Naturwissenschaften*, 72(4), 197–203. <https://doi.org/10.1007/BF01195761>
- Kyba, C. C. M., & Hölker, F. (2013). Do artificially illuminated skies affect biodiversity in nocturnal landscapes? *Landscape Ecology*, 28(9), 1637–1640. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9936-3>
- Kyba, C. C. M., Kuester, T., Sánchez de Miguel, A., Baugh, K., Jechow, A., Hölker, F., Bennie, J., Elvidge, C. D., Gaston, K. J., & Guanter, L. (2017). Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. *Science Advances*, 3(11), e1701528. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701528>
- Kyba, C. C. M., Ruhtz, T., Fischer, J., & Hölker, F. (2011). Cloud Coverage Acts as an Amplifier for Ecological Light Pollution in Urban Ecosystems. *PLoS ONE*, 6(3), e17307. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017307>
- LED Lighting Market Size & Share Analysis—Industry Research Report—Growth Trends.* (2023). <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/led-lighting-market>

- Lefèvre, M., & Lefevre, M. (1974). La “Maladie Verte” de Lascaux. *Studies in Conservation*, 19(3), 126. <https://doi.org/10.2307/1505660>
- Levesque, K. R., Fortin, M., & Mauffette, Y. (2002). Temperature and food quality effects on growth, consumption and post-ingestive utilization efficiencies of the forest tent caterpillar *Malacosoma disstria* (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Bulletin of Entomological Research*, 92(2), 127–136. <https://doi.org/10.1079/BER2002153>
- Lewanzik, D., & Voigt, C. C. (2017). Transition from conventional to light-emitting diode street lighting changes activity of urban bats. *Journal of Applied Ecology*, 54(1), 264–271. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12758>
- Light pollution map.* (2023). <https://www.lightpollutionmap.info/#zoom=6.84&lat=50.5730&lon=5.3763&state=eyJiYXNlbWFWIjoiTGF5ZXJCaW5nUm9hZCIsIm92ZXJsYXkiOiJ3YV8yMDE1Iiwib3ZlcmxheWNvbG9yIjpmYWxzZSwib3ZlcmxheW9wYWNpdHkiOjYwLCJmZWFOdXJlc29wYWNpdHkiOjg1fQ==>
- Longcore, T., & Rich, C. (2004). Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(4), 191–198. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0191:ELP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0191:ELP]2.0.CO;2)
- Longcore, T., Rich, C., Mineau, P., MacDonald, B., Bert, D. G., Sullivan, L. M., Mutrie, E., Gauthreaux, S. A., Avery, M. L., Crawford, R. L., Manville, A. M., Travis, E. R., & Drake, D. (2012). An Estimate of Avian Mortality at Communication Towers in the United States and Canada. *PLoS ONE*, 7(4), e34025. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034025>
- Luginbuhl, C. B., Boley, P. A., & Davis, D. R. (2014). The impact of light source spectral power distribution on sky glow. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 139, 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.12.004>

- Macgregor, C. J., Evans, D. M., Fox, R., & Pocock, M. J. O. (2017). The dark side of street lighting: Impacts on moths and evidence for the disruption of nocturnal pollen transport. *Global Change Biology*, 23(2), 697–707. <https://doi.org/10.1111/gcb.13371>
- Macgregor, C. J., Pocock, M. J. O., Fox, R., & Evans, D. M. (2015). Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: A review. *Ecological Entomology*, 40(3), 187–198. <https://doi.org/10.1111/een.12174>
- McMahon, T. A., Rohr, J. R., & Bernal, X. E. (2017). Light and noise pollution interact to disrupt interspecific interactions. *Ecology*, 98(5), 1290–1299. <https://doi.org/10.1002/ecy.1770>
- Merckx, T., Nielsen, M. E., Heliölä, J., Kuussaari, M., Pettersson, L. B., Pöyry, J., Tiainen, J., Gotthard, K., & Kivelä, S. M. (2021). Urbanization extends flight phenology and leads to local adaptation of seasonal plasticity in Lepidoptera. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(40), e2106006118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2106006118>
- Merckx, T., Nielsen, M. E., Kankaanpää, T., Kadlec, T., Yazdanian, M., & Kivelä, S. M. (2023). Dim light pollution prevents diapause induction in urban and rural moths. *Journal of Applied Ecology*, 60(6), 1022–1031. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14373>
- Miller, J. R. (2005). Biodiversity conservation and the extinction of experience. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(8), 430–434. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.013>
- Milonas, P. G., & Savopoulou-Soultani, M. (2004). Diapause Termination in Overwintering Larvae of a Greek Strain of *Adoxophyes orana* (Lepidoptera: Tortricidae). *Environmental Entomology*, 33(3), 513–519. <https://doi.org/10.1603/0046-225X-33.3.513>
- Molleman, F., Javoš, J., Esperk, T., Teder, T., Davis, R. B., & Tammaru, T. (2011). Sexual differences in weight loss upon eclosion are related to life history strategy in

- Lepidoptera. *Journal of Insect Physiology*, 57(6), 712–722.
<https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2011.02.009>
- Moore, M. E., Hill, C. A., & Kingsolver, J. G. (2021). Differing thermal sensitivities in a host–parasitoid interaction: High, fluctuating developmental temperatures produce dead wasps and giant caterpillars. *Functional Ecology*, 35(3), 675–685.
<https://doi.org/10.1111/1365-2435.13748>
- Muscogiuri, G., Poggiogalle, E., Barrea, L., Tarsitano, M. G., Garifalos, F., Liccardi, A., Pugliese, G., Savastano, S., Colao, A., Colao, A., Alviggi, C., Aprano, S., Barazzoni, R., Barrea, L., Beguinot, F., Belfiore, A., Bellastella, G., Bettini, S., Bifulco, G., ... Vettor, R. (2022). Exposure to artificial light at night: A common link for obesity and cancer? *European Journal of Cancer*, 173, 263–275. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2022.06.007>
- Nabli, H., Bailey, W. C., & Necibi, S. (1999). Beneficial Insect Attraction to Light Traps with Different Wavelengths. *Biological Control*, 16(2), 185–188.
<https://doi.org/10.1006/bcon.1999.0748>
- Navara, K. J., & Nelson, R. J. (2007). The dark side of light at night: Physiological, epidemiological, and ecological consequences. *Journal of Pineal Research*, 43(3), 215–224. <https://doi.org/10.1111/j.1600-079X.2007.00473.x>
- Nemec, S. J. (1969). Use of Artificial Lighting to Reduce *Heliothis* Spp. Populations in Cotton Fields¹. *Journal of Economic Entomology*, 62(5), 1138–1140.
<https://doi.org/10.1093/jee/62.5.1138>
- Nemeth, R. S., & Anderson, J. J. (1992). Response of Juvenile Coho and Chinook Salmon to Strobe and Mercury Vapor Lights. *North American Journal of Fisheries Management*, 12(4), 684–692. [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(1992\)012<0684:ROJCAC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(1992)012<0684:ROJCAC>2.3.CO;2)

- Niva, C. C., & Takeda, M. (2003). Effects of Photoperiod, Temperature and Melatonin on Nymphal Development, Polyphenism and Reproduction in *Halyomorpha halys* (Heteroptera: Pentatomidae). *Zoological Science*, 20(8), 963–970. <https://doi.org/10.2108/zsj.20.963>
- Nowinszky, L., Puskas, J., & Hill, L. (Eds.). (2023). *The light trapping of insects influenced by the sun and moon in Europe, Australia and the USA*. Cambridge Scholars Publishing.
- Owens, A. C. S., Cochard, P., Durrant, J., Farnworth, B., Perkin, E. K., & Seymoure, B. (2020). Light pollution is a driver of insect declines. *Biological Conservation*, 241, 108259. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108259>
- Owens, A. C. S., & Lewis, S. M. (2018). The impact of artificial light at night on nocturnal insects: A review and synthesis: XXXX. *Ecology and Evolution*, 8(22), 11337–11358. <https://doi.org/10.1002/ece3.4557>
- Perkin, E. K., Hölker, F., & Tockner, K. (2014). The effects of artificial lighting on adult aquatic and terrestrial insects. *Freshwater Biology*, 59(2), 368–377. <https://doi.org/10.1111/fwb.12270>
- Persson, B. (1971). Influence of Light on Flight Activity of Noctuids (Lepidoptera) in South Sweden. *Insect Systematics & Evolution*, 2(3), 215–232. <https://doi.org/10.1163/187631271X00220>
- Petanidou, T., Kallimanis, A. S., Sgardelis, S. P., Mazaris, A. D., Pantis, J. D., & Waser, N. M. (2014). Variable flowering phenology and pollinator use in a community suggest future phenological mismatch. *Acta Oecologica*, 59, 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2014.06.001>
- Péter, Á., Seress, G., Sándor, K., Vincze, E., Klucsik, K. P., & Liker, A. (2020). The effect of artificial light at night on the biomass of caterpillars feeding in urban tree canopies. *Urban Ecosystems*, 23(6), 1311–1319. <https://doi.org/10.1007/s11252-020-00999-z>

- Ramalho, C. E., & Hobbs, R. J. (2012). Time for a change: Dynamic urban ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 27(3), 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.10.008>
- Ramirez, N. (2004). Pollination specialization and time of pollination on a tropical Venezuelan plain: Variations in time and space. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 145(1), 1–16. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2004.00181.x>
- Rich, C., & Longcore, T. (Eds.). (2006). *Ecological consequences of artificial night lighting*. Island Press.
- Riitters, K. H., & Wickham, J. D. (2003). How far to the nearest road? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(3), 125–129. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001\[0125:HFTTNR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0125:HFTTNR]2.0.CO;2)
- Rivkin, L. R., Santangelo, J. S., Alberti, M., Aronson, M. F. J., de Keyzer, C. W., Diamond, S. E., Fortin, M., Frazee, L. J., Gorton, A. J., Hendry, A. P., Liu, Y., Losos, J. B., MacIvor, J. S., Martin, R. A., McDonnell, M. J., Miles, L. S., Munshi-South, J., Ness, R. W., Newman, A. E. M., ... Johnson, M. T. J. (2019). A roadmap for urban evolutionary ecology. *Evolutionary Applications*, 12(3), 384–398. <https://doi.org/10.1111/eva.12734>
- Robinson, H. S. (2009). ON THE BEHAVIOUR OF NIGHT-FLYING INSECTS IN THE NEIGHBOURHOOD OF A BRIGHT SOURCE OF LIGHT. *Proceedings of the Royal Entomological Society of London. Series A, General Entomology*, 27(1–3), 13–21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.1952.tb00139.x>
- Rodrigues, A. L. O., Rodrigues, A., & Peroff, D. M. (2015). The Sky and Sustainable Tourism Development: A Case Study of a Dark Sky Reserve Implementation in Alqueva: The Sky and Sustainable Tourism Development. *International Journal of Tourism Research*, 17(3), 292–302. <https://doi.org/10.1002/jtr.1987>
- Rydell, J. (1992). Exploitation of Insects around Streetlamps by Bats in Sweden. *Functional Ecology*, 6(6), 744. <https://doi.org/10.2307/2389972>

- Sanders, D., Kehoe, R., Cruse, D., van Veen, F. J. F., & Gaston, K. J. (2018). Low Levels of Artificial Light at Night Strengthen Top-Down Control in Insect Food Web. *Current Biology*, 28(15), 2474-2478.e3. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.05.078>
- Sanders, D., Kehoe, R., Tiley, K., Bennie, J., Cruse, D., Davies, T. W., Frank van Veen, F. J., & Gaston, K. J. (2015). Artificial nighttime light changes aphid-parasitoid population dynamics. *Scientific Reports*, 5(1), 15232. <https://doi.org/10.1038/srep15232>
- Saunders, D. S. (2009). Circadian rhythms and the evolution of photoperiodic timing in insects. *Physiological Entomology*, 34(4), 301–308. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.2009.00699.x>
- Schroer, S., Häffner, E., & Hölker, F. (2019). Impact of artificial illumination on the development of a leafmining moth in urban trees. *International Journal of Sustainable Lighting*, 21(1), 1–10. <https://doi.org/10.26607/ijsl.v21i1.86>
- Shirai, Y. (1995). Longevity, flight ability and reproductive performance of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Yponomeutidae), related to adult body size. *Population Ecology*, 37(2), 269–277. <https://doi.org/10.1007/BF02515829>
- Sierro, J., Schloesing, E., Pavón, I., & Gil, D. (2017). European Blackbirds Exposed to Aircraft Noise Advance Their Chorus, Modify Their Song and Spend More Time Singing. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5, 68. <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00068>
- Singhal, R. K., Chauhan, J., Jatav, H. S., Rajput, V. D., Singh, G. S., & Bose, B. (2021). Artificial night light alters ecosystem services provided by biotic components. *Biologia Futura*, 72(2), 169–185. <https://doi.org/10.1007/s42977-020-00065-x>
- Sordello, R. (2017). Pollution lumineuse et trame verte et bleue: Vers une trame noire en France ? *Territoire En Mouvement*, 35. <https://doi.org/10.4000/tem.4381>

- Sotthibandhu, S., & Baker, R. R. (1979). Celestial orientation by the large yellow underwing moth, *Noctua pronuba* L. *Animal Behaviour*, 27, 786–800.
[https://doi.org/10.1016/0003-3472\(79\)90015-0](https://doi.org/10.1016/0003-3472(79)90015-0)
- Sower, L. L., Shorey, H. H., & Gaston, L. K. (1970). Sex Pheromones of Noctuid Moths. XXI. Light: Dark Cycle Regulation and Light Inhibition of Sex Pheromone Release by Females of *Trichoplusia ni*. *Annals of the Entomological Society of America*, 63(4), 1090–1092. <https://doi.org/10.1093/aesa/63.4.1090>
- Summers, C. G. (1997). Phototactic Behavior of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) Crawlers. *Annals of the Entomological Society of America*, 90(3), 372–379.
<https://doi.org/10.1093/aesa/90.3.372>
- Svensson, A. M., & Rydell, J. (1998). Mercury vapour lamps interfere with the bat defence of tympanate moths (Operophter spp.; Geometridae). *Animal Behaviour*, 55(1), 223–226.
<https://doi.org/10.1006/anbe.1997.0590>
- Syed, R. A. (1979). Studies on oil palm pollination by insects. *Bulletin of Entomological Research*, 69(2), 213–224. <https://doi.org/10.1017/S0007485300017673>
- Tancredi, S., Urbano, T., Vinceti, M., & Filippini, T. (2022). Artificial light at night and risk of mental disorders: A systematic review. *Science of The Total Environment*, 833, 155185.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155185>
- Touitou, Y., Reinberg, A., & Touitou, D. (2017). Association between light at night, melatonin secretion, sleep deprivation, and the internal clock: Health impacts and mechanisms of circadian disruption. *Life Sciences*, 173, 94–106.
<https://doi.org/10.1016/j.lfs.2017.02.008>
- Tundisi, J. G. (Ed.). (1999). *Theoretical reservoir ecology and its applications*. Backhuys Publ. [u.a.].

- Underhill, V. A., & Höbel, G. (2018). Mate choice behavior of female Eastern Gray Treefrogs (*Hyla versicolor*) is robust to anthropogenic light pollution. *Ethology*, 124(8), 537–548. <https://doi.org/10.1111/eth.12759>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs: 68% of the world population projected to live in urban areas by 2050. (2018, May 16). <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
- Urbanski, J., Mogi, M., O'Donnell, D., DeCotiis, M., Toma, T., & Armbruster, P. (2012). Rapid Adaptive Evolution of Photoperiodic Response during Invasion and Range Expansion across a Climatic Gradient. *The American Naturalist*, 179(4), 490–500. <https://doi.org/10.1086/664709>
- van Geffen, K. G., Groot, A. T., Van Grunsven, R. H. A., Donners, M., Berendse, F., & Veenendaal, E. M. (2015). Artificial night lighting disrupts sex pheromone in a noctuid moth: Moth sex pheromone in illuminated nights. *Ecological Entomology*, 40(4), 401–408. <https://doi.org/10.1111/een.12202>
- van Geffen, K. G., Van Eck, E., de Boer, R. A., van Grunsven, R. H. A., Salis, L., Berendse, F., & Veenendaal, E. M. (2015). Artificial light at night inhibits mating in a Geometrid moth. *Insect Conservation and Diversity*, 8(3), 282–287. <https://doi.org/10.1111/icad.12116>
- van Geffen, K. G., Van Grunsven, R. H. A., Van Ruijven, J., Berendse, F., & Veenendaal, E. M. (2014). Artificial light at night causes diapause inhibition and sex-specific life history changes in a moth. *Ecology and Evolution*, 4(11), 2082–2089. <https://doi.org/10.1002/ece3.1090>
- van Langevelde, F., Braamburg-Annegarn, M., Huigens, M. E., Groendijk, R., Poitevin, O., Deijk, J. R., Ellis, W. N., Grunsven, R. H. A., Vos, R., Vos, R. A., Franzén, M., &

- WallisDeVries, M. F. (2018). Declines in moth populations stress the need for conserving dark nights. *Global Change Biology*, 24(3), 925–932. <https://doi.org/10.1111/gcb.14008>
- van Langevelde, F., van Grunsven, R. H. A., Veenendaal, E. M., & Fijen, T. P. M. (2017). Artificial night lighting inhibits feeding in moths. *Biology Letters*, 13(3), 20160874. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0874>
- Vepsäläinen, K. (1974). Lengthening of Illumination Period is a Factor in Averting Diapause. *Nature*, 247(5440), 385–386. <https://doi.org/10.1038/247385a0>
- Verheijen, F. J. (1960). The Mechanisms of the Trapping Effect of Artificial Light Sources Upon Animals. *Archives Néerlandaises de Zoologie*, 13(1), 1–107. <https://doi.org/10.1163/036551660X00017>
- Warrant, E. J., Kelber, A., Wallén, R., & Wcislo, W. T. (2006). Ocellar optics in nocturnal and diurnal bees and wasps. *Arthropod Structure & Development*, 35(4), 293–305. <https://doi.org/10.1016/j.asd.2006.08.012>
- Warren, A. D. (1990). Predation of five species of Noctuidae at ultraviolet light by the western yellowjacket (Hymenoptera: Vespidae). *Journal of The Lepidopterists Society*, 44, 32–32.
- Welsh, B. C., & Farrington, D. P. (2008). Effects of Improved Street Lighting on Crime. *Campbell Systematic Reviews*, 4(1), 1–51. <https://doi.org/10.4073/csr.2008.13>
- West, K. E., Jablonski, M. R., Warfield, B., Cecil, K. S., James, M., Ayers, M. A., Maida, J., Bowen, C., Sliney, D. H., Rollag, M. D., Hanifin, J. P., & Brainard, G. C. (2011). Blue light from light-emitting diodes elicits a dose-dependent suppression of melatonin in humans. *Journal of Applied Physiology*, 110(3), 619–626. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01413.2009>

- Wojda, I., Staniec, B., Sułek, M., & Kordaczuk, J. (2020). The greater wax moth *Galleria mellonella*: Biology and use in immune studies. *Pathogens and Disease*, 78(9), ftaa057. <https://doi.org/10.1093/femspd/ftaa057>
- Xu, K., DiAngelo, J. R., Hughes, M. E., Hogenesch, J. B., & Sehgal, A. (2011). The Circadian Clock Interacts with Metabolic Physiology to Influence Reproductive Fitness. *Cell Metabolism*, 13(6), 639–654. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2011.05.001>