

RAPPORT DE STAGE

Master 2 Biodiversité, Ecologie et Evolution

Parcours conservation de la biodiversité (Année 2024 / 2025)

Etude des populations de *Macromia splendens*, *Oxygastra curtisii* et *Gomphus graslinii* sur deux sites Natura 2000 des Hautes Vallées Cévenoles

Juliette BOURREL

Soutenance le septembre 2025



Structure d'accueil : Syndicat des Hautes Vallées Cévenoles

Encadrant : Arnaud LORY, chargé de mission Natura 2000

Co-Encadrant : Bastien LOUBOUTIN, chargé de mission entomologiste (OPIE)

Crédits photos :



Figure 1. Vu d'ensemble d'un transect sur le Galeizon © Juliette Bourrel, 2025

*Figure 2. Exuvie de *Macromia splendens* © Juliette Bourrel, 2025*

*Figure 3. Exuvie d'*Oxygastra curtisii* © Juliette Bourrel, 2025*

*Figure 4. Emergence de *Gomphus graslinii* à la sortie de son exuvie © Cyril Soustelle, 2022*

*Figure 5. Chevelu racinaire d'*Aulne glutineux* © Cyril Soustelle, 2022*

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble du corps enseignant du Master 2 BEE pour la qualité des enseignements dispensés au cours de cette année, qui m'ont permis d'acquérir de solides bases théoriques et méthodologiques.

Je souhaite exprimer ma gratitude aux financeurs Natura 2000, la Région Occitanie et le Fonds Européen pour le Développement Rural, pour avoir rendu possible ce stage.

Mes remerciements les plus sincères vont également aux élus et salariés du Syndicat des Hautes Vallées Cévenoles, et en particulier à M. Yannick Louche, président fondateur, à Mme Émilie Brès, directrice, ainsi qu'à M. Arnaud Lory, chargé de mission Natura 2000 « Vallée du Galeizon » et mon maître de stage, et M. Juan-Pablo Rodriguez, chargé de mission N2000 « Hautes Vallées de la Cèze et du Luech » pour leur accompagnement tout au long de cette expérience. Merci : Arnaud pour ton encadrement bienveillant qui m'a permis de m'épanouir dans ce stage (et le chocolat, aussi !), Juan pour ta gentillesse à toute épreuve, Emilie pour les discussions sur la vie professionnelle qui m'ont bien éclairée, François pour m'avoir fait découvrir ta belle vallée, Théo pour notre (très utile) collaboration et échange de compétences QGIS / R, Jean-Luc pour tes (toujours très bons !) conseils, Céline et Maëlle pour m'avoir appris autant de choses qu'aux enfants pendant les animations nature, et à l'ensemble de l'équipe pour avoir rempli les pauses déjeuner de discussions passionnantes et pour avoir fait passer ce stage en un éclair.

Je souhaite également remercier Bastien Louboutin, pour son précieux accompagnement, que ce soit à travers la mise à disposition de sources bibliographiques, l'appui technique sur les analyses réalisées, la mobilisation de son réseau ou encore les nombreuses relectures.

Je remercie chaleureusement Cyril Soustelle pour la transmission de son savoir en odonatologie, et sa disponibilité pour répondre à mes nombreux questionnements concernant le protocole.

Je tiens aussi à remercier Élie Gaget et Jean-Yves Barnagaud pour leur aide en statistiques, qui a été déterminante dans l'avancée de ce travail.

Merci à Marilyn pour le temps et le soin consacrés à la relecture de mon travail.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la bonne réalisation de ce stage. J'adresse en particulier une pensée émue à ma famille, dont l'influence m'a donné très tôt le goût des mathématiques, et aux professeurs qui ont su l'enrichir et l'élargir à la biologie.

LISTE DES ABREVIATIONS

CD = Conseil Départemental

DFCI = Défense de la Forêt Contre les Incendies

DHFF = Directive Habitats-Faune-Flore

MAB = Man and Biosphere

OPIE = Office pour les Insectes et leur Environnement

PNA = Plan National d'Actions

SHVC = Syndicat des Hautes Vallées Cévenoles

ZSC = Zone Spéciale de Conservation

Présentation de la structure d'accueil

Le [Syndicat des Hautes Vallées Cévenoles](#) (SHVC) est un syndicat intercommunal créé en 1992, héritier de la démarche Man and Biosphere (MAB) de l'UNESCO. Il regroupe 26 communes et environ 13 500 habitants, à cheval entre le Gard et la Lozère, et porte un projet de développement durable à l'échelle territoriale (Figure 1).

Le SHVC anime et gère deux sites Natura 2000, la « Vallée du Galeizon » et la « Haute-Cèze et le Luech », Zones Spéciales de Conservation (ZSC) au titre de la Directive-Habitats-Faune-Flore (DHFF) où sont menées de nombreuses actions en faveur de la biodiversité (inventaires naturalistes, suivis scientifiques, actions de sensibilisation, ...). Le syndicat pilote également de nombreux programmes en accompagnant collectivités territoriales et habitants, en lien avec la transition énergétique, l'agriculture ou encore la gestion forestière. Depuis 2022, le SHVC a d'ailleurs intégré la compétence Défense des Forêts Contre l'Incendie (DFCI), lui permettant d'articuler gestion forestière et prévention des risques, en lien avec sa charte forestière. Parallèlement, il propose des programmes d'animation et de sensibilisation au grand public sur de nombreuses thématiques grâce à Biosphera, Centre d'Interprétation des Vallées Cévenoles, et mise beaucoup sur l'implication citoyenne. Par cette approche intégrée et ses compétences transversales, le SHVC se positionne comme un acteur clé de la transition écologique et de la cohésion territoriale en Cévennes.

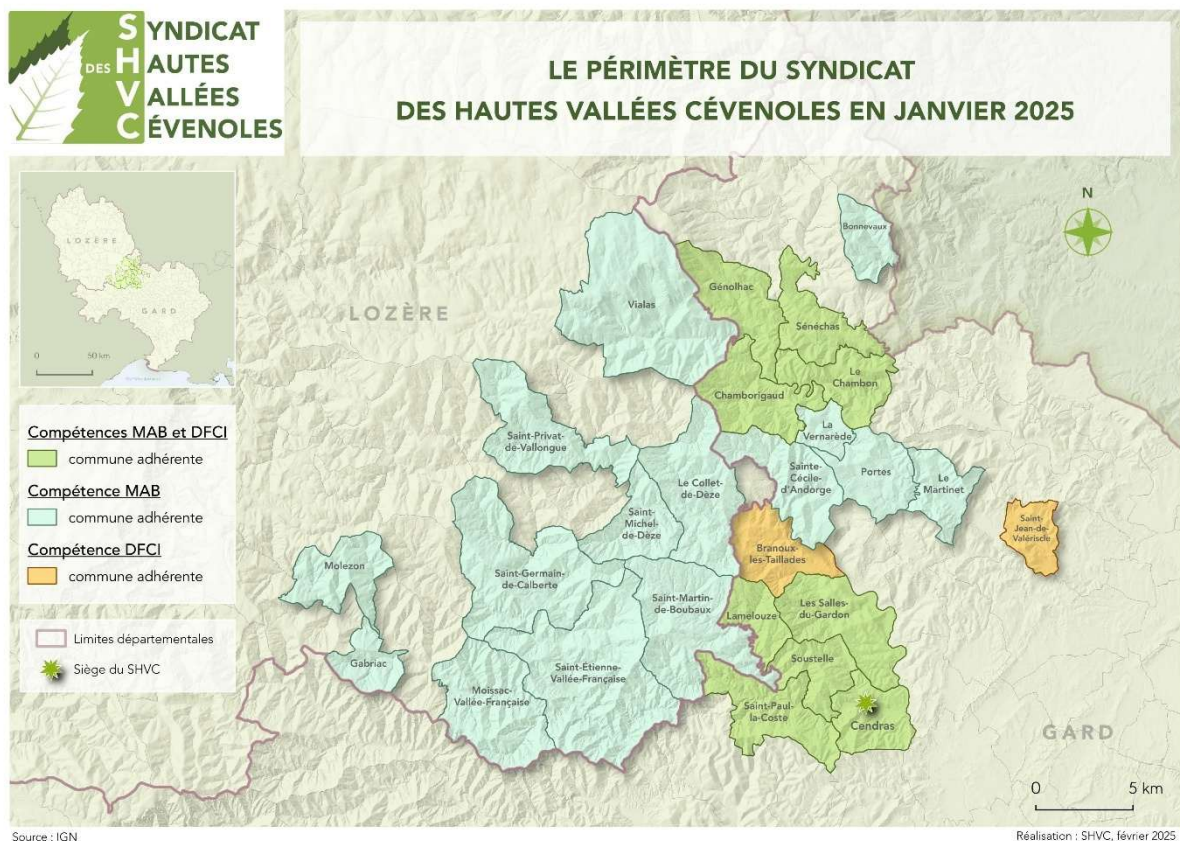


Figure 1. Adhésion des communes par compétence au SHVC

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	3
LISTE DES ABREVIATIONS	4
Présentation de la structure d'accueil.....	5
INTRODUCTION	8
MATERIEL ET METHODES	11
1. Présentation des espèces suivies	11
a) <i>Oxygastra curtisii</i> (Dale,1834)	11
b) <i>Macromia splendens</i> (Pictet,1843).....	12
c) <i>Gomphus graslinii</i> (Rambur, 1842)	13
2. Présentation des sites d'étude	14
a) Site Natura 2000 « Vallée du Galeizon » (FR9101369).....	14
b) Site Natura 2000 « Hautes Vallées de la Cèze et du Luech » (FR9101364).....	14
3. Méthodologie de prospection.....	15
a) Méthode d'échantillonnage.....	15
b) Protocole de collecte de données	15
c) Variables mesurées	16
4. Méthodologie d'exploitation des données	17
a) Traitements préliminaires.....	17
b) Analyses statistiques	18
RESULTATS	19
1. Présentation des données	19
a) Synthèse des données récoltées.....	19
b) Effectifs et distribution des espèces sur le site.....	19
2. Modélisation.....	21
a) Evolution spatio-temporelle des populations	21
b) Modélisation des relations espèces – habitat d'émergence.....	30

DISCUSSION	33
1. Analyse et mise en perspective des résultats	33
a) Etude descriptive de la distribution des espèces sur le site.....	33
b) Evolution spatio-temporelle des populations.....	33
c) Modélisation des relations espèces – habitat d'émergence.....	35
2. Implications pour la gestion conservatoire	37
a) Evaluation de l'état de conservation des espèces.....	37
b) Recommandations pour la préservation des espèces	37
3. Limites méthodologiques.....	38
a) Critique du protocole suivi et des analyses réalisées	38
b) Pistes d'amélioration méthodologique pour le suivi à long terme des odonates d'intérêt communautaire.....	40
GLOSSAIRE.....	41
BIBLIOGRAPHIE	43
ANNEXES	49
RESUME	64
ABSTRACT.....	64

INTRODUCTION

Problématique irréversible des changements environnementaux globaux (Dirzo, 2003), la perte de biodiversité atteint aujourd'hui des taux indiquant l'entrée dans la sixième extinction de masse (De Vos *et al.*, 2015) (Ceballos, *et al.*, 2015), nécessitant la mise en place de mesures de conservation efficaces (Barnosky, *et al.*, 2011). Les invertébrés et particulièrement les insectes, représentant pourtant plus de 85 % de la diversité animale connue (Footitt & Adler, 2009) et environ 1 million d'espèces décrites au total (Chapman, 2009), sont malgré tout victimes d'un biais taxonomique les minimisant au sein des publications scientifiques et des politiques de conservation (Di Marco, *et al.*, 2017) (Donaldson, *et al.*, 2016). Actuellement, seulement 0,12 % des espèces d'insectes connues en Europe font l'objet de politiques de conservation (Leandro *et al.*, 2017). Ils ne sont pourtant pas moins menacés que les vertébrés, avec une majorité des extinctions historiques les concernant (Dunn, 2005) et 18,5 % des espèces évaluées comme menacées (IUCN, 2017). On parle aujourd'hui « d'extinction silencieuse » (Fonseca, 2009) pour ce groupe taxonomique aux nombreuses fonctions écologiques (Denis, 2018).

Parmi les insectes, les Odonates représentent un ordre relativement bien connu et étudié (Miguel *et al.*, 2017), dû à son faible nombre d'espèces (environ 6 000) (Boudot *et al.*, 2017) ainsi que son attrait aux yeux du grand public (May, 2019). Premier ordre d'insectes à avoir été évalué pour la Liste rouge mondiale (Baillie *et al.*, 2008), les Odonates présentent un taux d'espèces menacées d'extinction de 10 %, mais la forte proportion (35 %) d'espèces non évaluées par manque de données permet d'estimer un taux d'espèces menacées plus proche de 15 % (IUCN, 2007). A l'échelle européenne, parmi les 143 espèces d'Odonates inventoriées dont 18 endémiques du territoire européen (De Knijf, *et al.*, 2024), ce sont également 15 % des espèces qui sont menacées d'extinction. De plus, 11 % des espèces d'Odonates sont quasi-menacées d'extinction, et environ un quart des espèces voit ses effectifs diminuer (Kalkman, *et al.*, 2010). La conservation des Odonates est une priorité pour trois régions en particulier : la Crête, le sud des Balkans et la péninsule Ibérique / le sud de la France (Boudot *et al.*, 2017).

La France est en effet un point chaud de la diversité odonatologique, avec pas moins de 89 espèces présentes sur son territoire (Boudot *et al.*, 2017), dont 79 au sein de la région Occitanie (Charlot *et al.*, 2018) et 76 spécifiquement dans le Gard (Louboutin, *et al.*, 2022). La Liste Rouge des libellules de France métropolitaine de 2016 indique que 30 % des espèces sont actuellement « quasi-menacées », « menacées » ou déjà « éteintes » sur le territoire national (UICN France *et al.*, 2016).

Ceci, ajouté à la spécificité du cycle de vie amphibie (Sahlén *et al.*, 2008) des Odonates qui ont été identifiées comme de bons bioindicateurs de la santé des écosystèmes (Corbet, 1999) (Kalkman, *et al.*, 2008), a mené en 2010 à la création du premier Plan National d'Actions (PNA) en faveur des Odonates, pour une durée de 5 ans (Dupont, 2010). Les PNA sont des outils stratégiques opérationnels portés par le ministère en charge de l'écologie, qui visent à assurer la conservation ou le rétablissement dans un état de conservation favorable d'espèces menacées ou faisant l'objet d'un intérêt particulier. Ce premier plan d'action, visant 18 espèces, a été renouvelé et élargi en 2020, pour une durée de 10 ans, devenant le PNA en faveur des Libellules, coordonné par l'Office pour les insectes et leur environnement (Opie). Le [nouveau PNA](#) se décompose en trois axes de travail principaux : l'amélioration des connaissances scientifiques, la mise en œuvre d'actions concrètes de gestion et de conservation et la sensibilisation de tous les publics à la préservation des Odonates (Houard, 2020). Il prend désormais en compte 33 espèces, choisies parmi les espèces menacées, protégées ou inscrites à la directive européenne Habitats-Faune- Flore (DHFF). Les PNA sont déclinés dans chacune des régions françaises, dont l'Occitanie où la déclinaison est rédigée et animée par le Conservatoire d'espaces naturels d'Occitanie (CEN) et l'Opie, de 2022 à 2031 (CEN Occitanie & Opie (coord.), 2022).



Figure 2. Carte des sites N2000 animés par le SHVC

La DHFF, adoptée en 1992, impose aux Etats membres de l'Union Européenne d'identifier et de protéger les espèces et habitats jugés « d'intérêt communautaire », cités dans ses annexes. Sur cette base est créé le réseau de zones Natura 2000, espaces naturels protégés se déclinant en deux types : les Zones Spéciales de Conservation et les Zones de Protection Spéciales (issues de la directive Oiseaux) (Union européenne, 1992). Le Syndicat des Hautes Vallées Cévenoles (SHVC), situé à la frontière entre le Gard, la Lozère et l'Ardèche, anime deux zones

Natura 2000 classées Zones Spéciales de Conservation : le site « Vallée du Galeizon » et le site « Haute Vallée de la Cèze et du Luech » (Figure 2). Le SHVC a réalisé de 2017 à 2019 un inventaire odonatologique sur toute la longueur des trois principales rivières des deux sites : le Galeizon, la Cèze et le Luech (Lafont *et al.*, 2021).

Cet inventaire a confirmé la présence et l'autochtonie de trois espèces d'intérêt communautaire : *Oxygastra curtisii* (Dale, 1834), *Macromia splendens* (Pictet, 1843) et *Gomphus graslinii* (Rambur, 1842) sur les sites Natura 2000. A sa suite, un protocole de suivi de ces espèces a été mis en place sur cinq années à partir de 2021 pour le site « Vallée du Galeizon », et de 2022 pour le site « Haute Vallée de la Cèze et du Luech ». Ainsi, ce suivi arrive à son terme pour le premier site et l'acquisition de données se poursuivra encore une année sur le second site. Ce protocole vise à participer à l'amélioration des connaissances de ces trois espèces du PNA, dont l'écologie des larves et la variabilité interannuelle des effectifs restent méconnus (Denis *et al.*, 2017), et de répondre à la nécessité de produire des comptages standardisés pour évaluer, suivre et favoriser la conservation de ces espèces (Denis, 2018). Ce stage consiste donc en une première analyse des données récoltées, afin d'obtenir de premiers résultats, à l'issue d'une phase de 5 ans de suivi, et d'orienter de futures études sur ce sujet.

Dans quelles mesures ce suivi permet-il de caractériser les dynamiques de populations et les habitats d'émergences d'*Oxygastra curtisii*, *Macromia splendens* et *Gomphus graslinii* ?

Ce rapport vise à vérifier les hypothèses suivantes :

- Au vu des étiages prolongés dans un contexte de dérèglement climatique, il est attendu que les tendances de populations soient décroissantes et présentent de fortes variations interannuelles comme il est commun d'en observer chez des espèces d'insectes (Schmidt Dalzochio *et al.*, 2020).
- Il est attendu que les habitats d'émergence correspondent à la bibliographie : des zones calmes des rivières, relativement profondes et avec une ripisylve importante (Boudot, 2017).

MATERIEL ET METHODES

1. Présentation des espèces suivies

a) *Oxygastra curtisii* (Dale, 1834)



Figure 3. Imago et exuvie d'*O. curtisii*, photographies par C. SOUSTELLE (CD30)

O. curtisii est un anisoptère de la famille des *Synthemistidae*, dont elle est la seule représentante en Europe (IUCN, 2024). De taille moyenne, elle se reconnaît par son abdomen vert métallique à noirâtre portant des taches jaunes dorsales allongées et son thorax entièrement vert métallique (Boudot *et al.*, 2017). L'exuvie, longue de 19 à 22 mm, arbore un masque en cuiller présentant un sillon à sa base et est dépourvue d'épines dorsales (Figure 3).

Endémique d'Europe occidentale et d'Afrique du Nord sous forme de populations relictuelles, cette espèce est particulièrement présente dans le sud et l'ouest de la France (Boudot *et al.*, 2017) (Lambret, 2022). Considérée en préoccupation mineure pour la région Occitanie et en France, la responsabilité régionale pour la conservation de l'espèce n'en est pas moins forte étant donné son statut quasi-menacé à l'échelle européenne et son déclin d'ores et déjà documenté au Royaume-Uni (Boudot *et al.*, 2017). Citée aux annexes II et IV de la Directive Habitats Faune-Flore, la Cordulie à corps fin, de son nom vernaculaire, est protégée sur l'ensemble du territoire français.

Cette espèce se rencontre dans les secteurs lents et zones assez profondes des eaux courantes, jusqu'à 800m d'altitude (Boudot *et al.*, 2017) sous forme de populations le plus souvent isolées et peu importantes (Denis, 2018). Les larves vivant dans les débris végétaux coincés dans les chevelus racinaires, une lisière arborée apparaît nécessaire à leur habitat (Boudot *et al.*, 2017). La phase larvaire est longue de 2 à 3 ans et les émergences se regroupent sur 10 à 15 jours entre le mois de mai et début août (Boudot *et al.*, 2017).

b) *Macromia splendens* (Pictet, 1843)

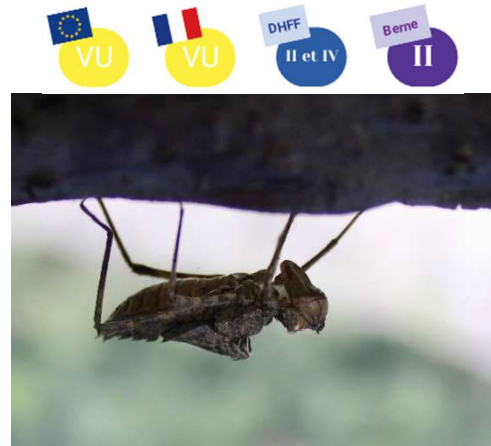


Figure 4. Imago et exuvie de *M. splendens*, photographiques par C. SOUSTELLE (CD30)

Anisoptère emblématique considéré comme un des plus grands d'Europe (Denis, 2018), *M. splendens* se distingue par son thorax vert métallique marqué de bandes antéhumérales et latérales jaunes, ses deux grandes taches jaunes sur le front et son abdomen noirâtre portant des taches jaunes médiodorsales (Boudot *et al.*, 2017). Son exuvie, mesurant 30 à 35 mm de long, est aisément reconnaissable par cette grande taille (Opie, 2016), ses pattes très longues lui donnant une allure d'araignée. L'exuvie présente une petite corne entre ses antennes (Doucet, 2016) (Figure 4).

Cette espèce affiche une aire de répartition restreinte, étant endémique du sud-ouest de la France et de la péninsule Ibérique (Boudot *et al.*, 2017) où elle est présente de manière localisée sous forme de populations fragmentées (Denis, 2018), et reste rare et peu abondante (MNHN & OFB, 2003-2025). L'espèce est classée vulnérable sur les listes rouges européenne et nationale ; également en Occitanie où résident vraisemblablement 80 % des populations connues, conférant ainsi à la région une forte responsabilité quant à sa conservation, d'autant que les violentes crues cévenoles peuvent mener à des disparitions locales (Soustelle, com. pers.). La Cordulie splendide est listée aux annexes II et IV de la DHFF et est protégée sur le territoire national.

M. splendens affectionnerait les mêmes types d'habitats qu'*O. curtisii* (Castagnet, *et al.*, 2014) : les secteurs calmes des grandes rivières, voire les retenues hydroélectriques et les petits ruisseaux présentant des vasques plus profondes, à des altitudes inférieures à 500 m (Boudot *et al.*, 2017). Les larves vivent à proximité des rives entre 30 et 150 cm de profondeur, dans des zones calmes et ombragées, enfouies dans des sédiments sablonneux ou organiques où elles chassent à l'affût (Boudot *et al.*, 2017). La phase larvaire de *M. splendens* s'étend sur deux à trois années (Boudot *et al.*, 2017). Les émergences se déroulent tôt le matin, en rétroversion complète et jusqu'à plusieurs mètres de haut (Boudot *et al.*, 2017). Il semblerait qu'un seuil thermique soit nécessaire à sa métamorphose (Castagnet, *et al.*, 2014), qui se déroule majoritairement en juin et juillet (Arguel & Louboutin, 2022)

et que, de manière générale, la température moyenne annuelle de l'eau soit un facteur primordial définissant la présence de l'espèce (Denis, Payet & Danflous, 2018) (Denis *et al.*, 2018).

c) *Gomphus graslinii* (Rambur, 1842)



Figure 5. Emergence et exuvie de *G. graslinii*, photographiques par C. SOUSTELLE (CD30)

G. graslinii est un anisoptère de la famille des Gomphidés, jaune et noir, de taille moyenne, caractérisé par une forte dent latérale externe sur les cercoïdes des mâles. Tous les segments de son abdomen portent une bande médiodorsale jaune et les bandes noires de son thorax sont plus larges que les bandes jaunes qu'elles entourent (Boudot *et al.*, 2017). L'exuvie de *G. graslinii* se distingue par sa taille moyenne, son aspect trapu et un masque labial plat et large (Doucet, 2016) (Figure 5). La distinction entre les exuvies du genre *Gomphus* se fait sous loupe binoculaire. Néanmoins, un nouveau critère, en cours de discussion, permettrait de reconnaître *G. graslinii* sur le terrain : la présence de tâches foncées marquées sur les tergites (Doucet, 2025).

G. graslinii, tout comme *M. splendens*, est endémique du sud-ouest de la France et de la péninsule Ibérique (Boudot *et al.*, 2017). L'espèce est assez fréquente dans le sud-ouest de la France (Boudot *et al.*, 2017), notamment au sud du Massif central où, malgré la dégradation des habitats, elle est encore localement abondante (Boudot, 2017). *G. graslinii* est néanmoins considéré comme quasi-menacé à l'échelle européenne et en région Occitanie, bien qu'il soit classé préoccupation mineure en France. L'espèce figure aux annexes II et IV de la DHFF. Le Gomphe de Graslin est également strictement protégé sur l'ensemble du territoire national.

G. graslinii s'observe jusqu'à 300 m d'altitude. Cette espèce affectionne les grandes rivières calmes et les petits ruisseaux (Boudot *et al.*, 2017) ; en particulier, la larve se développe durant 3 à 4 ans dans les zones sableuses et limoneuses de ces rivières (Arthur, *et al.*, (n. d.)). Les imagos s'observent de début juin à fin août (Arthur, *et al.*, (n. d.)). De nombreux aspects de l'écologie de cette espèce demeurent inconnus.

2. Présentation des sites d'étude

a) Site Natura 2000 « Vallée du Galeizon » (FR9101369)

Le site Natura 2000 de la Vallée du Galeizon, créé le 28 février 2001, couvre une superficie de 8 739 hectares et constitue une Zone Spéciale de Conservation (ZSC) au titre de la DHFF. À cheval sur les départements du Gard et de la Lozère, il se situe au nord-ouest de la ville d'Alès, englobant les communes de Cendras, Saint-Paul-La-Coste, Soustelle, Lamelouze et une partie de Mialet côté gardois, ainsi que Saint-Martin-de-Boubaux et des parties de Saint-Etienne-Vallée-Française et Saint-Germain-de-Calberte côté lozérien.

Le site correspond au bassin versant du Galeizon, délimité au nord par la vallée Longue et au sud par la vallée Française, composé pour l'essentiel de deux unités géologiques : les Cévennes cristallines ou schisteuses en amont (85 %) et la bordure cévenole calcaire à l'aval (15 %). Ce territoire abrite 16 habitats d'intérêt communautaire et 18 espèces d'intérêt communautaire, dont les trois espèces ciblées (Lafont, Rodriguez & Soustelle, 2021), avec des enjeux forts tels que le maintien des milieux ouverts, notamment des prairies maigres de fauche de basse altitude (6510) ou encore la restauration et conservation des châtaigneraies cévenoles méso et supra méditerranéennes (9260) (DREAL Occitanie, 2010).

b) Site Natura 2000 « Hautes Vallées de la Cèze et du Luech » (FR9101364)

Ce site correspond à la partie amont du bassin versant de la Cèze et se caractérise par une forte hétérogénéité spatiale et saisonnière. Marqué par une importante différence altitudinale, allant de 130 à 1 209 m d'altitude, les basses altitudes du sud sont marquées par un climat méditerranéen, quant aux secteurs situés au nord, ils subissent une influence tempérée montagnarde. La géologie du site varie également dans l'espace, passant de secteurs granitiques en altitude à des terrains sédimentaires alluvionnaires au sud, en traversant les Cévennes cristallines ou schisteuses. Le périmètre couvre 12681 hectares répartis sur 20 communes et se découpe en plusieurs parties : la zone de "montagne", la haute vallée de la Cèze, la vallée de l'Homol, la haute et moyenne vallée du Luech, et le cours moyen de la Cèze en aval de la confluence avec le Luech. Ce territoire abrite 20 habitats d'intérêt communautaire, dont cinq prioritaires, et 11 espèces animales d'intérêt communautaire, dont *O. curtisii* et *M. splendens*, présentes dans la Cèze et le Luech (Lafont, Rodriguez & Soustelle, 2021) (DREAL Occitanie, 2014).

3. Méthodologie de prospection

Le protocole (Soustelle, 2020) a été inspiré par la « Proposition d'un protocole suivi des Odonates d'intérêt communautaire inféodés aux cours d'eau » présentée par Alice DENIS *et al.*, lors du Séminaire scientifique et technique sur les Maculinea et Odonates dans le Massif central à Millau les 2 et 3 juin 2016. », ainsi que par l'étude menée par l'Opie sur le Rhône méridional (Louboutin, *et al.*, 2016), toutes deux adaptées aux spécificités du territoire d'étude et aux objectifs du SHVC.

a) Méthode d'échantillonnage

63 transects fixes, définis comme les premiers mètres d'une berge sur une longueur de 50 m, ont été positionnés sur les zones d'émergence des espèces cibles dans le Galeizon, la Cèze et le Luech (Lafont *et al.*, 2021), de telle sorte à ce que l'habitat soit le plus homogène possible le long d'un transect. Ces transects ont été positionnés, de manière non aléatoire, sans considération spécifique pour un espacement régulier entre transects, ni pour un suivi sur l'entièreté du linéaire des rivières. En moyenne, 10 transects, répartis par moitié sur les deux rives, ont été placés par secteur de 5 km de linéaire de cours d'eau, chacun des trois cours d'eau étant constitué de deux secteurs.

Les transects sont matérialisés à la bombe de chantier fluo sur le terrain et sont référencés par leurs coordonnées GPS. Ils ont été nommés selon le référencement IGN, ainsi que par un code construit tel qu'indiqué dans le Tableau 1. La liste des transects se trouve en Annexe 1.

Tableau 1. Construction des codes des transects

Nom transect	N2000	Berge (droite / gauche)	Numéro	Nomenclature
La Blaquièrre	GAL	D	01	GALD01
Mas agnel	HCE	G	02	HCEG02

Au total, 21 transects ont été placés dans le Galeizon, 23 dans la Cèze et 19 dans le Luech (Annexe 2).

b) Protocole de collecte de données

Pour chaque transect, un binôme, composé d'un chargé de mission Natura 2000 ainsi qu'un agent de terrain du SHVC et du Conseil Départemental du Gard, réalise le relevé. Un agent est choisi comme descripteur ; il remplit la fiche terrain, présentée en Annexe 3, visant à décrire l'habitat. Le second agent est l'observateur ; son rôle est de chercher, compter et ramasser les exuvies d'*O. curtisii*, de *M. splendens* et de *Gomphus sp.*, de manière exhaustive sur toute la longueur du transect. La détermination à l'espèce du genre *Gomphus* se fait à l'aide d'une loupe binoculaire et de la clef de détermination des exuvies des Odonates de France (Doucet, 2016), pour éviter toute confusion avec

G. similimus, *G. vulgatissimus* et *G. pulchellus*. La durée accordée à la prospection d'un transect est de 20 minutes (10 minutes dans un sens, 10 minutes dans l'autre sens). D'autres données naturalistes peuvent être saisies mais ne sont pas considérées dans le cadre de ce protocole.

La période de suivi correspond à la période d'émergence connue a priori des trois espèces ciblées, soit du 1^{er} juin au 31 juillet. Chaque année, trois périodes de prospection ont lieu au cours de la période de suivi sur chaque transect, avec un intervalle de 7 jours minimum et 20 jours maximum entre chaque prospection, ce qui donne les dates suivantes :

- 1^{ère} période entre le 01 juin et le 15 juin ;
- 2^{ème} période entre le 16 juin et le 10 juillet ;
- 3^{ème} période entre le 10 juillet et le 31 juillet.

Ces prospections sont soumises aux aléas météorologiques et peuvent être décalées ou annulées en cas de conditions de terrain trop dangereuses, comme un fort orage ou une crue. En revanche, la prospection n'est pas annulée en cas de fortes pluies ayant pu provoquer une crue les jours précédents, l'information étant alors passée en commentaire.

c) Variables mesurées

A chaque relevé, correspondant à la prospection d'un transect à une date donnée, les effectifs des exuvies collectées sont notés. Les variables environnementales relevées décrivent la morphologie du cours d'eau, la ripisylve et le substrat (Tableau 2).

Les variables soulignées dans le Tableau 2 sont qualitatives, les autres variables sont semi-quantitatives, codées en classes de valeurs (voir la fiche terrain en Annexe 3). Des covariables sont mesurées : date, identifiant de relevé, notateur, observateur. D'autres variables ont été mesurées (support d'émergence des exuvies, sex-ratio, observations d'imagos lors du relevé, conditions météorologiques du jour et de la veille, ainsi que d'autres variables (voir la fiche terrain en Annexe 3)) mais n'ont pas été jugées pertinentes dans le cadre de cette étude.

Tableau 2. Variables relevées lors du protocole « Suivi des Odonates d'intérêt communautaire »

Morphologie du cours d'eau	Ripisylve	Substrat
Vitesse du courant (m / s)	<u>Type de berge</u>	Quantité de vases / argiles / limons
Profondeur (m)	<u>Arbres surplombants</u>	(%)
Pente de la berge (°)	<u>Arbustes surplombants</u>	Quantité de substrat sablo-limoneux
<u>Présence / absence d'un seuil en aval du transect</u>	Quantité d'arbres (%)	(%)
<u>Présence / absence d'un seuil en amont du transect</u>	Quantité d'arbustes (%)	Quantité de sables (%)
	Quantité d'aulnes (%)	Quantité de graviers (%)
	Quantité d'ombrage (%)	Quantité de galets / pierres (%)
		Quantités de blocs / dalles (%)
		Quantité de chevelu racinaire (%)
		Quantité de débris organiques (%)

La distribution de ces variables environnementales dans les transects est présentée en Annexe 4.

4. Méthodologie d'exploitation des données

Les cartes ont été réalisées sur le logiciel QGIS, version 3.16. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées sur le logiciel R, version 4.4.3 (R Core Team, 2025).

a) Traitements préliminaires

Le tableau de données contient une ligne par relevé. Chaque ligne comporte des informations sur le nombre d'exuvies collectées et une description environnementale du transect. Des variables ont été ajoutées : présence / absence par espèce, numéro de la période de prospection (1^{ère}, 2^{ème} ou 3^{ème}), jours juliens, rivière, secteur amont / aval (selon les secteurs définis précédemment). Certaines des variables environnementales étaient codées en classes (« 1-5 % » par exemple) ; la moyenne de chaque classe a été retenue pour obtenir des variables semi-quantitatives. La variable « pourcentage d'aulnes par transect », comprise de façon hétérogène par les observateurs, a été convertie en présence / absence. Les variables « vases / argiles / limons », « seuil amont », et « arbustes surplombants » ont été écartées de l'analyse car elles étaient mal distribuées (quasi-absence de transects où « vases / argiles / limons » est non nul ; modalités aux effectifs insuffisants pour « seuil amont » — absence = 610, présence = 5 — et « arbustes surplombants » — aucun = 1, non surplombants = 8 —). Les valeurs manquantes, ou « NA », concernaient 5,4 % des relevés et certaines des colonnes les plus importantes selon la littérature scientifique (11 « NA » pour la variable « vitesse du courant » par exemple). Ces valeurs, non compatibles avec les modèles appliqués, ont été imputées manuellement, en remplaçant chaque « NA » par la valeur la plus proche dans le temps (relevé précédent ou suivant).

b) Analyses statistiques

Pour *O. curtisii* et *M. splendens*, des modèles généralisés linéaires mixtes ont été développés avec le package « glmmTMB » (Brooks, *et al.*, 2017) : des modèles en présence / absence avec une loi binomiale, et des modèles en abondance, avec une loi négative binomiale (nbinom1) — après que le diagnostic du modèle de Poisson indique une sur-dispersion — et une zéro-inflation, retenue au vu de l'histogramme des variables de réponse. Tous ces modèles incluent un effet aléatoire transect et des variables fixes (année, rivière, jours juliens avec effet quadratique). Deux approches méthodologiques distinctes ont été appliquées :

- Pour étudier finement les évolutions spatio-temporelles des effectifs et des probabilités de présence des espèces, les modèles composés uniquement des variables fixes ont d'abord été étudiés. Puis diverses interactions entre année, rivière, secteur et jours juliens ont été modélisées séparément. Le critère d'Akaike corrigé (AICc) et le R^2 (ajusté) ont été calculés pour chacun de ces modèles et comparés au modèle contenant uniquement les variables fixes.
- Pour étudier l'effet des variables environnementales, une approche de *model averaging* a été adoptée. Le modèle total inclut les effets fixes ainsi que l'ensemble des variables environnementales correctement distribuées. Un effet quadratique a été appliqué à la variable « vitesse du courant » afin de rendre compte de son effet non linéaire attendu. Une limite de six variables par modèle a été établie pour ne pas dépasser 10 % des 63 transects étudiés (Peduzzi *et al.*, 1996) et maintenir un temps de calcul raisonnable. Les modèles ont ensuite été classés selon l'AIC et ceux présentant un écart inférieur ou égal à deux points d'AIC par rapport au meilleur modèle ont été moyennés (Burnham & Anderson, 2002). Les effets des meilleurs modèles ont été moyennés.

Les effets des modèles sont étudiés grâce à la fonction « emmeans » du package du même nom (Lenth, 2025) et « Effect », du package « effects » (Fox *et al.*, 2025). Pour les variables quantitatives, le nombre de données est représenté sur l'axe des abscisses sous forme de densité de points gris. La fonction « pairs » du package « emmeans » a été utilisée afin d'étudier la significativité des effets des modalités au sein des variables qualitatives. Sur les graphiques correspondants, la significativité a été représentée par des accolades et des étoiles. Les conditions d'application des modèles ont été systématiquement vérifiées : les corrélations ont été vérifiées à partir d'une matrice des corrélations avec le coefficient de Spearman, à partir du package « corrplot » (Wei & Simko, 2024), et de tests de Kruskal et du χ^2 . La multicolinéarité a été vérifiée à l'aide de la fonction « check_collinearity » du package « performance » (Lüdtke, *et al.*, 2025), l'homoscédasticité et la dispersion à partir des graphiques issus du package « DHARMA » (Hartig, 2024).

RESULTATS

1. Présentation des données

a) Synthèse des données récoltées

Au total, 615 relevés ont été réalisés : 252 dans le Galeizon (3 prospections × 4 années × 21 transects), 207 dans la Cèze (3 prospections × 3 années × 23 transects) et 156 dans le Luech (3 prospections × 3 années × 19 transects, moins 15 relevés annulés suite à un orage lors de la seconde période de prospection de 2022).

Un total de 54 exuvies de *G. graslinii* a été recensé, exclusivement dans le Galeizon, correspondant à 0,88 % du total des exuvies récoltées. Pour *M. splendens*, 1 132 exuvies ont été collectées, soit 18,5 % du total, réparties ainsi : 196 dans le Galeizon, 392 dans le Luech et 544 dans la Cèze. Enfin, 4 929 exuvies d'*O. curtisii* ont été observées, à savoir 80,6 % du total, avec 544 dans le Galeizon, 1 477 dans le Luech et 2 908 dans la Cèze.

b) Effectifs et distribution des espèces sur le site

O. curtisii et *M. splendens* ont été collectées au moins une fois sur la quasi-totalité des transects (Figure 6). *G. graslinii* n'est observé que sur quatre transects situés dans le Galeizon. Les cartes présentant la répartition des exuvies sur les sites d'étude sont présentées en Annexe 5.

Effectifs d'exuvies par transect

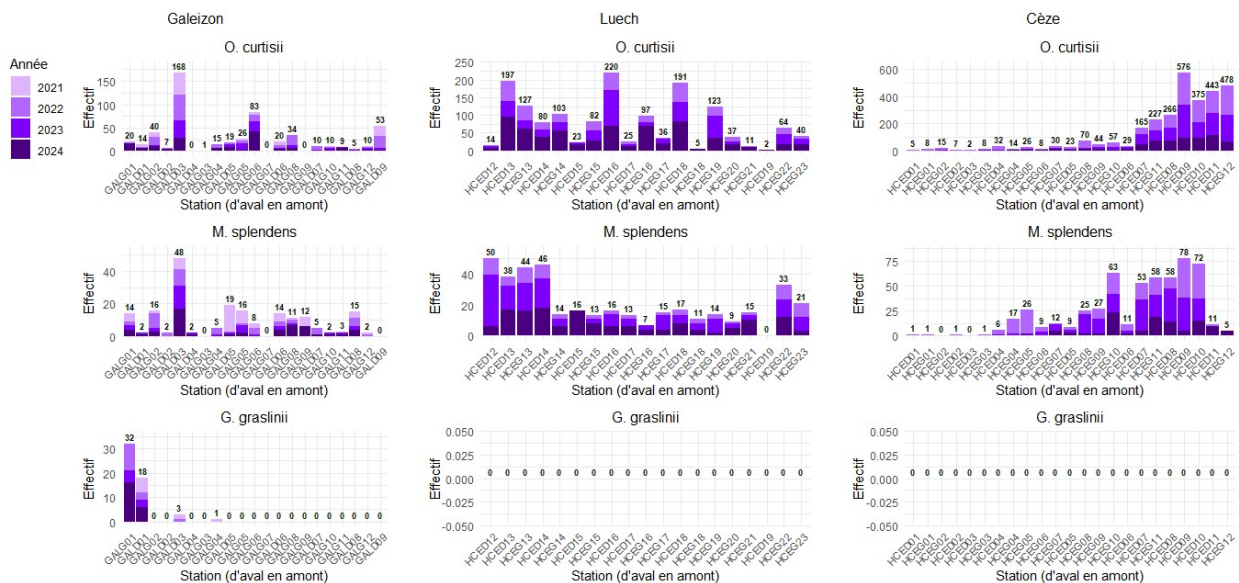


Figure 6. Répartition des exuvies collectées par espèce, par transect et par année, triés d'aval en amont pour le Galeizon, la Cèze et le Luech.

Plus d'*O. curtisii* et de *M. splendens* ont été collectées dans les Hautes vallées de la Cèze et du Luech que dans la vallée du Galeizon. La distribution des effectifs des deux espèces semble corrélée, avec des maxima et des minima observés sur des transects similaires. Néanmoins, leurs effectifs diffèrent nettement, *O. curtisii* ayant été collectée en beaucoup plus grand nombre que *M. splendens*. Chaque année, un nombre relativement similaire d'exuvies d'une même espèce est retrouvé sur un même transect.

G. graslinii est observé uniquement à l'aval du Galeizon, majoritairement dans les deux transects les plus en aval du site, localisés à la confluence avec le Gardon d'Alès, mais est également observé de manière sporadique sur deux autres transects, toujours dans la moitié aval de la rivière. Sur toute la durée du suivi, un maximum de 32 exuvies a été collecté sur le transect GALG01 (« La Blaquièrre »), tandis que 16 exuvies ont été collectées au maximum en une année (en l'occurrence, 2024), sur le même transect.

Dans le Galeizon, c'est le transect GALD03 (« Malataverne ») qui comptabilise le plus d'exuvies d'*O. curtisii* et de *M. splendens* sur les quatre années de suivi réalisées (respectivement 168 et 48 exuvies). Ce même transect établit également le nombre record d'exuvies d'*O. curtisii* et de *M. splendens* collectées en une année pour le Galeizon (respectivement 55 en 2022 et 17 en 2024). Les autres transects ont fourni des nombres bien moins importants d'exuvies. On ne remarque pas de pattern particulier entre l'amont et l'aval de la rivière.

A l'inverse, la Cèze présente une forte distinction entre les transects les plus en aval, pauvres en exuvies, et ceux situés en amont, plus riches. Cependant, les populations de *M. splendens* s'effondrent dans les deux transects les plus en amont. C'est dans la Cèze que sont trouvés les effectifs records d'*O. curtisii* et de *M. splendens* collectés sur la totalité des trois années de suivi, respectivement 576 et 78 exuvies, au transect HCED09 (« Le Claux Aval »), situé dans la partie amont de la rivière. Sur une seule année, les records sont également détenus par ce même transect : 245 exuvies d'*O. curtisii* en 2023 et 40 exuvies de *M. splendens* en 2022.

Dans le Luech, une quantité légèrement plus importante d'exuvies d'*O. curtisii* ont été collectées en aval de la rivière par rapport à l'amont, tendance plus nette pour *M. splendens*, à l'exception des deux transects les plus à l'amont, qui montrent un rebond de population. Le record en effectifs d'*O. curtisii* sur les trois années de suivi et le record sur une seule année est localisé sur le transect HCED16 (« Le Chambon »), situé au milieu du linéaire prospecté (respectivement 220 exuvies au total et 100 exuvies en 2023). HCED12 (« Le Vieux Moulin »), transect le plus en aval du Luech, est celui qui a fourni le plus de *M. splendens* sur les trois années de suivi avec 50 exuvies ;

record dû à l'importante récolte de 2023 (33 exuvies, correspondant au maximum d'exuvies récoltées en une année sur le Luech), tandis que peu d'exuvies y ont été trouvées en 2022 et 2024.

2. Modélisation

Le faible nombre de sites et de relevés avec *G. graslinii* n'a pas permis de faire converger des modèles. Les résultats descriptifs concernant cette espèce sont à retrouver à l'Annexe 6. Un exemple de vérification des conditions d'application des modèles est rédigé en Annexe 7.

a) Evolution spatio-temporelle des populations

- *O. curtisii* : modèles contenant les variables fixes

Le Galeizon est la rivière où la probabilité de présence et les effectifs d'*O. curtisii* sont significativement les plus faibles (Figure 7), tandis que la Cèze et le Luech ont des valeurs trop proches pour être significativement différentes (**présence / absence** : Cèze / Galeizon : ratio = 4,6 ; p-value = 0,002 ; Cèze / Luech : ratio = 0,5 ; p-value = 0,3 ; Galeizon / Luech : ratio = 0,1 ; p-value < $1,0 \times 10^{-4}$; **abondance** : Cèze / Galeizon : ratio = 2,9 ; p-value = 0,005 ; Cèze / Luech : ratio = 0,9 ; p-value = 0,9 ; Galeizon / Luech : ratio = 0,3 ; p-value = 0,002).

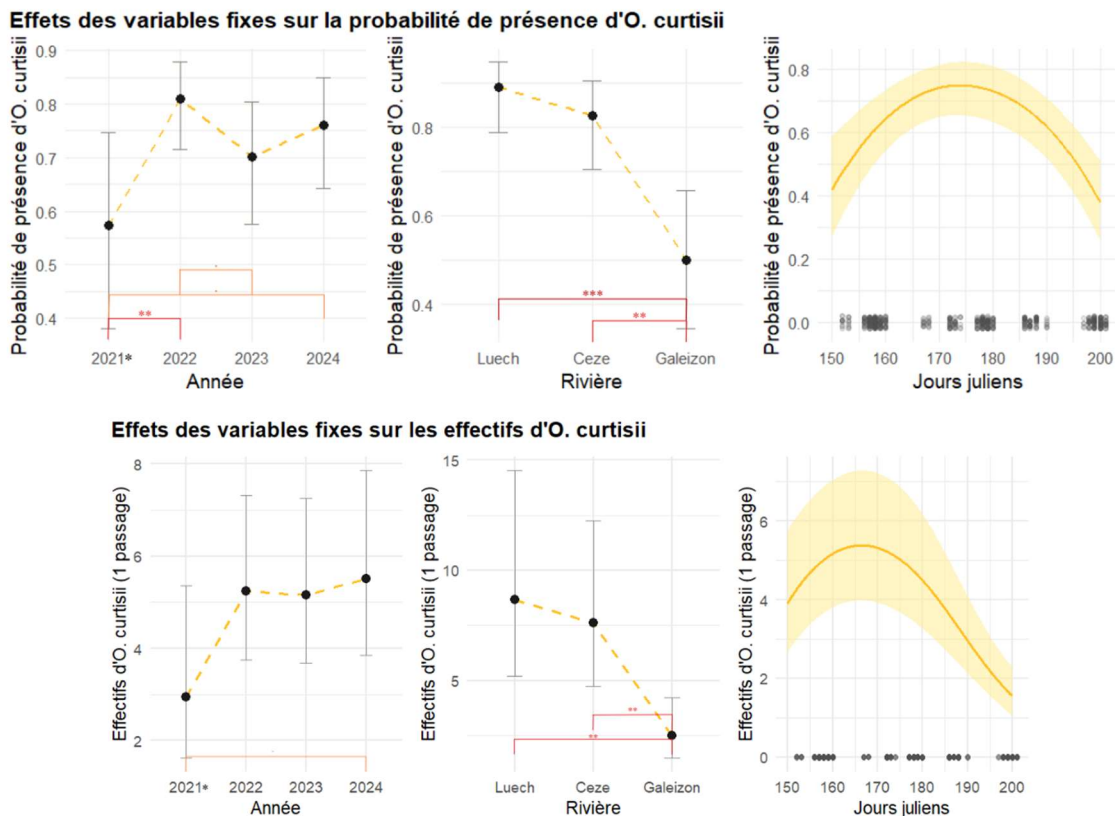


Figure 7. Effets des variables fixes « Année », « Rivière » et « Jours juliens » sur la probabilité de présence et les effectifs d'*O. curtisii*. Significativité : $p \leq 0,001$: *** ; $0,001 < p \leq 0,01$: ** ; $0,01 < p \leq 0,05$: * ; $0,05 < p \leq 0,1$: . ; $p > 0,1$: vide.

La probabilité de présence et les effectifs d'*O. curtisii* sont faibles en 2021 comparé aux autres années, dû au fait que seul le Galeizon, soit la rivière la moins riche en cette espèce, ait été prospectée cette année-là. Bien que la probabilité de présence ait légèrement chuté entre 2022 et 2023 (ratio = 1,9 ; p-value = 0,09), les effectifs collectés entre ces deux années ne sont pas significativement différents ; ainsi, en 2023, *O. curtisii* semble avoir été présente sur moins de transects, l'abondance totale restant relativement stable.

Les jours juliens ont un effet quadratique tel qu'attendu sur les effectifs et la probabilité de présence d'*O. curtisii* (**présence / absence** : estimate = $-2,4 \times 10^{-3} \times \text{jours juliens}^2 + 8,2 \times 10^{-1} \times \text{jours juliens}$; p-value = $6,5 \times 10^{-6}$ pour jours juliens² et $8,7 \times 10^{-6}$ pour jours juliens ; **abondance** : estimate = $-1,2 \times 10^{-3} \times \text{jours juliens}^2 + 3,8 \times 10^{-1} \times \text{jours juliens}$; p-value = $2,0 \times 10^{-7}$ pour jours juliens² et $1,0 \times 10^{-6}$ pour jours juliens). La probabilité de présence de l'espèce atteint son maximum au milieu de la période de suivi. Les effectifs quant à eux atteignent leur maximum un peu avant. Cela laisse penser que les *O. curtisii* émergent en grand nombre sur certains transects précoces au début de la période de suivi, mais qu'elles émergent sur un plus grand nombre de transects différents au milieu de la période de suivi.

- *O. curtisii* : interaction année × rivière

Pour toutes les années, le Galeizon est la rivière où la probabilité de présence et les effectifs d'*O. curtisii* sont les plus faibles (Figure 8). 2022 présente un pic de probabilité de présence, significativement différent des valeurs de 2021 et 2023 (**2021 / 2022** : ratio = 0,2 ; p-value = 0,005 ; **2022 / 2023** : ratio = 3,4 ; p-value = 0,02 ; **2022 / 2024** : ratio = 1,9 ; p-value = 0,4). Le même pic est visible pour les effectifs, moins significatif (**2021 / 2022** : ratio = 0,4 ; p-value = 0,03 ; **2022 / 2023** : ratio = 1,9 ; p-value = 0,9 ; **2022 / 2024** : ratio = 1,2 ; p-value = 0,9). En 2024, la probabilité de présence et les effectifs d'*O. curtisii* semblent supérieurs à ceux de 2023 (**présence / absence** : ratio = 0,5 ; p-value = 0,5 ; **abondance** : ratio = 0,2 ; p-value = 0,1).

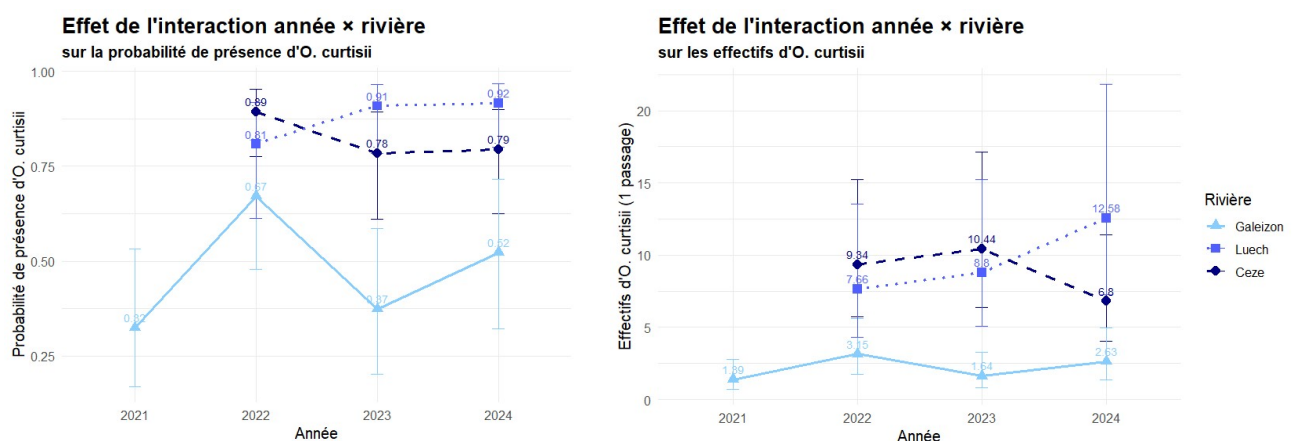


Figure 8. Effet de l'interaction année × rivière sur la probabilité de présence et les effectifs d'*O. curtisii*

Bien qu'en 2022, la Cèze ait une probabilité de présence et des effectifs d'*O. curtisii* plus élevés que le Luech, cette tendance s'inverse dès 2023 pour la probabilité de présence, et en 2024 pour les effectifs. La probabilité de présence et les effectifs d'*O. curtisii* tendent à croître dans le Luech et décroître dans la Cèze. En 2024 dans le Luech, il y a significativement plus d'exuvies qui ont été trouvées qu'en 2022, et quasi-significativement plus qu'en 2023 (**2022 / 2024** : ratio = 0,6 ; p-value = 0,03 ; **2023 / 2024** : ratio = 0,7 ; p-value = 0,1). Dans la Cèze à l'inverse, les effectifs d'exuvies sont significativement inférieurs en 2024 qu'en 2022 et en 2023 (**2022 / 2024** : ratio = 1,4 ; p-value = 0,07 ; **2023 / 2024** : ratio = 1,5 ; p-value = 0,02).

- *O. curtisii* : interaction rivière × secteur

Cette modélisation confirme les hypothèses posées lors de la description de la répartition des effectifs : le Galeizon n'est pas sectorisé entre l'amont et l'aval, ni pour les effectifs, ni pour la probabilité de présence d'*O. curtisii*. Ces deux variables prennent des valeurs légèrement supérieures à l'aval du Luech par rapport à son amont, de manière non significative. En revanche, la Cèze est fortement sectorisée, avec un amont significativement plus riche en exuvies que l'aval (**présence / absence** : ratio = 10,7 ; p-value < 10^{e-4} ; **abondance** : ratio = 7,8 ; p-value < 10^{e-4}).

- *O. curtisii* : interaction année × jours juliens

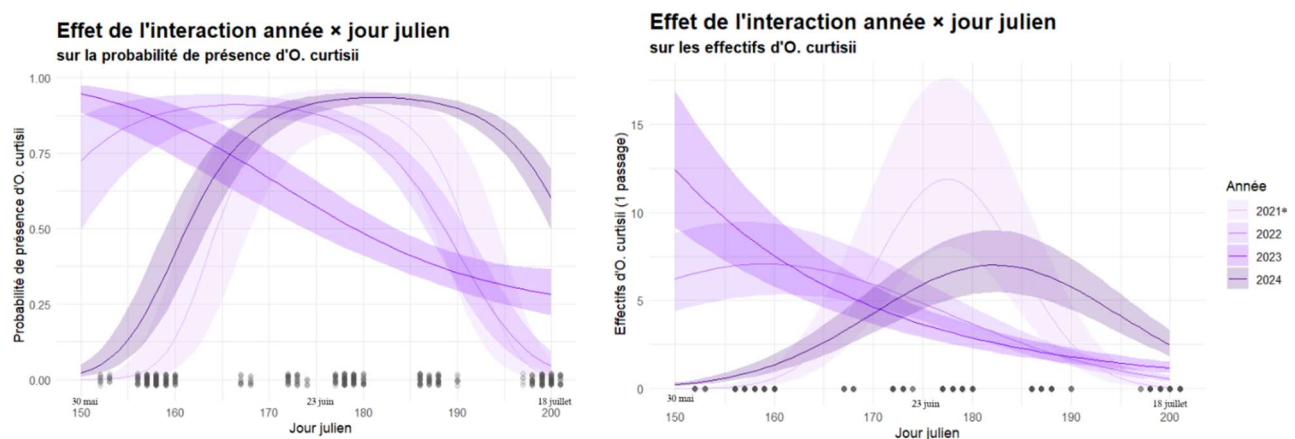


Figure 9. Effet de l'interaction année × jours juliens sur la probabilité de présence et les effectifs d'*O. curtisii*

En 2021, le maximum de probabilité de présence d'*O. curtisii* ainsi que le maximum de ses effectifs est atteint au milieu de la période de suivi, les probabilités de présence et effectifs tendant vers 0 au début et à la fin de la période de suivi (Figure 9). Les émergences ont été plus précoces en 2022, avec une probabilité de présence de 0,75 dès le début de la période de suivi, et un pic de probabilité de présence et d'effectifs autour du 160^{ème} jour julien (9 juin). La fin de la période de prospection correspond à la fin de l'émergence de l'espèce cette année-là, avec une probabilité de présence et des effectifs proches de 0. En 2023, les émergences étaient encore plus précoces, avec un

pic avant le début de la période de suivi, et une période d'émergence plus longue cette année-là, continuant après la fin de la période de suivi, la probabilité de présence de l'espèce en fin de période de suivi étant toujours de 0,25, bien que les effectifs récoltés alors soient faibles. A l'inverse, 2024 a été une année tardive en termes d'émergence d'*O. curtisii*, avec un pic de probabilité de présence et d'effectifs atteints aux alentours du 180^{ème} jour julien (29 juin), et une probabilité de présence et des effectifs non nuls à la fin de la période de suivi, indiquant une continuité de l'émergence de l'espèce après cette dernière.

- *O. curtisii* : interaction rivière × jours juliens

Le pic d'émergence est atteint autour du 175^{ème} jour julien (20 juin), soit au milieu de la période de suivi, pour la probabilité de présence d'*O. curtisii* et ses effectifs dans le Galeizon (Figure 10). Les effectifs et probabilité de présence sont quasi-nuls au début et à la fin de la période de suivi ; ainsi, toute la période d'émergence d'*O. curtisii* sur le Galeizon serait incluse dans la période de suivi.

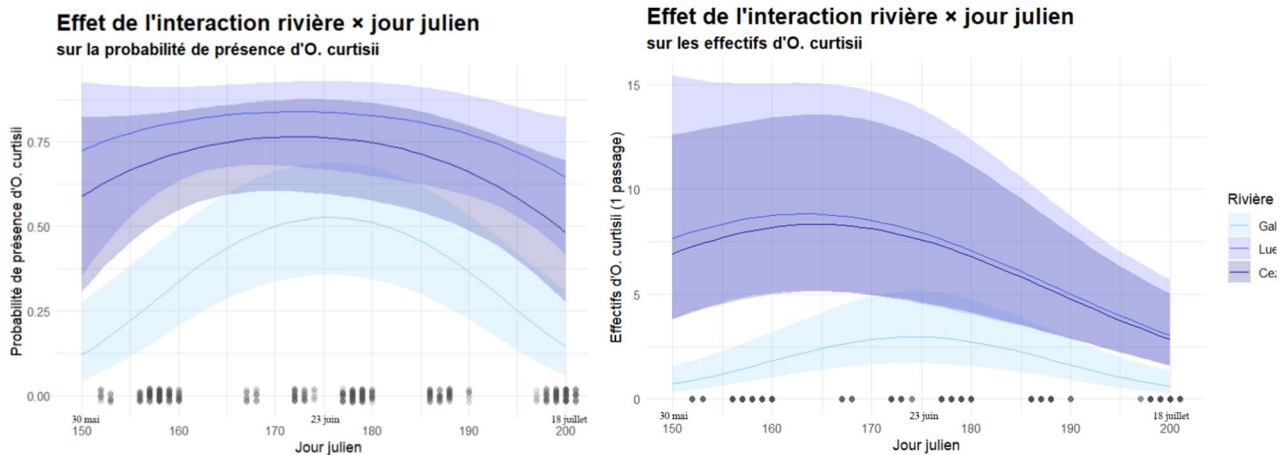


Figure 10. Effets de l'interaction rivière × jours juliens sur la probabilité de présence et les effectifs d'*O. curtisii*

Les courbes plus aplaties de la Cèze et du Luech pour la probabilité de présence d'*O. curtisii* indiquent une période d'émergence plus longue pour ces rivières, peut-être due à des périodes d'émergence différentes à l'aval et à l'amont. Le pic d'émergence, en termes d'effectifs d'*O. curtisii*, est atteint entre la première et la seconde période de prospection pour la Cèze et le Luech ; il est possible que le secteur le plus abondant émerge en premier pour ces rivières. Les probabilités de présence et effectifs d'*O. curtisii* sont non nuls au début et à la fin de la période de suivi, bien que les effectifs se rapprochent de 0. Ainsi, une partie de la période d'émergence de l'espèce n'est pas prise en compte dans les données car a lieu en-dehors de la période de suivi.

- *O. curtisii* : interaction secteur \times rivière \times jours juliens

Les courbes de l'amont et de l'aval du Galeizon sont superposées pour la probabilité de présence d'*O. curtisii* et ses effectifs ; il n'y a pas de différence de période d'émergence entre l'amont et l'aval de cette rivière (Figure 11).

A l'inverse, le pic de probabilité de présence d'*O. curtisii* et, dans une moindre mesure, le pic d'effectifs de l'espèce, sont plus précoces à l'aval, pour la Cèze et le Luech. Ainsi, les émergences d'*O. curtisii* démarrent plus tôt à l'aval de la Cèze et du Luech comparé à l'amont.

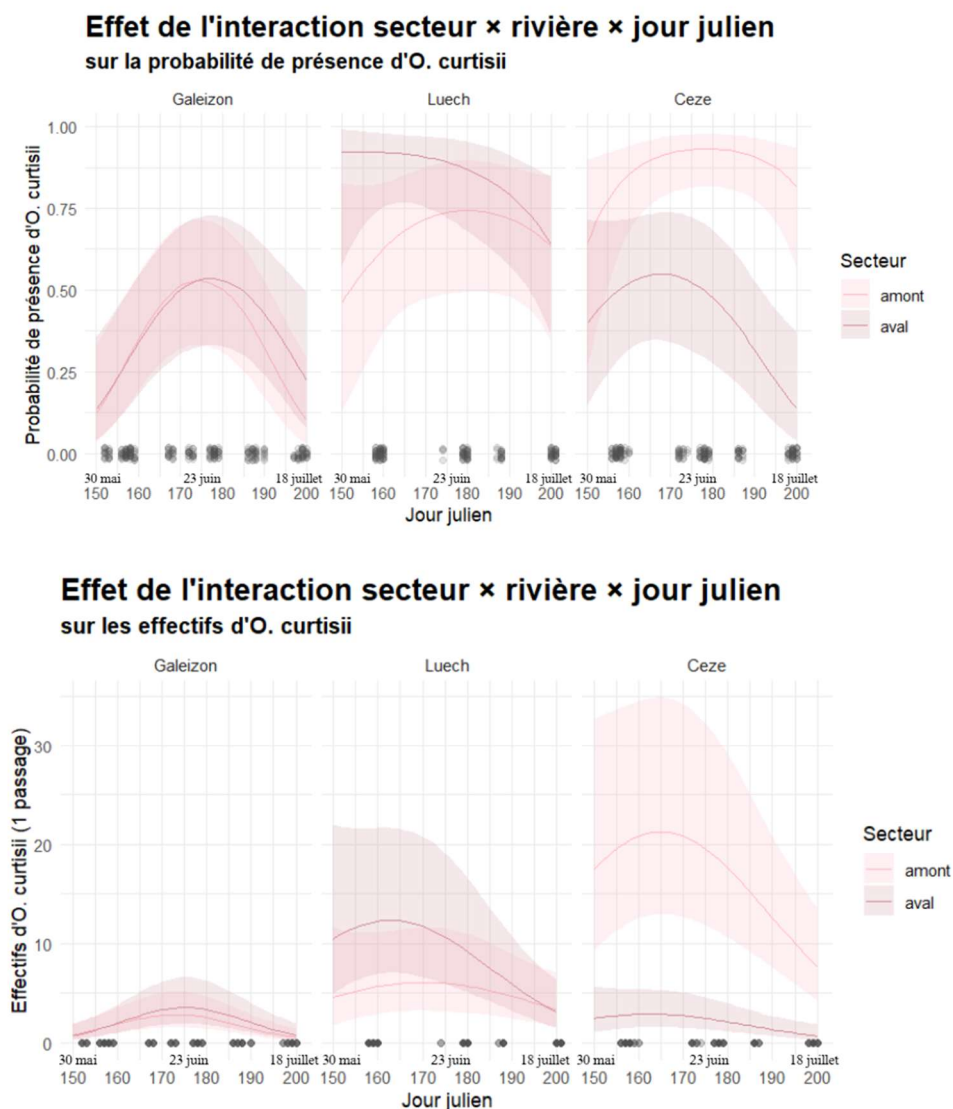


Figure 11. Effet de l'interaction secteur \times rivière \times jours juliens sur la probabilité de présence et les effectifs d'*O. curtisii*

Tandis que la probabilité de présence et les effectifs d'*O. curtisii* s'approchent de 0 à l'issue de la période de suivi dans le secteur aval de la Cèze, indiquant la fin de la période d'émergence, les probabilités de présence de l'espèce au début et à la fin de la période de suivi restent élevées (supérieures à 0,5) à l'amont de la Cèze, et dans le Luech ; la période d'émergence semble y commencer avant et s'achever après la fin de la période de suivi.

- *M. splendens* : modèles contenant les variables fixes

Pour *M. splendens*, le Galeizon est la rivière où la probabilité de présence et les effectifs de l'espèce sont significativement les plus faibles (Figure 12), tandis que la Cèze et le Luech ont des valeurs trop proches pour être significativement différentes (**présence / absence** : Cèze / Galeizon : ratio = 2,4 ; p-value = 0,2 ; Cèze / Luech : ratio = 0,3 ; p-value = 0,04 ; Galeizon / Luech : ratio = 0,1 ; p-value = 0,0001 ; **abondance** : Cèze / Galeizon : ratio = 2,3 ; p-value = 0,03 ; Cèze / Luech : ratio = 0,6 ; p-value = 0,3 ; Galeizon / Luech : ratio = 0,3 ; p-value = 0,0003).

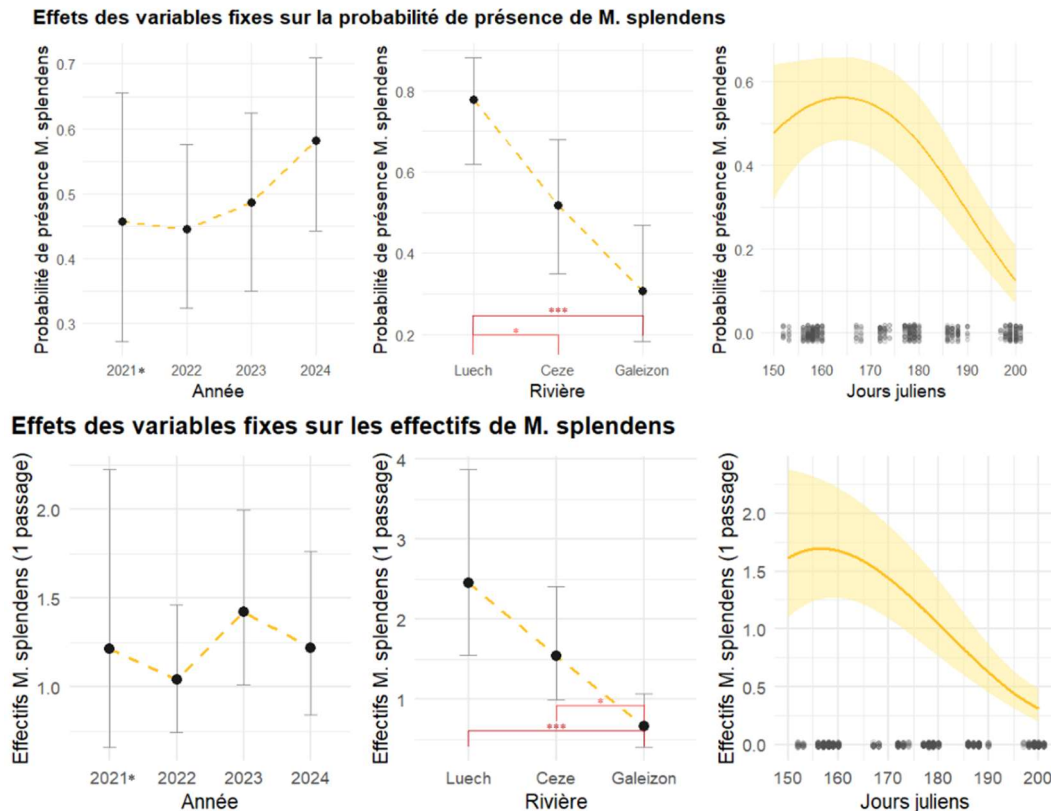


Figure 12. Effets des variables fixes « Année », « Rivière » et « Jours juliens » sur la probabilité de présence et les effectifs de *M. splendens*. Significativité : $p \leq 0,001$: *** ; $0,001 < p \leq 0,01$: ** ; $0,01 < p \leq 0,05$: * ; $0,05 < p \leq 0,1$: . ; $p > 0,1$: vide.

Bien que les probabilités de présence et effectifs de 2021 ne soient pas inférieurs aux autres années, malgré l'absence de relevés dans la Cèze et le Luech, 2023 et 2024 semblent être des années plus abondantes, et avec une probabilité de présence plus forte pour *M. splendens*. Nous pouvons donc supposer que 2022 était une année particulièrement pauvre en cette espèce sur la Cèze et le Luech, ne permettant ainsi pas de distinguer les relevés de cette année des relevés de 2021 concernant uniquement le Galeizon. Il n'y a pas de différence significative de probabilité de présence ou d'effectifs entre les années. Pour autant, la probabilité de présence de *M. splendens* tend à croître, tandis que les effectifs, plus élevés en 2023 qu'en 2022, diminueraient légèrement en 2024.

Les jours juliens ont un effet quadratique sur la population, avec un pic d'émergence marqué (**présence / absence** : estimate = $-1,7e^{-3} * \text{jours juliens}^2 + 5,6e^{-1} * \text{jours juliens}$; p-value = 0,001 pour

jours juliens² et 0,002 pour jours juliens ; **abondance** : estimate = $-9,2e^{-4} * \text{jours juliens}^2 + 2,9e^{-1} * \text{jours juliens}$; p-value = 0,003 pour jours juliens² et 0,007 pour jours juliens). Le pic d'émergence apparaît tôt dans la période de suivi, au moment de la première période de prospection, pour les effectifs tout comme pour la probabilité de présence.

- *M. splendens* : interaction année × rivière

Le Galeizon est la rivière où la probabilité de présence et les effectifs de *M. splendens* sont les plus faibles sur toutes les années du suivi (Figure 13). La probabilité de présence et les effectifs semblent néanmoins montrer une tendance à l'augmentation.

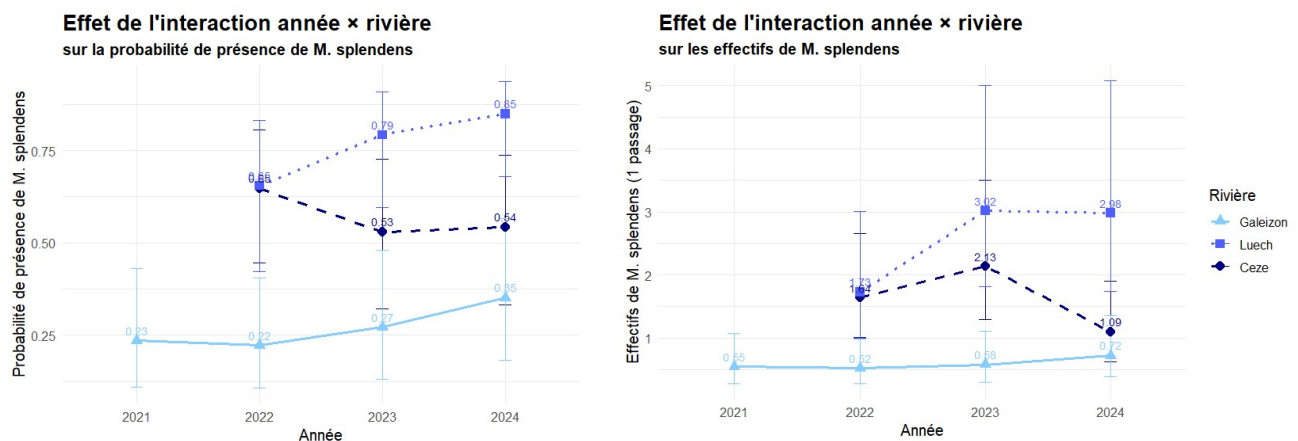


Figure 13. Effet de l'interaction année × rivière sur la probabilité de présence et les effectifs de *M. splendens*

Partant d'une probabilité de présence et d'effectifs égaux en 2022, la Cèze et le Luech se distinguent par la suite, avec une tendance à croître pour le Luech et à diminuer pour la Cèze, au regard des deux facteurs étudiés. La probabilité de présence de *M. splendens* est en effet quasi-significativement plus élevée en 2024 qu'en 2022 dans le Luech (2022 / 2024 : ratio = 0,3 ; p-value = 0,09), tandis que les effectifs moyens par relevé y sont significativement plus élevés en 2023 et 2024 qu'en 2022 (2022 / 2023 : ratio = 0,6 ; p-value = 0,03 ; 2022 / 2024 : ratio = 0,6 ; p-value = 0,05). Bien que la tendance observée pour la probabilité de présence de *M. splendens* dans la Cèze ne s'appuie pas sur des données significatives, les effectifs de cette espèce y sont significativement moins élevés en 2024 qu'en 2023 (2023 / 2024 : ratio = 1,9 ; p-value = 0,006).

- *M. splendens* : interaction rivière × secteur

Il n'y a pas de sectorisation entre l'amont et l'aval dans le Galeizon ; les valeurs de probabilité de présence et d'effectifs de *M. splendens* sont plus élevées à l'aval du Luech qu'à l'amont, mais de manière non significative, pour la probabilité de présence et l'abondance de *M. splendens* ; et une différence marquée entre l'amont de la Cèze et l'aval, avec une probabilité de présence et des effectifs

de *M. splendens* bien supérieurs à l'amont qu'à l'aval (**présence / absence** : ratio = 15,4 ; p-value < 0,0001 ; **abondance** : ratio = 6,7 ; p-value < 0,0001).

- *M. splendens* : interaction année × jours juliens

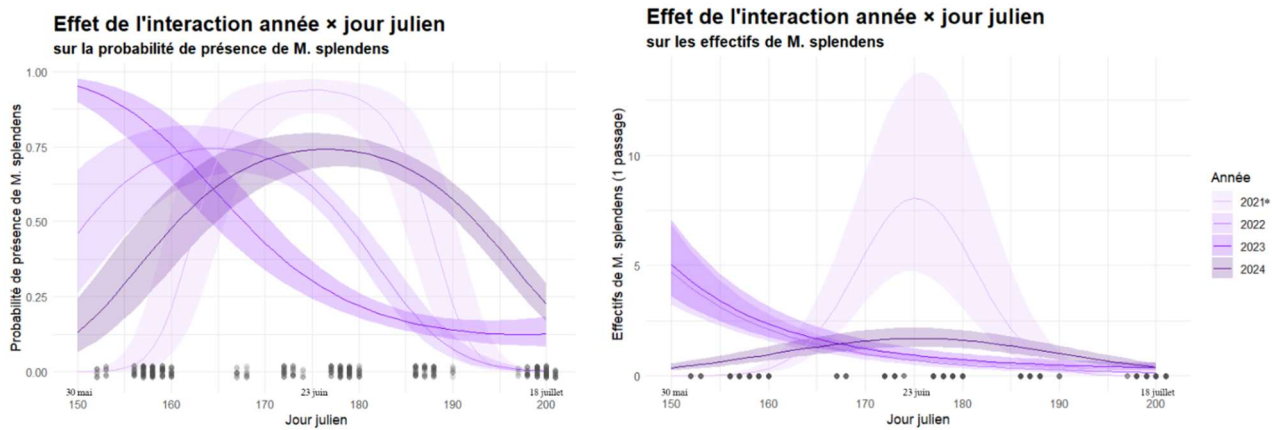


Figure 14. Effet de l'interaction année × jours juliens sur la probabilité de présence et les effectifs de *M. splendens*

La période d'émergence est centrée sur la période de suivi en 2021. Les émergences sont plus précoces en 2022 et 2023 et plus tardives en 2024 (Figure 14). Les émergences se poursuivent au-delà de la période de suivi en 2023 et 2024, tandis qu'elles commencent avant le début de la période de suivi en 2022 et 2023.

- *M. splendens* : interaction rivière × jours juliens

Le pic d'émergence de *M. splendens* dans le Galeizon, en termes de probabilité de présence et d'effectifs, a lieu au milieu de la période du suivi, aux alentours du 175^{ème} jour julien (20 juin) (Figure 15). De la même manière, les probabilités de présence et effectifs quasi-nuls au début et à la fin de la période de suivi indiquent que la période d'émergence est bien entièrement comprise dans la période de suivi.

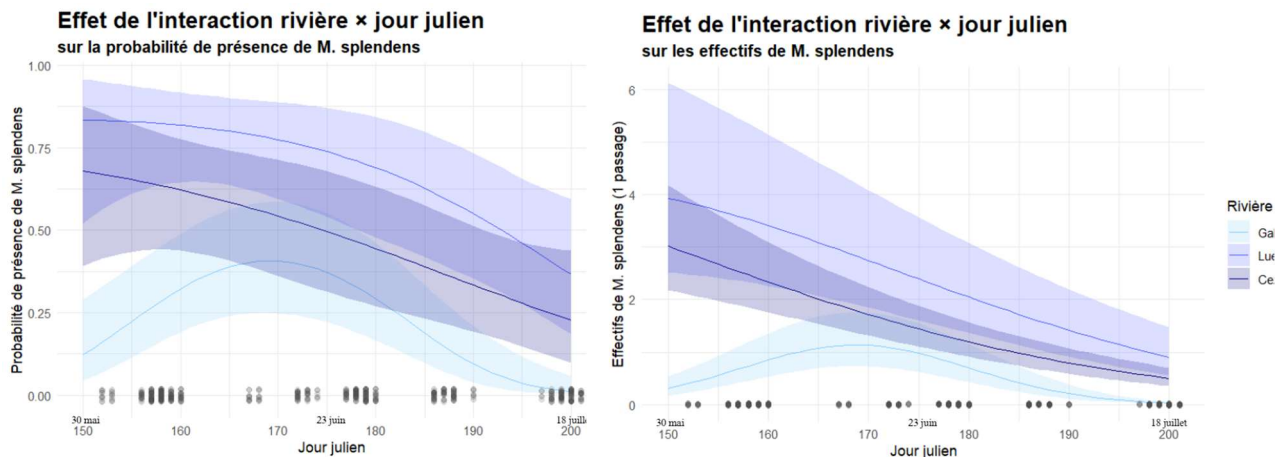


Figure 15. Effet de l'interaction rivière × jours juliens sur la probabilité de présence et les effectifs de *M. splendens*

Les courbes de probabilités de présence de *M. splendens* et d'effectifs de l'espèce en fonction des jours juliens, pour la Cèze et le Luech sont, quant à elles, décroissantes. Ainsi, le pic d'émergence a eu lieu avant ou au tout début de la période de suivi et n'apparaît donc pas ici. A la fin de la période de suivi, la probabilité de présence de *M. splendens* est toujours de 0,25, les effectifs par relevé étant alors très faibles. Il semble que la période d'émergence soit terminée ou presque terminée, en fin de période de suivi.

- *M. splendens* : interaction secteur \times rivière \times jours juliens

La période d'émergence de *M. splendens* dans le Galeizon n'est pas sectorisée entre l'amont et l'aval de la rivière (Figure 16).

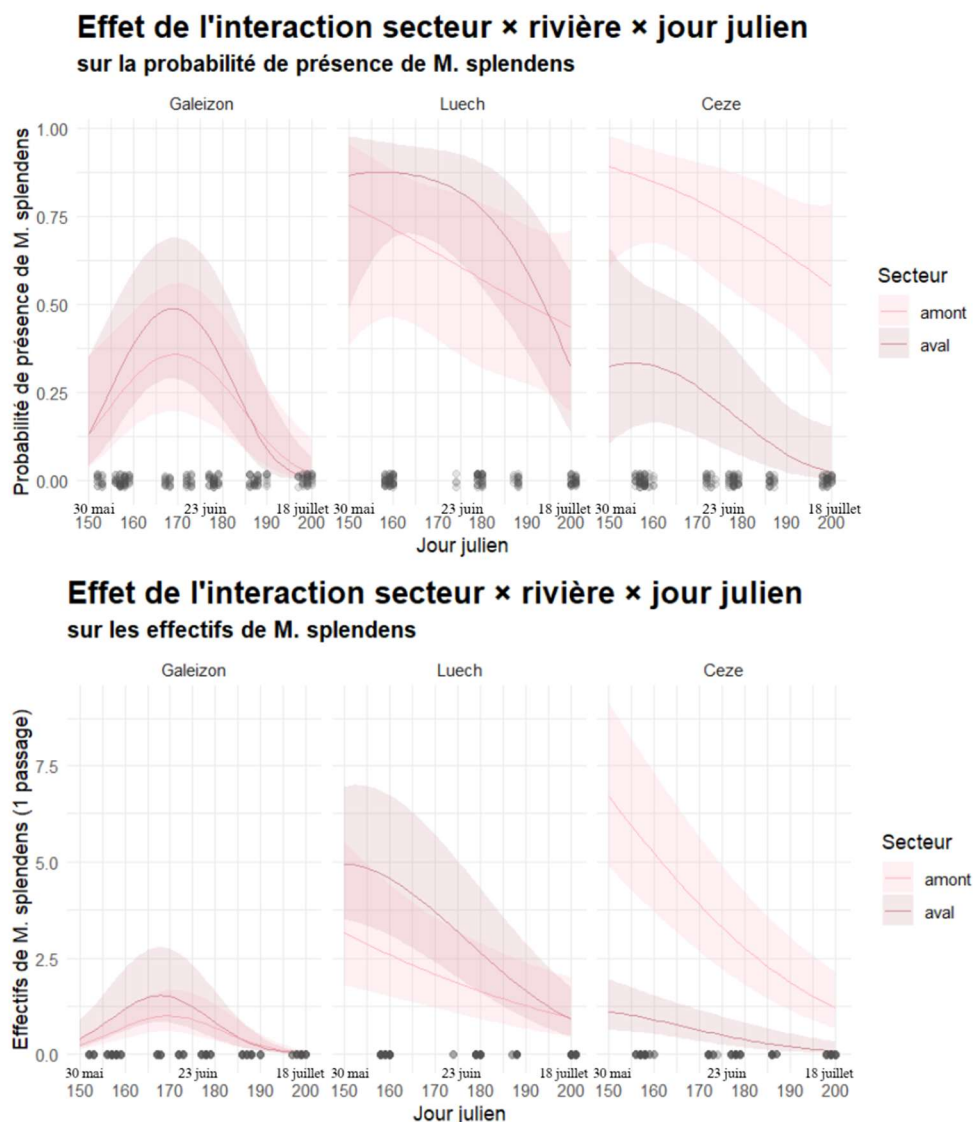


Figure 76. Effet de l'interaction secteur \times rivière \times jours juliens sur la probabilité de présence et les effectifs de *M. splendens*

Il semble que le pic d'émergence de *M. splendens*, en termes de probabilité de présence et d'effectifs dans la Cèze et le Luech, ait lieu avant le début de la période de suivi, tandis qu'il a lieu tout au début de la période de suivi pour le secteur aval de ces rivières. Ainsi, *M. splendens* émergerait

plus précocement à l'amont qu'à l'aval de ces rivières. La faible probabilité de présence de *M. splendens* dans le secteur aval de la Cèze à l'issue de la période de suivi suggère que sa période d'émergence est achevée dans cette zone. En revanche, les probabilités de présence toujours élevées à l'amont de la Cèze et dans le Luech indiquent que la période d'émergence de *M. splendens* n'y est pas terminée.

b) Modélisation des relations espèces – habitat d'émergence

La matrice des corrélations montre des relations significatives entre variables environnementales, par exemple une corrélation positive entre quantité d'arbres et quantité d'ombrage. Néanmoins, aucun coefficient de corrélation ne dépasse 0,7 en valeur absolue ; toutes les variables sont donc conservées pour le modèle complet.

Pour chacun des quatre modèles réalisés, le Tableau 3 présente le nombre de meilleurs modèles retenus ainsi que les variables les composant.

*Tableau 3. Résultats du model averaging pour la présence / absence et l'abondance d'*O. curtisii* et de *M. splendens**

Espèce	<i>O. curtisii</i>		<i>M. splendens</i>	
Modèle	Présence / absence	Abondance	Présence / absence	Abondance
Nombre de modèles retenus	4	2	1	8
Variables retenues	Galets / pierres Arbres Vitesse du courant	Vitesse du courant Type de berge Arbres surplombants	Chevelu racinaire Pente	Pente Vitesse du courant Présence / absence d'aulnes Type de berge Graviers Arbres Sablo-limoneux

Les graphiques de réponse de la probabilité de présence et des effectifs des deux espèces aux variables environnementales quantitatives et qualitatives sont présentés en Annexe 8.

- O. curtisii : modèle en présence / absence

*Tableau 4. Effet des variables quantitatives des meilleurs modèles sur la probabilité de présence d'*O. curtisii*. Significativité : $p \leq 0,001$: *** ; $0,001 < p \leq 0,01$: ** ; $0,01 < p \leq 0,05$: * ; $0,05 < p \leq 0,1$: . ; $p > 0,1$: vide.*

Variable	Estimate	P-value	Significativité
Quantité de galets / pierres (%)	1,7 ^{e-2}	0,02	**
Quantité d'arbres (%)	1,1 ^{e-2}	0,03	**
Vitesse du courant ²	-1,1 ^{e1}	0,03	**
Vitesse du courant (m / s)	-3,2	0,05	**

Les résultats montrent une corrélation positive entre probabilité de présence d'*O. curtisii* et la quantité de galets / pierres, ainsi qu'avec la quantité d'arbres (Tableau 4). La vitesse du courant quant

à elle impacte négativement la probabilité de présence de l'espèce, avec une incertitude plus forte sur les vitesses de courant élevées (Annexe 8).

- *O. curtisii* : modèle en abondance

Tableau 5. Effet des variables quantitatives des meilleurs modèles sur les effectifs d'*O. curtisii*. Significativité : $p \leq 0,001$: *** ; $0,001 < p \leq 0,01$: ** ; $0,01 < p \leq 0,05$: * ; $0,05 < p \leq 0,1$: . ; $p > 0,1$: vide.

Variable	Estimate	P-value	Significativité
Vitesse du courant (m / s)	-2,7	0,001	***

Effets des meilleures variables qualitatives sur les effectifs d'*O. curtisii*

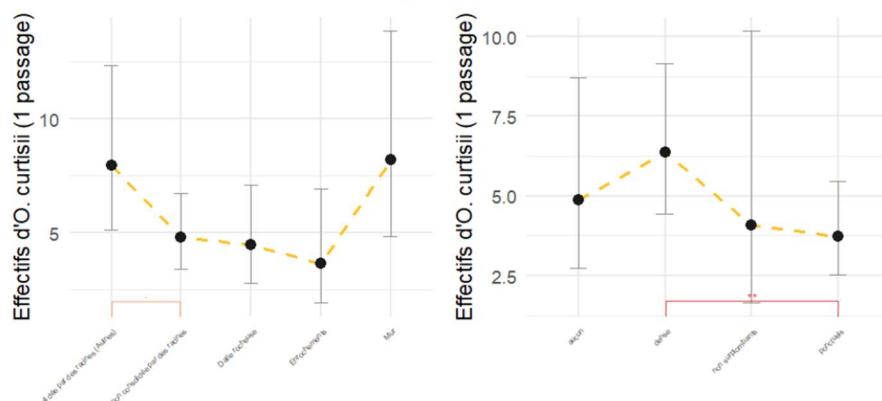


Figure 17. Effet des variables qualitatives des meilleurs modèles sur les effectifs d'*O. curtisii*. Significativité : $p \leq 0,001$: *** ; $0,001 < p \leq 0,01$: ** ; $0,01 < p \leq 0,05$: * ; $0,05 < p \leq 0,1$: . ; $p > 0,1$: vide.

La vitesse du courant est négativement corrélée aux effectifs d'*O. curtisii* (Tableau 5). L'espèce est significativement plus abondante dans les zones où les berges sont consolidées par des racines (aulnes) que là où elles ne le sont pas (ratio = 1,7 ; p-value = 0,06) (Figure 17). Il semble qu'une berge de type « mur » favoriserait également l'abondance de l'espèce, de manière non significative, tandis que des enrochements la défavoriseraient. Enfin, l'espèce est plus abondante dans les zones où les arbres surplombants sont denses que dans les zones où ils sont ponctuels (ratio = 1,7 ; p-value = 0,008). L'effet des deux autres modalités est soumis à une forte incertitude, par manque de données (69 relevés pour « aucun » et 24 relevés pour « non surplombants »).

- *M. splendens* : modèle en présence / absence

Tableau 6. Effet des variables quantitatives des meilleurs modèles sur la probabilité de présence de *M. splendens*. Significativité : $p \leq 0,001$: *** ; $0,001 < p \leq 0,01$: ** ; $0,01 < p \leq 0,05$: * ; $0,05 < p \leq 0,1$: . ; $p > 0,1$: vide.

Variable	Estimate	P-value	Significativité
Quantité de chevelu racinaire (%)	$1,9 \times 10^{-9}$	0,02	**
Pente de la rive (°)	$2,7 \times 10^{-2}$	0,04	**

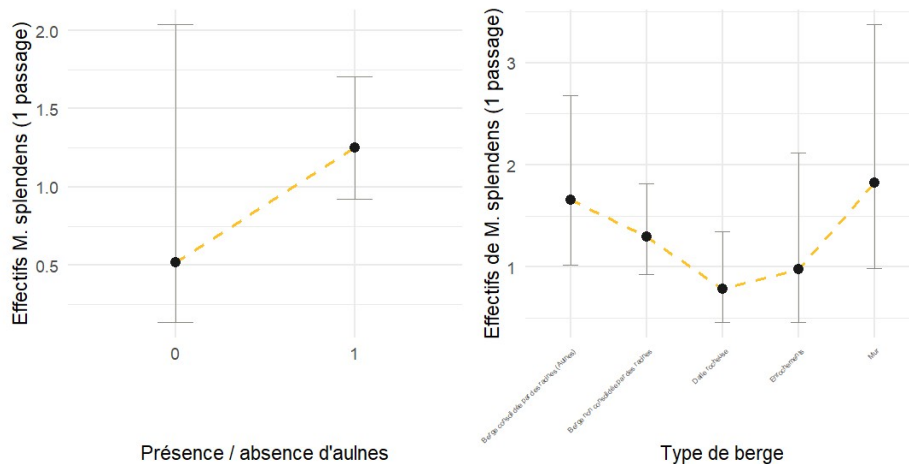
La quantité de chevelu racinaire est positivement corrélée à la probabilité de présence de *M. splendens*, tout comme la pente de la rive (Tableau 6). L'incertitude est forte pour les valeurs élevées de chevelu racinaire et les valeurs faibles de pente de la rive (Annexe 8).

- *M. splendens* : modèle en abondance

Tableau 7. Effet des variables quantitatives des meilleurs modèles sur les effectifs de *M. splendens*. Significativité : $p \leq 0,001$: *** ; $0,001 < p \leq 0,01$: ** ; $0,01 < p \leq 0,05$: * ; $0,05 < p \leq 0,1$: . ; $p > 0,1$: vide.

Variable	Estimate	P-value	Significativité
Pente de la berge (°)	$2,3 \times 10^{-2}$	0,01	**
Vitesse du courant (m / s)	-1,5	0,09	*
Quantité de graviers (%)	$5,4 \times 10^{-3}$	0,2	
Quantité d'arbres (%)	$4,5 \times 10^{-3}$	0,2	
Quantité de substrat sablo-limoneux (%)	$-4,2 \times 10^{-3}$	0,3	

Effets des meilleures variables qualitatives sur les effectifs de *M. splendens*



La pente de la berge est fortement et positivement corrélée aux effectifs de *M. splendens*, tandis que la vitesse du courant y est négativement corrélée (Tableau 7). Le trop faible nombre de transects dans la modalité « absence d'aulnes » (17 transects) ne permet pas d'obtenir un résultat significatif ; cependant, les effectifs de *M. splendens* semblent favorisés par la présence d'aulnes (Figure 18). Il n'y a pas de différence significative d'effectifs entre les types de berges, bien qu'il semble que les exuvies de *M. splendens* soient plus abondantes dans les berges consolidées par des racines et les berges de type « mur ». Les variables « quantité de gravier » ainsi que « quantité d'arbres » semblent positivement corrélés aux effectifs de *M. splendens*, tandis que la variable substrat sablo-limoneux y semble négativement corrélée. Néanmoins les effets de ces trois variables ne sont pas significatifs.

DISCUSSION

1. Analyse et mise en perspective des résultats

a) Etude descriptive de la distribution des espèces sur le site

La forte fréquence d'*O. curtisii* et de *M. splendens* dans les transects prospectés, observée à la Figure 9, est cohérente avec le fait que les transects aient été positionnés selon la présence avérée de ces espèces. Cette figure montre que l'inégale répartition des effectifs entre transects reste stable tout au long du suivi ; un transect semble favorable ou défavorable aux deux espèces majoritaires de manière constante d'une année sur l'autre, sauf exception en lien avec des épisodes météorologiques extrêmes (crues morphogènes). Le record du total sur cinq années de 576 *O. curtisii* et 78 *M. splendens* dans le transect HCEG09 « Le Claux Aval » est sous-évalué. Dans quatre transects de la Cèze, dont celui-ci, le nombre d'exuvies était tel que les observateurs ont dû choisir entre l'exhaustivité du comptage et le respect du temps de prospection. Le comptage a donc été exhaustif en 2022 et 2023, mais limité par le temps en 2024, entraînant une sous-estimation des effectifs sur ces transects cette année-là. Le comptage exhaustif des exuvies a permis de trouver au maximum 245 exuvies d'*O. curtisii* et 40 exuvies de *M. splendens* sur ce même transect en 2023.

L'échantillonnage des transects ayant initialement été réfléchi pour l'étude d'*O. curtisii* et de *M. splendens*, il est normal de ne trouver que peu de *G. graslinii*, qui n'est présent qu'en marge de ces sites Natura 2000.

b) Evolution spatio-temporelle des populations

Tendances populationnelles et comparaisons inter-rivières

Les populations d'*O. curtisii* et *M. splendens* présentent des dynamiques contrastées selon les cours d'eau étudiés. Dans le Galeizon, les tendances sont stables malgré des populations de taille relativement restreinte. La Cèze montre une tendance significativement décroissante mais conserve des effectifs supérieurs à ceux du Galeizon en 2024. Le Luech présente quant à lui une tendance relativement croissante. La Cèze se caractérise par une forte sectorisation avec un aval pauvre en exuvies et un amont aux effectifs élevés. Cette différenciation entre rivières ne peut s'expliquer par un biais de positionnement des transects, ceux-ci ayant été placés sur l'ensemble des sites connus de présence des deux espèces. L'hypothèse d'une tendance globalement décroissante n'est ainsi pas vérifiée. Malgré l'observation de variations interannuelles, une étude prolongée serait nécessaire pour en évaluer l'ampleur.

L'étude d'Arguel (2022), appliquant le protocole A. Denis (Denis, 2016) sur quatre rivières d'Occitanie (Aveyron, Lot, Vère, Vialer), révèle des densités moyennes d'exuvies sur 100 m de 10,2 ; 0 ; 47,3 et 2,9 respectivement pour *O. curtisii*, et 1,7 ; 0,1 ; 5,2 et 2,3 pour *M. splendens*. En comparaison, notre étude sur transects de 50 m établit des densités moyennes annuelles de : *O. curtisii* : 2,2 dans le Galeizon, 8,9 dans la Cèze, 9,7 dans le Luech et *M. splendens* : 0,6 dans le Galeizon, 1,6 dans la Cèze, 2,6 dans le Luech.

Ces résultats montrent que les densités d'*O. curtisii* dans la Cèze et le Luech dépassent celles du Lot et du Vialer, et s'avèrent comparables à l'Aveyron. Le Galeizon équivaut au Vialer. Pour *M. splendens*, la Cèze et le Luech surpassent également le Lot et le Vialer, la Cèze étant similaire à l'Aveyron. Malgré la différence de longueur des transects limitant les conclusions, il apparaît que les densités en exuvies sur la Cèze et le Luech sont nettement supérieures à celles des rivières de l'étude d'Arguel, exception faite d'*O. curtisii* dans la Vère. Cependant, les effectifs totaux peuvent différer car la quasi-totalité des sites de présence ont été prospectés dans notre étude (Soustelle, com. pers.) – le comptage des populations étant ainsi quasi-exhaustif (information non disponible chez Arguel) les populations sont potentiellement non limitées aux sites prospectés –.

Impact des conditions météorologiques et modifications protocolaires

En 2022, de fortes pluies ont contraint l'annulation des prospections sur la majorité des transects du Luech lors de la seconde période. Ces annulations concernant principalement des transects riches en exuvies, la moyenne observée s'est trouvée artificiellement réduite, expliquant partiellement l'augmentation des probabilités de présence et des effectifs observée les deux années suivantes.

Le changement d'interprétation du protocole en 2024 sur quatre transects de la Cèze (passage du comptage exhaustif au respect du temps imparti) n'a pas impacté l'analyse. La compilation du modèle avec et sans ces transects confirme la baisse significative des effectifs des deux espèces en 2024.

Analyse de la phénologie et robustesse des modèles

Les modèles incluant des interactions avec les jours juliens manquent légèrement de robustesse en raison du nombre insuffisant de données par modalité, résultant en un AIC légèrement supérieur aux modèles fixes. Néanmoins, leur explicabilité (R^2) étant supérieure, ils apportent des informations précieuses pour affiner la compréhension phénologique et ont donc été conservés.

Les périodes de prospection s'avèrent bien centrées sur l'émergence dans le Galeizon, contrairement à la Cèze et au Luech où les populations émergent massivement plus précocement et sur une période plus étendue, débordant du cadre temporel du suivi. Les années 2022 et 2023 se

distinguent par une émergence particulièrement précoce, 2023 présentant une période d'émergence très longue se prolongeant au-delà de la fin du suivi.

Dans la Cèze et le Luech, les populations d'*O. curtisii* du secteur aval émergent avant celles de l'amont, tandis que *M. splendens* présente le résultat opposé. A l'inverse, la non-sectorisation du Galeizon s'explique logiquement par le fait que la Cèze et le Luech sont de plus longues rivières, probablement soumises à un gradient thermique (aval plus chaud, amont plus frais). Étonnamment, les dates par secteur sont similaires entre la Cèze et le Luech, bien que ce dernier soit un affluent se jetant au niveau du secteur amont de la Cèze.

Les périodes de prospection s'avèrent légèrement tardives comparativement aux périodes d'émergence. Théoriquement, l'accumulation des exuvies sur les berges permet un passage post-émergence, mais le lessivage potentiel par temps pluvieux ou venteux rend les résultats moins fiables si le suivi n'est pas centré sur l'émergence. Le choix de la première période découle de prospections préalables hors protocole révélant une émergence massive des *M. splendens* début juin sans augmentation progressive préalable, suggérant l'absence de lessivage avant le premier relevé.

L'étude phénologique de Denis (Denis, 2018) sur ces trois espèces met en évidence des décalages phénologiques entre transects, directement liés à la température des milieux aquatiques malgré leur proximité géographique. Ainsi, deux systèmes aquatiques distants de moins de 5 km présentent un décalage d'environ trois semaines dans leurs périodes d'émergence. La précocité observée en aval de la Cèze et du Luech pour *O. curtisii* semble résulter du même phénomène ; une étude thermique des transects permettrait de valider cette hypothèse (Castagnet *et al.*, 2014).

Les tendances similaires entre *O. curtisii* et *M. splendens* indiquent une sensibilité commune aux mêmes variables environnementales. Les différences d'effectifs d'exuvies entre les trois rivières doivent être mises en perspective avec leurs spécificités d'habitat. L'analyse multivariée (Annexe 9) révèle une forte différenciation entre le Galeizon et la Cèze, le Luech constituant un milieu intermédiaire. La Cèze se caractérise par une profondeur, une lenteur et un couvert arbustif supérieurs, éléments à considérer dans l'analyse ultérieure.

c) Modélisation des relations espèces – habitat d'émergence

Préférences d'habitat et modélisation environnementale

Cette étude se concentre, par l'échantillonnage des transects choisi, sur les habitats occupés par les espèces ciblées. L'absence de « négatifs » limite le domaine de validité des modèles ; néanmoins, de grandes variations d'effectifs, et donc de densité larvaire, entre transects, permettent une discrimination fine des habitats favorables au sein même des habitats d'émergence occupés.

Pour *O. curtisii*, une faible vitesse de courant et la présence abondante d'arbres constituent deux facteurs primordiaux favorisant la probabilité de présence et l'abondance. L'espèce abonde particulièrement lorsque les berges sont consolidées par des racines d'aulnes et quand les galets / pierres forment une proportion substantielle du substrat.

M. splendens privilégie les fortes pentes de berge, favorables à la fois pour la probabilité de présence et l'abondance. Le chevelu racinaire important favorise également l'espèce. Malgré la faible variabilité du nombre d'exuvies collectées limitant la significativité des modèles, l'analyse révèle l'importance de la vitesse du courant, du type de berge et de la quantité d'arbres. La présence d'aulnes et la quantité de graviers semblent favoriser l'abondance, tandis que les substrats sablo-limoneux s'avèrent négativement corrélés.

Les deux espèces privilégient ainsi les milieux arborés à courant lent, avec présence d'aulnes et berges consolidées par leurs racines. Ces résultats concordent, comme attendu, avec la littérature (Boudot *et al.*, 2017) qui stipule que ces espèces préfèrent les parties calmes des grandes rivières aux rives boisées, à une altitude inférieure à 500 m (*M. splendens*) ou 800 m (*O. curtisii*). Toutefois, la définition de « grande rivière » n'étant pas explicitée, nos trois cours d'eau correspondraient plutôt aux « ruisseaux contenant des vasques relativement profondes » également appréciés par *M. splendens*, selon les mêmes auteurs. La localisation des transects (de l'aval vers l'amont, s'interrompant bien avant la source) suggère un possible effet altitudinal corrélé à l'effet température, confirmé par la présence de *G. graslinii* uniquement sur les transects les plus avals, conformément à sa limite altitudinale plus faible (Boudot *et al.*, 2017).

Concernant les habitats larvaires spécifiques, ces mêmes auteurs indiquent qu'*O. curtisii* vit dans les débris végétaux (Boudot *et al.*, 2017) ou les chevelus racinaires (Leipelt & Suhling, 2001), tandis que *M. splendens* s'enfouit dans des sédiments sablonneux ou organiques (Leipelt & Suhling, 2005). Ces variables n'ayant pas été retenues dans nos meilleurs modèles, seules des corrélations indirectes peuvent être établies, notamment entre la consolidation des berges par les racines d'aulnes et la présence simultanée de débris organiques et chevelus racinaires pour *O. curtisii*.

La présente étude constitue un focus sur les habitats d'émergence occupés, s'appuyant sur le postulat que la zone d'émergence est proche de l'habitat larvaire. Cependant, les larves peuvent se déplacer sur plusieurs dizaines de mètres pour émerger (Tourneur & Lambret, 2017) et ne mobilisent qu'une portion de cet habitat. L'observation d'exuvies de *M. splendens* exhibant la couleur d'une couche du substrat près de la berge suggère que la dernière phase larvaire se déroule dans cette zone, les larves vivant à proximité de la ripisylve plutôt qu'au milieu de la rivière. Certains effets des

variables environnementales (galets / pierres, graviers) pourraient ainsi n'être que des corrélations sans lien de causalité direct.

Implications écologiques

La présence des deux espèces dans des petits cours d'eau et dans des conditions plus ou moins différentes de celles décrites dans la littérature corrobore les observations de Denis (Denis, 2018), suggérant qu'*O. curtisii* et *M. splendens* ne sont pas des espèces aussi spécialistes que couramment supposé. Elles peuvent soit s'adapter à divers macro-habitats, soit trouver le même micro-habitat dans différents types de macro-habitats (étangs ou gravières avec circulation d'eau). Cette conclusion amène à reconsidérer leur utilisation comme indicateurs stricts d'habitats préservés.

2. Implications pour la gestion conservatoire

a) Evaluation de l'état de conservation des espèces

Le temps court du suivi et l'absence de seuils de densité définis ne permettent pas d'établir un état de conservation précis des trois espèces sur la zone d'étude. Néanmoins, les fortes densités relevées sur les meilleurs transects et les tendances populationnelles plutôt stables suggèrent un relativement bon état de conservation d'*O. curtisii* et *M. splendens* sur les deux sites Natura 2000. Le secteur aval de la Cèze, plus anthropisé, présente toutefois un état de conservation général moins favorable. *G. graslinii*, présente en marge du site « Vallée du Galeizon », ne peut faire l'objet d'une telle évaluation territoriale mais mérite un suivi continu, particulièrement dans le contexte de dérèglement climatique (baisse estivale du débit et augmentation thermique de l'eau, à confirmer).

b) Recommandations pour la préservation des espèces

La conservation en bon état écologique des rivières est primordiale pour maintenir des habitats adaptés aux trois espèces. Cela passe par la préservation de la ripisylve, une qualité de l'eau satisfaisante, une gestion raisonnée des pompages, le respect des débits réservés et la continuité des flux sédimentaires. Ces mesures doivent concilier ensoleillement suffisant pour l'activité des adultes et préservation de la diversité des micro-habitats, essentielle à la richesse odonatologique. Les travaux d'effacement des seuils en cours risquent de détruire certains habitats anthropiques favorables (Denis, 2018), bien que la présente étude ne permette pas de conclure. Les crues morphogènes demeurent le principal gestionnaire des rivières cévenoles.

3. Limites méthodologiques

a) Critique du protocole suivi et des analyses réalisées

Conception et positionnement du protocole

Ce protocole, initialement conçu pour évaluer les tailles de populations et leurs variations interannuelles, cible la quasi-totalité des zones de présence des trois espèces, permettant une mesure presque exhaustive des populations dans les trois rivières. Cependant, ce positionnement exclut les zones d'absence, limitant l'analyse des habitats à un faible domaine de validité, malgré des résultats cohérents avec la littérature. Les transects, positionnés depuis l'aval jusqu'au dernier site de présence confirmée, ne couvrent pas l'ensemble du linéaire et ne sont pas répartis de manière équidistante ou aléatoire. L'impression de continuité populationnelle dans certains graphiques est donc erronée, les transects étant séparés par des zones d'absence avérée.

La longueur des transects, issue d'un compromis entre détectabilité et finesse descriptive, pose des difficultés pour caractériser les variables environnementales (type de berge par exemple), l'homogénéité n'étant pas toujours vérifiée. Les exuvies étant régulièrement concentrées sur une faible portion correspondant à un micro-habitat d'émergence spécifique, l'unité de longueur du transect s'avère trop grande pour une définition précise de l'habitat.

Biais observateur et variabilité protocolaire

L'absence de permutation des binômes entre rivières empêche de dissocier l'effet « rivière » de l'effet « observateur », créant un biais non quantifiable concernant la description des transects (mais pas la détection d'exuvies, les observateurs étant formés (Denis, 2018)). Ce biais passe également par l'interprétation du protocole : les îlots à proximité de la berge doivent-ils être prospectés ? Définition de la pente de berge (premiers cm ou m) ? Le pourcentage d'aulnes se rapporte-t-il à la proportion parmi les arbres ou à une couverture totale ? Priorité au temps imparti ou à l'exhaustivité ?

Ce dernier point s'avère particulièrement critique : sur les quatre transects les plus riches en *O. curtisii* de la Cèze, les prospections 2022 et 2023 furent exhaustives tandis qu'en 2024, le temps fut strictement respecté, limitant la prospection à environ un tiers du transect. Cette instabilité protocolaire crée un effondrement artificiel des effectifs d'*O. curtisii* en 2024, visible dans les données brutes.

Impact des conditions météorologiques

Les conditions météorologiques entre prospections jouent un rôle déterminant. Le protocole repose sur l'hypothèse que toutes les exuvies émergeant entre deux périodes pourront être collectées

lors de la seconde, permettant de mesurer la population entière. En réalité, les orages et vents violents peuvent lessiver les exuvies, sous-estimant les effectifs lors de la prospection suivante.

Enrichissement nécessaire des données

Le jeu de données gagnerait à être enrichi par des informations météorologiques (dates de crues, suivi thermique des transects). L'intensité des crues les désigne comme facteur primordial expliquant les déplacements sédimentaires et potentiellement les diminutions drastiques de populations (larves broyées dans les sédiments déplacés (Soustelle com. pers.)). Du fait du long cycle larvaire, l'impact des crues se mesure d'une à trois années plus tard.

Les variations thermiques annuelles seraient intéressantes à étudier, la phénologie et la présence variant selon la température de l'eau (Cordero Rivera, 2000). Cela permettrait de comprendre le décalage phénologique entre amont et aval de la Cèze et du Luech, de définir les préférendums thermiques, donnée primordiale dans le cadre du dérèglement climatique.

Le suivi thermique pourrait permettre de prévoir annuellement les dates de suivi selon les évolutions en temps réel. En 2025, la température fut mesurée à chaque relevé, mais la variabilité journalière élevée et l'ordre fixe de prospection (même heure par transect) limitent l'analyse comparative. La pose de boutons thermiques par transect constituerait une solution plus adaptée.

Choix méthodologiques et limitations analytiques

L'imputation manuelle des valeurs manquantes repose sur la faible variabilité temporelle théorique des variables, la présence de données manquantes sur des variables essentielles (excluant la suppression de colonnes) et leur dispersion sur de nombreux relevés (excluant la suppression de lignes). Ce choix subjectif aurait pu être remplacé par un code prédictif de valeurs probables.

La différence du début de suivi entre sites Natura 2000 amène le modèle à prédire des valeurs 2021 pour la Cèze et le Luech, sortant du domaine de validité. Ces valeurs, supprimées uniquement dans l'analyse d'interaction année \times rivière, peuvent biaiser les autres modèles.

L'autocorrélation spatiale, approchée par les effets rivière et secteur, nécessiterait un approfondissement (distance à la source, coordonnées géographiques) compte tenu de l'effet secteur prononcé dans la Cèze.

b) Pistes d'amélioration méthodologique pour le suivi à long terme des odonates d'intérêt communautaire

L'amélioration essentielle consiste à établir un protocole distinct par problématique. Le protocole actuel, conçu pour les variations interannuelles de populations, est aussi utilisé pour l'habitat, et d'autres analyses non détaillées ici. Cette multiplicité d'objectifs demande plus de temps et concentration qu'un protocole simplifié, générant fatigue, erreurs et biais accrus.

Pour le suivi populationnel, le protocole pourrait être allégé en collectant uniquement effectifs d'exuvies, date et transect. L'intérêt de transects strictement fixes peut être questionné car les crues morphogènes modifient régulièrement le faciès des berges et les stations de présence. En 2025, l'érosion d'une berge a causé la chute d'un arbre au chevelu racinaire propice (Lory com. pers.).

Le suivi de *G. graslinii* nécessiterait des transects distincts et un protocole adapté aux espèces rares. Les périodes actuelles sont trop précoces et devraient être retardées (Annexe 10). L'ajout d'une quatrième période précoce documenterait le début d'émergence d'*O. curtisii* et *M. splendens*, mais nécessiterait des moyens supplémentaires.

Pour l'habitat, un nouvel échantillonnage serait nécessaire, potentiellement inspiré du protocole SOGAP avec transects aléatoires (Baeta *et al.*, 2025). Les variables pourraient être simplifiées en ne conservant que celles impactant l'habitat larvaire et en agrégeant les variables redondantes (« arbres surplombants » / « quantité d'arbres »). Il faut redéfinir les variables pour éviter les biais d'interprétation, fixer des dimensions précises (largeur et hauteur de prospection sur la berge) et caractériser le substrat par catégories distinctes d'une même variable plutôt que par pourcentages. La division en sections homogènes permettrait de dépasser la limite de l'homogénéité. La permutation des binômes ou une journée "test du biais observateur" permettrait de limiter ou d'évaluer ce biais.

Participer au protocole national SOGAP permettrait la comparaison des résultats avec d'autres organismes participants. En particulier, la prospection de transects d'une longueur standardisée est nécessaire pour chiffrer les comparaisons avec des études extérieures. Le tirage de mailles aléatoires conviendrait à la description de l'habitat d'émergence, tandis que des "mailles témoins" fixes assureraient le suivi populationnel.

Ces propositions ne devront pas être appliquées dès 2026 pour maintenir la comparabilité. Il est fortement conseillé de prolonger le suivi actuel sur le Galeizon d'une année pour comparer les effectifs de 2022 à 2026 entre les trois rivières. Les données 2025 n'ayant pu être analysées faute de temps, cette poursuite est d'autant plus nécessaire que *M. splendens* a montré une importante baisse en 2025 dans le Galeizon (Soustelle com. pers.).

GLOSSAIRE

AIC (Akaike Information Criterion) : critère statistique utilisé pour comparer et sélectionner les modèles en évaluant l'équilibre entre la qualité d'ajustement aux données et la complexité du modèle. Plus la valeur AIC est faible, meilleur est le modèle.

AICc (Akaike Information Criterion corrigé) : version corrigée de l'AIC adaptée aux petits échantillons, utilisée lorsque le nombre d'observations est limité par rapport au nombre de paramètres du modèle.

Anisoptère : sous-ordre d'Odonates caractérisé par des ailes postérieures plus larges que les antérieures et maintenues perpendiculairement au corps au repos. Comprend les libellules vraies, dont les trois espèces étudiées.

Autochtonie : caractère d'une espèce qui se reproduit naturellement dans un milieu donné, par opposition à une présence temporaire ou accidentelle.

Biodiversité : diversité du monde vivant à tous les niveaux d'organisation : diversité génétique, spécifique et écosystémique.

Biostatistique : application des méthodes statistiques aux sciences de la vie pour analyser et interpréter des données biologiques et écologiques.

Chevelu racinaire : ensemble dense de racines fines formant un réseau complexe, particulièrement développé chez les aulnes et autres végétaux riverains.

Crues morphogènes : crues d'intensité suffisante pour modifier la morphologie du lit d'une rivière (déplacement de sédiments, érosion des berges, modification du tracé).

DHFF (Directive Habitats-Faune-Flore) : directive européenne 92/43/CEE visant à préserver la biodiversité par la conservation des habitats naturels et des espèces de faune et de flore sauvages d'intérêt communautaire.

Écosystème : ensemble formé par une communauté d'êtres vivants et son environnement physique, fonctionnant comme un système écologique.

Émergence : processus de transformation de la larve aquatique en imago (adulte ailé) chez les Odonates, marquant le passage du milieu aquatique au milieu aérien.

Endémique : se dit d'une espèce dont l'aire de répartition naturelle est limitée à une région géographique restreinte.

Exuvie : enveloppe larvaire abandonnée par l'insecte lors de sa métamorphose en adulte. Utilisée comme indicateur de reproduction locale des Odonates.

Gomphidés : famille d'Anisoptères caractérisée par des yeux séparés et un abdomen souvent élargi à l'extrémité. *Gomphus graslinii* appartient à cette famille.

Habitat : milieu naturel dans lequel vit une espèce, réunissant l'ensemble des conditions physiques, chimiques et biologiques nécessaires à sa survie et à sa reproduction.

Imago : forme adulte et reproductrice d'un insecte après métamorphose complète.

Jours juliens : système de numérotation continue des jours dans l'année, où le 1er janvier correspond au jour 1 et le 31 décembre au jour 365 (ou 366).

Larvaire (phase) : stade de développement aquatique des Odonates, durant lequel l'insecte vit dans l'eau avant sa métamorphose en adulte ailé.

MAB (Man and Biosphere) : programme scientifique intergouvernemental de l'UNESCO visant à établir une base scientifique pour améliorer les relations entre l'homme et son environnement.

Métamorphose : transformation morphologique et physiologique complète qui permet le passage de la larve aquatique à l'adulte ailé chez les Odonates.

Model averaging : technique statistique consistant à moyenniser les résultats de plusieurs modèles pour obtenir des estimations plus robustes et réduire l'incertitude.

Modèle généralisé linéaire mixte (GLMM) : modèle statistique combinant effets fixes et effets aléatoires, adapté à l'analyse de données non-normales avec structure de corrélation.

Multicolinéarité : situation statistique où plusieurs variables explicatives d'un modèle sont fortement corrélées entre elles, pouvant affecter la fiabilité des estimations.

PNA (Plan National d'Actions) : outil de conservation visant à définir les actions nécessaires à la conservation ou au rétablissement d'espèces menacées sur le territoire français.

Phénologie : étude de l'influence des variations climatiques sur les phénomènes biologiques périodiques, comme l'émergence des insectes.

Ripisylve : formation végétale qui se développe sur les bords des cours d'eau, jouant un rôle écologique majeur pour la stabilisation des berges et l'habitat aquatique.

Substrat : nature du fond d'un cours d'eau (sables, graviers, galets, roches, etc.) conditionnant l'habitat des larves d'Odonates.

Sur-dispersion : situation statistique où la variance des données observées est supérieure à celle prédite par le modèle théorique (ex: loi de Poisson).

Transect : ligne d'échantillonnage de longueur déterminée (50 m dans cette étude) le long de laquelle sont réalisées les observations et mesures.

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, à l'origine du programme MAB.

ZSC (Zone Spéciale de Conservation) : aire protégée désignée au titre de la Directive Habitats-Faune-Flore pour la conservation d'habitats naturels et d'espèces d'intérêt communautaire.

Zéro-inflation : excès de valeurs nulles dans un jeu de données par rapport à ce qu'attendrait une distribution théorique classique, nécessitant des modèles statistiques adaptés.

BIBLIOGRAPHIE

- Arguel, L. (2022). *suivi de trois espèces d'Odonates de la Directive Habitats Faune Flore sur quatre sites Natura 2000 en Occitanie*. Toulouse.
- Arguel, L., & Louboutin, B. (2022, 07 13). *Macromia splendens* (Pictet, 1843). Récupéré sur Atlas dynamique des Odonates de France, Office pour les insectes et leur environnement: <https://atlas-odonates.insectes.org/odonates-de-france/macromia-splendens>
- Arthur, L., Baglinière, J.-L., Barataud, M., Barbier, B., Bensettiti, F., Berrebi, P., . . . Vandel, J.-M. ((n. d.)). *Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire, Tome 7: Espèces animales*.
- Baeta, R., Lafont, V.-A., & Rusu-Stievenard, A. (2025). *Protocole de suivi des Odonates Gomphidés et anisoptères prioritaires - SOGAP. Association Naturaliste d'étude et de protection des écosystèmes "Caudalis", Office pour les insectes et leur environnement, Office Français de la Biodiversité*.
- Baillie, J., Hilton-Taylor, C., & Stuart, S. (2008). *IUCN Red List of threatened species: A global species assessment*.
- Barnosky, A., Matzke, N., Tomiya, S., Wogan, G., Swartz, B., Quental, T., & Ferrer, E. (2011). Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 471(7336), 51-57.
- Boudot, J.-P., Grand, D., Wildermuth, H., & Monnerat, C. (2017). *Les Libellules de France, Belgique, Luxembourg et Suisse*. Biotope, Mèze (Collection Parthénopé), 2ème ed., 456p.
- Brooks, M., Bolker, B., Kristensen, K., Maechler, M., Magnusson, A., Skaug, H., . . . van Benthem, K. (2017). glmmTMB balances speed and flexibility among packages for zero-inflated generalized linear mixed modeling. *The R Journal*, 9(2), 378 - 400.
- Burnham, K., & Anderson, D. (2002). *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*. Springer.
- Castagnet, J., Chazalmartin, S., Christophe, F., Merly, S., Christophe, A., Christophe, N., . . . DREAL Languedoc-Roussillon. (2014). *Cartographie des sites d'émergence de la Cordulie splendide Macromia splendens* (Pictet, 1843) *et de la Cordulie à corps fin Oxygastra curtisii* (Dale, 1834) *dans les gorges du Tarn (Lozère 48): répartition, biologie et écologie*. Office International de l'Eau / Agence de l'Eau Adour-Garonne.

- Ceballos, G., Ehrlich, P., Barnosky, A., García, A., Pringle, R., & Palmer, T. (2015). Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1(5), e1400253.
- CEN Occitanie & Opie (coord.). (2022). *Plan national d'actions en faveur des libellules - Déclinaison Occitanie 2022-2031. Agir pour la préservation des Odonates menacés et de leurs habitats*. DREAL Occitanie. 92 p. + annexes.
- Chapman, A. (2009). *Numbers of Living Species in Australia and the World (2nd edition)*. Canberra: Australian Biological Resources Study.
- Charlot, B., Danflous, S., Louboutin, B., & Jaulin, S. (2018). *Liste Rouge des Odonates d'Occitanie. Rapport d'évaluation*. CEN Midi-Pyrénées & OPIE. Toulouse.
- Corbet, P. (1999). *Dragonflies: Behavior and ecology of Odonate*. Cornell University Press.
- Cordero Rivera, A. (2000). Distribution, habitat requirement and conservation of *Macromia splendens* Pictet (Odonata: Corduliidae) in Galicia (NW Spain). *International Journal of Odonatology*, 3(1): 73-83.
- De Knijf, G., Billqvist, M., van Grunsven, R., Prunier, F., Vinko, D., Trottet, A., . . . Allen, D. (2024). *Measuring the pulse of European biodiversity, European Red List of Dragonflies & Damselflies (Odonata)*. Brussels: European Commission. 46 pp.
- De Vos, J., Joppa, L., Gittleman, J., Stephens, P., & Pimm, S. (2015). Estimating the normal background rate of species extinction. *Conservation Biology*, 29(2):452-62.
- Denis, A. (2018). *Impacts de l'anthropisation sur la diversité odonatologique au sein des cours d'eau: vers une meilleure prise en compte des espèces de la Directive Habitats Faune Flore*. Université de Toulouse.
- Denis, A., Danflous, S., & Pelozuelo, L. (2017). Etat des lieux des connaissances sur trois Odonates protégés de grands cours d'eau : *Oxygastra curtisii* (Dale, 1834), la Cordulie à corps fin, *Gomphus graslinii* Rambur, 1842, le Gomphe de Graslin et *Macromia splendens* (Pictet, 1843), la Cordulie splendide.
- Denis, A., Payet, O., & Danflous, S. (2018). Intraspecific variability of the phenology and morphology of three protected dragonflies, between natural and artificial habitats. *Journal of Insect Conservation* 22, 419-431.

- Di Marco, M., Chapman, S., Althor, G., Kearney, S., Besancon, C., Butt, N., & Watson, J. (2017). Changing trends and persisting biases in three decades of conservation science. *Global Ecology and Conservation*, 32-42.
- Dirzo, R. &. (2003). Global state of biodiversity and loss. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), 137–167.
- Donaldson, M., Burnett, N., Braun, D., Suski, C., Hinch, S., Cooke, S., & Kerr, J. (2016). Taxonomic bias and international biodiversity conservation research. *Facets*, 105-113.
- Doucet, G. (2016). *Clef de détermination des exuvies des Odonates de France*.
- Doucet, G. (2025, 08 25). [*Gomphus sp.*] *Gomphus graslinii ou similinus*? Récupéré sur Le Monde des Insectes: <https://www.insecte.org/forum/viewtopic.php?t=192168>
- DREAL Occitanie. (2010, 09 24). *DOCOb de la Vallée du Galeizon*. Récupéré sur DREAL Occitanie: <https://www.occitanie.developpement-durable.gouv.fr/docob-de-la-vallee-du-galeizon-a1532.html>
- DREAL Occitanie. (2014, 03 28). *Docob Hautes Vallées de la Cèze et du Luech*. Récupéré sur DREAL Occitanie: <https://www.occitanie.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=recherche&recherche=docob+hautes+vall%C3%A9es+de+la+c%C3%A8ze+et+du+luech>
- Dunn, R. (2005). Modern insect extinctions, the neglected majority. *Conservation Biology*, 1030-1036.
- Dupont, P. (2010). *Plan national d'actions en faveur des Odonates*. OPIE / SFO - Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer, 170 p.
- Fonseca, C. (2009). The silent mass extinction of insect herbivores in biodiversity hotspots. *Conservation Biology*, 1507-15.
- Footitt, R., & Adler, P. (2009). *Insect Biodiversity: Science and Society*. Wiley-Blackwell.
- Fox, J., Weisberg, S., & Price, B. (2025). effects: Effect Displays for Linear, Generalized Linear, and Other Models. R package version 4.3-0. *Comprehensive R Archive Network*.
- Hartig, F. (2024). *DHARMA: Residual diagnostics for hierarchical (multi-level / mixed) regression models (Version 0.4.7) [R package]*. Récupéré sur GitHub: <https://github.com/florianhartig/dharma>

- Houard, X. (2020). *Plan national d'actions en faveur des "libellules" - Agir pour la préservation des odonates menacés et de leurs habitats 2020-2030*. OPIE - DREAL Hauts-de-France - Ministère de la transition écologique: 66 p.
- inconnu., A. ((n.d.)). *Macromia splendens exuviae*. Récupéré sur Meslibellules.fr: <https://meslibellules.fr/pagesweb/corduliidae/macromia/splendens/macromia-splendens-exuvie-1.php>
- INPN. (2025, 08 26). *Site Natura 2000 "Hautes Vallées de la Cèze et du Luech"*. Récupéré sur inpn.mnhn: <https://inpn.mnhn.fr/site/natura2000/FR9101364>
- INPN. (2025, 08 26). *Site Natura 2000 "Vallée du Galeizon"*. Récupéré sur inpn.mnhn: <https://inpn.mnhn.fr/site/natura2000/FR9101369>
- IUCN. (2007). *The IUCN Red List of Threatened Species*.
- IUCN. (2018). *European Red List of Dragonflies*. Publication Office of the European Union.
- IUCN. (2024). *European Red List of Dragonflies and Damselflies*. Publication Office of the European Union.
- IUCN. (s.d.). *The IUCN Red List of Threatened Species, Version 2017-3a: Table 3*.
- Kalkman, V., Boudot, J.-P., Bernard, R., Conze, K.-J., De Knijf, G., Suhling, F., & van Tol, J. (2010). *European Red List of Dragonflies*. Publications Office of the European Union.
- Kalkman, V., Clausnitzer, V., Dijkstra, K.-D., Orr, A., Paulson, D., & van Tol, J. (2008). Global diversity of dragonflies (Odonata) in freshwater. *Hydrobiologia*, 595(1), 351-363.
- Lafont, V.-A., Rodriguez, J., & Soustelle, C. (2021). *Inventaire des espèces d'odonates d'intérêt communautaire et de leurs espèces compagnes - Site Natura 2000 "Haute-Cèze" - Synthèse et analyse des données 2017 à 2019*. Syndicat des Hautes Vallées Cévenoles: 81p.
- Lafont, V.-A., Rodriguez, J., & Soustelle, C. (2021). *Inventaire des espèces d'odonates d'intérêt communautaire et de leurs espèces compagnes - Site Natura 2000 "Vallée du Galeizon" - Synthèse et analyse des données 2027 à 2019*. Syndicat des Hautes Vallées Cévenoles : 90p.
- Lambret, P. (2022, 03 29). *Oxygastra curtisii* (Dale, 1834), Atlas dynamique des Odonates de France, Office pour les insectes et leur environnement, <https://atlas-odonates.insectes.org/odonates-de-france/oxygastra-curtisii>.

- Leandro, C., Jay-Robert, P., & Vergnes, A. (2017). Bias and perspectives in insect conservation: A European scale analysis. *Biological Conservation*, 213-224.
- Leipelt, K., & Suhling, F. (2001). Habitat selection of larval *Gomphus graslinii* and *Oxygastra curtisii* (Odonata: Gomphidae, Corduliidae). *International Journal of Odonatology*, 4(1), 23-34.
- Leipelt, K., & Suhling, F. (2005). Larval biology, life cycle and habitat requirements of *Macromia splendens*, revisited (Odonata: Macromiidae). *International Journal of Odonatology*, 8(1), 33-44.
- Lenth, R. (2025). emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means (Versoin 1.11.2) [R package]. *Comprehensive R Archive Network (CRAN)*.
- Louboutin, B., Blanchon, Y., Houard, X., Krieg-Jacquier, R., Lambret, P., Piney, B., . . . Rusu-Stievenard, A. (2022). *Atlas Dynamique des Odonates de France, Office pour les insectes et leur environnement (OPIE)*. Récupéré sur <https://atlas-odonates.insectes.org/>
- Louboutin, B., Houard, X., Jaulins, S., Besnard, A., Blanchon, Y., Gabant, P., . . . Ronne, C. (2016). *Détection des populations de Gomphidae sur le Rhône méridional entre Caderousse et Beaucaire - Troisième année d'inventaire et synthèse 2014-2015-2016. Rapport d'étude pour la Compagnie nationale du Rhône*. Office pour les insectes et leur environnement (coord.), Conservatoire d'espaces naturels du Languedoc-Roussillon, Centre Ornithologique du Gard, Ecologistes de l'Euzières, Société française d'Odonatologie délégation PACA. 84 pp.
- Lüdecke, D., Makowski, D., Ben-Shachar, M., Patil, I., Waggoner, P., Wiernik, B., & Thériault, R. (2025). performance: Assessment of regression models performance (Version 0.12.0) [R package]. *Comprehensive R Archive Network*.
- May, M. (2019). Odonata: Who they are and what they have done for us lately: Classification and ecosystem services of dragonflies. *Insects*, 62.
- Miguel, T., Calvão, L., Vital, M., & Juen, L. (2017). A scientometric study of the order Odonata with special attention to Brazil. *International Journal of Odonatology*, 27-42.
- MNHN& OFB. (2003-2025). Récupéré sur *Macromia splendens* (Pictet, 1843). Inventaire national du patrimoine naturel (INPN): https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/65384
- Opie. (2016). *Plan National d'Actions en Faveur des Libellules*. Récupéré sur <https://libellules.pnaopie.fr/>

- Peduzzi, P., Concato, J., Kemper, E., Holford, T., & Feinstein, A. (1996). A simulation study of the number of events per variable in logistic regression analysis. *Journal of Clinical Epidemiology*, 49(12), 1373-1379.
- R Core Team. (2025). *R: A Language and Environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for statistical computing.
- Sahlén, G., Haase, S., & Suhling, F. (2008). Morphology of dragonfly larvae along a habitat gradient: Interactions with feeding behaviour and growth (Odonata: Libellulidae). *International Journal of Odonatology*, 225-240.
- Schmidt Dalzochio, M., Périco, E., Dametto, N., & Sahlén, G. (2020). Rapid functional traits turnover in boreal dragonfly communities (Odonata). *Scientific Reports*, 10, Article 1511.
- Soustelle, C. (2020). *Méthodologie de suivi*.
- Tourneur, J., & Lambret, P. (2017). Répartition et écologie de *Gomphus graslinii* (Odonata: Gomphidae) sur le Loire angevin: une étude pilote. *Martinia*, 332(2), 93-115.
- UICN France, MNHN, OPIE & SFO. (2016). *La Liste rouge des espèces menacées en France - Chapitre Libellules de France métropolitaine*. Paris.
- Union européenne. (1992). *Directive 92/43/CEE du Conseil du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages*. Journal officiel des Communautés européennes, L 206, 7–50.
- Wei, T., & Simko, V. (2024). *R package 'corrplot': Visualisation d'une matrice de corrélation (Version 0.95)*. Récupéré sur GitHub: <https://github.com/taiyun/corrplot>

ANNEXES

Annexe 1 – Liste et nomenclature des transects prospectés dans le cadre du « Suivi Odonates 2021 – 2025 »

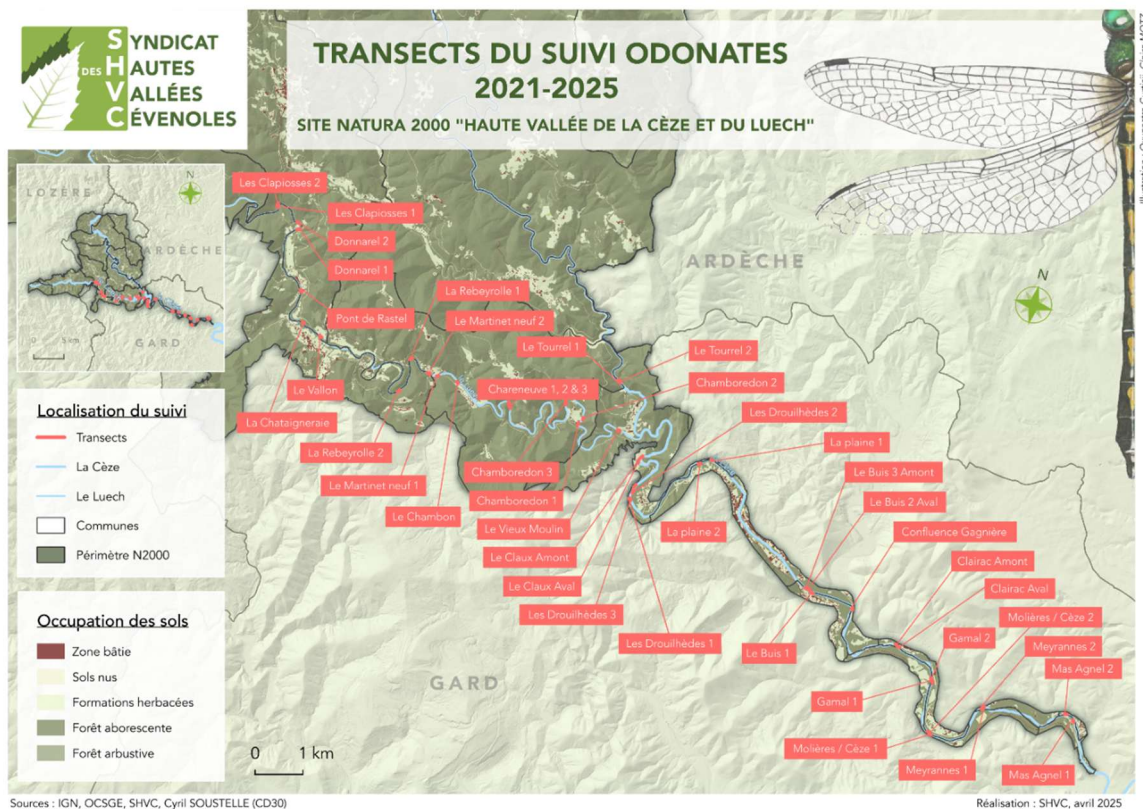
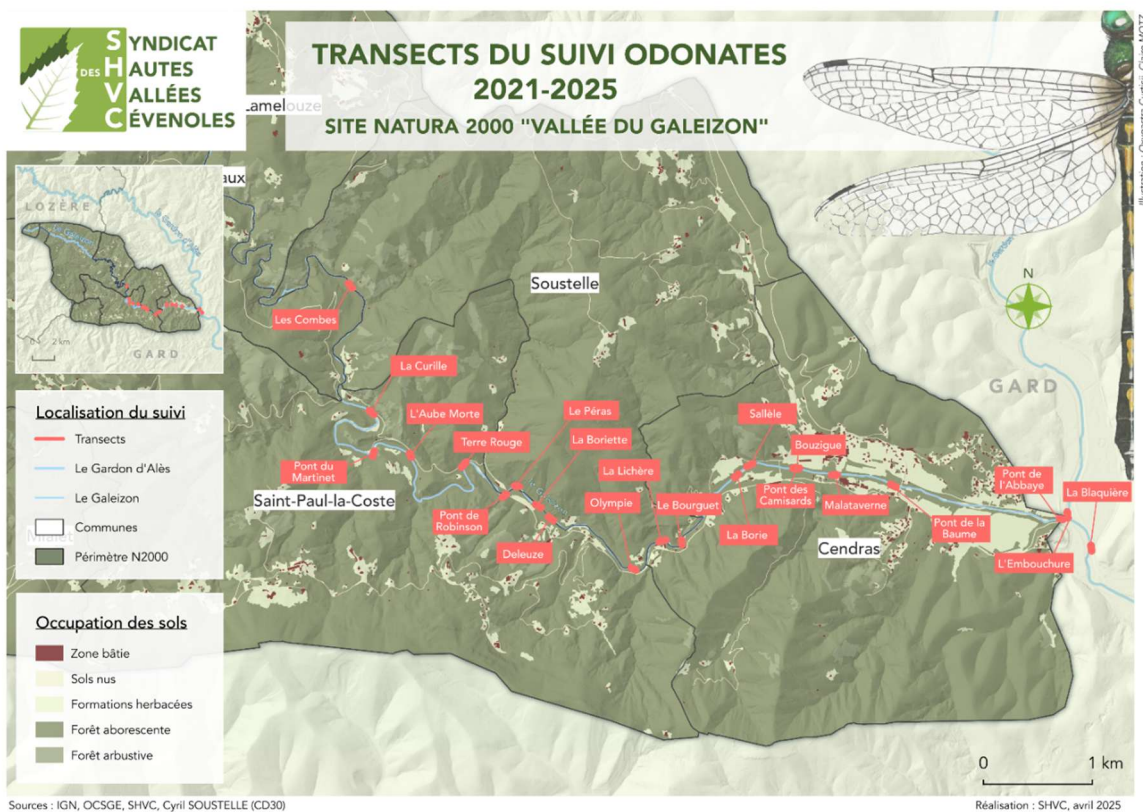
SITE NATURA 2000 Vallée du Galeizon

Secteur	N°	Nom transect	Code	Rive droite	Rive gauche	Début	Fin	Présence d'un seuil juste en aval	Commune
Secteur 1	1	La Blaquièrre	GALG01		X	871	872	Non	Saint Martin de Valgalgues
	2	L'Embouchure	GALD01	X		853	854	Non	Cendras
	3	Pont de l'Abbaye	GALG02	X		869	870	Non	Cendras
	4	Pont de la Baume	GALD02	X		867	868	Non	Cendras
	5	Malataverne	GALD03	X		825	826	Non	Cendras
	6	Pont des Camisards	GALD04	X		827	828	Non	Cendras
	7	Bouzigue	GALG03		X	829	830	Non	Cendras
	8	Sallèle	GALG04		X	864	865	Oui	Cendras
	9	La Borie	GALD05	X		875	876	Oui	Cendras
	10	Le Bourguet	GALG05		X	833	834	Non	Cendras
Secteur 2	11	La Lichère	GALG06		X	831	832	Non	Cendras
	12	Olimpie	GALG07		X	823	824	Non	Soustelle
	13	Deleuze	GALD06	X		845	846	Non	Saint Paul la Coste
	14	La Boriette	GALG08		X	843	844	Non	Soustelle
	15	Le Péras	GALG09		X	841	842	Non	Soustelle
	16	Pont de Robinson	GALD07	X		862	863	Non	Saint Paul la Coste
	17	Terre rouge	GALG10		X	860	861	Non	Saint Paul la Coste
	18	L'Aube morte	GALG11		X	821	822	Non	Saint Paul la Coste
	19	Pont du Martinet	GALD08	X		848	849	Non	Saint Paul la Coste
	20	La Curille	GALG12		X	873	874	Non	Saint Paul la Coste
	21	Les Combes	GALD09	X				Non	Soustelle

Secteur	N°	Nom transect	Code	Rive droite	Rive gauche	Début	Fin	Commune
Secteur 1	1	Mas Agnel 1	HCED01	X		1275	1276	Saint Ambroix
	2	Mas Agnel 2	HCEG01		X	1277	1278	Saint Brès
	3	Meyrannes 1	HCEG02		X	1282	1281	Meyrannes
	4	Meyrannes 2	HCED02	X		1279	1280	Meyrannes
	5	Molières/Cèze 1	HCED03	X		1283	1284	Molières sur Cèze
	6	Molières/Cèze 2	HCEG03		X	1285	1286	Meyrannes
	7	Gamal 1	HCED04	X		1288	1289	Molières sur Cèze
	8	Gamal 2	HCEG04		X	1290	1291	Meyrannes
	9	Clairac Aval	HCEG05		X	1293	1292	Meyrannes
	10	Clairac Amont	HCEG06		X	1294	1293	Meyrannes
	11	Confluence Gagnière	HCEG07		X	1296	1295	Bessèges
Secteur 2	12	Le Buis 1	HCED05	X		1297	1298	Robiac -Rochessadoules
	13	Le Buis 2 Aval	HCEG08		X	1300	1301	Bessèges
	14	Le Buis 3 Amont	HCEG09		X	1301	1302	Bessèges
	15	La plaine 1	HCEG10		X	1303	1304	Bordezac
	16	La plaine 2	HCED06	X		1305	1306	Bessèges
	17	Les Drouilhèdes 1	HCED07	X		1308	1307	Peyremale
	18	Les Drouilhèdes 2	HCEG11		X	1309	1310	Peyremale
	19	Les Drouilhèdes 3	HCED08	X		1312	1311	Peyremale
	20	Le Claux Aval	HCED09	X		1314	1313	Peyremale
	21	Le Claux Amont	HCED10	X		1316	1315	Peyremale
	22	Le Tourrel 1	HCED11	X		1318	1319	Chambon
	23	Le Tourrel 2	HCEG12		X	1317	1320	Peyremale

Secteur 3	24	Le Vieux Moulin	HCED12	X		239	238	Peyremale
	25	Chamboredon 1	HCED13	X		237	236	Chambon
	26	Chamboredon 2	HCEG13		X	235	234	Chambon
	27	Chamboredon 3 amont seuil	HCED14	X		245	244	Chambon
	28	Chareneuve 1	HCEG14		X	218	217	Chambon
	29	Chareneuve 2	HCED15	X		216	215	Chambon
	30	Chareneuve 3	HCEG15		X	214	213	Chambon
	31	Le Chambon Le palanquis	HCED16	X		209	208	Chambon
	32	Le Martinet neuf 1	HCED17	X		251	252	Chambon
	33	Le Martinet neuf 2	HCEG16		X	253	254	Chambon
Secteur 4	34	La Rebeyrolle 1	HCEG17		X	1330	1333	Chamborigaud
	35	La Rebeyrolle 2	HCED18	X		1331	1332	Chambon
	36	Le Vallon	HCEG18		X	1334	1335	Génolhac
	37	La Chataigneraie	HCEG19		X	1336	1337	Génolhac
	38	Pont de Rastel	HCEG20		X	1338	1339	Génolhac
	39	Donnarel 1	HCEG21	X		1322	1324	Génolhac
	40	Donnarel 2	HCED19		X	1325	1326	Chamborigaud
	41	Les Clapiosses 1	HCEG22		X	1327	1328	Génolhac
	42	Les Clapiosses 2	HCEG23		X	1328	1329	Génolhac

Annexe 2 – Localisation des transects du « Suivi des Odonates d'Intérêt communautaire 2021 – 2025 » sur les sites Natura 2000 « Vallée du Galeizon » et « Hautes Vallées de la Cèze et du Luech »

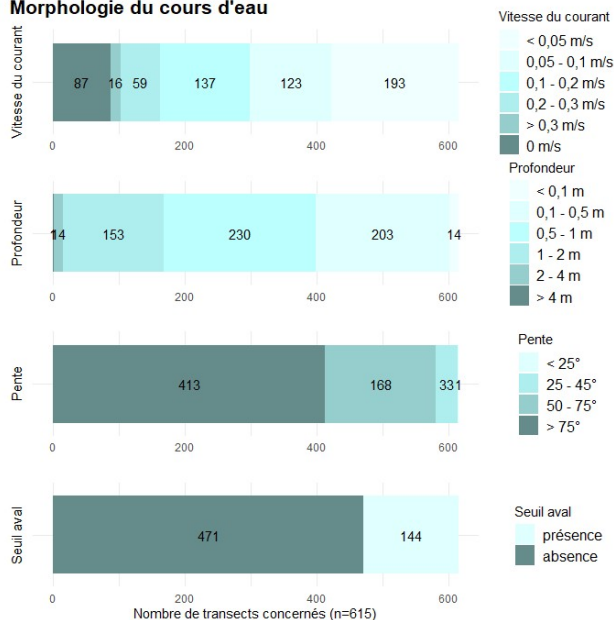


Annexe 3 – Fiche terrain du protocole « Suivi Odonates 2021 – 2025 » (Louboutin, *et al.*, 2016)

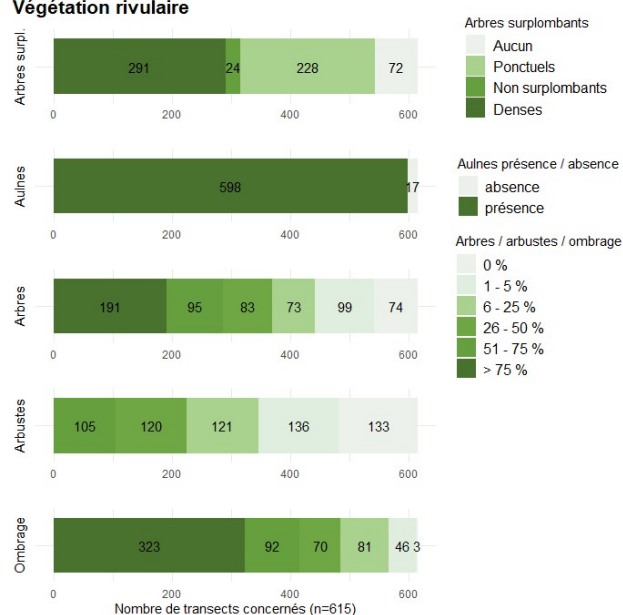
Fiche de Terrain (page 1/2) – Anisoptères Natura 2000 « Vallée du Galeizon »																																																																																																																		
<p>Rappel: Remplir 1 fiche par transect par passage.</p> <p>La description est ainsi répétée lors des 3 passages (1er juin-15 juin, 16 juin au 10 juillet & 11 juillet-31 juillet)</p> <p>Une placette correspond à 50 mètres linéaire de rive sur 5 m de large (2 m terrestres + 3 m aquatiques)</p>																																																																																																																		
Données générales																																																																																																																		
Secteur : 1 Transect : GALG01 Rive : <input type="checkbox"/> Droite, <input type="checkbox"/> Gauche. Lieu-dit : La Blaquière		Noms opérateurs : <input type="checkbox"/> AL <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> JP-R <input type="checkbox"/> C-S Notes : <input type="checkbox"/> AL <input type="checkbox"/> C-S. Observations : <input type="checkbox"/> AL <input type="checkbox"/> C-S. Notes : <input type="checkbox"/> JP-R <input type="checkbox"/> S. Observations : <input type="checkbox"/> JP-R <input type="checkbox"/> S.				Date : ___/___/___ Heure début : ___ H ___																																																																																																												
Conditions météo (du moment) : Vent inférieur à 20 Km/h : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Absence de pluie : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Température > 20°C : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Couverture nuageuse < 75% : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non					Météo de la veille (Peut-être vérifié à posteriori) : http://www.meteofrance.com/clim/at/meteo-date-passe Vent inférieur à 20 Km/h : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Absence de pluie : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Température > 20°C : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Couverture nuageuse < 75% : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non																																																																																																													
Paramètres descripteurs de la placette (cocher la case dominante)																																																																																																																		
Vitesse du courant (x secondes (avec un flotteur) pour 1 mètre à ~ 2 m du bord) : <input type="checkbox"/> nulle <input type="checkbox"/> 10 à 5 sec <input type="checkbox"/> > 20 sec <input type="checkbox"/> 5 à 3 sec <input type="checkbox"/> 20 à 10 sec <input type="checkbox"/> < 3 sec					Profondeur moyenne (Évaluée à plusieurs reprises à ~ 2 m du bord) : <input type="checkbox"/> assec <input type="checkbox"/> 1 à 2 m <input type="checkbox"/> < 10 cm <input type="checkbox"/> 2 à 4 m <input type="checkbox"/> 10 à 50 cm <input type="checkbox"/> > 4 m <input type="checkbox"/> 0,50 à 1 m																																																																																																													
Pente berge (terrestre) : <input type="checkbox"/> subnulle (pente < 25°) <input type="checkbox"/> forte (> 75°) <input type="checkbox"/> faible (25-45°) <input type="checkbox"/> plateau (nulle puis abrupte) <input type="checkbox"/> moyenne (50-75°)					Présence d'un seuil : <input type="checkbox"/> en amont <input type="checkbox"/> en aval <input type="checkbox"/> aucun Entretien régulier berge : <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non Type d'entretien visible : <input type="checkbox"/> fauche <input type="checkbox"/> tonte <input type="checkbox"/> élagage <input type="checkbox"/> coupe rase (abattage) <input type="checkbox"/> travaux prévention crue <input type="checkbox"/> RAS																																																																																																													
Type de berge : <input type="checkbox"/> plage <input type="checkbox"/> berge consolidée par des racines <input type="checkbox"/> enrochements <input type="checkbox"/> berge non consolidée par des racines <input type="checkbox"/> mur (pierre ou béton) <input type="checkbox"/> dalle rocheuse					Ligneux rivulaires surplombants (ombrage) : <input type="checkbox"/> aucun ligneux arborée <input type="checkbox"/> aucun ligneux arbustif <input type="checkbox"/> arborée surplombante dense <input type="checkbox"/> arbustive surplombante dense <input type="checkbox"/> arborée surplombante ponctuelle <input type="checkbox"/> arbustive surplombante ponctuelle <input type="checkbox"/> arborée non surplombante <input type="checkbox"/> arbustive non surplombante																																																																																																													
Végétation rivulaire (Jusqu'à 5 m du bord) (Cocher une case par ligne) (% estimé de surface)					% Substrat immergé (Cocher une case par ligne) (% estimé de surface)																																																																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>0 %</th> <th>1-5 %</th> <th>6-25 %</th> <th>26-50 %</th> <th>51-75 %</th> <th>> 75 %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sol nu</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Herbacées</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Arbustes (< 7 mètres)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Arbres (> 8 mètres)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aulnes</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						0 %	1-5 %	6-25 %	26-50 %	51-75 %	> 75 %	Sol nu							Herbacées							Arbustes (< 7 mètres)							Arbres (> 8 mètres)							Aulnes							<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>0 %</th> <th>1-5 %</th> <th>6-25 %</th> <th>26-50 %</th> <th>51-75 %</th> <th>> 75 %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Vases-Argiles-Limons</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sablo-limoneux (mixte)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sables (50µ - 2mm)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Graviers (2 mm à 5 cm)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Galets-Pierres (5 à 25 cm)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Blocs-Dalles (> 25 cm)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Chevelu racinaire ramifié d'Aulnes ou de Saules</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Débris organiques (feuilles...)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						0 %	1-5 %	6-25 %	26-50 %	51-75 %	> 75 %	Vases-Argiles-Limons							Sablo-limoneux (mixte)							Sables (50µ - 2mm)							Graviers (2 mm à 5 cm)							Galets-Pierres (5 à 25 cm)							Blocs-Dalles (> 25 cm)							Chevelu racinaire ramifié d'Aulnes ou de Saules							Débris organiques (feuilles...)						
	0 %	1-5 %	6-25 %	26-50 %	51-75 %	> 75 %																																																																																																												
Sol nu																																																																																																																		
Herbacées																																																																																																																		
Arbustes (< 7 mètres)																																																																																																																		
Arbres (> 8 mètres)																																																																																																																		
Aulnes																																																																																																																		
	0 %	1-5 %	6-25 %	26-50 %	51-75 %	> 75 %																																																																																																												
Vases-Argiles-Limons																																																																																																																		
Sablo-limoneux (mixte)																																																																																																																		
Sables (50µ - 2mm)																																																																																																																		
Graviers (2 mm à 5 cm)																																																																																																																		
Galets-Pierres (5 à 25 cm)																																																																																																																		
Blocs-Dalles (> 25 cm)																																																																																																																		
Chevelu racinaire ramifié d'Aulnes ou de Saules																																																																																																																		
Débris organiques (feuilles...)																																																																																																																		
% Ombrage de la rive à 2m (Cocher une case par ligne) (% estimé de surface)					Évaluation du Substrat/indice de confiance : <input type="checkbox"/> Bonne <input type="checkbox"/> Moyenne <input type="checkbox"/> Mauvaise <input type="checkbox"/> NE																																																																																																													
Pratique de la baignade : <input type="checkbox"/> nulle <input type="checkbox"/> moyenne <input type="checkbox"/> intense Turbidité : <input type="checkbox"/> limpide, <input type="checkbox"/> trouble, <input type="checkbox"/> eutrophisation, <input type="checkbox"/> rejet épurateur					Présence castor : <input type="checkbox"/> terrier <input type="checkbox"/> terrier hutte <input type="checkbox"/> refuge <input type="checkbox"/> castoréum <input type="checkbox"/> passage <input type="checkbox"/> RAS Présence loutre : <input type="checkbox"/> catiche <input type="checkbox"/> épreinte <input type="checkbox"/> reliefs repas <input type="checkbox"/> RAS Présence d'écrevisses : <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> RAS																																																																																																													
Remarques description :																																																																																																																		

Annexe 4 – Diagramme de distribution des variables environnementales dans les transects du « Suivi Odonates 2021 – 2025 »

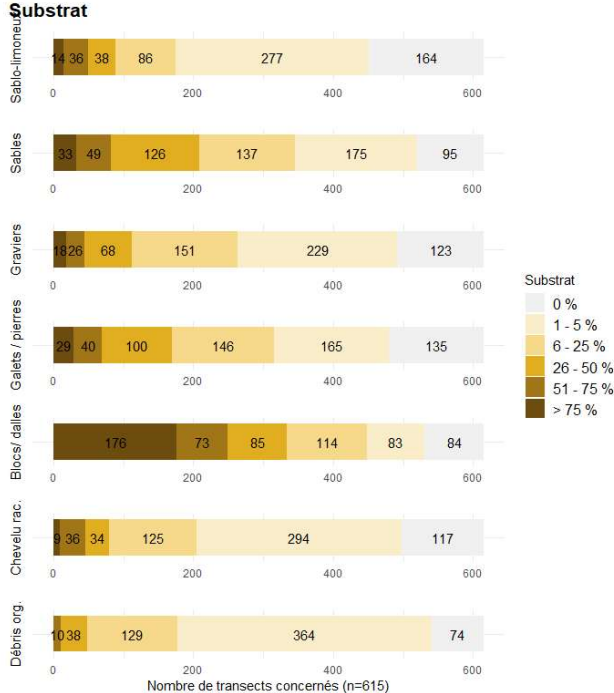
Morphologie du cours d'eau



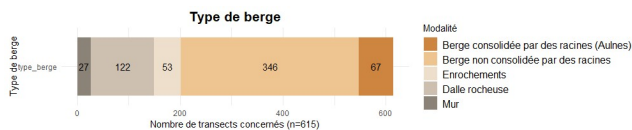
Végétation rivulaire



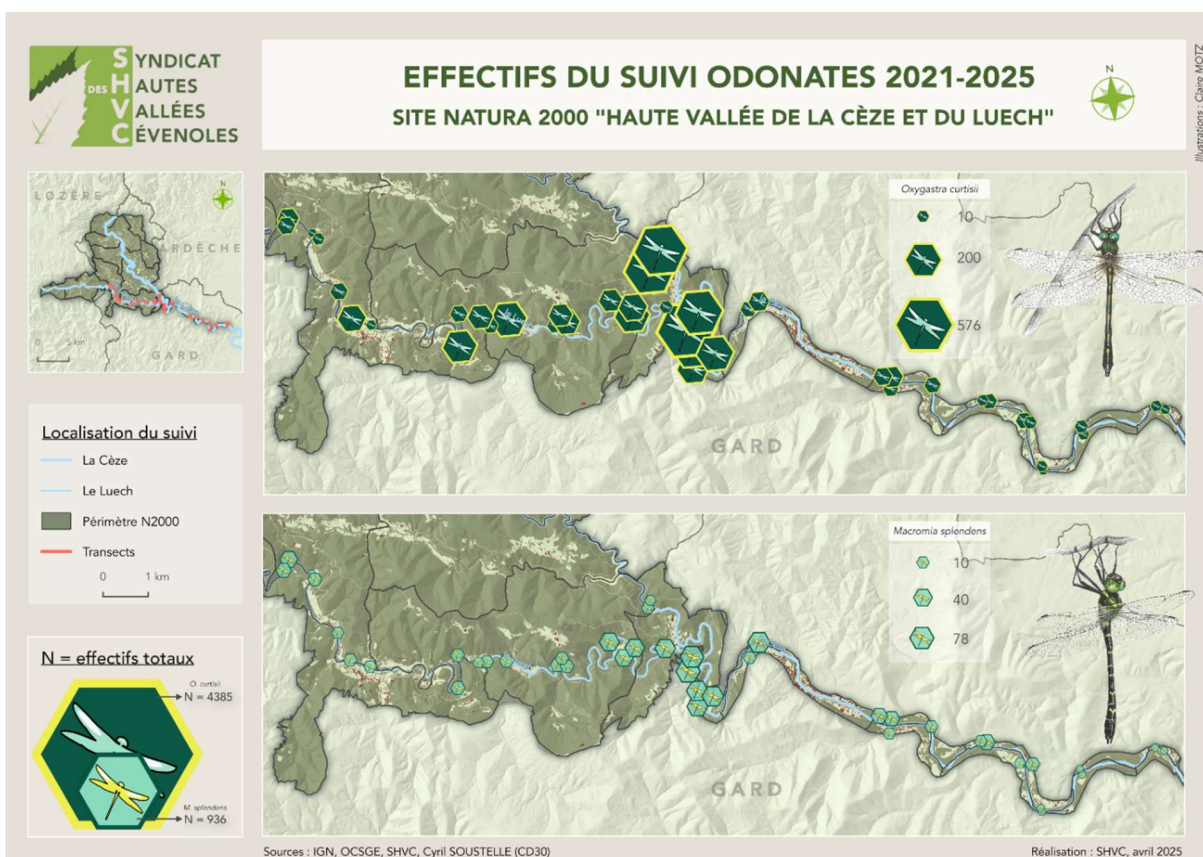
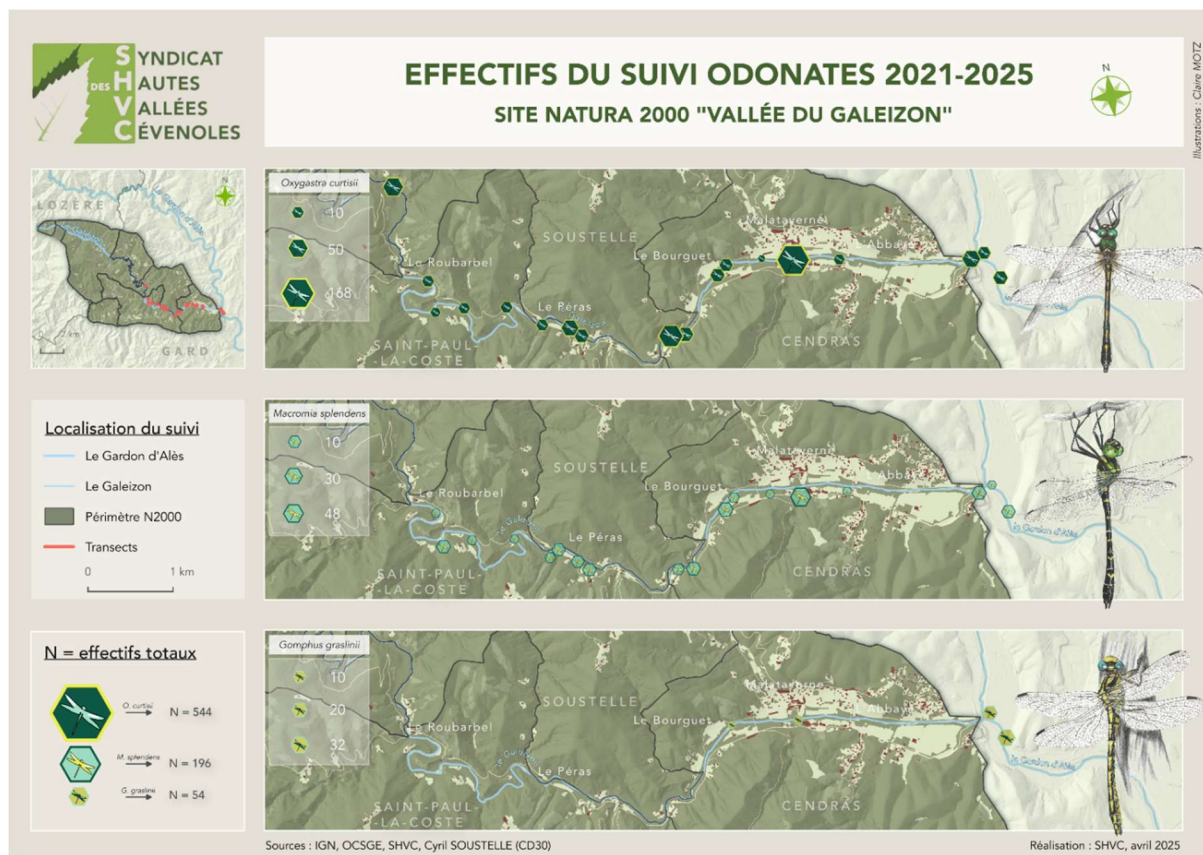
Substrat



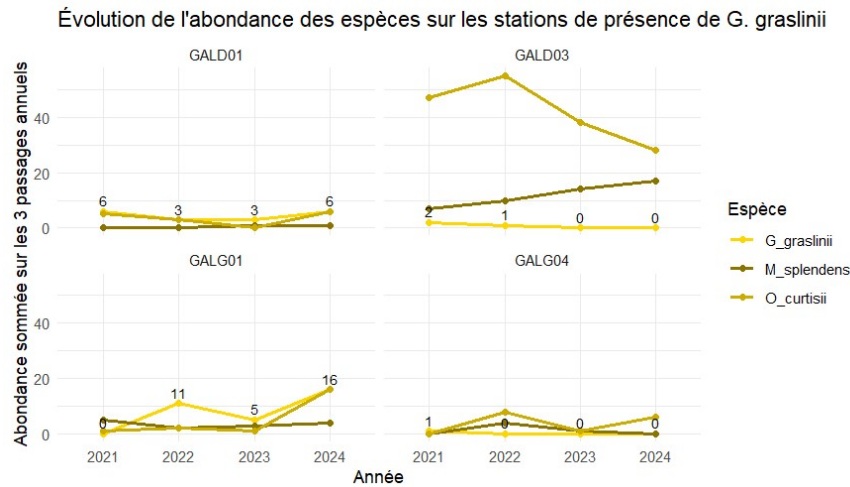
Type de berge



Annexe 5 – Cartes de répartition des effectifs d'*O. curtisii*, *M. splendens* et *G. graslinii* dans le cadre du « Suivi Odonates 2021 – 2025 »



Annexe 6 - Analyse des variations interannuelles et des réponses aux variables environnementales de *G. graslinii*



G. graslinii est observé au moins une fois sur quatre transects durant la période de suivi. Il est relevé de manière stable sur les transects GALD01 et GALG01, situés en marge du site Natura 2000 « Vallée du Galeizon », dans le Gardon d'Alès. Les effectifs y sont stables voire croissants. L'espèce a été observée en 2022 et 2023 dans le transect GALD03, à des effectifs très faibles (respectivement 2 et 1 exuvies). Une unique observation de *G. graslinii* est relevée dans le transect GALG04, en 2021.

Le faible nombre de sites et de relevés avec *G. graslinii* n'a pas permis de faire converger des modèles. Ainsi, l'étude de la réponse de *G. graslinii* aux variables environnementales a été menée par comparaison de la moyenne de chacune des variables environnementales dans les transects où l'espèce a été trouvée au moins une fois, à la moyenne de ces mêmes variables dans les transects où l'espèce est absente. Des tests de Wilcoxon ont été appliqués aux variables pour lesquelles le boxplot montrait une potentielle différence significative.

La quantité de graviers est significativement plus faible dans les transects de présence de *G. graslinii* (**moyenne en cas d'absence : 13,99 ; moyenne en cas de présence : 8,88 ; p-value = 5,6^{e-4}**). A l'inverse, la quantité de débris organiques est significativement plus élevée dans les transects de présence de *G. graslinii* qu'en cas d'absence (**moyenne en cas d'absence : 7,84 ; moyenne en cas de présence : 26,13 ; p-value = 5,6^{e-6}**). Les autres comparaisons ne fournissent pas de résultat significatif. Ces résultats ne sauraient être considérés comme des causalités, ils doivent être vus comme des corrélations. *G. graslinii* ayant une limite altitudinale plus faible qu'*O. curtisii* et *M. splendens*, il est probable que ce facteur prime.

Annexe 7 - Vérification des conditions d'application des modèles

Exemple du modèle « relation effectifs – habitat », *O. curtisii* en présence / absence :

Après avoir obtenu les meilleurs modèles, ici au nombre de 4, la colinéarité de chacun est vérifiée à l'aide de la fonction « check_collinearity » du package « performance » :

```
check_collinearity(mod_avg_1)
check_collinearity(mod_avg_2)
check_collinearity(mod_avg_3)
check_collinearity(mod_avg_4)
```

```
> check_collinearity(mod_avg_1)
# Check for Multicollinearity

Low Correlation
```

Term	VIF	VIF 95% CI	Increased SE	Tolerance	Tolerance 95% CI
arbres_quant1	1.09	[1.03, 1.25]	1.04	0.92	[0.80, 0.97]
galets_pierres_quant1	1.14	[1.07, 1.28]	1.07	0.88	[0.78, 0.94]
annee	1.21	[1.13, 1.36]	1.10	0.82	[0.74, 0.89]
riviere	1.26	[1.16, 1.40]	1.12	0.80	[0.71, 0.86]

```
High Correlation
```

Term	VIF	VIF 95% CI	Increased SE	Tolerance	Tolerance 95% CI
jour_julien	875.25	[749.76, 1021.78]	29.58	1.14e-03	[0.00, 0.00]
I(jour_julien^2)	878.49	[752.53, 1025.56]	29.64	1.14e-03	[0.00, 0.00]

```
> check_collinearity(mod_avg_2)
# Check for Multicollinearity

Low Correlation
```

Term	VIF	VIF 95% CI	Increased SE	Tolerance	Tolerance 95% CI
galets_pierres_quant1	1.12	[1.06, 1.27]	1.06	0.89	[0.79, 0.95]
I(vit_courant_quant1^2)	1.14	[1.07, 1.28]	1.07	0.88	[0.78, 0.94]
annee	1.21	[1.13, 1.36]	1.10	0.82	[0.74, 0.89]
riviere	1.17	[1.09, 1.31]	1.08	0.86	[0.76, 0.92]

```
High Correlation
```

Term	VIF	VIF 95% CI	Increased SE	Tolerance	Tolerance 95% CI
jour_julien	881.91	[755.46, 1029.55]	29.70	1.13e-03	[0.00, 0.00]
I(jour_julien^2)	886.44	[759.34, 1034.84]	29.77	1.13e-03	[0.00, 0.00]

```
> check_collinearity(mod_avg_3)
# Check for Multicollinearity

Low Correlation
```

Term	VIF	VIF 95% CI	Increased SE	Tolerance	Tolerance 95% CI
galets_pierres_quant1	1.12	[1.06, 1.27]	1.06	0.89	[0.79, 0.95]
vit_courant_quant1	1.21	[1.13, 1.36]	1.10	0.82	[0.74, 0.89]
annee	1.22	[1.13, 1.37]	1.11	0.82	[0.73, 0.88]
riviere	1.17	[1.09, 1.31]	1.08	0.85	[0.76, 0.91]

```
High Correlation
```

Term	VIF	VIF 95% CI	Increased SE	Tolerance	Tolerance 95% CI
jour_julien	885.18	[758.26, 1033.36]	29.75	1.13e-03	[0.00, 0.00]
I(jour_julien^2)	890.46	[762.79, 1039.54]	29.84	1.12e-03	[0.00, 0.00]

```
> check_collinearity(mod_avg_4)
# Check for Multicollinearity

Low Correlation
```

Term	VIF	VIF 95% CI	Increased SE	Tolerance	Tolerance 95% CI
arbres_quant1	1.09	[1.03, 1.25]	1.04	0.92	[0.80, 0.97]
I(vit_courant_quant1^2)	1.13	[1.06, 1.28]	1.06	0.88	[0.78, 0.94]
annee	1.25	[1.16, 1.40]	1.12	0.80	[0.71, 0.86]
riviere	1.12	[1.06, 1.27]	1.06	0.89	[0.79, 0.95]

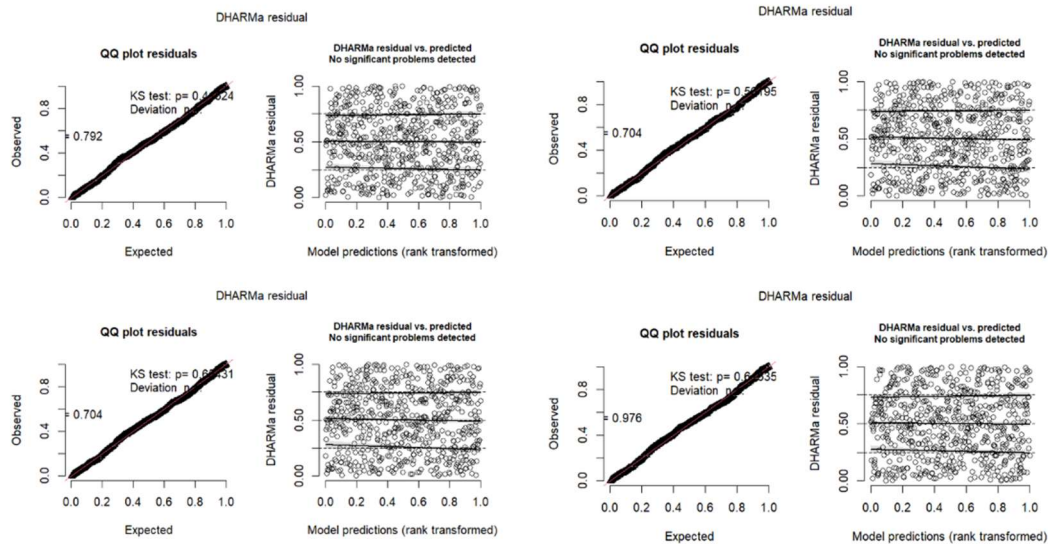
```
High Correlation
```

Term	VIF	VIF 95% CI	Increased SE	Tolerance	Tolerance 95% CI
jour_julien	879.93	[753.77, 1027.24]	29.66	1.14e-03	[0.00, 0.00]
I(jour_julien^2)	884.47	[757.66, 1032.54]	29.74	1.13e-03	[0.00, 0.00]

Ici, les vifs sont mauvais pour « jour_julien » et « jour_julien² », ce qui est cohérent avec la manière dont « jour_julien² » est créé, ainsi cela ne pose pas problème. Les autres variables rentrent dans les conditions d'application d'un modèle linéaire généralisé : aucun vif n'est supérieur à 5 et la moyenne des vifs est inférieure à 2.

L'homoscédasticité des résidus est vérifiée par la visualisation de la simulation de résidus, issue du package « DHARMA » :

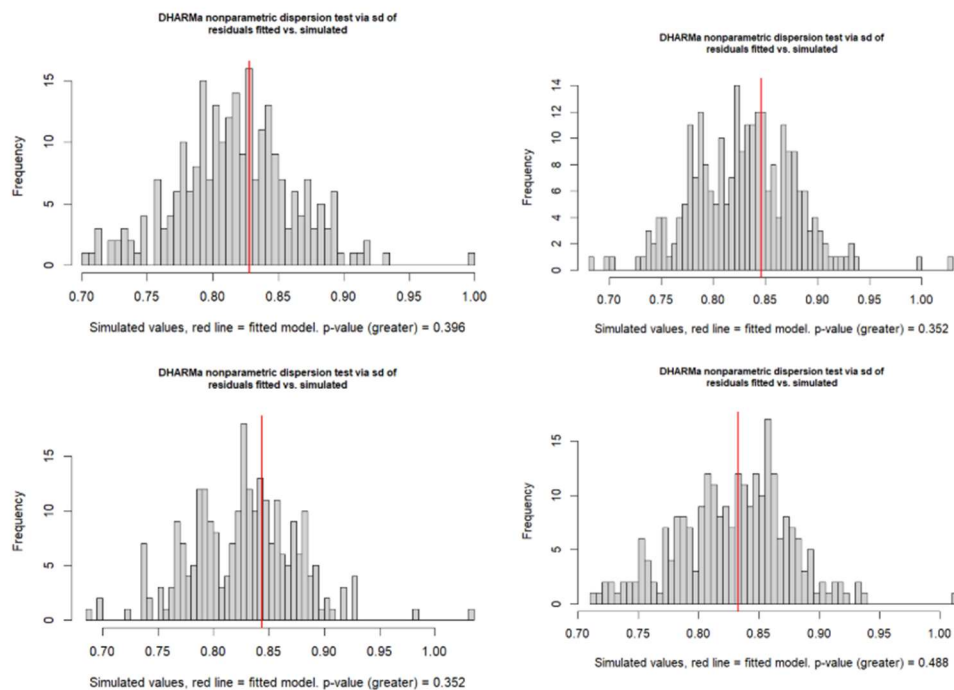
```
simulationOutput1 <- simulateResiduals(fittedModel = mod_avg_1, plot=T)
simulationOutput2 <- simulateResiduals(fittedModel = mod_avg_2, plot=T)
simulationOutput3 <- simulateResiduals(fittedModel = mod_avg_3, plot=T)
simulationOutput4 <- simulateResiduals(fittedModel = mod_avg_4, plot=T)
```

Pour chacun des meilleurs modèles, le QQ plot montre une adéquation des résidus à la droite de Henry, et le second graphique montre des résidus répartis selon « une belle nuit étoilée d'été », sans pattern particulier. L'homoscédasticité des résidus est respectée.

Enfin, la dispersion est testée avec la fonction « testDispersion » du package « DHARMA » :

```
testDispersion(simulationOutput1, alternative="greater")
testDispersion(simulationOutput2, alternative="greater")
testDispersion(simulationOutput3, alternative="greater")
testDispersion(simulationOutput4, alternative="greater")
```



Les p-values sont supérieurs à 0,05, donc le résultat des tests est non significatif. Ainsi, la dispersion de chacun des meilleurs modèles n'est pas significativement supérieure à 1,5.

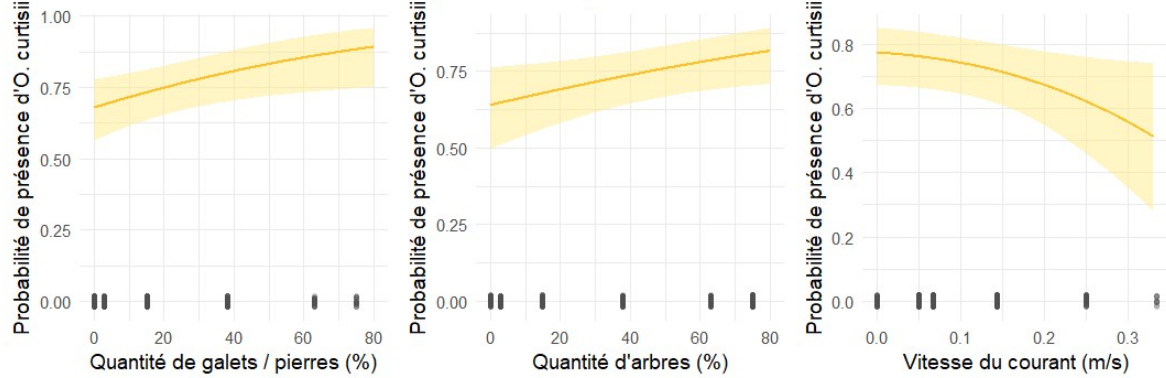
Toutes les conditions d'application sont respectées pour ces meilleurs modèles, leurs effets peuvent donc être étudiés.

Annexe 8– Résultats des effets des variables environnementales au sein de la modélisation de la relation espèce – habitat

- *O. curtisii*

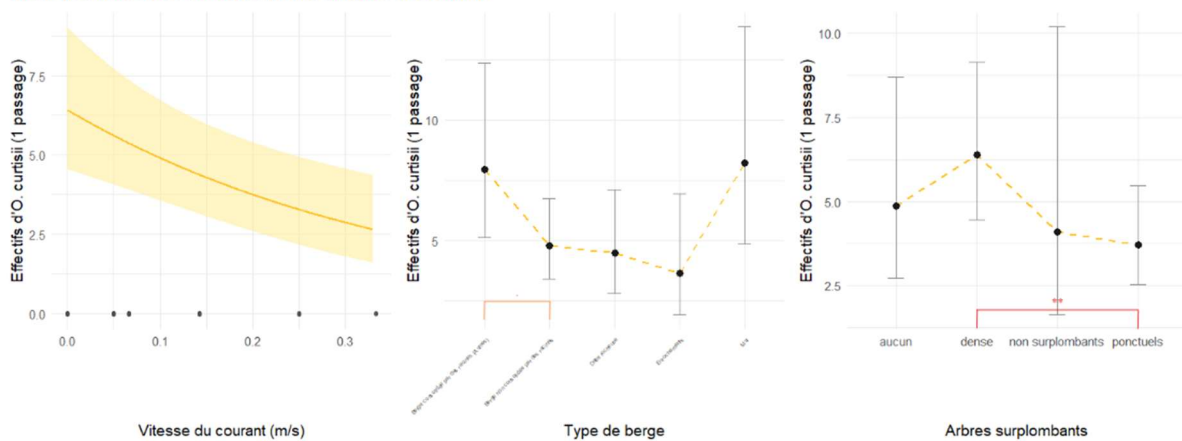
• *Modèle en présence / absence*

Effets des meilleures variables sur la probabilité de présence d'*O. curtisii*



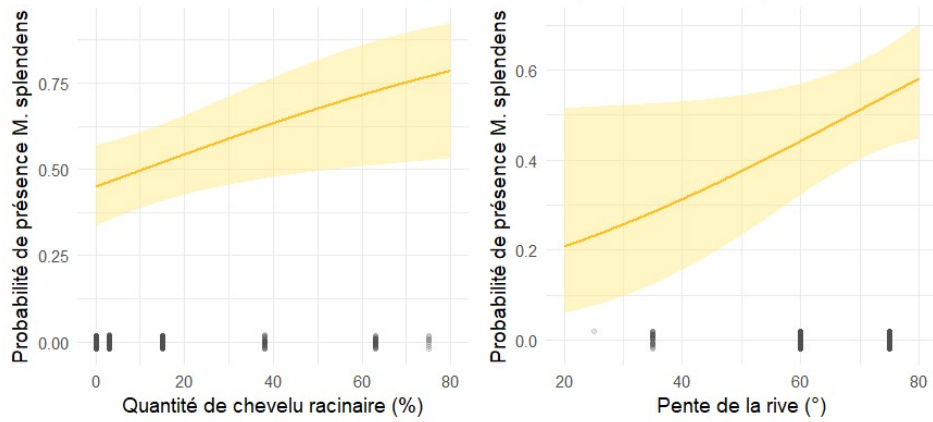
• *Modèle en abondance*

Effets des meilleures variables sur les effectifs d'*O. curtisii*



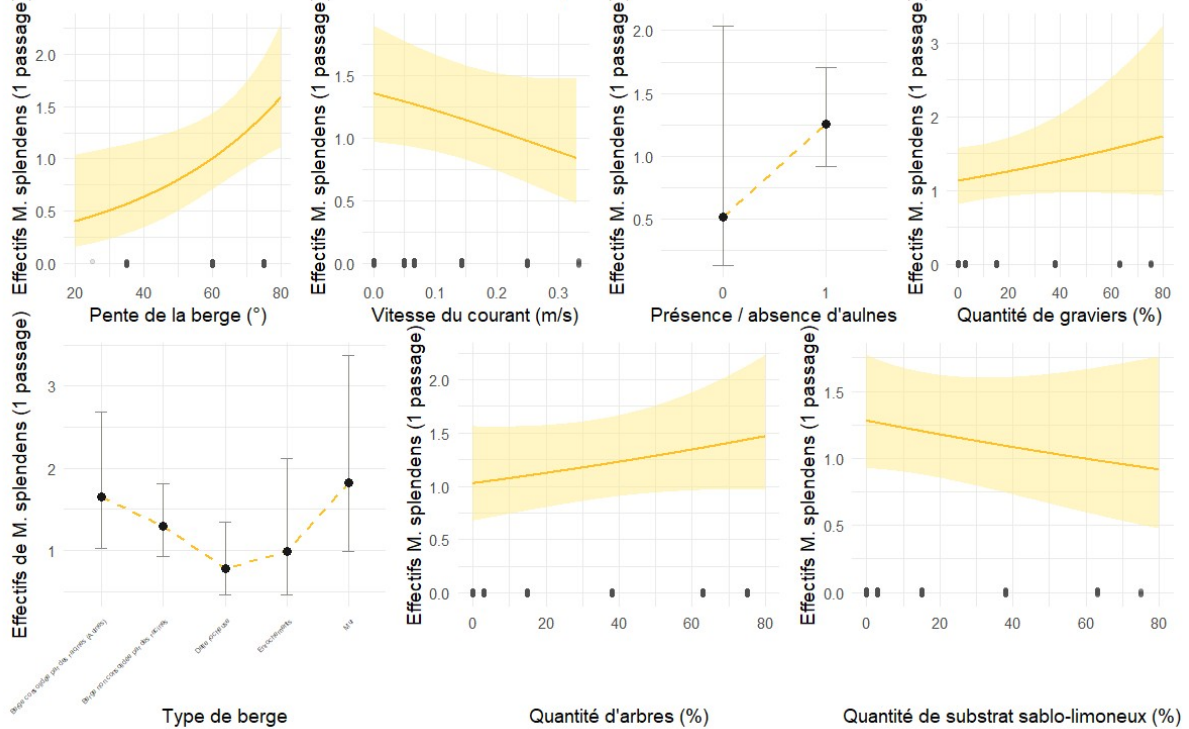
- *M. splendens*
- *Modèle en présence / absence*

Effets des meilleures variables sur la probabilité de présence de *M. splendens*



- *Modèle en abondance*

Effets des meilleures variables sur les effectifs de *M. splendens*



Annexe 9 - Analyse multivariée

L'analyse multivariée menée explique 35 % de la variance du jeu de données (Figure annexe 9). L'axe principal reflète la ripisylve, tandis que le second se rapporte au substrat et à la force de la pente.

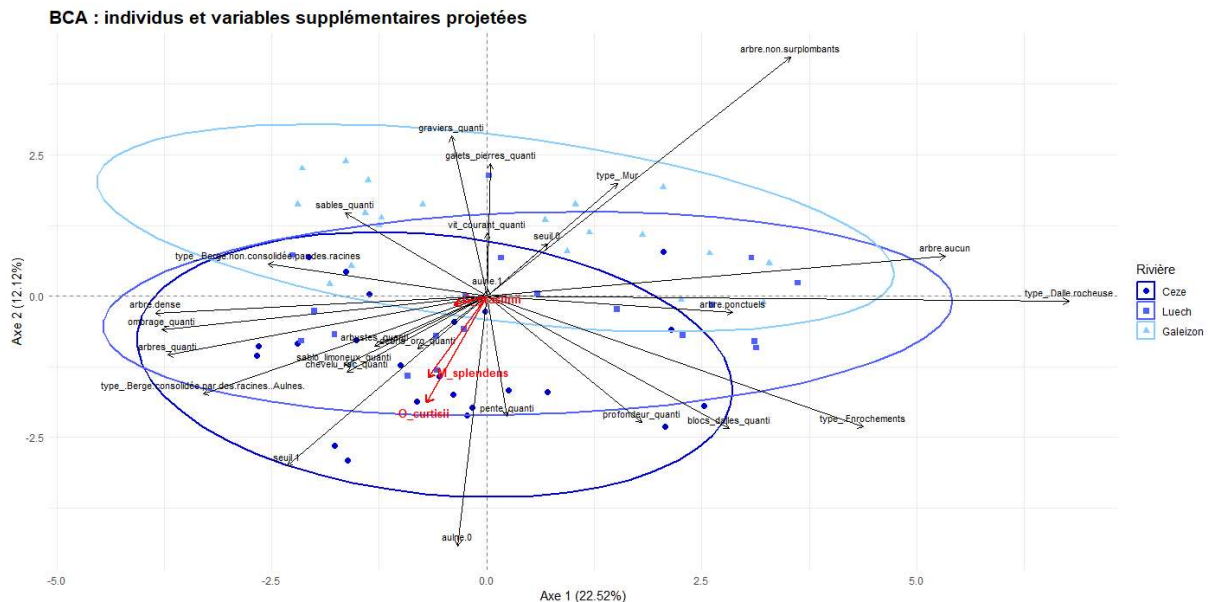


Figure annexe 9. Analyse multivariée : Between-group Composants Analysis appliquée sur une analyse de Hill-Smith

Il ressort de cette analyse que la Cèze et le Galeizon sont des milieux assez différents, le Luech se situant entre-deux. Le Galeizon est moins profond donc plus rapide que la Cèze, impliquant l'abondance de sédiments plus fins et l'absence de matière organique. La Cèze ne présente que des transects arborés, et est plus riche en chevelu racinaire. La pente de la berge y est plus forte.

Les effectifs des trois espèces, passés en variables supplémentaires, sont corrélés pour *O. curtisii* et *M. splendens* ; elles sont donc trouvées dans des milieux similaires, avec les effectifs les plus forts dans la Cèze. *G. graslinii*, au milieu du graphique, ne semble que très peu influencée par les variables portées par ces deux axes. Il y a donc d'autres facteurs qui expliquent son abondance. La taille des flèches des variables supplémentaires ne peut être comparée à la taille des flèches des variables environnementales, car ces dernières ont été multipliées par un facteur 5 pour plus de lisibilité.

Annexe 10 – Graphique phénologique de *G. graslinii*

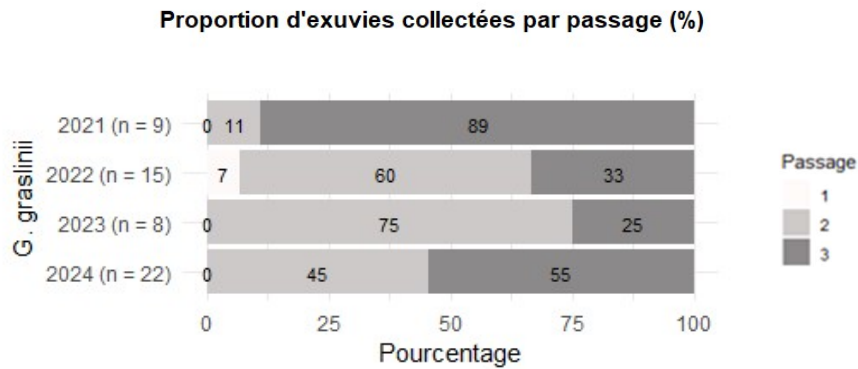


Figure annexe 10. Graphique phénologique de *G. graslinii* : proportion d'exuvies récoltées par période de prospection

G. graslinii, présent uniquement dans le Galeizon, est majoritairement collecté lors des secondes et troisièmes périodes de prospection (Figure annexe 10).

RESUME

Ce stage s'inscrit dans le cadre du dispositif Natura 2000 et du Plan National d'Actions en faveur des Odonates, avec un focus particulier sur le suivi de trois espèces d'intérêt communautaire : *Oxygastra curtisii*, *Macromia splendens* et *Gomphus graslinii*. L'objectif principal était d'améliorer la connaissance de leur répartition, de leur abondance et des facteurs environnementaux influençant leur présence, à travers un protocole standardisé de collecte d'exuvies mis en place au sein de deux sites Natura 2000. Le travail a consisté à compiler et harmoniser plusieurs années de données, puis à mettre en place des traitements statistiques permettant d'analyser la dynamique des populations. Des modèles mixtes généralisés (GLMM) ont été mobilisés afin de relier la présence/absence et l'abondance des espèces à des variables environnementales (substrat, végétation, conditions hydromorphologiques). Les résultats mettent en évidence des tendances relativement stables des populations et des préférences écologiques différenciées selon les espèces, confirmant l'importance de la diversité des micro-habitats rivulaires pour leur maintien. Ce stage a également permis de souligner l'importance de protocoles standardisés et de séries temporelles longues pour mieux appréhender les tendances démographiques.

ABSTRACT

This internship was carried out within the Natura 2000 system and the framework of the National Action Plan for Odonates, with a particular focus on monitoring three species of community interest: *Oxygastra curtisii*, *Macromia splendens*, and *Gomphus graslinii*. The main objective was to improve knowledge of their distribution, abundance, and the environmental factors influencing their presence, through a standardized exuviae collection protocol implemented on two Natura 2000 sites. The work involved compiling and harmonizing several years of data, followed by statistical analyses to assess population dynamics. Generalized Linear Mixed Models (GLMMs) were used to link species presence/absence and abundance to environmental variables (substrate, vegetation, hydromorphological conditions). The results revealed relatively stable population trends and species-specific ecological preferences, confirming the importance of riparian microhabitat diversity for their persistence. This internship also highlighted the importance of standardized protocols and long-term time series in order to better understand demographic trends.