

Crues du lac de Neuchâtel

Effet de la crue de l'été 2021 sur des populations d'Inule de Suisse (*Inula helvetica* Weber)



Inule de Suisse (Inula helvetica Weber) (@ Association de la Grande Cariçaie / Sophie Giriens) et crue lacustre de l'été 2021 dans la réserve naturelle de Cheyres (@ Association de la Grande Cariçaie).



Association de la Grande Cariçaie
Chemin de la Cariçaie 3
1400 Cheseaux-Noréaz
Suisse

T +41 24 425 18 88
info@grande-cariçaie.ch
www.grande-cariçaie.ch

Christian Clerc, collaborateur scientifique
Christophe Sahli, collaborateur scientifique

28 mars 2025

Table des matières

1	Introduction	4
2	Contexte et objectifs de l'étude	5
3	L'Inule de Suisse (<i>Inula helvetica</i> Weber).....	7
3.1	Ecologie.....	7
3.2	Distribution.....	8
3.3	Protection	8
3.4	L'Inule de Suisse dans le périmètre statutaire de l'AGC	8
4	La crue de l'été 2021	9
5	Méthodes.....	10
5.1	Calcul de l'altitude moyenne	11
5.2	Échantillonnage	11
5.3	Dénombrement des populations après la crue de l'été 2021	12
5.4	Analyse de l'effet de la crue de l'été 2021	12
5.4.1	<i>Modèle binomial d'altitudes.....</i>	<i>12</i>
5.4.2	<i>Modèle binomial de jours d'inondation</i>	<i>12</i>
5.4.3	<i>Modèles log-linéaires sur les différences de classes de dénombrements.....</i>	<i>12</i>
5.4.4	<i>Calcul d'une valeur théorique de variable en fonction d'une valeur seuil de probabilité du modèle</i>	<i>13</i>
6	Résultats.....	13
6.1	Altitude moyenne des mailles	13
6.2	Échantillonnage	14
6.3	Dénombrement des populations après la crue de l'été 2021	14
6.4	Analyse de l'effet de la crue de l'été 2021	15
6.4.1	<i>Différence de dénombrements.....</i>	<i>15</i>
6.4.2	<i>Différences de dénombrements en fonction de l'altitude moyenne de la maille</i>	<i>17</i>
6.4.3	<i>Différences de dénombrements en fonction du nombre de jours d'inondation</i>	<i>18</i>
7	Discussion.....	19
8	Conclusion	22

Annexes

- ANNEXE 1** **Caractéristiques des différents échantillonnages envisagés**
- ANNEXE 2** **Formules R des modèles statistiques utilisés**
- ANNEXE 3** **Comparaison de la distribution des classes de dénombrements initiales en fonction des altitudes moyennes des mailles**
- ANNEXE 4** **Caractéristiques des 80 mailles de l'échantillon servant à évaluer l'effet de la crue de l'été 2021 sur les populations d'Inule de Suisse**

1 INTRODUCTION

La Rive sud du lac de Neuchâtel abrite un ensemble discontinu de sites naturels marécageux communément appelé « Grande Cariçaie » composé de hauts-fonds lacustres, de marais non-boisés et de forêts alluviales. La haute valeur naturelle de cet ensemble a conduit, dès la fin des années 1960, à la création des premières réserves naturelles pour quatre de ses sites. A partir de la deuxième moitié des années 1970, tout ou partie de cet ensemble a été inscrit dans plusieurs inventaires d'objets naturels d'importance nationale et internationale. Ces inscriptions, et le cadre légal qui les a accompagnées, a abouti à la création de nouvelles réserves naturelles au début des années 2000. La Grande Cariçaie abrite aujourd'hui neuf réserves naturelles, chacune au bénéfice d'un règlement adapté, chevauchant les cantons de Berne, Fribourg, Neuchâtel et Vaud,

Dès le début des années 1980 une gestion conservatoire des marais non-boisés fribourgeois et vaudois de la Grande Cariçaie a été mise en place. Afin d'officialiser et de structurer le rôle des partenaires de cette gestion, l'Association de la Grande Cariçaie (AGC, <https://grande-caricaie.ch>) a été créée en 2010. Elle regroupe des représentants des cantons de Fribourg, Neuchâtel et Vaud, des communes riveraines, des ONG impliquées dans la protection de la nature ainsi que quelques propriétaires privés. Ses statuts fixent les buts poursuivis et le périmètre dans lequel s'exercent ses activités. Ce périmètre couvre 3'696 hectares qui, pour l'essentiel, sont propriété des cantons de Fribourg, Neuchâtel et Vaud. Il englobe les neuf réserves naturelles ainsi qu'une zone protégée à son extrémité sud-ouest. Le canton de Berne n'étant pas membre de l'association, seules huit des neuf réserves naturelles sont placées sous la responsabilité de l'association (Figure 1).

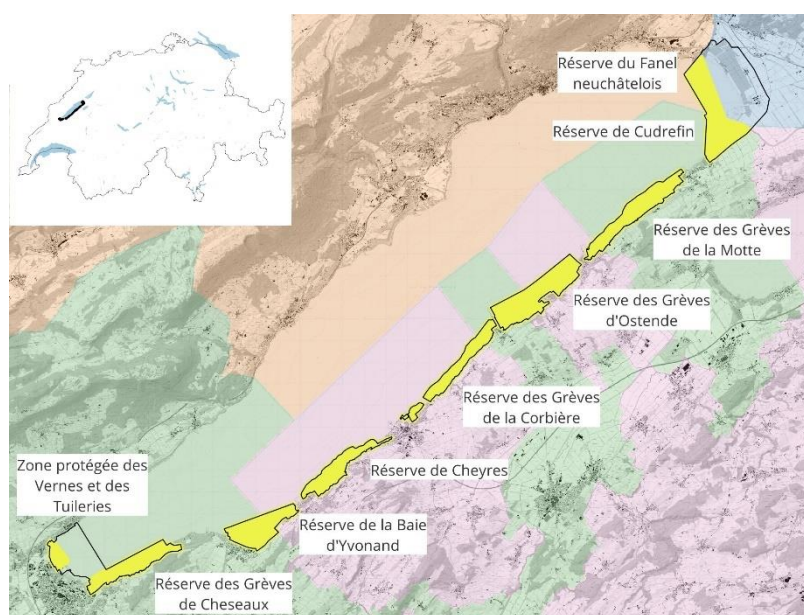


Figure 1 : En noir : périmètre statuaire de l'Association de la Grande Cariçaie sur la rive sud du lac de Neuchâtel. En jaune : périmètre des de la zone protégée et des huit réserves naturelles placées sous la responsabilité de l'AGC. En bleu : canton de Berne. En mauve : canton de Fribourg. En orange : canton de Neuchâtel. En vert : canton de Vaud.

Dirigée par un Comité directeur (CDir), l'AGC collabore avec le Groupe surveillance des rives en matière de respect des mesures légales de protection et avec la Commission paritaire consultative qui représente les usagers et groupements d'intérêts dans les réserves naturelles et leur proximité.

En matière scientifique, l'AGC s'appuie sur une Commission scientifique (CSc) qui valide les études scientifiques qui lui sont soumises ou propose et définit les études à mener dans le périmètre statutaire de l'AGC.

L'AGC confie l'essentiel de ses tâches opérationnelles à son Bureau exécutif (BEx). Le BEx assure l'administration de l'association et la coordination et l'animation des partenaires et groupes impliqués dans la gestion conservatoire du périmètre statutaire de l'AGC. Le BEx rédige et met à jour régulièrement le plan de gestion de la Grande Cariçaie (PG-AGC), document faîtière des activités de l'AGC qui définit les objectifs conservatoires à poursuivre, les actions à mener pour les concrétiser ainsi que le programme de leur application et les besoins financiers nécessaires à sa concrétisation. Le PG-AGC catégorise ses objectifs et ses actions selon cinq domaines principaux qui sont la « *Connaissance du site* », l'« *Entretien des milieux naturels* », l'« *Information et l'accueil du public* », l'« *Organisation et le fonctionnement de l'AGC* » et la « *Protection du site* », chacun de ces domaines se déclinant en plusieurs thèmes.

Dans le domaine de la « *Connaissance du site* », le thème « *C-EE – Ecologie des espèces* » du PG-AGC pour la période 2025-2028 prévoit l'action « *C-EE-FLO - Etude de l'écologie des espèces végétales* ». Cette action vise à motiver ou mener toute étude qui permettrait de mieux connaître les espèces présentes dans le périmètre statutaire de l'AGC. Ces études peuvent concerner des domaines aussi variés que la physiologie des espèces, leur cycle de vie, les liens qui les rattachent aux milieux naturels qui les abritent ou encore leur sensibilité à des facteurs physico-chimiques (air, sol, eau).

Ce rapport s'inscrit dans cette perspective, en rendant compte de l'effet de la crue exceptionnelle du lac de Neuchâtel en été 2021 sur les populations d'Inule de Suisse (*Inula helvetica* Weber), espèce végétale de priorité élevée au niveau national et au niveau du périmètre statutaire de l'AGC. Les résultats présentés s'ajoutent à ceux publiés dans ce même domaine d'évaluation pour la Violette des marécages (*Viola persicifolia* auct.) (Clerc 2017), autre espèce végétale de priorité élevée au niveau de ces périmètres.

2 CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

En marge de la gestion conservatoire réalisée par l'AGC dans son périmètre statutaire, des phénomènes naturels agissent continuellement sur les espèces et les milieux naturels et sont susceptibles d'en faire varier la distribution géographique. Parmi ces phénomènes, les crues du lac de Neuchâtel apparaissent comme les plus spectaculaires et leurs effets sont peu documentés. Ces crues étant difficilement prévisibles, l'évaluation de leurs effets reste délicate, l'AGC ne disposant pas toujours de données décrivant dans le détail l'état de la flore et de la faune avant la montée des eaux, ni des disponibilités nécessaires à l'observation scientifique de leurs effets après les pics de crue.

La crue du lac de Neuchâtel de l'été 2021, la plus spectaculaire depuis la fin des travaux de la 2^{ème} Correction des Eaux du Jura réalisés entre 1962 et 1973, offrait à l'AGC l'opportunité de mettre à l'épreuve sa capacité à évaluer les effets de ce phénomène exceptionnel. Le déclencheur de cette mise à l'épreuve a été l'observation, dans une lisière de la réserve naturelle de Cudrefin en juin 2022, de la présence de plusieurs centaines de tiges sèches d'Inule de Suisse (*Inula helvetica* Weber) et de l'absence totale de tiges de l'année sur une station pourtant connue pour abriter une colonie dense de l'espèce (Figure 2). Il semblait à priori possible que cette disparition soit la conséquence de l'inondation du site par la crue, l'altitude du site abritant la population disparue étant supposée plus basse que les niveaux d'eau atteints par la crue.



Figure 2 : En haut : crue du lac de Neuchâtel en été 2021. A gauche : marais inondés dans la réserve naturelle de Cheyres. A droite : prairie à Choin (*Schoenus* sp.) inondée dans la réserve naturelle des Grèves de la Motte (@ Association de la Grande Cariçaie). En bas à gauche : l'Inule de Suisse (*Inula helvetica* Weber) (@ Association de la Grande Cariçaie / Sophie Giriens). En bas à droite : périmètre, en noir, de la réserve naturelle de Cudrefin et site, en rouge, abritant une station de l'espèce où seules des tiges sèches ont été observées en juin 2022.

L'AGC a porté l'Inule de Suisse au rang d'espèce prioritaire au niveau de son périmètre statuaire, la liste des taxons prioritaires sélectionnés figurant dans les PG-AGC établis successivement pour les périodes 2012-2019 et 2020-2024. Cette liste comprend les 67 taxons dont la présence a été signalée dans ce périmètre et qui ont été désignés comme prioritaires au niveau national selon les listes de taxons produites par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV, 2019). Ils ont été classés en 2 catégories de priorité au niveau du périmètre statuaire de l'AGC, soit 20 taxons classés en priorité élevée et 47 taxons classés en priorité faible.

Le statut d'espèce prioritaire oblige l'AGC à prêter une attention particulière aux espèces bénéficiant de ce statut, tant au niveau de leur connaissance (taxonomie, inventaire, écologie, évolution des populations) que de leur conservation. Le PG-AGC pour la période 2025-2028 prévoit à cet effet l'action de connaissance « C-SP-VEP - Monitoring des espèces végétales ». Pour appliquer cette action, l'AGC a développé un ensemble de modules dont l'un est consacré aux espèces prioritaires. Son détail est présenté dans le Chapitre 5 de ce rapport. Ce module vise, dans chaque maille d'un réseau régulier couvrant le périmètre statuaire de l'AGC, à relever en présence/absence les espèces classées de priorité faible et à dénombrer les populations des espèces classées de priorité élevée. Il a été appliqué aux surfaces terrestres du périmètre statuaire de l'AGC de 2014 à 2024 après une année test en 2013. Un rapport intermédiaire des résultats obtenus a été publié en 2023 (Clerc et Manzocchi 2023).

L'Inule de Suisse ayant d'abord été classée en priorité faible dans le PG-AGC pour la période 2012-2019 pour être ensuite classée en priorité élevée dans ce plan pour la période 2020-2024, les données récoltées entre 2014 et 2024 mélangeaient donc des données de présence/absence et des données de dénombrement. Les données de dénombrement récoltées avant la crue de l'été 2021 offraient cependant l'opportunité qu'elles soient exploitées pour évaluer les effets de cette crue sur les populations de l'espèce. A cet effet, le module dédié aux espèces végétales prioritaires a été reconduit en 2022, soit une année après la crue, sur un échantillon de mailles limité à celles abritant les plus importantes populations de l'espèce. Les données obtenues ont été comparées à

celles obtenues avant la crue de l'été 2021 et le résultat de cette comparaison a fait l'objet d'un premier rapport (Clerc 2023) présenté à la CSc lors de sa séance annuelle du 15 juin 2023. Une corrélation significative entre la différence des dénombrements réalisés avant et après la crue et l'altitude des stations, soit indirectement leur durée d'inondation, est mise en évidence dans ce rapport.

Au terme de la séance du 15 juin 2023, la CSc souhaitait que l'AGC complète cette première étude en procédant à un échantillonnage de mailles représentatif de la diversité de leur altitude et des populations d'Inule de Suisse qu'elles abritent. Les résultats des dénombrements à réaliser sur cet échantillon devaient permettre de réévaluer la corrélation mise en évidence dans la première étude et, si cette corrélation devait être confirmée, de préciser les seuils altitudinaux qui la caractérisent. Ce rapport présente les résultats de cette nouvelle étude menée durant les étés 2023 et 2024.

3 L'INULE DE SUISSE (*Inula helvetica* Weber)

L'Inule de Suisse est une plante hémicryptophyte vivace appartenant à la famille des Astéracées. Elle mesure entre 0.5 et 1.5 m et développe, en fin d'été, de nombreux capitules jaunes d'environ 3 cm de diamètre. Ses feuilles, dentées et tomenteuses-grisâtres, dégagent au froissement une odeur caractéristique de mélisse (Figure 3).



Figure 3 : A gauche : colonie d'Inules de Suisse dans la réserve naturelle de Cudrefin (@ Association de la Grande Cariçaie / Sophie Girens). A droite : les nombreux capitules (généralement plusieurs dizaines) portés par un pied de l'espèce (@ Association de la Grande Cariçaie / Samuel Jordan).

3.1 ECOLOGIE

L'inule de Suisse affectionne les sols pauvres, humides et plutôt basiques. Elle colonise les ourlets buissonnants de la plaine. TypoCH la désigne comme espèce composant le milieu naturel « 5.1.3. Ourlet hygrophile de plaine (*Convolvulion*) » en la désignant comme « moins strictement inféodée » à ce milieu naturel que les espèces qui le caractérisent.

3.2 DISTRIBUTION

Plante du sud-ouest européen, l'Inule de Suisse est essentiellement distribuée dans les régions alpines et pyrénéennes. En Suisse, l'espèce trouve ses principales aires de distribution dans (Figure 4) :

- la région des lacs de Neuchâtel, Bienne et Morat ;
- les plaines de l'Aar, en amont de son entrée dans le lac de Bienne ;
- les plaines inférieures des bassins de l'Aar, de la Limmat et de la Reuss, au nord-est du pays ;
- les plaines inférieures du Rhône (Chablais) et de la Veveyse, à l'est du bassin lémanique.

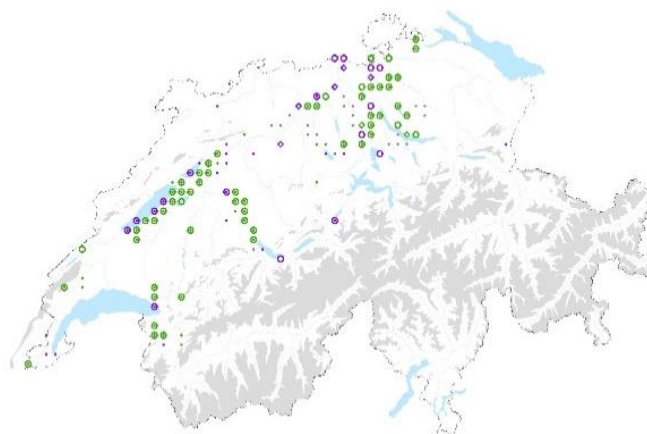


Figure 4 : Carte de la distribution nationale de l'Inule de Suisse (Source Infoflora), à fin 2024.

3.3 PROTECTION

L'Inule de Suisse a été classée « Vulnérable » dans les listes rouges nationales successives de 2016 et 2019. Elle est inscrite comme espèce de priorité nationale élevée dans la liste des espèces prioritaires au niveau national publiée par l'Office fédéral de l'environnement, la Suisse portant une responsabilité internationale élevée pour sa conservation selon cette même liste (OFEV 2019).

3.4 L'INULE DE SUISSE DANS LE PÉRIMÈTRE STATUTAIRE DE L'AGC

L'Inule de Suisse a été considérée comme espèce patrimoniale de haute valeur dès les débuts de la gestion conservatoire des zones naturelles de la Grande Cariçaie, à l'aube des années 1980. Elle a été le sujet, à divers titres, de plusieurs suivis et monitorings dont les résultats ont fait l'objet de publications (Müller 1996, Fernex 2008). La carte de la Figure 5 présente la distribution des observations de l'espèce réalisées dans le périmètre statuaire de l'AGC pour la période 1950-2020, soit avant la crue de l'été 2021, et extraites des bases de données de l'association. Dans ce périmètre, l'Inule de Suisse est présente en colonies souvent denses dans les prairies humides embroussaillées (*Molinion*, *Caricion davallianae*) essentiellement en lisière de la forêt alluviale. Elle affectionne aussi les ourlets thermophiles qui bordent les chemins sillonnant le périmètre. Ses principales colonies se situent à l'extrême nord-est du périmètre statuaire de l'AGC, dans la partie vaudoise de la réserve naturelle des Grèves de la Motte.

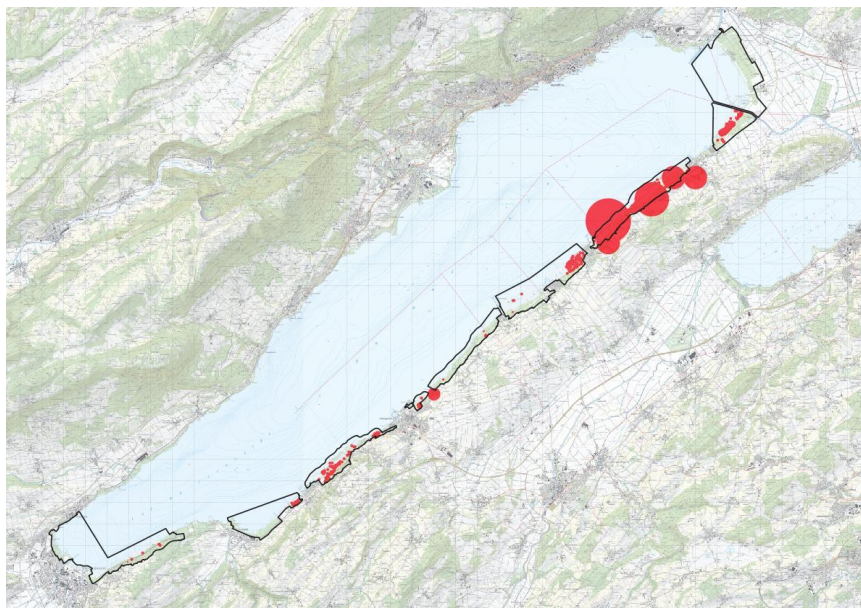


Figure 5 : En noir : périmètre statutaire de l'Association de la Grande Cariçaie sur la rive sud du lac de Neuchâtel. Ronds rouges : périmètres de présence d'Inule de Suisse pour la période 1950-2020 (n.b. : le rayon des périmètres est relatif à la précision de la donnée).

4 LA CRUE DE L'ÉTÉ 2021

En été 2021, le niveau du lac de Neuchâtel a atteint un niveau record jamais égalé depuis la 2^{ème} Correction des Eaux du Jura (2^{ème} CEJ, 1962-1973) (Figure 6). La crue débuta début juillet, pour atteindre le niveau maximal de 430.712 m le 19 juillet. Sa durée peut être fixée à 27 jours entre le 12 juillet et le 7 août 2021. Le lac a vu son niveau monter d'environ 1 mètre durant la première semaine de cette période. La décrue a duré environ 3 semaines, s'achevant à la fin de la première semaine d'août.

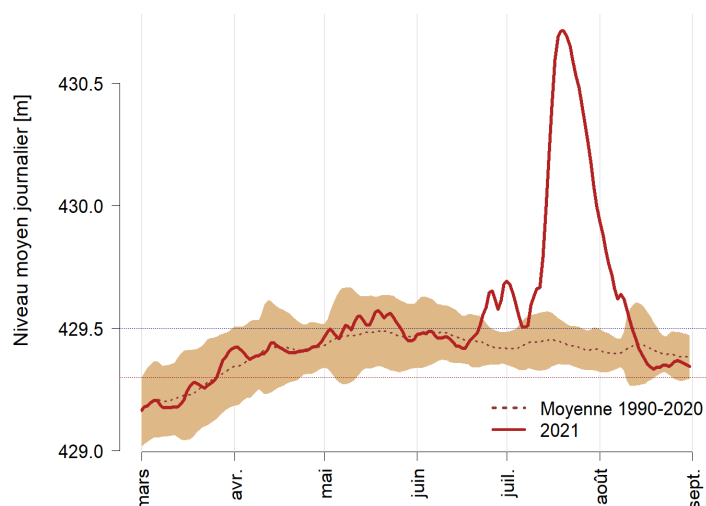


Figure 6 : Niveau du lac de Neuchâtel. À gauche : période mars - août 2021. À droite : période 1 juillet – 9 août 2021 (Source OFEV)

5 MÉTHODES

L'action de connaissance « *C-SP-VEP - Monitoring des espèces végétales* » du PGE-AGC est spécifiquement dédiée aux espèces prioritaires au niveau du périmètre statutaire de l'AGC. Cette action correspond à l'un des 6 modules composant le programme de monitoring de la flore et de la végétation défini par l'AGC. Elle consiste, par 2 prospections dans l'unité spatiale considérée (maille de 50 m x 50 m), à dénombrer les populations des espèces prioritaires classées en priorité élevée par l'AGC au niveau de son périmètre statutaire. Ces dénombrements incluent toutes les émergences feuillées présentes de l'espèce, qu'elles soient fertiles ou stériles, et sont caractérisés par un code renvoyant à des classes de dénombrement logarithmiques (Tableau 1).

Tableau 1 : Codes et classes de dénombrement des populations des espèces classées de priorité élevée par l'AGC.

Code	Classe de dénombrement
0	0 émergences feuillées
1	1-9 émergences feuillées
2	10-99 émergences feuillées
3	100-999 émergences feuillées
4	1'000-9'999 émergences feuillées
5	10'000-99'999 émergences feuillées

Appliquée dès 2014 après une année test en 2013 sur le périmètre statutaire de l'AGC à l'exception des surfaces bernoises, cette action a permis de révéler la présence de l'Inule de Suisse dans 540 mailles avant la crue de l'été 2021. Dans ce lot, 334 mailles sont au bénéfice d'un dénombrement de leurs populations (Figure 7).

Remarques :

- les dénombrements réalisés en été 2021 ont été considérés comme réalisés avant la crue ;
- le décalage entre le nombre de mailles dans lesquelles la présence de l'espèce a été relevée (540) et le nombre de celles dans lesquelles les populations ont été dénombrées (334) provient du changement de statut de l'espèce au cours du monitoring. La mise à jour de la liste des espèces prioritaires au niveau national, intervenue en 2017, a fait passer l'espèce du statut d'espèce de priorité faible, soumise au relevé de sa présence, à celui d'espèce de priorité élevée, soumise à un dénombrement de ses populations. Certaines mailles avaient déjà subi les 2 prospections prévues selon le premier statut de l'espèce et les populations de l'espèce n'y ont pas été dénombrées, alors que les populations des mailles au bénéfice d'au plus une prospection avant ce changement ont été dénombrées lors de la (des 2) prospection(s) postérieure(s) à ce changement.

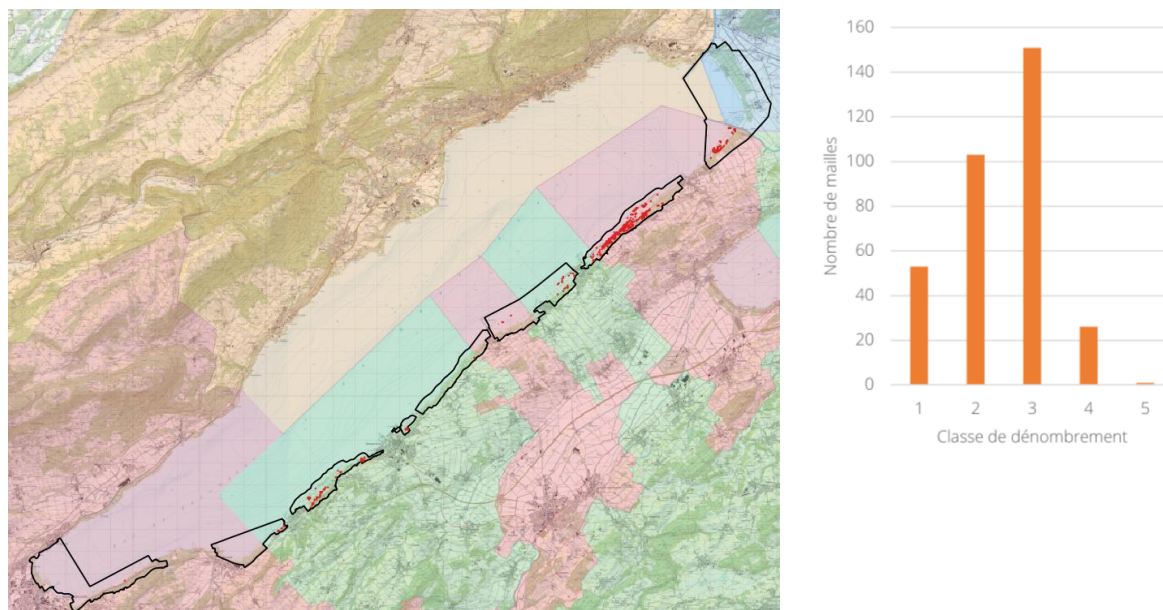


Figure 7 : A gauche : Localisation des 334 mailles dans lesquelles les populations de l'Inule de Suisse ont été dénombrées avant la crue de l'été 2021. En bleu : canton de Berne. En rouge : canton de Fribourg. En orange : canton de Neuchâtel. En vert : canton de Vaud. A droite : distribution des 334 mailles dans les classes de dénombrement.

Pour respecter le souhait formulé par la CSc lors de sa séance du 15 juin 2023, les étapes de traitement suivantes ont été réalisées sur la base des 334 mailles au bénéfice d'un dénombrement de leurs populations avant la crue de l'été 2021 :

- calcul de leur altitude moyenne ;
- échantillonnage de mailles représentatives de la diversité de leur altitude et de la valeur du dénombrement des populations d'Inule de Suisse qu'elles abritent telle que relevée avant la crue de l'été 2021 ;
- dénombrement des populations des mailles de l'échantillon après la crue de l'été 2021 ;
- analyse de l'effet de la crue de l'été 2021 sur les mailles de l'échantillon.

Les méthodes utilisées lors de ces étapes sont développées dans les paragraphes qui suivent.

5.1 CALCUL DE L'ALTITUDE MOYENNE

L'altitude moyenne des 334 mailles a été calculée à l'aide de l'outil « Statistique de zone » fourni par QGIS, en croisant leur géométrie vectorielle avec les données raster d'un modèle numérique de terrain obtenu par la technologie LIDAR en 2016.

5.2 ÉCHANTILLONNAGE

L'échantillon stratifié souhaité a été limité à 80 mailles parmi les 334 mailles au bénéfice d'un dénombrement de leurs populations. Cette limitation est dictée par la disponibilité du botaniste de l'AGC pour réaliser le travail de dénombrement sur le terrain.

Dans un premier temps, pour réduire la représentation des mailles élevées n'ayant pas été atteintes par la crue, les mailles dont le minimum d'altitude était supérieur à 431 m ont été écartées

(l'inondation ayant atteint 430.71 m). Ensuite, deux critères de stratification ont été retenus pour pouvoir réaliser une analyse permettant de répondre aux interrogations principales de ce travail :

- la classe de dénombrement initiale de la maille (6 classes de dénombrements, selon le Tableau 1) ;
- la hauteur moyenne de la maille (8 classes de hauteurs moyennes, réparties de manière équidistante entre le minimum et le maximum des hauteurs moyennes de mailles (429.42 m à 431.97 m)).

Pour obtenir un échantillonnage équilibré selon ces stratifications, un nombre minimal de $80/6 = 13$ (13.3) mailles par classe de dénombrement et $80/10 = 8$ mailles par classes de hauteurs moyennes était nécessaire. Certaines classes de hauteurs ne possédaient pas ce nombre minimal de mailles requis (Annexe 1). Ainsi, aucune de ces deux méthodes n'était idéale : la stratification par dénombrement surreprésentait les altitudes de maille inférieures à 430 m, tandis que la stratification par altitudes surreprésentait la classe de dénombrement « 3 » au profit des classes « 1 » et « 4 », en plus de ne pas atteindre le nombre désiré de 80 mailles (Annexe 1).

Les deux tables de données obtenues ont donc été combinées et une nouvelle sélection aléatoire de 80 mailles a été effectuée parmi ces mailles combinées. Cette procédure a permis d'obtenir un échantillon de mailles représentant un ensemble plus homogène d'altitudes moyennes réparties entre 429.43 et 431.97m, ainsi qu'une représentation suffisante de chaque classe de dénombrements (entre 12 et 33 mailles par classes de dénombrements initiales).

5.3 DÉNOMBREMENT DES POPULATIONS APRÈS LA CRUE DE L'ÉTÉ 2021

Le dénombrement des populations d'Inule de Suisse après la crue de l'été 2021 a été réalisé en été 2023 selon la même méthode que celle utilisée pour les dénombrements réalisés avant la crue (cf. Tableau 1).

5.4 ANALYSE DE L'EFFET DE LA CRUE DE L'ÉTÉ 2021

5.4.1 Modèle binomial d'altitudes

Pour cette analyse, les résultats des dénombrements ont été catégorisés en deux classes : les mailles ayant connu un changement de classe de dénombrement entre avant/après crue, et les mailles n'ayant pas connu de changement de classes ou ayant augmenté de classe entre avant/après crue. Un modèle linéaire généralisé a ensuite été appliqué aux données en relation à l'altitude moyenne de chaque maille, en spécifiant une famille de distribution binomiale. Les formules R des modèles utilisés au chapitre 5.4 figurent en Annexe 2.

5.4.2 Modèle binomial de jours d'inondation

Pour cette analyse, les résultats des dénombrements ont été catégorisés en deux classes : les mailles ayant connu un changement de classe de dénombrement entre avant/après crue, et les mailles n'ayant pas connu de changement de classes ou ayant augmenté de classe entre avant/après crue. Un modèle linéaire généralisé a ensuite été appliqué aux données en relation au nombre de jours d'inondation de chaque maille, en spécifiant une famille de distribution binomiale.

5.4.3 Modèles log-linéaires sur les différences de classes de dénombrements

Des variantes log-linéaires ont été dressées pour illustrer plus dans le détail les changements de classes de dénombrements en fonction de deux paramètres « altitude moyenne de la maille » et

« nombre de jours d'inondation ». Afin de visualiser des potentiels effets non-linéaires de ces relations, des termes quadratiques et cubiques des variables testées ont été ajoutés comme facteurs fixes dans l'analyse. Seules les données ayant connu une différence négative ou nulle de différence de classe ont été considérées (les valeurs négatives ne pouvant être acceptées dans le modèle en raison de la relation logarithmique de la fonction de lien).

5.4.4 Calcul d'une valeur théorique de variable en fonction d'une valeur seuil de probabilité du modèle

Une valeur de probabilité p de 0.9 (ou 90%) a été choisie de manière subjective pour représenter une valeur seuil à partir de laquelle 90% des mailles connaîtraient une diminution de leurs effectifs.

Dans le cas des modèles linéaires simples ci-dessus, la relation suivante a été utilisée pour calculer la valeur correspondante pour la variable testée, si $f(x) = ax + b$:

$$Valeur\ seuil = \frac{\log\left(\frac{p}{1-p}\right) - b}{a}$$

6 RÉSULTATS

6.1 ALTITUDE MOYENNE DES MAILLES

La Figure 8 présente le résultat de la distribution, après le calcul de leur altitude moyenne et selon des classes d'altitude de 0.5 m, des 334 mailles au bénéfice d'un dénombrement de leurs populations d'Inule de Suisse avant la crue de l'été 2021. Environ la moitié de ces mailles ont une altitude moyenne comprise entre 429.5 m et 430 m.

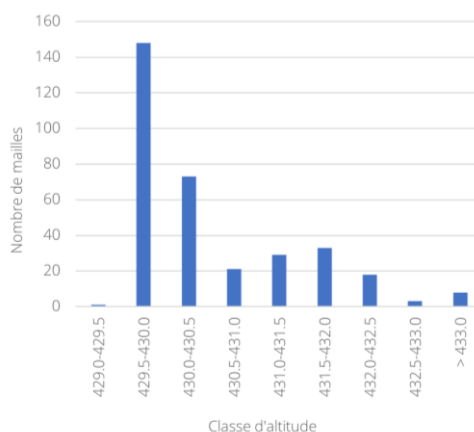


Figure 8 : Distribution des 334 mailles au bénéfice d'un dénombrement de leurs populations d'Inule de Suisse avant la crue de l'été 2021 dans des classes d'altitude de 0.5 m.

Le calcul de l'altitude moyenne a permis, pour chaque maille, de calculer des paramètres complémentaires et dépendants de l'altitude calculée, tels que le nombre de jours d'inondation de la maille et la hauteur moyenne de l'eau pendant les jours d'inondation. Pour rappel la durée de la crue est fixée à 27 jours couvrant la période du 12 juillet au 7 août 2021.

6.2 ÉCHANTILLONNAGE

La distribution des mailles résultant de l'échantillonnage en fonction des contraintes de stratification souhaitées par la CSc, soit leur altitude et l'importance de leurs populations, est présentée dans la Figure 9. L'échantillonnage stratifié de 80 mailles réalisé en début d'année 2023 a conduit à la sélection des mailles localisées sur la Figure 10. Le détail des valeurs de dénombrements initiales en fonction de l'altitude moyenne de la maille est présenté en Annexe 3.

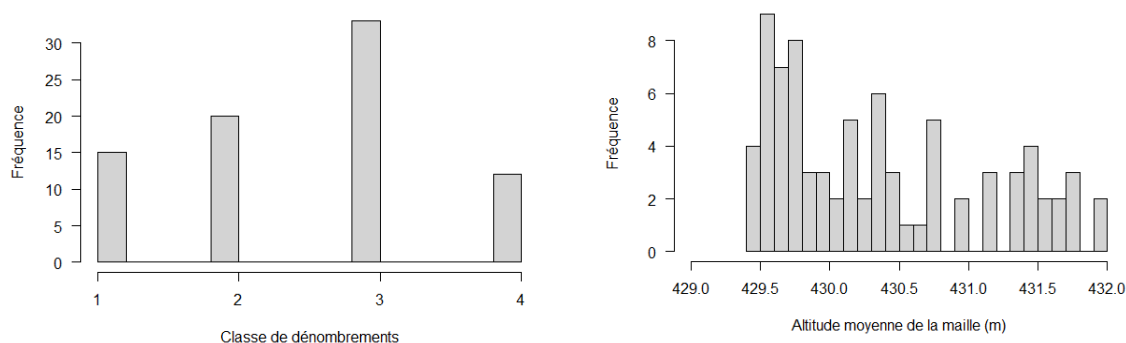


Figure 9 : Distribution des 80 mailles issues de l'échantillonnage selon les contraintes de stratification (importance des populations, altitude).

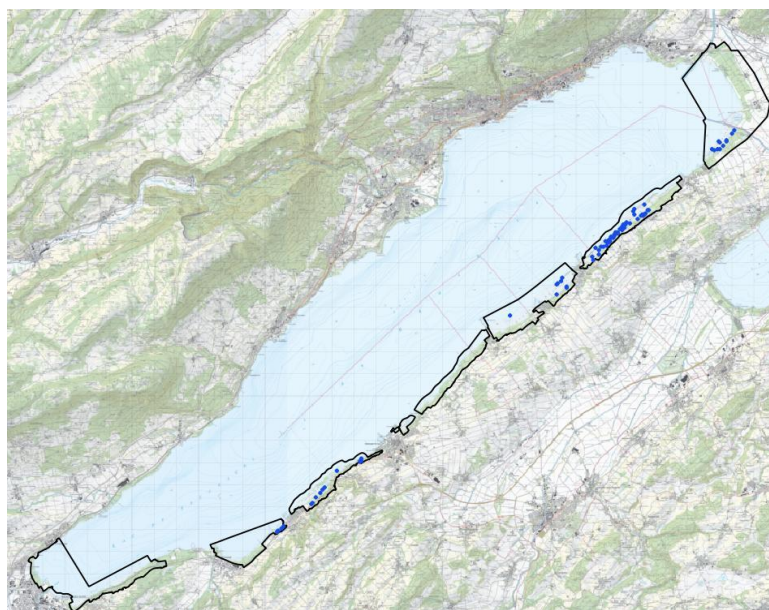


Figure 10 : Localisation des 80 mailles issues de l'échantillonnage stratifié.

6.3 DÉNOMBREMENT DES POPULATIONS APRÈS LA CRUE DE L'ÉTÉ 2021

Le dénombrement des populations d'Inule de Suisse des 80 mailles de l'échantillon a été réalisé en été 2023. La Figure 11 présente le résultat de ces dénombrements ainsi que celui des dénombrements réalisés avant la crue de l'été 2021.

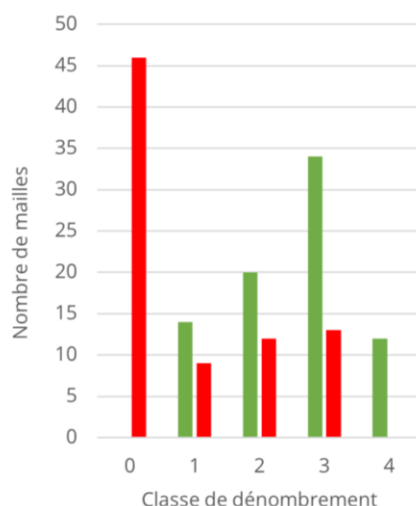


Figure 11 : Distribution des 80 mailles de l'échantillon dans les classes de dénombrement. En vert : dénombrements réalisés avant la crue de l'été 2021. En rouge : dénombrements réalisés après la crue de l'été 2021, en été 2023.

6.4 ANALYSE DE L'EFFET DE LA CRUE DE L'ÉTÉ 2021

6.4.1 Différence de dénombrements

L'ensemble des résultats nécessaires à l'analyse de l'effet de la crue de l'été 2021 peuvent être consultés dans l'Annexe 4 qui présente les dénombrements des populations d'Inule de Suisse réalisés avant et après cette crue, l'altitude moyenne, le nombre de jours d'inondation et la hauteur moyenne de l'eau pendant les jours d'inondation pour chacune des 80 mailles de l'échantillon à analyser. Plus des trois-quarts des mailles présentent une diminution de leurs populations et plus de la moitié une disparition complète de leurs populations après la crue de l'été 2021 (Tableau 2).

Tableau 2 : Variation de l'appartenance des 80 mailles de l'échantillon aux classes de dénombrement avant et après la crue de l'été 2021.

		Après la crue				
		Classe de dénombrement	0	1	2	3
Avant la crue	4	5	1	2	4	
	3	18	4	4	8	
	2	13	2	4	1	
	1	10	2	2		

		Total
Diminution	46	63
Stable	2	14
Augmentation		3

Les Figures 12 et 13 présentent respectivement la distribution des 80 mailles de l'échantillon en fonction des différences de classe de dénombrement des populations d'Inule de Suisse avant et après la crue et la distribution de ces différences selon l'altitude moyenne croissante des mailles.

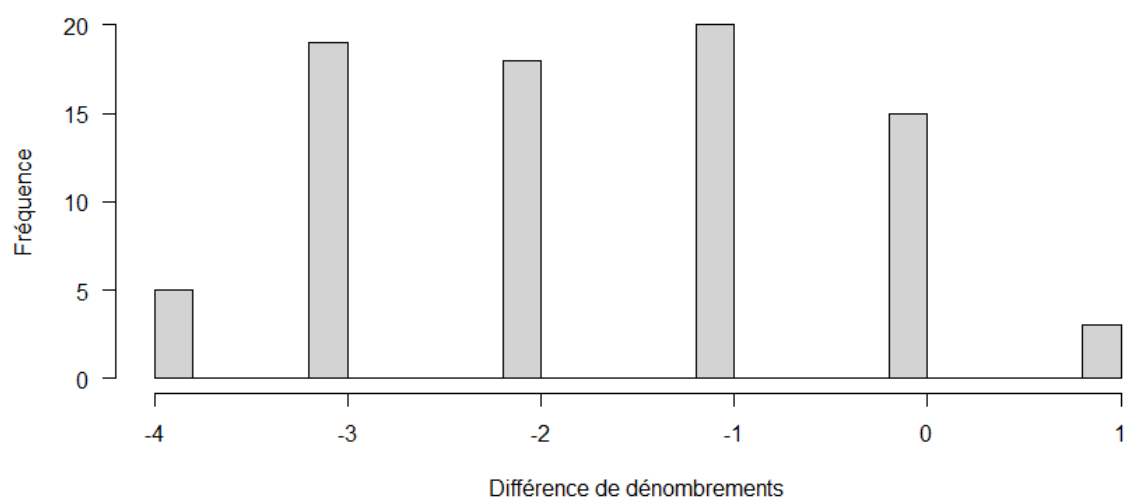


Figure 12 : Histogramme des différences de classe de dénombrement des populations d'Inule de Suisse avant et après la crue de l'été 2021.

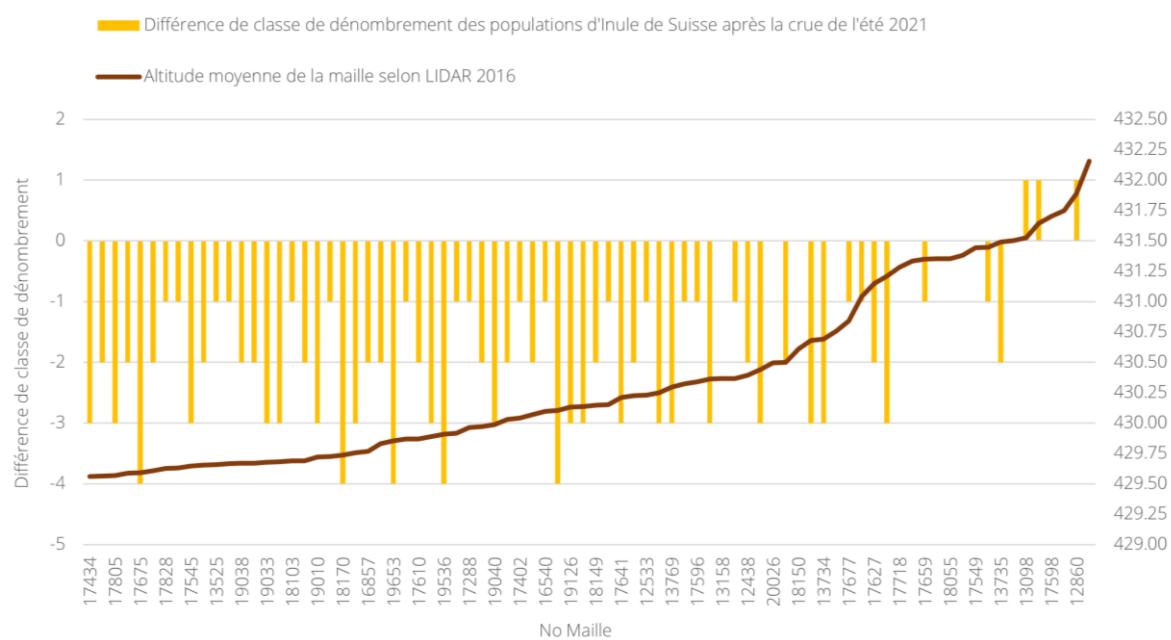


Figure 13 : Détails des différences de classe de dénombrement des populations d'Inule de Suisse avant et après la crue de l'été 2021.

6.4.2 Différences de dénombrements en fonction de l'altitude moyenne de la maille

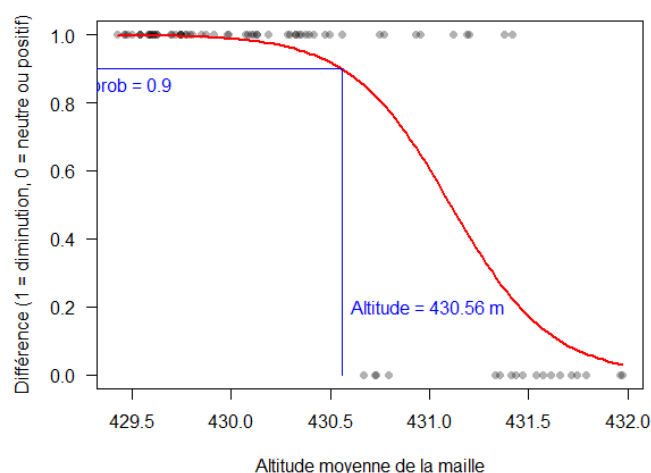


Figure 14: Résultats du modèle binomial des différences de dénombrements en fonction de l'altitude moyenne de la maille

Selon le modèle binomial simple, le seuil de 90% de diminution de classes de dénombrement est atteint dès que l'altitude moyenne de la maille est égale ou inférieure à 430.56 m (Figure 14). La relation entre ces deux variables est significative (estimate = -4.00, se = 0.95, $p < 0.0001$).

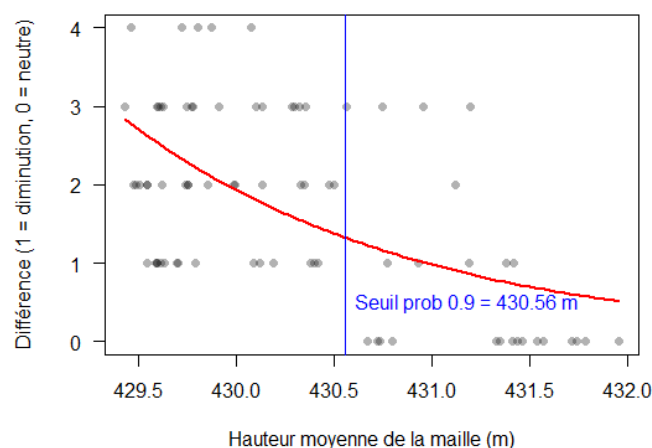


Figure 15: Résultats du modèle log-linéaire des différences de dénombrements en fonction de l'altitude moyenne de la maille. Le seuil de probabilité de 90% de diminution a été représenté en superposition.

Selon le modèle log-linéaire, la relation entre ces deux variables semble suivre une courbe exponentielle inverse, les mailles les plus basses étant les plus sujettes à perdre plusieurs classes de dénombrements (Figure 15). La relation entre ces variables est significative (estimate = -0.68, se = 0.15, $p < 0.0001$).

6.4.3 Différences de dénombrements en fonction du nombre de jours d'inondation

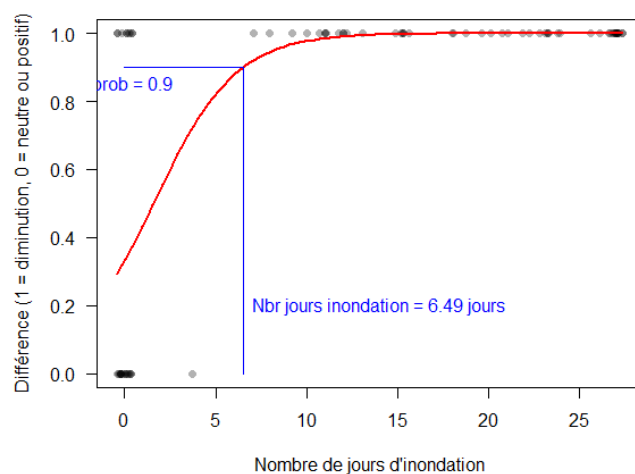


Figure 16 : Résultats du modèle binomial des différences de dénombrements en fonction du nombre de jours d'inondation de la maille

Selon le modèle binomial, le seuil de 90% de diminution de classes de dénombrement est atteint après 6.49 jours d'inondation (Figure 16). Toujours selon ce modèle, cela signifie qu'après un seul jour complet d'inondation, 43% des mailles connaîtraient une diminution d'au moins une classe de dénombrement. La relation entre ces deux variables est faiblement significative (estimate = 0.45, se = 0.18, $p < 0.05$).

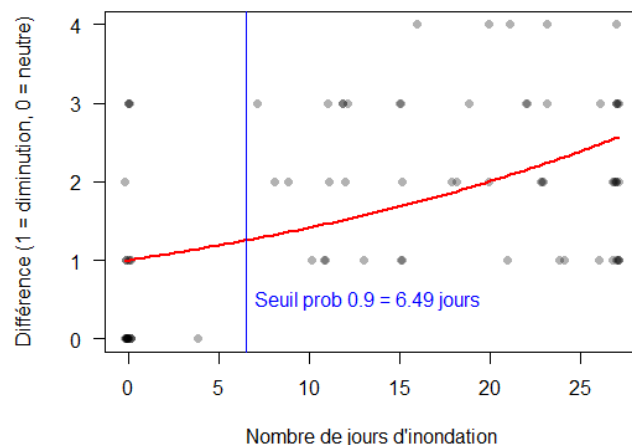


Figure 17 : Résultats du modèle log-linéaire des différences de dénombrements en fonction de l'altitude moyenne de la maille. Le seuil de probabilité 90% de diminution a été représenté en superposition.

Selon le modèle log-linéaire, la relation entre la diminution de classes de dénombrements et le nombre de jours d'inondation semble presque linéaire, le nombre de classes diminuant progressivement en fonction du nombre de jours d'inondation (Figure 17). La relation entre ces variables est significative (estimate = 0.03, se = 0.01, $p < 0.00001$).

7 DISCUSSION

La crue de l'été 2021 a probablement touché un grand nombre de milieux et d'espèces de la Grande Cariçaie. L'une des observations les plus notables a été de constater, empiriquement, une forte diminution de certaines populations d'Inule de Suisse après cet événement. Cette étude consistait à confirmer ces observations empiriques par le biais de dénombrements sur une sélection de mailles représentant une diversité de tailles de population et d'altitudes de mailles, ce dernier critère étant corrélé directement au nombre de jours d'inondation auxquels les populations de l'espèce ont été soumises.

Les compléments de dénombrements menés en 2023 confirment la sensibilité élevée de l'espèce aux inondations, en accord avec ce qui était connu de sa biologie. La majorité des 80 mailles échantillonnées ont connu une diminution de classe de dénombrement (68 mailles, soit 77.5% des mailles). Les analyses réalisées permettent d'affirmer que les populations des mailles dont l'altitude moyenne est inférieure à 430.56 m. auraient subi une diminution de leur population d'au moins une classe de dénombrement selon une probabilité de 90% (cf. Figure 15). Le second modèle statistique suggère qu'après un seul jour d'inondation, un peu moins de la moitié des mailles (43%, voir point 6.4.3) présenteraient déjà une diminution de leur population d'au moins une classe de dénombrement. Le fait que la relation soit faiblement significative selon le modèle s'explique par le fait que la quasi-totalité des valeurs neutres ou positives se trouvent reliées à un nombre de jours d'inondation nul. Il est probable qu'avec un échantillon plus large et une meilleure représentation de données dans la marge 1-10 jours d'inondation, la significativité de cette relation ait été bien supérieure. Par ailleurs, on constate une disparition importante des grandes populations qui se trouvaient dans les mailles d'altitudes les plus basses et donc soumises à l'inondation plus longtemps (Figure 17).

En 2024, s'est achevée la première étape de l'action de connaissance « *C-SP-VEP - Monitoring des espèces végétales prioritaires* » du PGE-AGC spécifiquement dédiée aux espèces prioritaires au niveau du périmètre statuaire de l'AGC. L'ensemble des 7'524 mailles couvrant les surfaces terrestres et une partie des surfaces lacustres de ce périmètre ont été prospectées 2 fois. Cette ultime étape de la démarche a permis de révéler la présence de l'Inule de Suisse dans 31 mailles supplémentaires, amenant le total de mailles de présence de l'espèce à 571 mailles (8 % des 7'524 mailles) et le nombre de mailles dans lesquelles elle a été dénombrée à 365 d'entre-elles (Figure 18). Au total, les populations de l'espèce s'élèvent à plusieurs dizaines de milliers de pieds, conférant au périmètre statuaire de l'AGC le rang de « probable plus important foyer national d'Inule de Suisse ».

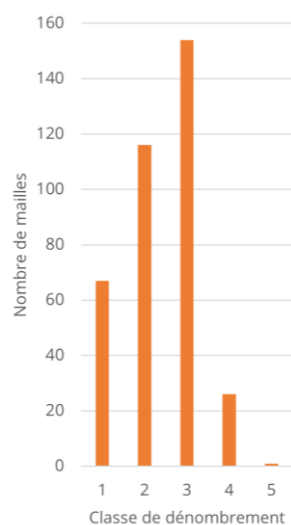
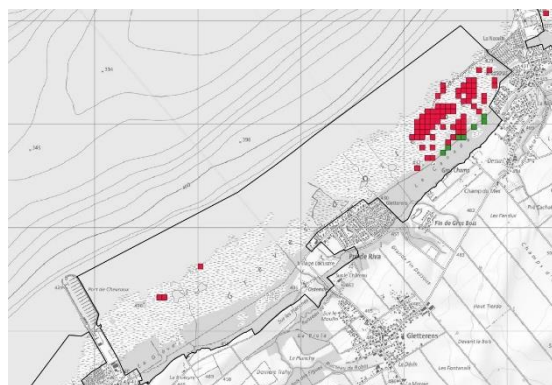
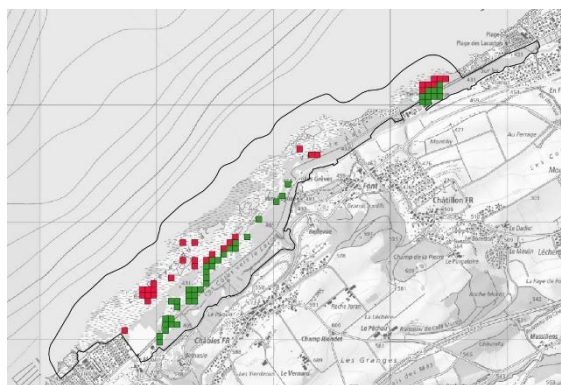


Figure 18 : Nombre de mailles par classe de dénombrement pour les 365 mailles du périmètre statuaire de l'AGC dans lesquelles les populations de l'Inule de Suisse ont été dénombrées à fin 2024, au terme de la première étape du monitoring des espèces végétales prioritaires.

En appliquant aux 571 mailles de présence de l'Inule de Suisse répertoriées à fin 2024 le seuil altitudinal discriminatoire déterminé par l'étude menée sur l'échantillon de 80 mailles, soit 430.56 m., une carte des mailles discriminées par cette valeur peut être proposée pour les réserves naturelles qui abritent l'essentiel des populations de l'espèce. Cette extrapolation conduit à considérer les réserves naturelles des Grèves d'Ostende et de Chevroux et celle de Cudrefin comme celles dont les populations d'Inule de Suisse auraient le plus souffert de la crue de l'été 2021 (Figure 19). La quasi-totalité des mailles qui abritent l'espèce dans ces 3 réserves naturelles auraient subi une diminution de ses populations d'au moins une classe de dénombrement selon une probabilité de 90%.



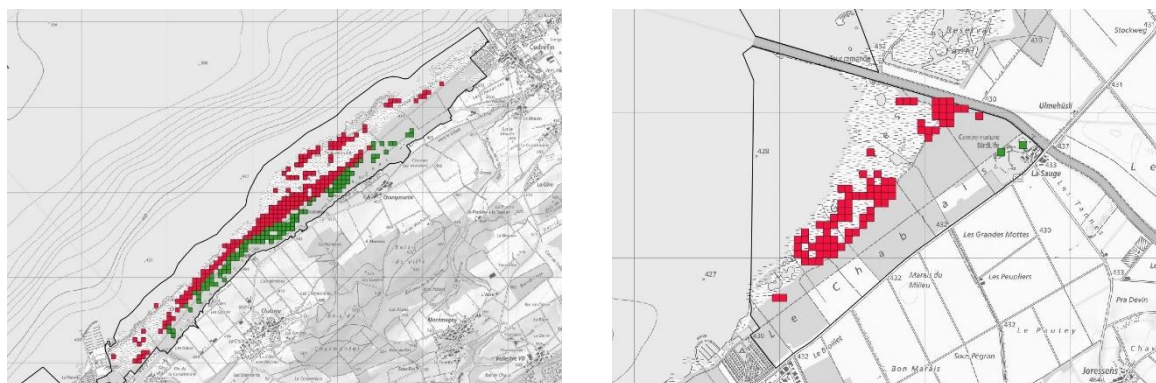


Figure 19 : Discrimination des mailles abritant des populations d'Inule de Suisse selon leur altitude moyenne et l'effet de la crue de l'été 2021 qu'elles auraient subi. En rouge : mailles dont l'altitude est inférieure à 430.56 m et qui auraient subi, sous l'effet de la crue, une diminution de leur population d'au moins une classe de dénombrement selon une probabilité de 90%. En vert : mailles dont l'altitude est supérieure à 430.56 m. et qui auraient subi, sous l'effet de la crue, une diminution de leur population d'au moins une classe de dénombrement selon une probabilité de 10%. De haut en bas et de gauche à droite : réserve naturelle de Cheyres, réserve naturelle des Grèves d'Ostende et de Chevroux, réserve naturelle des Grèves de la Motte et réserve naturelle de Cudrefin.

L'ensemble des 571 mailles de présence d'Inule de Suisse permet aussi d'affiner le profil écologique de l'espèce en intersectant ces mailles avec la carte de végétation la plus récente à disposition (carte 2010-2011). L'espèce affectionne particulièrement les forêts, essentiellement leurs lisières, ainsi que la Parvocariçaie neutro-basophile (*Caricion davallianae*) qui, dans le périmètre statuaire de l'AGC, est principalement représenté par la Prairie à choïn (*Schoenetum nigricantis*).

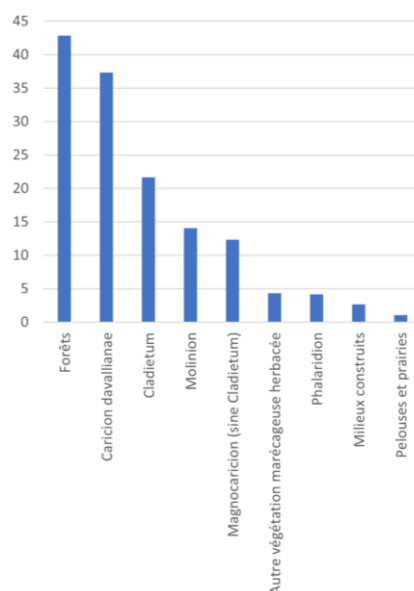


Figure 20 : Surface, en hectares, des milieux naturels couvrant les 571 mailles dans lesquelles l'Inule de Suisse a été observée à fin 2024, au terme de la première étape du monitoring des espèces végétales prioritaires au niveau du périmètre statuaire de l'AGC.

8 CONCLUSION

L'évaluation réalisée montre un effet significatif de la crue de l'été 2021 sur les populations d'Inule de Suisse, espèce de priorité élevée au niveau du périmètre statuaire de l'AGC. Celles ayant subi une inondation par la crue ont vu leur population diminuer, les plus fortes diminutions étant observées pour les populations ayant été inondées par les plus importantes hauteurs d'eau et ayant subi les plus longues durées d'inondation.

Plus généralement, les résultats obtenus interrogent l'AGC quant aux souhaits que pourraient émettre l'Association en matière de régulation du niveau du lac de Neuchâtel. Cette régulation est actuellement soumise au règlement de régulation des trois lacs du pied du Jura (Neuchâtel, Bienne et Morat) ([file:///C:/Users/CC/Downloads/Regulation des lacs du pied du jura-1.pdf](file:///C:/Users/CC/Downloads/Regulation%20des%20lacs%20du%20pied%20du%20jura-1.pdf)). Le règlement avait fait l'objet d'une étude de ses effets sur la végétation et les milieux naturels de la Grande Cariçaie, dont le rapport final a été publié en 1995 (Buttler, 1995.), sans que cette étude n'entraîne une quelconque modification du règlement de régulation en vigueur. Depuis cette date, l'AGC a eu l'occasion d'échanger sur ce thème avec la Commission intercantonale de surveillance de la 2^{ème} Correction des eaux du Jura, en charge de la surveillance de l'application du règlement, lors des rencontres des 9 novembre 2018 et 31 mars 2023.

Des modifications de cette régulation pourraient viser la restitution, au moins partielle, d'un régime des eaux du lac comparable à celui qui prévalait avant la 2^{ème} Correction des eaux du Jura (2^{ème} CEJ, 1962-1973), restitution qui pourrait se révéler favorable aux objectifs conservatoires que poursuit l'AGC. Dans ce sens, l'observation scientifique des effets des crues à venir doit permettre aux gestionnaires de mettre à l'épreuve les avantages qu'ils supposent pouvoir retirer de fluctuations plus importantes du niveau du lac. L'évaluation de l'effet des crues sur des phénomènes tels que l'embroussaillage des marais ou encore l'érosion des surfaces terrestres ne pourra cependant se faire qu'au travers de l'observation de nombreuses crues intervenant sur le « temps long ». Par contre, et de manière plus ponctuelle, la seule crue de l'été 2021 a permis d'évaluer ses effets sur une espèce, révélant toutes les précautions que l'AGC devra prendre si elle devait participer à l'arbitrage d'une modification du règlement de régulation du lac de Neuchâtel. Il semble en effet difficile d'imaginer, à la vue des résultats obtenus pour l'Inule de Suisse mais aussi ceux obtenus pour la Violette des marécages, qu'une modification du règlement visant à favoriser les crues puisse à la fois servir la conservation complète des valeurs naturelles existantes, qui ont profité des effets de ce règlement, et la restauration de celles disparues depuis l'entrée en vigueur de ce règlement.

Bibliographie

Clerc, C. (2017). La Violette des marécages (*Viola persicifolia* auct.) dans les réserves naturelles de la Grande Cariçaie - Petite synthèse des résultats d'inventaire et de suivi des stations du taxon pour la période 2005-2016.

Clerc, C. (2023). Crue exceptionnelle du lac de Neuchâtel en été 2021. Évaluation de son effet sur des populations d'*Inula* de Suisse (*Inula helvetica* Weber). Association de la Grande Cariçaie (AGC). Cheseaux-Noréaz.

Clerc, C. et Manzocchi, S. (2022) Monitoring de la flore et de la végétation 2013-2021. Synthèse de la première étape. Association de la Grande Cariçaie (AGC). Cheseaux-Noréaz.

Fernex, J. (2008). *Inula helvetica* Weber dans la Grande Cariçaie (CH). Evolution des populations et profil écologique en vue d'une optimisation de la gestion de l'espèce.

Müller, B. (1996) Verbreitung und aktuelle Gefährdung von *Inula helvetica* Weber und *I. x semiamplexicaulis* Reuter (Asteraceae) in der Schweiz. In : Botanica Helvetica, vol. 106, p. 177-195.

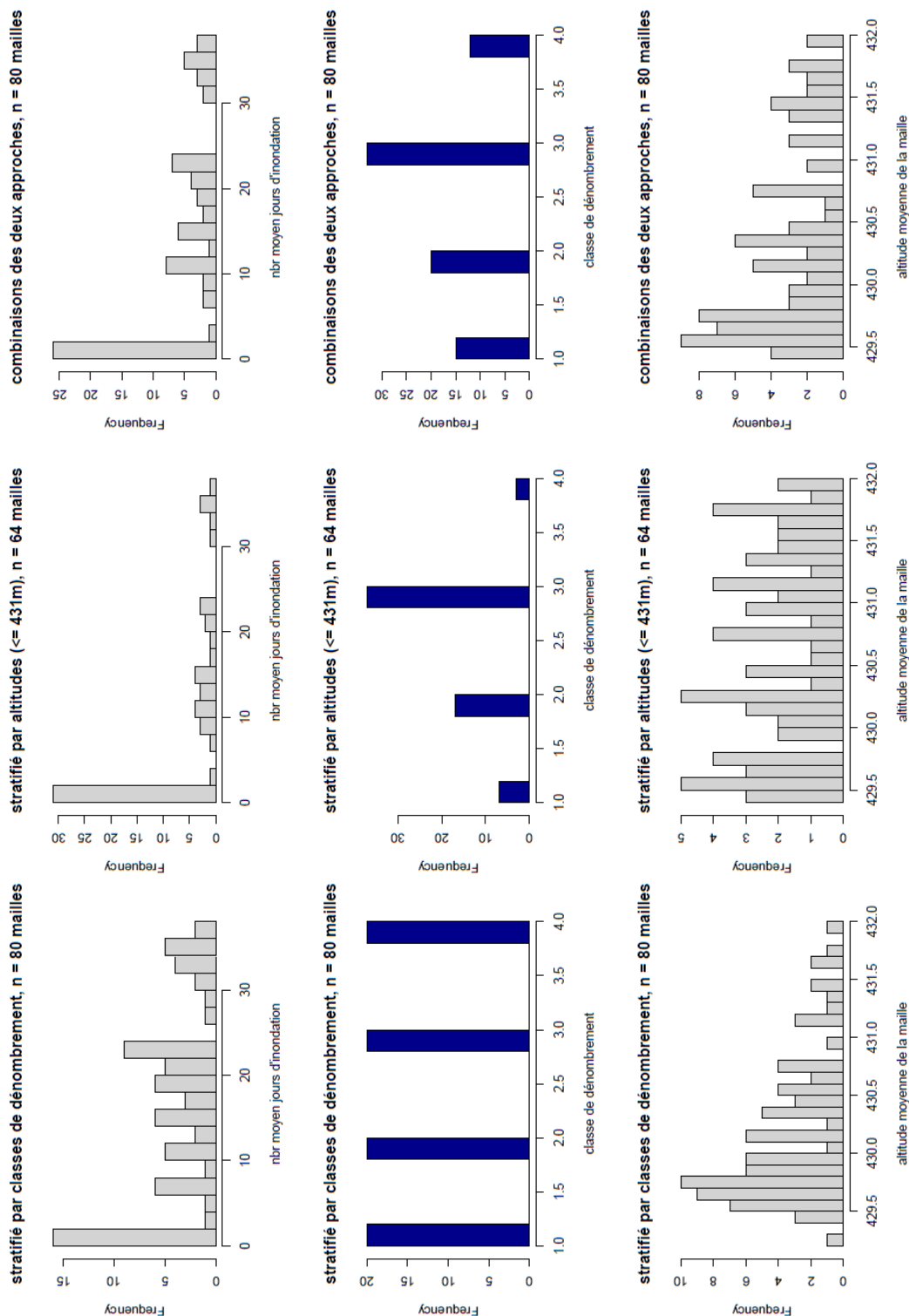
OFEV (2019). Liste des espèces et des milieux prioritaires au niveau national. Espèces et milieux prioritaires pour la conservation en Suisse. Office fédéral de l'environnement, Berne.

L'environnement pratique n° 1709 : 98 p.

Buttler, A., Cornali, P. et Bueche, M. (1995) Etude des effets de la régulation des lacs subjurassiens sur la végétation et le milieu. Rapport final. Laboratoire d'écologie végétale et de phytosociologie. Neuchâtel ; 154 p.

ANNEXE 1

Caractéristiques des différents échantillonnages envisagés



ANNEXE 2

Formules R des modèles statistiques utilisés

Modèle binomial d'altitudes

```
glm(diff_bin ~ alt_moy, family = "binomial", data = inule).
```

Modèle binomial de jours d'inondation

```
glm(diff_bin ~ nb_j_inond, family = "binomial", data = inule)
```

Modèles log-linéaires sur les différences de classes de dénombrements

```
model_alt_log <- glm(diff_pos ~ alt_moy + (alt_moy^2) + (alt_moy^3), family  
= "poisson", data = inule[inule$diff_pos>=0,])  
model_jours_inond_log <- glm(diff_pos ~ nb_j_inond + (nb_j_inond^2) +  
(nb_j_inond^3), family = "poisson", data = inule[inule$diff_pos>=0,])
```

où `diff_pos` représente la différence en nombre de classes entre avant et après la crue.

Calcul d'une valeur théorique de variable en fonction d'une valeur seuil de probabilité du modèle

```
score_threshold_alt <- (log(p/(1-p))-model_alt$coefficients[1]) /  
model_alt$coefficients[2]
```

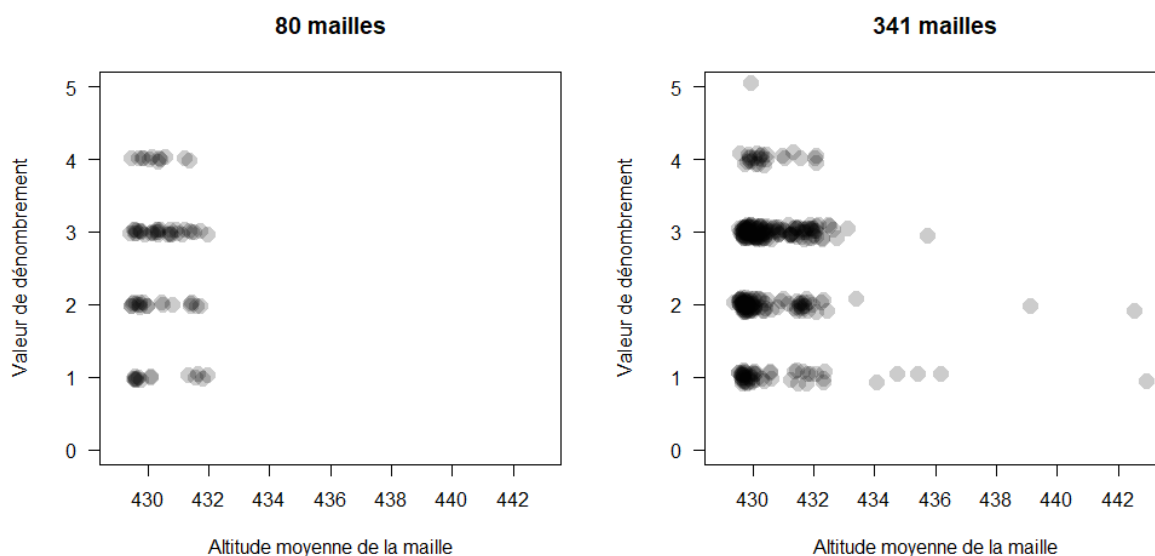
Les analyses ont été menées dans R 4.4.2 (R Core Team (2024) au moyen de l'interface RStudio (Posit Team 2024).

R Core Team (2024) *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.

Posit team (2024): *RStudio: Integrated Development Environment for R*. URL <http://www.posit.co/>.

ANNEXE 3

Comparaison de la distribution des classes de dénombrements initiales en fonction des altitudes moyennes des mailles



Comparaison de la distribution des classes de dénombrements initiales en fonction des altitudes moyennes des mailles. A gauche, échantillon de 80 mailles sur lesquelles la repasse de dénombrement a été effectuée après la crue de 2021 ; à droite, ensemble des 341 mailles pour lesquelles une valeur de dénombrement d'Inule de Suisse a été effectuée.

ANNEXE 4

Caractéristiques des 80 mailles de l'échantillon servant à évaluer l'effet de la crue de l'été 2021 sur les populations d'Inule de Suisse

Maille no	Classe de dénombrement avant la crue de l'été 2021	Classe de dénombrement en 2023, après la crue de l'été 2021	Altitude moyenne de la maille (m)	Nombre de jours d'inondation de la maille par la crue de l'été 2021	Hauteur moyenne de l'eau pendant les jours d'inondation de la maille par la crue de l'été 2021 (m)
12438	2	0	430.39	11	0.20
12471	3	0	430.14	15	0.36
12533	4	3	430.23	13	0.32
12589	3	1	430.23	13	0.32
12860	1	2	431.89	0	0.00
12885	3	3	432.15	0	0.00
13016	1	2	431.64	0	0.00
13098	2	3	431.53	0	0.00
13158	3	3	430.37	11	0.22
13211	3	2	430.32	12	0.25
13525	1	0	429.66	27	0.54
13712	2	2	431.75	0	0.00
13734	3	0	430.69	2	0.02
13735	3	1	431.49	0	0.00
13769	3	0	430.29	12	0.27
15818	1	0	429.63	27	0.57
16540	1	0	430.09	15	0.40
16728	3	0	431.21	0	0.00
16763	2	0	430.50	8	0.14
16823	1	0	429.66	25	0.58
16857	2	0	429.77	22	0.55
16921	2	0	429.61	27	0.59
17002	2	0	430.03	16	0.44
17240	3	0	430.25	13	0.29
17288	1	0	429.96	18	0.45
17328	1	1	431.50	0	0.00
17402	1	0	430.04	16	0.43
17434	3	0	429.56	27	0.64
17456	2	1	429.87	20	0.50
17458	4	0	430.10	15	0.39
17478	2	1	431.45	0	0.00
17530	3	3	430.76	0	0.00
17531	3	3	431.38	0	0.00
17545	3	0	429.65	27	0.55
17547	3	2	430.15	15	0.34
17549	2	2	431.44	0	0.00
17564	4	2	430.07	16	0.40
17596	3	2	430.34	12	0.23
17598	3	3	431.70	0	0.00
17610	3	1	429.87	20	0.50
17627	3	1	431.15	0	0.00
17641	3	0	430.21	13	0.34
17657	3	0	430.36	11	0.23
17659	4	3	431.35	0	0.00
17675	4	0	429.59	27	0.61
17677	3	2	430.84	0	0.00
17718	3	3	431.28	0	0.00
17736	2	0	429.67	24	0.60
17761	3	0	430.68	4	0.02
17805	3	0	429.57	27	0.63
17806	2	0	429.56	27	0.64
17807	1	0	429.72	23	0.57
17828	1	0	429.63	27	0.57
17832	2	0	429.97	18	0.44
17850	3	0	429.76	23	0.54
17996	4	1	430.44	9	0.19
17998	2	2	431.35	0	0.00
18017	2	0	429.59	27	0.61
18024	4	3	430.37	11	0.22
18025	4	3	431.04	0	0.00
18026	3	3	431.33	0	0.00
18055	1	1	431.35	0	0.00
18103	1	0	429.69	24	0.58
18149	4	2	430.15	15	0.35
18150	2	2	430.61	5	0.08
18170	4	0	429.74	23	0.55
18298	3	0	429.89	19	0.50
19010	3	0	429.72	23	0.57
19033	3	0	429.68	24	0.59
19038	2	0	429.67	24	0.60
19040	3	0	429.99	18	0.43
19126	3	0	430.13	15	0.36
19218	2	0	429.66	27	0.54
19251	2	0	429.69	24	0.58
19258	1	0	429.92	19	0.48
19294	2	0	429.83	20	0.54
19536	4	0	429.91	19	0.48
19653	4	0	429.85	20	0.51
20016	3	0	429.68	24	0.59
20026	3	3	430.49	8	0.15