

## Résumé scientifique

Sujet du stage : Détermination de l'exposition aux  
vagues de plantes dans un contexte de restauration  
des gravières

Ophélie Rochet

Equipe Ecologie Végétale et Zones Humides

Encadrant : Mme Sara Puijalon

-

Laboratoire LEHNA

Université Claude Bernard Lyon 1

Domaine scientifique de la Doua

6 rue Raphaël Dubois - 69622 Villeurbanne Cedex



## Introduction et objectifs

Les gravières en eau sont des écosystèmes aquatiques issues de l'extraction de granulats dans des carrières. L'extraction de granulats conduit à la remontée de l'eau des nappes phréatiques et à la formation d'un plan d'eau. La loi oblige aujourd'hui en France la remise en état des carrières à la fin de leur exploitation afin de garantir la sécurité et la propreté du site, le but étant d'offrir un nouvel usage au lieu en favorisant la création d'un nouvel écosystème (*Arrêté du 22/09/94 relatif aux exploitations de carrières* / AIDA, s. d.). Cependant, dans les plans d'eau de grande taille, comme certaines gravières en eau, **le développement de la végétation peut être altéré par la formation de vagues sous l'effet du vent**, conduisant à des effets importants, tant au niveau de la communauté végétale que de l'individu (Doyle, 2001; Riis & Hawes, 2003; Van Zuidam & Peeters, 2015). Bien que la présence de bateaux puisse accentuer fortement le phénomène, les vagues sont principalement dues au vent. La caractérisation et l'étude des vagues sont l'objet de nombreux travaux.

Plusieurs auteurs ont mis en évidence le lien entre les hauteurs de vagues, les caractéristiques de vent (vitesse, durée) et le fetch. Le fetch est la distance (km) parcourue par le vent sur l'eau sans rencontrer d'obstacle pour une direction de vent donnée (Mason et al., 2018). Il s'agit donc de la distance qui sépare deux rivages opposés pour une direction de vent donnée : on parle alors également de **fetch direct**. Des formules simples existent pour déterminer des hauteurs d'eau théoriques à partir des valeurs de fetch : plus le fetch est grand, plus les vagues seront hautes (Dodds, 2002). Cependant, une des limites importantes du fetch direct est qu'il ne prend pas en compte la morphologie du plan d'eau. En considérant des mesures de fetch adjacents (i.e. fetch pour des vents de directions proches du vent dominant), une correction peut alors être effectuée afin de mieux prendre en compte la morphologie du plan d'eau : on parle alors de **fetch effectif**, calculable - comme le fetch direct - pour toutes les directions de vents souhaitées (Håkanson et al., 1988). Le fetch direct ou effectif est ainsi pris en compte pour les calculs de hauteurs d'eau mais d'autres formules plus complexes existent également intégrant outre le fetch, des données de vent et/ou des données sur la profondeur du plan d'eau (Brodersen, 1995; Keddy, 1982).

Outre l'utilisation des caractéristiques des vents et du plan d'eau, l'exposition aux vagues peut également être étudiée directement en mesurant les hauteurs des vagues à l'aide de capteurs (e.g. ultrasons, optiques) placés sur un plan d'eau. Après un premier traitement du signal, un profil de vague est obtenu et représente l'amplitude (ou les hauteurs d'eau) en fonction du temps. A partir de ce profil de vague, différents paramètres sont alors calculables comme le  $H_{1/3}$  ou le  $H_{max}$ . Le  $H_{1/3}$  ou « hauteur significative » représente la valeur moyenne du tiers supérieur des hauteurs de vagues observées et  $H_{max}$  la hauteur de la plus haute vague enregistrée.

Une seule des deux méthodes d'évaluation de l'exposition aux vagues – directe par mesure des vagues ou indirectes à partir des caractéristiques des vents et des plans d'eau - est généralement utilisée et il n'existe pas de travaux comparant ses méthodes entre elles. L'objectif de ce projet était de **déterminer l'exposition aux vagues de placettes expérimentales situées en différents points d'une gravière et ce par différents moyens**. Il s'agit ainsi 1) de caractériser le vent présent au niveau d'un plan d'eau et de mesurer le degré d'exposition aux vagues de placettes expérimentales, 2) de mesurer également les hauteurs réelles des vagues grâce à des capteurs *in situ*, et 3) de comparer les résultats obtenus et de déterminer les différences de hauteurs de vagues au niveau de placettes exposées et abritées des vagues. Ce travail s'intègre dans un projet plus large visant à étudier la réponse de la végétation aquatique aux vagues, en particulier en comparant les traits des végétaux au niveau des placettes, exposées et artificiellement abritées des vagues. Cette étude permettra d'envisager la mise en place de matériel de protection des plantes contre les vagues et ce, dans le cadre de la restauration de milieux comme les carrières en eaux.

## Site d'étude et mesure de l'exposition aux vagues

La gravière dans laquelle a lieu l'expérimentation est située dans l'Ain, au Sud de la ville de Pérouges. Trois couples de placettes de 5m x 5m ont été installées sur le plan d'eau. Trois espèces végétales aquatiques ont été plantées dans chacune des placettes en juin 2019. L'exposition aux vagues a été artificiellement réduite au niveau d'une des deux placettes de chaque couple par la pose de filets en profondeur et de ligne d'eau brise-vagues en surface (Figure 1). Chaque couple est donc constitué d'une placette non modifiée (« exposée » aux vagues) et d'une placette avec filets de protection et ligne d'eau brise-vagues (« abritée » des vagues). Les couples de placettes sont positionnés sur deux berges du plan d'eau (Figure 1). Au niveau de chacune des six placettes se trouvent des enregistreurs autonomes permettant de mesurer la hauteur d'eau.

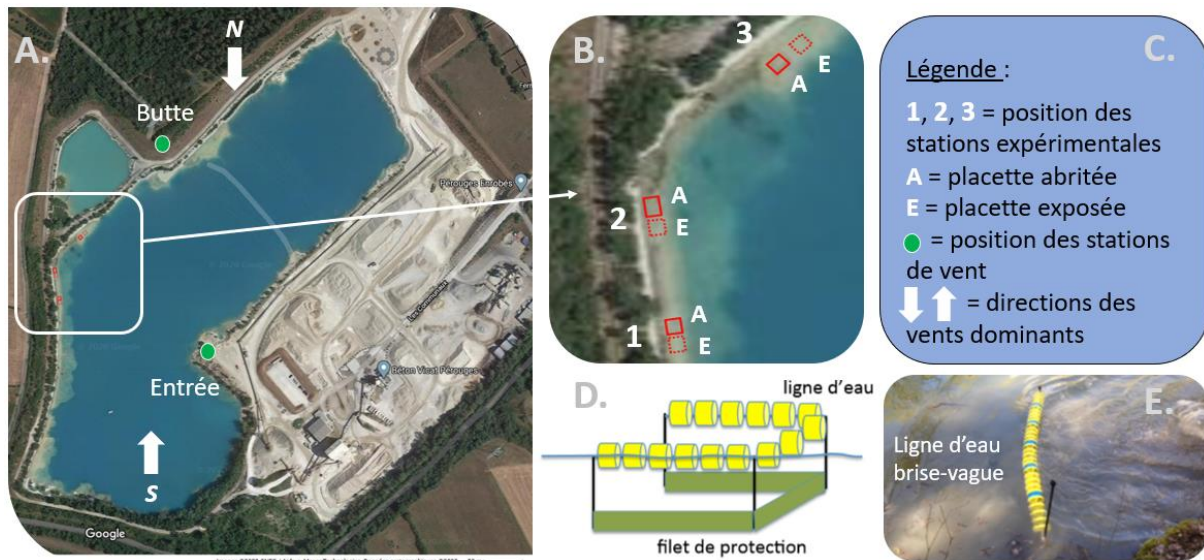


Figure 1 : A) Plan d'eau, positions des stations expérimentales (dans le cadre blanc), positions des stations de vent in situ et directions de provenance des vents dominants ; B) Positions des stations expérimentales et détails des placettes abritées et exposées aux vagues ; C) Légende ; D) et E) Détails du dispositif de protection des vagues

L'exposition aux vagues est mesurée par deux méthodes :

1) **estimation indirecte** de l'exposition aux vagues via l'analyse de la topographie du lieu et des données de vent et 2) **mesure directe** de la hauteur des vagues via l'utilisation de capteurs.

**Estimation indirecte de l'exposition aux vagues** : Le **fetch direct** et le **fetch effectif** sont calculés pour chacune des 6 placettes à partir d'une photographie aérienne du plan d'eau selon les vents dominants Nord et Sud. Les vents dominants ont été déterminés en réalisant trois roses des vents issues des deux stations de vent de la gravière (Figure 1) ainsi que de la station Météo France d'Ambérieu-en-Bugey. A partir des valeurs de fetch, la formule de Wetzel (Wetzel, 2001) a été utilisée pour calculer les valeurs de hauteurs de vagues :  $h_{max} = 0,105 \times \sqrt{fetch}$

D'autres formules prenant en compte, en plus du fetch, des données de vent ont également été testées. Des **index d'exposition relative** aux vagues (Relative Exposure Index ou REI) ont alors été calculés à partir de deux formules  $E_M$  et  $E_E$  (Keddy, 1982), la première prenant en compte la vitesse moyenne du vent et la fréquence directionnelle du vent et la seconde prenant en compte la notion d'*exceedance*, c'est-à-dire la proportion de vents pour chaque direction  $i$  excédant une vitesse  $x$  donnée. La méthode de calculs d'index d'exposition relative (REI) est plus précise qu'une estimation simple des hauteurs de vagues maximales (formule de Wetzel) car toutes les directions de vents sont prises en compte ainsi que leur importance relative. Cependant, la formule de Wetzel peut être

intéressante si le calcul est réalisé pour plusieurs directions de vents (dominants) et permet d’avoir une estimation rapide et sans matériel de l’exposition aux vagues.

**Mesure directe de la hauteur des vagues** : L’utilisation de capteurs mesurant les hauteurs d’eau au niveau de chaque placette permet de comparer les placettes exposées et abritées artificiellement des vagues. Les paramètres calculés sont  $H_{1/3}$  et  $H_{max}$ .

## Résultats et discussion

### Estimation indirecte de l’exposition aux vagues

Un des objectifs de cette étude était de mesurer le degré d’exposition aux vagues des stations et de les comparer entre elles. Dans le cas de l’estimation des hauteurs de vagues maximales par la formule de Wetzel, la placette la plus exposée aux vagues sur la gravière varie selon le vent dominant considéré : dans le cas d’un vent du Sud et pour des mesures à partir du fetch direct et effectif (Figure 2A), les hauteurs de vagues sont plus importantes pour la station 3 que pour les stations 1 et 2 tandis que pour un vent du Nord, les hauteurs de vagues sont plus importantes pour la station 1 que pour les stations 2 et 3. Les calculs issus de la formule de Wetzel, en prenant en compte le fetch effectif, montrent par ailleurs moins de différence entre les stations qu’en prenant en compte le fetch direct (Figure 2A) et se rapprochent certainement plus de la réalité via la prise en compte de la morphologie du rivage adjacent. La prise en compte du fetch effectif est également plus cohérente avec les résultats des REI ( $E_E$  et  $E_M$ ) où les différences entre stations sont également faibles (Figure 2B).

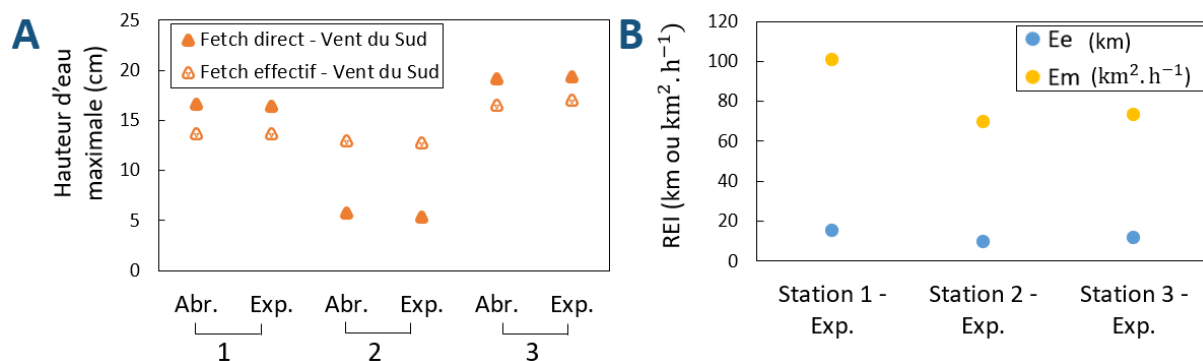


Figure 2 : A) Hauteurs d'eau maximales pour chacune des placettes abritées (Abr.) et exposées (Exp.) de chaque station (1, 2, 3) calculées avec la formule de Wetzel pour le vent du Sud. B) REI pour chaque formule considérée ( $E_E$  et  $E_M$ ) pour les placettes exposées (Exp.). Des résultats similaires sont obtenus pour les placettes abritées.

L’exposition aux vagues sur le site d’étude semble moyenne : les REI (pour la formule  $E_E$ ) sont en moyenne 50% plus faibles que ceux retrouvés dans la littérature (Strand & Weisner, 1996). Cela peut notamment s’expliquer par la taille des lacs étudiés dont l’aire est de l’ordre de plusieurs kilomètres carrés, ce qui n’est pas le cas du plan d’eau de la gravière.

### Mesure directe de la hauteur des vagues

Les capteurs mesurant les hauteurs d’eau au niveau de chaque placette ont permis de mettre en évidence une différence entre placettes abritées et exposées. L’étude des hauteurs d’eau sur la gravière montre une différence entre placettes abritées et exposées pour le  $H_{1/3}$  de 10% (de 1,6 à 1,8cm pour la station 1) à 30% (de 0,8 à 1,2cm pour la station 2) et pour le  $H_{max}$  une différence de 50% (de 2,2 à 4,4cm pour la station 1) à 95% (de 1,2 à 22,1cm pour la station 2) alors que la littérature montre plutôt une réduction de 50% en estuaire (Silinski et al., 2018). Ces études concernent généralement des lieux naturellement abrités et d’autres exposés aux vagues alors que, dans notre cas, l’abris est créé par un dispositif expérimental. Les dispositifs expérimentaux sont donc efficaces

pour réduire le niveau d'exposition aux vagues dans des proportions assez comparables avec ce qui peut être observé *in situ* dans des sites peu exposés aux vagues.

Les  $H_{1/3}$  calculés à partir des mesures *in situ* ne montrent pas une différence aussi importante entre les placettes abritées et exposées que les  $H_{max}$ . Le calcul de  $H_{1/3}$  est très souvent privilégié en océanographie ou en limnologie dans le cas de grands lacs où les vagues sont plus fréquentes et plus importantes que dans des petits plans d'eau peu profonds. Ainsi, un calcul de  $H_{1/10}$  serait peut-être plus représentatif des vagues pouvant impacter les végétaux sur la gravière.

### **Comparaison des mesures indirectes et directes**

Un autre objectif consistait à comparer les mesures indirectes (estimations des vagues) et les mesures directes (hauteurs d'eau). Ainsi, une exposition aux vagues plus importante pour la station 3 par rapport aux autres stations est observée en réalisant les calculs de  $H_{1/3}$  et de  $H_{max}$ . En considérant le paramètre  $E_E$  (plus pertinent que  $E_M$  car prenant en compte les vents les plus forts et donc les plus susceptibles d'induire la formation de vagues) les différences entre stations sont plus faibles (Figure 2B). Les hauteurs d'eau maximales estimées à partir de la formule de Wetzel pour le vent du Sud (environ 15cm) - les stations étant plus exposées au vent du Sud qu'au vent du Nord – semblent être de même ordre que les estimations obtenues pour les hauteurs d'eau maximales réellement observées sur site ( $H_{max}$ , environ 20cm) pour les placettes exposées. Cependant, les placettes 3 semblent soumises, même rarement, à des vagues beaucoup plus hautes ( $H_{max}$  de 42cm) que celles estimées avec la formule de Wetzel. Les méthodes indirectes d'évaluation de l'exposition aux vagues permettent d'obtenir une estimation moins précise que les données de hauteurs d'eau, en particulier dans notre cas où la différence d'exposition entre les stations n'est pas très importante.

Les différences entre les stations (1, 2 et 3) sont donc relativement faibles quelle que soit la méthode de calcul ou de mesure, bien que la station 3 peut être soumise ponctuellement à des vagues plus hautes ( $H_{max}$  de 42cm pour la station 3 et  $H_{max}$  de 5 à 22cm respectivement pour les stations 1 et 2). La mesure sur site des hauteurs de vagues a pour avantage d'évaluer la différence entre placettes exposées et placettes artificiellement abritées, ce qui n'est pas le cas des méthodes d'estimation des vagues. De plus, même si le coût est plus élevé pour la mise en place de capteurs *in situ*, le niveau de précision est très supérieur aux autres méthodes. L'estimation de l'exposition aux vagues grâce aux données de vent et de topographie permet d'avoir cependant une estimation relativement fiable et pour un coût relativement réduit si l'on prend en compte les données de vent issues d'une station météo proche du lieu d'expérimentation.

## **Conclusion**

Ce rapport a permis de comparer les différentes méthodes utilisées aujourd'hui pour estimer ou mesurer les vagues sur des plans d'eau. Le choix de la méthode dépend des objectifs de l'expérimentation et des moyens disponibles.

L'objectif final de l'expérimentation sur la gravière est d'étudier la réponse des plantes aux vagues. La caractérisation du niveau d'exposition aux vagues dans les différentes placettes est donc un aspect important du projet. Les résultats obtenus ici permettent de conclure qu'il existe une différence d'exposition aux vagues entre placettes exposées et abritées, même si elle est parfois faible. L'étape suivante du projet consistera à étudier la réponse de la végétation aquatique à ces différents niveaux d'exposition aux vagues afin de déterminer si la mise en place de dispositifs de protection peut avoir un effet positif sur le développement de la végétation.

## Bibliographie

Arrêté du 22/09/94 relatif aux exploitations de carrières | AIDA. (s. d.). Consulté 30 juillet 2020, à l'adresse [https://aida.ineris.fr/consultation\\_document/5809](https://aida.ineris.fr/consultation_document/5809)

Brodersen, K. P. (1995). The effect of wind exposure and filamentous algae on the distribution of surf zone macroinvertebrates in Lake Esrom, Denmark. *Hydrobiologia*, 297(2), 131-148. <https://doi.org/10.1007/BF00017480>

Dodds, W. K. (2002). Physiography of Lakes and Reservoirs. In *Freshwater Ecology* (p. 90-111). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012219135-0/50007-6>

Doyle, R. D. (2001). Effects of waves on the early growth of *Vallisneria americana*. *Freshwater Biology*, 46(3), 389-397. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2001.00668.x>

Håkanson, L., Ervik, A., Mäkinen, T., & Möller, B. (1988). Coastal water sensitivity. In *Basic Concepts Concerning Assessments of Environmental Effects of Marine Fish Farms* (p. 44-85). Nordic Council of Ministers. <https://books.google.fr/books?id=J-Xlh0p-1k0C&pg=PA53&dq=Hakanson,+1981+effective+wind+fetch&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwib-eyZuNTpAhV15OAKHZzVBgsQ6AEIOzAC#v=onepage&q=Hakanson%2C%201981%20effective%20wind%20fetch&f=false>

Keddy, P. A. (1982). Quantifying within-lake gradients of wave energy : Interrelationships of wave energy, substrate particle size and shoreline plants in axe lake, Ontario. *Aquatic Botany*, 14, 41-58. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(82\)90085-7](https://doi.org/10.1016/0304-3770(82)90085-7)

Mason, L. A., Riseng, C. M., Layman, A. J., & Jensen, R. (2018). Effective fetch and relative exposure index maps for the Laurentian Great Lakes. *Scientific Data*, 5(1), 180295. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.295>

Riis, T., & Hawes, I. (2003). Effect of wave exposure on vegetation abundance, richness and depth distribution of shallow water plants in a New Zealand lake. *Freshwater Biology*, 48(1), 75-87. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2003.00974.x>

Silinski, A., Schoutens, K., Puijalon, S., Schoelynck, J., Luyckx, D., Troch, P., Meire, P., & Temmerman, S. (2018). Coping with waves : Plasticity in tidal marsh plants as self-adapting coastal ecosystem engineers: Marsh plants as self-adapting ecosystem engineers. *Limnology and Oceanography*, 63(2), 799-815. <https://doi.org/10.1002/lno.10671>

Strand, J. A., & Weisner, S. E. B. (1996). Wave exposure related growth of epiphyton : Implications for the distribution of submerged macrophytes in eutrophic lakes. *Hydrobiologia*, 325(2), 113-119. <https://doi.org/10.1007/BF00028271>

Van Zuidam, B. G., & Peeters, E. T. H. M. (2015). Wave forces limit the establishment of submerged macrophytes in large shallow lakes : Waves Limit Macrophyte Establishment. *Limnology and Oceanography*, 60(5), 1536-1549. <https://doi.org/10.1002/lno.10115>

Wetzel, R. G. (2001). WATER MOVEMENTS. In *Limnology* (p. 93-128). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-057439-4.50011-3>