

## UNE ZONE HUMIDE PERD-ELLE AUTANT, MOINS OU DAVANTAGE D'EAU PAR ÉVAPOTRANSPIRATION QU'UN ÉTANG PAR ÉVAPORATION ? ÉTUDE EXPÉRIMENTALE EN LIMOUSIN

Mohammad Al Domany, Laurent Touchart, Pascal Bartout et Quentin Choffel

Armand Colin | « Annales de géographie »

2020/1 N° 731 | pages 83 à 112

ISSN 0003-4010

ISBN 9782200932763

Article disponible en ligne à l'adresse :

-----  
<https://www.cairn.info/revue-annales-de-geographie-2020-1-page-83.htm>  
-----

Distribution électronique Cairn.info pour Armand Colin.

© Armand Colin. Tous droits réservés pour tous pays.

La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.

# Une zone humide perd-elle autant, moins ou davantage d'eau par évapotranspiration qu'un étang par évaporation ? Étude expérimentale en Limousin

*Does a wetland lose as much, less or more water by evapotranspiration than a pond by evaporation ? Experimental study in Limousin*

**Mohammad Al Domany**

Chercheur PHD, Université d'Orléans, Laboratoire CEDETE

**Laurent Touchart**

Professeur, Université d'Orléans, Laboratoire CEDETE

**Pascal Bartout**

Maître de conférences HDR, Université d'Orléans, Laboratoire CEDETE

**Quentin Choffel**

Doctorant, Université d'Orléans, Laboratoire CEDETE

## Résumé

Malgré la rareté des études reposant sur des méthodologies scientifiques rigoureuses pour estimer la quantité d'eau perdue des étangs français *via* l'évaporation, les autorités les considèrent comme une cause majeure de l'étiage estival du chevelu hydrographique de tête de bassin. L'évaporation des étangs enregistre ses taux les plus élevés en été, mais les études antérieures avaient négligé la quantité d'eau pouvant être perdue par l'évapotranspiration des plantes qui remplaceraient ces étangs s'ils étaient effacés. Dans cette recherche nous adaptons une approche basée sur l'éventuelle surévaporation qui se produit en dépassement de l'évapotranspiration du terrain qui a existé ou existera en lieu et place de la nappe d'eau libre. Des mesures directes de l'évaporation d'un étang et de l'évapotranspiration des plantes occupant le fond d'un ancien étang rompu ont été prises entre le 1<sup>er</sup> mars et le 30 septembre 2018 en Limousin. Les résultats montrent que la prairie humide a perdu 1,37 fois la quantité d'eau perdue par l'étang voisin. Concernant l'évapotranspiration, la comparaison entre les calculs des formules mathématiques et les mesures prises *in situ* montrent que la méthode de Penman-Monteith ne prend pas en considération le stade végétatif des plantes. Concernant l'évaporation, la formule « Aldomany » donne des valeurs proches des mesures réalisées sur l'étang, l'écart moyen n'étant que de 6,4 %. Les méthodes mathématiques utilisées dans cette recherche peuvent fournir des estimations acceptables de l'évapotranspiration réelle des prairies humides si le coefficient cultural calculé dans cette étude (1,37) est pris en considération.

## Abstract

*Despite the rarity of serious studies based on solid scientific methodologies to estimate the quantity of water lost from French ponds by evaporation, the French authorities consider these water bodies as the main cause of water loss and therefore the summer low water levels of the hydrographic networks. Certainly,*

*pond evaporation records its highest rates in summer, but previous studies had neglected the amount of water that can be lost through plant evapotranspiration that would replace the ponds if they were dried up. In this research the Authors adapt an approach based on possible over-evaporation that occurs in excess of the wetland evapotranspiration that existed or would exist in place of the ponds. Direct measurements of pond evaporation and the evapotranspiration of plants occupying the bottom of an old broken-up pond were taken during the warm semester of 2018 in Limousin (France). The results of this research show that the wetland has lost 1.37 times the amount of water lost from the nearby pond. Comparison between calculations from mathematical formulae and measurements taken in situ shows that the Penman-Monteith method does not consider the vegetative stage of plants and that it is more suitable for estimating evaporation from free water bodies. Aldomany's formula gives close values with an average difference of 6.4 % of the measured evaporation. The mathematical methods used in this research can provide acceptable estimates of the actual evapotranspiration of wet wetland if the crop coefficient calculated in this study (1.37) has been taken into consideration.*

**Mots-clés** évaporation, évapotranspiration réelle, étang, prairie humide, Limousin

**Keywords** evaporation, actual evapotranspiration, pond, wetland, Limousin

## 1 Introduction

« En région Poitou-Charentes, Pays de Loire et Centre, les très nombreux plans d'eau situés en tête de bassin-versant accentuent fortement l'intensité des étiages, d'autant plus que ceux-ci ont le plus souvent été aménagés sur d'anciennes zones humides » (Boutet-Berry *et al.*, 2011, p. 27). Cette affirmation de l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (devenu AFB depuis) représente le discours officiel des autorités françaises, exprimé de la même manière dans les documents internes des agences de l'eau<sup>1</sup>, des syndicats de bassin, des schémas d'aménagement et de gestion des eaux ou encore des contrats de rivière. La justification répétée de cette assertion se trouve être que les étangs du centre-ouest de la France évaporeront en moyenne, en été, un demi-litre par seconde par hectare<sup>2</sup>, soit la perte d'une tranche d'eau de cent trente millimètres par mois. Or il manque dans ces documents une comparaison avec les autres milieux géographiques. En effet, la perte d'eau, ou « la forte accentuation de l'étiage » n'est pas une question absolue, mais relative. L'étang évapore certes, mais la zone humide (ZH) qui existait avant la mise en eau de l'étang ou qui reprendra sa place après « l'effacement », prôné par les autorités, évapotranspirera elle aussi. Si mise en accusation de l'étang il doit y avoir, elle ne peut se fonder sur son

1 Par exemple, « la diminution du débit liée à des activités anthropiques (prélèvement, évaporation en période d'étiage du fait de la présence de plans d'eau » (Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 2016, p. 41).

2 Elle est par exemple exprimée ainsi par l'Onema : « Impact sur le débit du cours d'eau. Evaporation : diverses études convergent vers une évaporation moyenne estivale de 0,5 l/s/ha » (Carmie, 2012, p. 14).

évaporation, mais sur l'éventuelle surévaporation qui se produit en dépassement de l'évapotranspiration (ET) du terrain qui a existé ou existera en lieu et place de la nappe d'eau libre.

Nous posons l'hypothèse de travail que la somme algébrique de l'évaporation de l'étang et de l'ET de la ZH équivalente peut donner un résultat positif, nul ou négatif. C'est pourquoi il est nécessaire de quantifier sans a priori les deux termes de l'opération mathématique. Ceux-ci doivent être définis et il faut utiliser la meilleure méthode possible pour leur détermination.

L'ET est la somme de l'évaporation et de la transpiration des plantes de la surface de la Terre vers l'atmosphère. C'est une variable climatique qui relie le bilan énergétique de surface (chaleur latente de vaporisation), le bilan hydrique (évaporation) et le cycle du carbone (transpiration-photosynthèse) (Fisher *et al.*, 2017 ; Yang *et al.*, 2016 ; Brutsaert et Chen, 1996). La disponibilité d'informations précises et fiables sur l'ET est une condition préalable à la gestion des ressources en eau, la planification de l'irrigation, l'estimation du rendement des cultures et les prévisions de sécheresse (Liaquat *et al.*, 2015 ; Baik et Choi, 2015).

Au cours des dernières décennies, plusieurs types d'approches ont été développés pour estimer l'ET, dont celles basées sur la télédétection (Ma *et al.*, 2018 ; Song *et al.*, 2016 ; Yao *et al.*, 2014). Elles peuvent l'évaluer aux échelles régionales ou globales. Cependant, les estimations quotidiennes de ces algorithmes ont montré des différences substantielles (Long *et al.*, 2014), et des marges d'erreur allant de 14 % à 44 % par rapport aux mesures au sol de lysimètres et d'évapotranspiromètres (Kalma *et al.*, 2008 ; Velpuri *et al.*, 2013 ; Yao *et al.*, 2013).

Dans diverses pratiques, l'ET des plantes ne souffrant pas de stress hydrique est estimée par les coefficients culturaux (Doorenbos et Pruitt, 1977). Dans cette approche, l'ET des cultures en croissance optimale est écrite comme :

$$ET_{opt} = kc ET_{ref} \quad (1) \text{ (Jacobs et De Bruin, 1998)}$$

Où :  $kc$  est le coefficient cultural concernant l'espèce végétale étudiée et  $ET_{ref}$  est l'ET d'une culture de référence, généralement du gazon.

L' $ET_{ref}$  est obtenue soit par des mesures directes de l'ET d'un gazon coupé régulièrement pour maintenir sa hauteur entre 8 et 12 cm (Thorntwaite et Holzman, 1942 ; Penman, 1948) (ce qui s'écarte de la réalité de terrain des herbes occupant les prairies humides), soit calculée par des formules mathématiques utilisant des données météorologiques (Thorntwaite et Holzman, 1939 ; Monteith, 1965). Dans le cas de MétéoFrance, la grille de calcul est fondée sur un carré de 12 km par 12 km, chaque point étant interpolé en fonction des cinq stations météorologiques les plus proches.

La question fondamentale est celle de savoir s'il existe vraiment une surévaporation due aux étangs dans le Centre-Ouest de la France, région accueillant près d'un étang français sur deux actuellement (Bartout et Touchart, 2013) et

donc particulièrement sensible à cette thématique stagnustre. Pour tenter d'apporter une réponse nuancée et géographique, il convient de privilégier l'approche multiscale et l'analyse hydrobioclimatique. Les changements d'échelles doivent se décliner selon *i*) un cadrage bibliographique international, *ii*) le choix d'une région où les enjeux tournant autour des étangs sont particulièrement élevés, *iii*) la focalisation sur un étang dont les caractéristiques morphométriques rejoignent la normale régionale du Limousin (Bartout, 2012) et sur une ZH situés à proximité l'un de l'autre, et *iv*) la sélection de celle-ci sur le fond d'un ancien étang effacé. L'approche hydrobioclimatique doit comporter des mesures effectives de terrain (dans une thématique par ailleurs trop souvent traitée par des estimations exclusivement mathématiques), tant pour l'évaporation de l'étang que pour la transpiration des plantes de prairie humide. Elle vise aussi à obtenir le coefficient cultural des plantes étudiées, le jonc et les herbes gazonnantes dominées par les fétuques.

## 2 L'évaporation des étangs dans ses contextes scientifiques et réglementaires

### 2.1 Le contexte scientifique mondial

À l'échelle mondiale, dans différents milieux climatiques, un certain nombre de chercheurs ont montré depuis longtemps que l'évaporation d'une nappe d'eau libre n'était pas forcément supérieure à l'ET d'un terrain humide où les plantes ne souffrent pas de stress hydrique. En Floride, certains ont noté que l'évaporation d'un plan d'eau était supérieure à l'ET des plantes de ZH pendant la saison de repos végétatif, mais qu'elle lui était inférieure quand les plantes se trouvaient dans leur stade de croissance maximale (DeBusk *et al.*, 1983). En Égypte, A. Rashed et ses collaborateurs (2014) ont quantifié par des mesures directes le fait que l'évaporation d'une surface d'eau libre était toute l'année inférieure à l'ET des plantes de ZH. En Floride, les plantes étudiées étaient la Jacinthe d'eau et la Petite Lentille d'eau, en Égypte, il s'agissait des deux mêmes, auxquelles s'ajoutaient la Massette, le Roseau et le Millet rampant.

Dans la zone tempérée européenne, de nombreux résultats sont analogues. Que ce soit en Russie occidentale (Урываев, 1953), en Allemagne (Gessner, 1959, Herbst et Kappen, 1999), en Roumanie (Stan *et al.*, 2016), l'évaporation des petits lacs naturels (de la taille des étangs artificiels français) est plus faible que l'ET des hélrophytes selon un rapport variant entre 1,5 et 3 à l'échelle annuelle. Dans les petits plans d'eau d'Allemagne du nord (Herbst et Kappen, 1999), l'évaporation a été inférieure à l'ET lors de trois des quatre années de mesures. En Roumanie, dans le cas du lac Caldarusani, l'évaporation estivale était de 4,3 mm/j, cependant que l'ET des plantes était de 10,3 mm/j.

La cause de ces pertes d'eau plus faibles pourrait se trouver dans le fait que la surface évaporante d'une nappe d'eau libre est plus petite que celle d'un marécage

de même superficie comprenant des plantes dont les stomates sont répartis sur une surface de contact au total plus grande.

À plus courte échelle de temps, l'ET des plantes de ZH devient encore plus forte à chaque fois que l'humidité relative de l'air diminue (Gessner, 1959 ; Rao, 1988) et la vitesse de la brise augmente (Weert et Kamerling, 1974), du moins en restant en deçà de 7 à 8 km/h.

## **2.2 Le contexte réglementaire européen et français et son influence sur le biais méthodologique**

À l'échelle européenne, la politique de l'eau est organisée par la directive cadre sur l'eau de 2000 (DCE-2000) qui se fixe comme objectif un bon état des eaux<sup>3</sup>. À l'échelle française, elle a été codifiée par la loi sur l'eau et les milieux aquatiques de 2006. Pour ce faire, la réglementation a adopté la démarche des hydro-écorégions (Andriamahefa, 1999) qui segmente le tissu hydrographique en « masses d'eau » (cours d'eau, plan d'eau, côtière, transition, nappe), mais sans mettre en avant les relations existant entre ces différentes entités, excepté quand il s'agit d'une logique amont-aval. De fait, cette réglementation n'est pas conçue en fonction des bassins hydrographiques (ce qu'énonce pourtant la DCE-2000 dans son texte en anglais), elle ne fait pas référence aux ZH et considère l'aspect anthropologique comme une « pathologie » (Wasson *et al.*, 2004). Les étangs étant des créations anthropiques (au même titre que la plupart des mares et des lacs en France), ils n'ont donc pas de place attirée dans cette classification. N'existant pas, ils ne peuvent être gérés en tant qu'« étangs » (« limnosystèmes de versant », Touchart, 2007), mais ne sont vus que comme des perturbateurs.

Au contraire de cette vision réglementaire niant l'étang, les pratiques en ont fait un élément essentiel des campagnes (puis des coulées vertes des villes). Défini par les lexicographes dès le XVI<sup>e</sup> siècle (Estienne, 1549, Estienne et Liébault, 1583, Nicot, 1606), tant pour ses volets agricole que piscicole, cynégétique, industriel et de plus en plus de loisir, l'étang apportait alors avec lui le développement économique, la diversification alimentaire, une plus grande biodiversité, la réduction des maladies par ennoisement des zones spongieuses et, plus tard, un bien-être, un coin de nature.

Cependant, comme la forêt, l'étang était l'apanage des classes sociales aisées. Les mouvements sociaux des XVII<sup>e</sup>, XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles, ainsi que les avancées scientifiques autour de deux doctrines que sont l'hygiénisme et de l'agronomie (Rozier, 1786), ont mis à mal leur utilité et leur existence même.

Leur retour sur le devant de la scène au début des années 1960 correspond au développement des loisirs, mais aussi à l'émergence du concept de ZH et, plus largement, à une réappropriation sociale de l'hydrosystème (Bartout et Touchart, 2017) autour des questions de Nature. L'étang peut alors être apparenté à une des multiples formes des ZH définies par la Convention de Ramsar (1971). Au

3 Initialement en 2015, aujourd'hui en 2021 ou 2027 selon les types de « masses d'eau » et les types d'indicateurs.

niveau mondial, le programme « Man and Biosphere » de l'UNESCO fait entrer l'étang dans le domaine des ZH : il s'agit de « toute zone de transition entre des systèmes terrestres et aquatiques où la nappe phréatique est proche de la surface du sol ou dans laquelle cette surface est recouverte d'eau peu profonde, de façon permanente ou temporaire ».

Cette sensibilisation aux ZH qui vise à leur protection est liée au développement intensif des sociétés modernes, sachant que près de la moitié d'entre elles a disparu à l'échelle mondiale depuis les années 1970 (Gramond, 2002, Russi *et al.*, 2013). Or, en France, si la création des ZH offre une existence pseudo-légale aux étangs, la mise en avant agricole des Trente Glorieuses va paradoxalement les exclure<sup>4</sup>. En effet la loi d'orientation agricole du 4 juillet 1980 qui définit « la maîtrise de l'eau comme facteur essentiel de la production agricole » encourage le drainage (Narcy, 2004), contribue à la disparition des ZH, principalement jusqu'au début des années 1990 (Bernard, 1994 ; Franchomme et Kergomard, 2006 ; Cizel, 2013). Ce drainage a aussi provoqué un recours massif à l'irrigation conduisant les autorités à multiplier les réserves en eau, souterraines (puits) ou de surface (pompages en cours d'eau et création de « retenues collinaires »). Or ces dernières sont assimilées fonctionnellement à des étangs mais n'en ont plus la diversité d'usage, si bien qu'elles déforment la réalité. L'image de ce nouvel étang n'est plus assimilée à une ZH (trop profond, absence de végétation rivulaire) et les créations en têtes de bassin de petits étangs voués exclusivement à des fonctionnalités individualistes et non à des besoins communautaires (Bartout, 2006) déforment le ressenti du public et d'un certain nombre de structures qui y voient une perturbation de l'hydrosystème et de la ZH « de référence » au sens de la seule ayant un intérêt environnemental (Jarleton, 2009).

Les étangs sont alors exclus des ZH et le discours officiel pose la question de l'effacement (suppression) de l'étang comme préalable à la restauration de la continuité écologique, s'appuyant sur deux pré-supposés : la rupture de la chaussée de l'étang dans le profil amont-aval du cours d'eau et la perte en eau. Nous avons déjà discuté cette approche (application de la doctrine du New Public Management) utilisée pour la DCE-2000 (Bartout et Touchart, 2016) biocentrée/écocentrée excluant l'homme (Bartout et Touchart, 2017), mais nos récents travaux sur la question évaporatoire (Al Domany, 2017) ont remis en question le bien-fondé de la surévaporation de l'étang. Nous proposons ici de quantifier et comparer l'empreinte évaporatoire d'un étang en eau et d'un autre effacé.

4 « De souche paysanne [...], j'apprécie peu les vastes étendues, les horizons à l'infini. Mon œil a besoin d'être arrêté par les haies ou les roseaux. En ces tristes temps où les rivières ne charrieront bientôt plus que la mousse des machines dites sinistrement "à laver", l'avenir du rêveur et du pêcheur se situe au bord de l'étang » (Fallet, 1974).

### 3 Le site d'étude en Limousin pendant l'année 2018

#### 3.1 La chaîne d'un étang rompu et d'étangs en eau

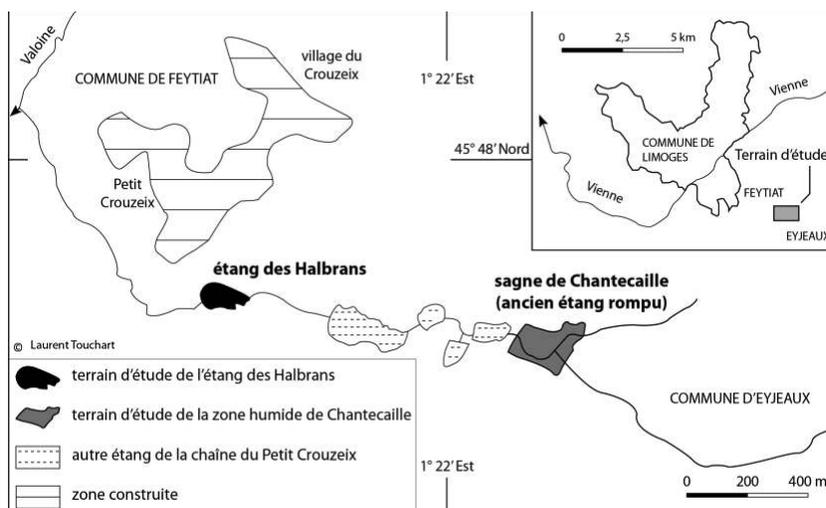
Le site se trouve au cœur même d'un territoire où les querelles entre pro et anti étangs sont vives. La Haute-Vienne a connu une explosion de son nombre d'étangs dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle (7 470 étangs compris entre 0,1 et 100 ha, et 14 596 plans d'eau de plus de 0,01 ha à l'heure actuelle, chiffres inédits) mais elle en était déjà riche (monts d'Ambazac et de Blond autour de l'abbaye de Grandmont, Pays des Feuillardiers en lien avec la force motrice nécessaire à l'activation des forges dites *périgourdines*). L'étang est donc ici un élément familial et toutes les communes du département en possèdent (Bartout, 2006). Ceux-ci ont été construits, pour les plus anciens, en barrage de cours d'eau dans des vallées encaissées. Ils ont permis de stocker l'eau pour les besoins agricoles (système des levades) ou industriels (moulins) en ennoyant des fonds de vallées peu utiles. Or, ces terrains humides, incultivables, forment justement les sites que souhaite revaloriser le SDAGE Loire-Bretagne pour leurs services écologiques, alors que deux siècles plus tôt, les hygiénistes n'y voyaient que maladie et rachitisme (Rozier, 1786).

De fait, ces fonds de vallée ont connu une fluctuation de leurs mises en valeur selon les préceptes et intérêts économiques de l'époque et il est possible, en étudiant le palimpseste des paysages, de trouver des étangs en eau et d'autres asséchés depuis plus ou moins longtemps les uns à côté des autres. Ces fonds de vallon humides sont appelés en Limousin des sagnes. Ce terme vernaculaire épouse mieux qu'un autre la logique scientifique de cette recherche. Il désigne en effet la plante principale du terrain gorgé d'eau, en général le jonc (Lavalade, 2003), dont nous cherchons à quantifier le coefficient cultural, et aussi, par métonymie géographique, la ZH tout entière (Villoutreix, 1995), dont nous cherchons à quantifier l'ET totale.

À l'intérieur de la Haute-Vienne, le site d'étude se trouve précisément à une dizaine de kilomètres au sud-est de Limoges, sur les communes de Feytiat et Eyjeaux. Il s'agit, en tête de bassin d'un ruisseau affluent de la Valoine, elle-même se jetant dans la Vienne quelques kilomètres en aval, de la chaîne des cinq étangs du Petit Crouzeix, précédée d'une sagne. Celle-ci, formée d'une jonchaie, provient d'un ancien étang, rompu dans les années 1970 (fig. 1).

Les mesures quotidiennes d'évaporation prises entre le 1<sup>er</sup> mars et le 30 septembre 2018<sup>5</sup> ont été effectuées sur celui des cinq plans d'eau situé le plus en aval, l'étang des Halbrans, celles d'ET du jonc sur la prairie humide située à l'amont,

5 Il ne nous a pas été possible de pouvoir obtenir des mesures sur une année hydrologique complète. Cependant, selon nos travaux précédents (Al Domany, 2017) sur deux étangs (l'un à Chérine en Brenne, l'autre à Rilhac-Rancon en Haut-Limousin) couvrant des mesures sur une année hydrologique complète, l'évaporation mesurée pendant la période allant du 1<sup>er</sup> mars au 30 septembre représente plus de 70 % de l'évaporation annuelle. Pour ce qui concerne l'évapotranspiration, cette période de sept mois couvre la plus grande partie de la période végétative.



**Fig. 1** Localisation du terrain d'étude.  
*Location map of the study site.*

la sagne de Chantecaille. Les deux sites de mesures, en continuité topographique (même vallon) et hydrographique (même ruisseau)<sup>6</sup>, se trouvent à seulement 1 km de distance. Ils sont soumis au « climat océanique altéré » (température moyenne annuelle supérieure à 11 °C, précipitations dépassant 700 mm/an) de la classification de Joly *et al.* (2010). Les précipitations y tombent tout au long de l'année avec un minimum en saison estivale et un maximum de saison hivernale.

L'étang des Halbrans (45°47'40"N – 1°21'20"E, 330 mètres au-dessus de la mer) est le seul de la chaîne qui soit une propriété privée, les quatre autres, sans nom, appartenant à la commune de Feytiat. Son aménagement hydraulique cumule un déversoir, un moine et une dérivation. La superficie de l'étang au début de la période d'étude (mars 2018) était égale à 11 200 m<sup>2</sup>, son volume à cette date-là était de 11 645 m<sup>3</sup> et sa profondeur moyenne de 1,05 mètre [fig. 2 (a)]. En cela, l'étang des Halbrans correspond à l'archétype de l'étang français dont les moyennes sont d'environ 10 000 m<sup>2</sup> de superficie pour 1 m de profondeur maximale (Touchart et Bartout, 2015). Ces caractéristiques donnent à cet étang un potentiel de généralisation des résultats obtenus.

À partir de la mi-juin, en raison de l'assèchement du cours d'eau de rang 0 avant l'entrée dans la chaîne et de la faiblesse des précipitations, le niveau d'eau dans l'étang a commencé à diminuer, du fait des fuites dans la chaussée, de l'infiltration vers les nappes phréatiques, de la percolation vers l'entourage de l'étang et de l'évaporation qui enregistre ses valeurs les plus élevées durant les mois

6 C'est-à-dire où les différences climatiques (rayonnement solaire, température de l'air, vitesse du vent...) sont négligeables.

d'été. À la fin de septembre, le niveau de l'étang avait baissé de 65 cm. À cause de ce marnage, le volume, estimé lors la deuxième campagne bathymétrique<sup>7</sup> du 6 octobre 2018, ne dépassait pas 5 000 m<sup>3</sup>. La profondeur moyenne de l'étang à cette date n'était alors que de 45 cm [fig. 2 (b)]. Pourtant, du fait de son encaissement, la superficie de l'étang n'avait diminué que de 605 m<sup>2</sup> entre les deux dates, pour atteindre 10 595 m<sup>2</sup>.

À l'intérieur du plateau disséqué du Haut Limousin, le bassin versant (BV) de l'étang des Halbrans, qui s'étend sur 183 ha, voit son altitude décroître depuis le point culminant à 421 m jusqu'à 330 m à la chaussée [fig. 2 (c)]. Le BV est occupé par des prairies et des champs cultivés (86 ha ou 47 %), des forêts (78 ha ou 42,6 %), des zones construites et des réseaux de communication (13 ha ou 7,1 %) et des surfaces en eau (6 ha ou 3,3 %), l'ensemble ayant été quantifié par nos soins à partir d'une image satellite et au moyen d'un SIG [fig. 2 (d)]. Bien que les étangs ne représentent que 3,3 % de la superficie totale du BV, ce pourcentage est 6,34 fois plus grand que celui des étangs à l'échelle nationale<sup>8</sup>. La superficie des étangs varie de 0,51 à 2,1 ha, sans compter les mares, aussi présentes dans le bassin. La taille moyenne des étangs limousins étant de 0,6 ha (Bartout, 2012), il se trouve que quatre des cinq étangs de la chaîne sont plus grands que la moyenne régionale.

Située en amont de la chaîne, la sagne de Chantecaille, qui s'étire entre 352 m et 348,25 m d'altitude, couvre 1,84 ha. Cet ancien étang rompu recueille les eaux des versants environnants. Les petits rus temporaires qui traversent cette zone ont creusé leur lit, de parfois 1,5 m de profondeur, dans les sédiments accumulés au fond de l'ancien étang. Gorgée d'eau pendant l'essentiel de l'année, cette prairie humide est occupée à plus de 85 % par des joncs. En tant qu'ancien étang, elle peut servir de référence scientifique pour l'étude prédictive des plans d'eau qui seraient susceptibles d'être effacés dans les années à venir.

### **3.2 Le semestre chaud de 2018 par rapport aux normales saisonnières**

Pour cadrer la période d'étude dans les normales saisonnières de mars à septembre, nous avons utilisé des données issues de la station MétéoFrance de Limoges-Bellegarde, à 15,5 km à l'ouest-nord-ouest de notre terrain d'étude. Les tableaux 1 et 2 montrent les moyennes mensuelles de 2018 et des 40 dernières années.

Concernant les précipitations, la période d'étude peut être divisée en deux parties. La première (de mars à juin 2018) est plus pluvieuse que la moyenne. Ces quatre mois ont reçu 443,2 mm, alors que cette période de l'année en reçoit normalement 340. La deuxième partie (de juillet jusqu'à la fin de septembre<sup>9</sup>) se

7 Cette bathymétrie a été réalisée grâce à deux cordes en plastique de 150 mètres de longueur graduée tous les dix mètres, utilisées perpendiculairement l'une à l'autre. Les profondeurs y ont été prises tous les dix mètres avec une perche en acier graduée tous les 25 cm.

8 Selon les travaux de P. Bartout (inédit), la superficie totale des étangs existant en France métropolitaine est égale à 285 544 ha. Cette superficie ne représente que 0,52 % de la surface de la France métropolitaine.

9 Cette période de sécheresse s'est poursuivie pendant le mois d'octobre 2018, car la quantité de précipitations tombée dans ce mois-ci n'a pas dépassé 18 mm.

**Tab. 1** Les paramètres climatiques issus de la station MétéoFrance (Limoges-Bellegarde) pour la période allant de mars à septembre 2018.

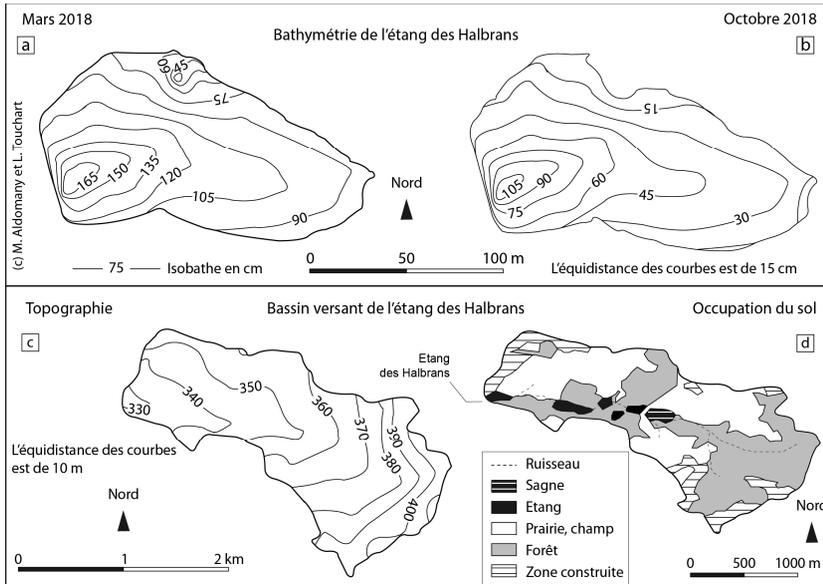
*The climatic parameters from Limoges-Bellegarde weather station for the period March to September 2018.*

Mois	Précipitation (mm)	Température (°C)	Vitesse du vent (m/s)	Humidité relative (%)
Mars 2018	146	6,5	4,4	80
Avril 2018	113	12,6	3,6	68
Mai 2018	107	14,5	2,9	74
Juin 2018	78	18,8	3,5	69
Juillet 2018	30	21,6	2,9	63
Août 2018	15	21,2	3	62
Septembre 2018	29	18,2	3,2	63
Total/Moyenne	518	16,2	3,4	68

**Tab. 2** Les paramètres climatiques calculés en utilisant les données des 40 dernières années provenant de la station MétéoFrance (Limoges-Bellegarde).

*The climatic parameters calculated using data of the last 40 years from Limoges-Bellegarde weather station.*

Mois	Précipitation (mm)	Température (°C)	Vitesse du vent (m/s)	Humidité relative (%)
Mars moyenne 40 ans	80	7,7	3,7	75
Avril moyenne 40 ans	88	9,9	3,6	73
Mai moyenne 40 ans	95	13,3	3,1	74
Juin moyenne 40 ans	74	16,9	3	73
Juillet moyenne 40 ans	69	19,1	2,9	72
Août moyenne 40 ans	76	19	2,8	72
Sep. moyenne 40 ans	72	16,1	2,9	75
Total/Moyenne	554	14,8	3,1	73



**Fig. 2** La bathymétrie de l'étang des Halbrans et son bassin versant.  
*Bathymetry and watershed of Halbrans pond.*

caractérisé par un manque relatif de pluie. Ces trois mois n'ont reçu que 74,3 mm, soit 34 % de la normale. Une telle répartition influence l'ET des cultures agricoles et des pâturages, et celle des plantes occupant les sagnes.

À l'exception de mars, au contraire plus froid d'1,2 °C, la période d'étude enregistre des températures de l'air supérieures de deux degrés à la normale, la différence la plus importante arrivant en avril (+ 2,7 °C).

Pour le paramètre du vent, la vitesse moyenne observée pendant la période d'étude est légèrement supérieure à la normale. Cela a tendance à stimuler la diffusion de la vapeur d'eau et participe ainsi à l'augmentation de l'évaporation. L'humidité relative de 2018, inférieure à la normale, facilite le transfert des molécules d'eau de la surface d'évaporation vers l'atmosphère et accélère l'évaporation à partir des étangs et l'ET des plantes si leurs apports en eau sont assurés.

En résumé, 2018 se caractérise par un printemps plus humide et chaud que la normale, majorant en théorie l'ET végétale par accélération de la croissance des plantes, et un été plus sec et chaud que la moyenne, augmentant potentiellement le taux d'évaporation des plans d'eau libres et freinant l'ET des plantes à l'échelle du bassin.

## 4 Une méthodologie fondée sur des mesures directes réalisées *in situ*

Face à l'incertitude des méthodes reposant sur des données collectées loin du terrain d'étude ou à des pas de temps hebdomadaires ou mensuels, le protocole ici utilisé répond à deux idées fortes : d'une part la priorité absolue donnée aux mesures *in situ*, réalisées à même l'étang et la sagne, d'autre part l'utilisation croisée des mesures directes et des équations mathématiques.

### 4.1 Les méthodes utilisées pour mesurer l'évapotranspiration réelle (ETR) des plantes et estimer l'évapotranspiration de référence (ET<sub>0</sub>)

Des discordances entre résultats expérimentaux et données calculées ont souvent fait douter de la validité des formules permettant d'évaluer ET. Mais les mesures proviennent dans la plupart des cas de lysimètres capables tout au plus de fournir une estimation correcte de l'ET physiologique alors que les formules se réfèrent en principe à l'ET climatique (Lecarpentier, 1975 ; Trout *et al.*, 2018).

Une revue des études concernant la mesure d'ETR montre que la plupart visent à mesurer l'évapotranspiration de référence (ET<sub>0</sub>), soit pour la luzerne (ET<sub>r</sub>), soit pour le gazon (ET<sub>0</sub>) (Wright *et al.*, 2000 ; Doorenbos et Pruitt, 1977 ; Wright, 1982 ; Howell *et al.*, 1995 et 1997). Il est vrai que ces deux types d'ET de référence ont été mesurés par ces auteurs en utilisant des lysimètres, mais les critères utilisés peuvent conduire à des résultats différents. Ainsi, l'ET<sub>0</sub> est généralement mesurée à partir d'un gazon régulièrement coupé pour maintenir sa hauteur entre 8 et 15 cm. Mais, dans la nature, les herbes ont des hauteurs parfois supérieures, si bien que la superficie d'échange est plus grande. C'est pourquoi, si le gazon ne souffre pas de stress hydrique, ce qui est le plus souvent le cas dans les zones humides, son ET<sub>r</sub> dépassera l'ET<sub>0</sub>.

Puisque notre étude cherche à embrasser au plus près les conditions réelles du milieu géographique, nous n'avons pas coupé les plantes utilisées pour mesurer leur ET<sub>r</sub>.

#### 4.1.1 L'évapotranspiromètre utilisé

Pour mesurer l'ET<sub>r</sub> des plantes occupant la sagne de Chantecaille, nous avons utilisé un type de lysimètre de dimensions réduites, un évapotranspiromètre, composé d'une bassine et d'une balance.

La bassine souple en PVC est de forme carrée. Elle mesure 34 cm de côté au sommet (donc 1 156 cm<sup>2</sup> de surface d'échange) et 29 cm à sa base, sa profondeur est de 30 cm. Un échantillon de jonc a été placé dans une bassine enterrée au même endroit où l'échantillon a été prélevé (sagne de Chantecaille). Un échantillon de gazon a été placé dans une bassine enterrée au bord de l'étang des Halbrans. Le sol est maintenu à 5 cm du rebord de la bassine, au même niveau que celui du sol encadrant.

La balance de 48 kg de capacité et de 2 grammes de précision donne, par la différence de poids entre deux mesures consécutives, la variation de stock

d'eau. Certes, la croissance végétale elle-même pourrait provoquer une différence de poids, mais la prise de mesures au pas de temps journalier réduit fortement cette possibilité de marge d'erreur. Celle-ci irait dans le sens que les chiffres d'évapotranspiration que nous donnons pourraient être légèrement inférieurs à la réalité, puisque ce serait une perte d'eau supérieure qui expliquerait un poids total en baisse pour une biomasse en hausse.

Comme la bassine est fermée à la base, l'ET a été calculée selon l'équation :

$$\text{ETR} = P \pm S \text{ (2) (Parcevaux et al., 1990)}$$

Où : *ETR* est l'évapotranspiration réelle en gramme ; *P* est les précipitations tombées depuis la dernière mesure en gramme ; *S* est la variation de poids de la bassine en gramme. Pour convertir l'ETR de gramme en mm, nous avons divisé les résultats de l'équation (2) par 116<sup>10</sup>.

M. Müller (1982) dit que les résultats obtenus en utilisant cet instrument sont assez fiables, bien que l'isolation entre le sol dans le lysimètre et le sol encadrant puisse générer une erreur de détermination de l'ET<sub>r</sub> (Budyko et Timofeev, 1952). Dans notre cas, le sol était gorgé d'eau jusqu'à la fin de juin. Il est vrai que, de la mi-juin à la fin septembre, les précipitations tombées ont été inférieures à la moyenne, mais le sol à 25 cm de profondeur est resté humide.

La mesure de l'ETR a été prise quotidiennement à 7 h 45, au moment du minimum diurne de contenance calorifique de l'eau des étangs limousins (Touchart, 2016). Après chaque mesure, le poids était ramené à celui du jour précédent, soit en vidant l'eau excédentaire qui était entrée dans la bassine par la pluie<sup>11</sup>, soit en ajoutant de l'eau pour compenser celle perdue durant les 24 dernières heures. Dès la mi-août, et jusqu'à la fin de la période, il n'y avait plus d'eau liquide dans le trou de la bassine mais le fond et les côtés étaient toujours humides. C'est pourquoi nous avons gardé notre méthode consistant à ajouter de l'eau à la bassine pour compenser celle perdue par l'ET.

Nous posons comme postulat que cet apport d'eau n'a ni perturbé le processus d'ET des plantes ni produit des valeurs erronées de l'ET. Car, si les échantillons de jonc et de gazon n'avaient pas été dans les bassines, leur système racinaire aurait été capable de s'alimenter en eau pour assurer le processus d'ET dans ses limites supérieures. Nous avons en effet vérifié chaque jour à l'extérieur et à côté de la bassine que le sol à 25 cm de profondeur était bien humide, si bien que les racines, qui peuvent atteindre ces horizons, n'ont eu aucun problème à absorber la quantité d'eau requise. Il s'agit là du fondement méthodologique de cette

10 Chaque 1 mm d'eau perdue d'une surface de 1 m<sup>2</sup> est égal à une quantité d'eau de 1 000 grammes. Donc l'ETR de 1 mm à partir d'une surface de 1 160 cm<sup>2</sup> est égale à 116 grammes.

11 La végétation qui déborde en aérien des limites de la bassine crée une incertitude quant à la quantité exacte de pluie qui y entre pendant les 24 dernières heures. Cependant, la marge d'erreur générée par cette quantité d'eau entrante dans la bassine de l'évapotranspiromètre par ce biais n'est pas à même de générer une erreur significative pour l'estimation de l'évapotranspiration des plantes étudiées.

recherche, qui étudie une sagne de fond de vallon, toujours humide. On ne peut certes pas assurer qu'il n'existe pas du tout d'effet d'isolement des 1 156 cm<sup>2</sup> d'une végétation par rapport à l'ensemble de l'écosystème de la prairie humide, qui pourrait légèrement modifier son fonctionnement. Mais c'est le principe même d'une case lysymétrique (Howell *et al.*, 1995).

#### 4.1.2 La méthode de Penman-Monteith

En absence de mesures directes de l'ET des plantes, plusieurs méthodes mathématiques sont utilisées. Celle de Penman-Monteith, recommandée par la FAO, est dite donner de bons résultats sous des conditions climatiques variées (Bakhtiari *et al.*, 2011 ; Marti *et al.*, 2015 ; Ndiaye *et al.*, 2017). Elle est donc largement utilisée (Allen *et al.*, 2006 ; Bouhlassa et Paré, 2006 ; Calanca *et al.*, 2011).

Pour effectuer une comparaison directe avec les résultats de nos propres mesures, nous pensons préférable de rappeler que l'équation de Penman-Monteith (1956) est formulée ainsi :

$$ET_0 = \frac{0,428\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U)} \quad (3) \text{ (Monteith, 1965)}$$

où :  $ET_0$  est le taux d'ET de référence (mm/jour) ;  $R_n$  est le rayonnement net en (MJ/m<sup>2</sup> / jour) ;  $G$  est le flux de chaleur du sol en (MJ/m<sup>2</sup> / jour)<sup>12</sup>,  $e_s$  est la pression de vapeur saturante à la température de l'air en (kPa) ;  $e_a$  est la pression de vapeur réelle en (kPa) ;  $(e_s - e_a)$  est le déficit de pression de vapeur de l'air par rapport à la saturation (kPa) ;  $T$  est la température moyenne journalière de l'air en (°C) ;  $\Delta$  est la pente de la courbe de la pression de vapeur saturante à la température de l'air (kPa/°C) ;  $\gamma$  est la constante psychrométrique en (kPa/°C) ;  $U$  est la vitesse moyenne journalière du vent à 2 mètres de la surface du sol en (m/s).

## 4.2 Les méthodes utilisées pour mesurer et calculer l'évaporation de l'étang des Halbrans

### 4.2.1 Les bacs d'évaporation utilisés

Dans le cadre de cette recherche, nous avons utilisé deux types de bacs d'évaporation, l'un de classe A, l'autre flottant. Les deux ont été installés sans grillages de protection, pour ne pas perturber la circulation de l'air.

Le bac de classe A, métallique, a une section cylindrique de 122 cm de diamètre et 25,4 cm de profondeur, où la tranche d'eau est maintenue entre 20 et 22 cm (soit entre 5,4 à 3,4 cm du rebord). Nous l'avons installé au bord de l'étang des Halbrans. Ce type de bac, utilisé par l'U.S. *Weather Bureau*, a

12 « Pour des intervalles de temps du jour à une dizaine de jours, le flux de chaleur sous la culture de référence est faible et peut être négligé » ; « le flux de chaleur du sol est faible par rapport au rayonnement net ( $R_n$ ) et peut souvent être ignoré » (Allen *et al.*, 2006, p. 43). C'est pourquoi nous avons négligé le terme  $G$  quand nous avons calculé l' $ET_0$ .

été adopté par l'OMM (Inra, 1990). Les mesures ont été effectuées en utilisant une jauge à crochet, qui permet de mesurer les variations de hauteur à 0,05 mm près. Elle est installée dans un puits de tranquillisation de 10 cm de diamètre, qui protège du vent et maintient plane la surface de l'eau. Ce bac est d'installation facile et les mesures ne sont pas faussées par le rejaillissement des gouttes de pluie ; cependant il est sensible aux variations de la température de l'air et aux effets de l'insolation (Morell *et al.*, 1999).

Afin d'obtenir des mesures encore plus fiables, nous avons utilisé un bac flottant en plastique, de forme cylindrique, de 24,5 cm de diamètre au sommet et 20 cm à la base et d'une profondeur de 24 cm. Il a été installé directement dans l'étang, avec un niveau d'eau maintenu à 3 cm du rebord, équivalent à celui de l'étang.

En utilisant le même principe que pour l'ETR, l'évaporation de l'étang des Halbrans a été mesurée par la différence entre deux poids consécutifs selon l'équation :

$$E = P \pm \Delta \quad (4)$$

Où :  $E$  est l'évaporation en gramme par jour ;  $P$  est les précipitations tombées depuis la dernière mesure en gramme ;  $\Delta$  est la variation de poids du bac en gramme. Pour convertir l'évaporation de gramme en mm, nous avons divisé les résultats de l'équation (4) par 46<sup>13</sup>.

La mesure d'évaporation à partir des deux bacs a été prise quotidiennement à 7 h 30, au moment du minimum diurne de la température de l'eau des étangs limousins (Touchart, 2016). Après chaque mesure, le poids du bac flottant était ramené à celui du jour précédent, soit en vidant l'eau excédentaire qui y était entrée par la pluie, soit en ajoutant de l'eau pour compenser celle perdue durant les 24 dernières heures.

#### 4.2.2 La formule empirique d'« Aldomany »

Pour calculer l'évaporation de l'étang des Halbrans à partir des données météorologiques prises *in situ*, nous avons utilisé la formule « Aldomany », élaborée en comparant des mesures directes de l'évaporation prises par M. Aldomany (2017) sur des étangs situés en Brenne et Limousin et des données climatiques collectées au bord des étangs étudiés. Cette formule n'a pas encore été testée ailleurs et il s'agit ici seulement d'en comparer les résultats avec ceux du bac.

La formule « Aldomany » est formulée ainsi<sup>14</sup> :

13 Chaque 1 mm d'eau perdue d'une surface de 1 m<sup>2</sup> est égal à une quantité d'eau de 1 000 grammes. Donc l'évaporation de 1 mm à partir d'une surface de 460 cm<sup>2</sup> est égale à 46 grammes.

14 Cette formule empirique est le fruit de deux régressions linéaires multiples calculées en utilisant le logiciel statistique SPSS (version 22). La première régression linéaire multiple est calculée avec l'évaporation mesurée pendant une année hydrologique complète pour un étang pelliculaire (étang Cistude) et les cinq facteurs météorologiques les plus importants dans le processus d'évaporation et qui

$$E = 0,1 * Rs + 0,178 * T^{\circ}eau - 0,049 * T^{\circ}air - 0,019 * Hr + 0,324 * V + 0,61 \quad (5)$$

(Aldomany, 2017)

Où :  $E$  est l'évaporation en (mm/jour) ;  $Rs$  est le rayonnement solaire arrivant à la surface de l'étang en (MJ/m<sup>2</sup>/jour) ;  $T^{\circ}air$  est la température moyenne journalière de l'air en (°C) ;  $T^{\circ}eau$  est la température moyenne journalière de l'eau en (°C) ;  $Hr$  est l'humidité relative moyenne journalière de l'air ;  $V$  est la vitesse moyenne journalière du vent (m/s).

### 4.3 La mesure des paramètres hydroclimatiques

Afin d'entrer dans les équations de calcul de l'évaporation et de l'ET<sub>0</sub> les données les plus précises possible, des mesures en continu ont été effectuées dans l'étang des Halbrans lui-même.

Une station météorologique WS3083 a été implantée sur la rive, à 2 mètres au-dessus de la surface de l'eau. Elle moyenne toutes les 30 minutes le rayonnement solaire, la vitesse du vent, la température de l'air, l'humidité relative et les précipitations. En installant précédemment une station WS3083 et une station *Vantage Pro2* à proximité l'une de l'autre, au bord de l'étang de Château à Rilhac-Rancon à 14 km au nord-nord-ouest de l'étang des Halbrans, Al Domany (2017) avait montré que les valeurs étaient équivalentes. Un thermomètre enregistreur subaquatique *HOBO Water Temp Pro v2*, d'une résolution de 0,02 °C et d'une précision de 0,21 °C (précision constructeur Onset à 25 °C), a été installé dans l'étang à 60 cm du bac flottant et à 10 cm de profondeur. Il prend une mesure de température de l'eau toutes les 30 minutes.

La comparaison entre les données météorologiques prises au bord de l'étang des Halbrans et celles issues de la station MétéoFrance (Limoges-Bellegarde) de mars à septembre 2018 montre quelques différences. La quantité de précipitations du site d'étude est supérieure de près de 30 mm à celle de Limoges-Bellegarde. En revanche, la température y est de seulement 0,3 °C plus haute (16,47 contre 16,18 °C), alors que le gradient altitudinal attendu serait de 0,5 °C (330 m d'altitude contre 406 m). Cela dénote peut-être une légère influence de la masse d'eau de l'étang sur la température de l'air et relativise à la marge les conclusions

---

ont été collectés au bord de cet étang (voir équation 6) :  $E = 0,111 Rs + 0,174 T^{\circ}eau - 0,061 T^{\circ}air - 0,012 Hr + 0,518 V - 0,244$  (6).

La deuxième régression linéaire multiple est calculée avec l'évaporation mesurée durant une année hydrologique complète pour un étang profond (étang de Château) et les facteurs météorologiques les plus importants dans le processus d'évaporation et qui ont été collectés au bord de cet étang (voir équation 7) :  $E = 0,115 Rs + 0,185 T^{\circ}eau - 0,032 T^{\circ}air - 0,032 Hr + 0,021 V + 1,953$  (7).

Selon P. Bartout (2015), 61 % des étangs existant dans la région Limousin (soit 13949 sur 22788) ont une profondeur maximale inférieure à 2 mètres (soit des étangs pelliculaires) et 39 % (soit 8839 sur 22788) ont une profondeur maximale supérieure à 2 mètres (soit des étangs profonds). Nous avons utilisé ces pourcentages pour généraliser notre formule à la région Limousin. Donc, la formule « Aldomany » est la somme de 0,61\* (équation 6) + 0,39\* (équation 7).

climatiques présentées lors de la comparaison entre les mesures in situ à Limoges-Bellegarde (tableaux 1 et 2).

La vitesse du vent au bord de l'étang (moyenne de 0,62 m/s) est le paramètre le plus touché par les facteurs environnants, en particulier les arbres entourant l'étang. Cette comparaison montre l'importance des données collectées sur le terrain d'étude et les erreurs qui peuvent survenir lors de l'utilisation de données provenant de stations éloignées. C. Markfort *et al.* (2010) avaient eux aussi quantifié les fortes différences concernant le vent entre les mesures effectuées à même sur un petit plan d'eau d'un kilomètre de diamètre et celles issues de stations officielles plus éloignées.

## 5 Résultats et discussion

### 5.1 La quantité d'eau perdue par la sagne de Chantecaille via l'ETR des plantes

Le tableau 3 donne l'ETR mensuelle mesurée pour le jonc (ETR<sub>j</sub>) et le gazon (ETR<sub>g</sub>), ainsi que l'ET<sub>0</sub> calculée selon la méthode de Penman-Monteith (P-M). La quantité d'eau perdue varie d'un mois à l'autre, dans des proportions différentes entre les deux espèces. Comme l'eau n'est pas un facteur limitant, cette variation du ratio ETR<sub>j</sub>/ETR<sub>g</sub> est liée avant tout au type et à la densité de la plante.

En mars et avril, la densité du jonc était supérieure à celle du gazon, la surface d'échange entre le jonc et l'air ambiant était plus grande. C'est pourquoi le jonc enregistrait des valeurs d'ETR supérieures. Au fur et à mesure que la température augmentait, l'herbe poussait à un rythme accéléré et sa densité devenait plus grande. À partir de la troisième semaine d'avril, l'herbe commença à perdre plus d'eau que le jonc et cette situation a duré jusqu'à la fin d'août. À partir du début de septembre, l'herbe commença à jaunir et la quantité d'eau perdue devint inférieure à celle du jonc. Au total, le gazon a perdu 93 mm de plus que le jonc et le ratio moyen entre l'ETR<sub>j</sub> et l'ETR<sub>g</sub> est égal à 0,91 (voir le tab. 3).

Le ratio entre l'ETR mesurée du gazon et l'ET<sub>0</sub> calculée selon la méthode de P-M, qui doit être théoriquement de 1, n'a atteint cette valeur dans aucun des sept mois. D'autres auteurs avaient déjà fait ce constat ailleurs (Bakhtiari *et al.*, 2011 ; Calanca *et al.*, 2011 ; Rashed, 2014 ; Ndiaye *et al.*, 2017). La comparaison entre le taux d'ET mensuelle (mesurée et calculée) pour le gazon donne l'impression que la méthode de P-M ne prend pas en considération le stade végétatif de la plante, car les valeurs les plus faibles du ratio sont enregistrées pendant la période la plus active, d'avril à juillet. À partir d'août (fig. 3), quand le gazon a commencé à sécher, le ratio a augmenté, pour culminer à 1,39 en septembre, le seul des sept mois à dépasser 1. À la lumière de ce qui précède, nous pensons que la méthode de P-M est plus adaptée pour estimer la quantité d'eau perdue d'une surface d'eau libre que l'ET de référence.

**Tab. 3** La somme mensuelle des mesures quotidiennes de l'ETR du jonc épars et du gazon (en mm), des calculs de l' $ET_0$  effectués par la méthode de P-M et l'évapotranspiration réelle calculée pour la sagne de Chantecaille.

*Actual monthly evapotranspiration of grass and rush *Juncus effusus* (in mm), reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) performed by the Penman-Monteith method (PM) and Chantecaille marshland's actual evapotranspiration.*

Mois	ETR <sub>j</sub> (mm)	ETR <sub>g</sub> (mm)	ET <sub>0</sub> (mm)	ETR <sub>j</sub> /ETR <sub>g</sub>	ET <sub>0</sub> /ETR <sub>g</sub>	ETR <sub>sagne</sub> (mm)
Mars 2018	86,1	65,8	49,7	1,31	0,76	83,1
Avril 2018	131,7	123,8	83,3	1,06	0,67	130,5
Mai 2018	140,3	146,5	88,1	0,96	0,6	141,2
Juin 2018	201,9	245,3	127,6	0,82	0,52	208,4
Juillet 2018	196,3	244,3	140,5	0,8	0,57	203,5
Août 2018	130,8	165,6	133,2	0,79	0,8	136
Septembre 2018	82,9	69,2	96,3	1,2	1,39	80,8
Somme et ratio moyen	970	1060,5	718,7	0,91	0,68	983,5

Selon les mesures mentionnées ci-dessus et après avoir pris en compte que 85 % de la superficie de la sagne de Chantecaille est occupée par le jonc, nous avons estimé le taux d' $ET_r$  de cette ZH ( $ETR_{sagne}$ ) à l'échelle mensuelle selon l'équation :

$$ETR_{sagne} = (0.85 ETR_j + 0.15 ETR_g) \quad (8)$$

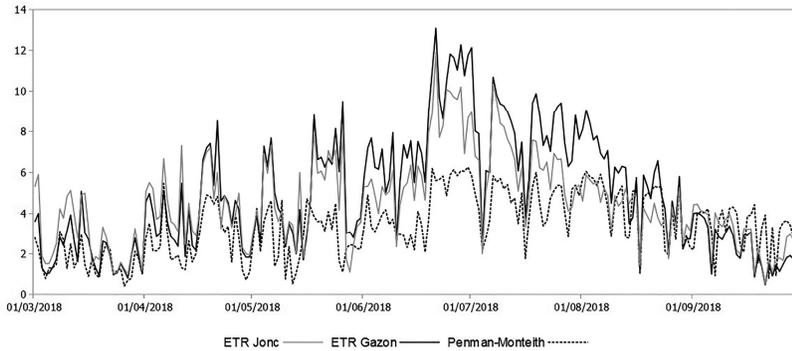
Où :  $ETR_{sagne}$  est (en mm par mois) ;  $ETR_j$  est l'évapotranspiration réelle du jonc pour le mois concerné (en mm) ;  $ETR_g$  est l'évapotranspiration réelle de gazon pour le mois concerné (en mm).

### 5.2 La quantité d'eau perdue par l'étang des Halbrans via l'évaporation

Le tableau (4) donne la somme mensuelle de l'évaporation mesurée [en utilisant un bac flottant ( $E_F$ ) et un bac de classe A ( $E_A$ )] et calculée [selon la méthode d'« Aldomany » ( $E_{\text{« Aldomany »}}$ )] à l'étang des Halbrans.

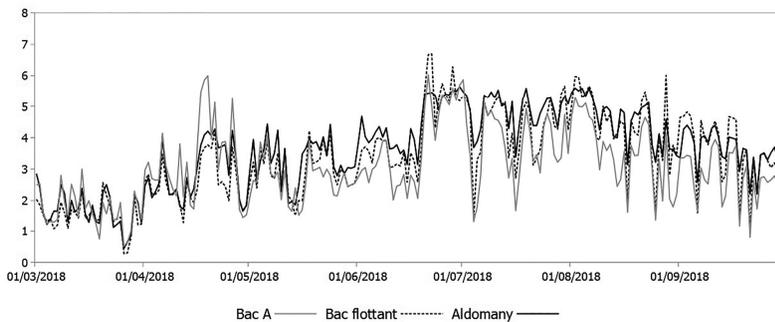
Concernant les mesures directes, le bac de classe A donne des valeurs supérieures à celles du bac flottant en mars et avril, mais il sous-estime l'évaporation pendant le reste de la période (fig. 4).

Cette différence ne peut être liée qu'à la température de l'eau, car les deux bacs sont installés à moins de 5 mètres l'un de l'autre et toutes les autres conditions sont identiques. Il a été montré (Al Domany, 2017, Al Domany *et al.*, 2018) que le bac de classe A, utilisé communément dans les recherches internationales



**Fig. 3** Les variations journalières de l'ETR de jonc et de gazon et de l'ETO calculée selon la méthode de P-M.

*Daily variations in grass and soft rush ETR (real evapotranspiration) and ETO (reference evapotranspiration) calculated using the PM method.*



**Fig. 4** Les variations journalières de l'évaporation mesurée par un bac flottant et d'un bac de classe A et calculée selon la formule « Aldomany » à l'étang des Halbrans pour la période allant du 01<sup>er</sup> mars au 30 septembre 2018.

*The daily variations of evaporation measured a class A evaporation pan and calculated according to Aldomany's formula at Halbrans pond for the period from March 1st to September 30th, 2018.*

présentait des résultats thermiques, dans le contexte des étangs limousins, très différents de ceux de l'étang. En revanche, le bac flottant, sauf les jours ensoleillés, n'a presque pas d'influence sur la température de l'eau qu'il contient. Nous avons donc considéré que les mesures d'évaporation du bac flottant étaient les plus proches de celles de l'évaporation réelle. Elles sont similaires aux seules mesures directes qui avaient été faites jusqu'à présent sur des étangs limousins (Cemagref, 1987, 1989), et, de juin à août, elles confirment les valeurs moyennes mensuelles de 130 mm reprises depuis dans les rapports internes.

La comparaison entre l'évaporation mesurée par le bac flottant et calculée selon la formule « Aldomany » montre que cette dernière donne des valeurs

proches, pour un écart moyen de 6,4 %. Cette méthode devra cependant être à l'avenir comparée avec d'autres.

**Tab. 4** La somme mensuelle (en mm) des mesures et des calculs quotidiens de l'évaporation effectués à l'étang des Halbrans.

*The monthly total (in mm) of evaporation measured and calculated at Halbrans pond.*

Mois	E <sub>F</sub>	E <sub>A</sub>	E « Aldomany »
Mars 2018	46,1	52,4	51,6
Avril 2018	77,8	98,9	87,3
Mai 2018	90,7	82,5	101,3
Juin 2018	125,8	111,2	133,7
Juillet 2018	136,4	116,4	141,3
Août 2018	136,2	110	142,1
Septembre 2018	105,9	82,5	107,5
Somme totale	718,9	653,9	764,8

Le tableau (5) montre que le bilan hydrique<sup>15</sup> de l'étang des Halbrans est positif pendant les mois de mars et avril, légèrement négatif en mai et juin et largement négatif en juillet, août et septembre.

Les précipitations tombées à la surface de l'étang durant les deux premiers mois ont été utilisées pour compenser la perte d'eau par évaporation et la quantité excédentaire a été rejetée dans le réseau hydrographique. Bien que l'étang ait reçu une quantité d'eau par les précipitations inférieure à celle perdue par l'évaporation pendant les mois de mai et de juin, il a continué à transférer l'eau reçue de son bassin versant dans son ruisseau émissaire, après déduction d'une petite fraction pour compenser la quantité d'eau perdue par évaporation. Cette fraction ne dépasse pas 17,9 mm pendant ces deux mois<sup>16</sup>.

En raison de la rareté des précipitations au cours des trois derniers mois, il n'y a plus d'écoulement d'eau concentré de surface, ni entrant dans l'étang, ni sortant de lui. Pratiquement toutes les précipitations (moins de 95 mm) tombées à la surface de l'étang de juillet à septembre ont été utilisées pour compenser la perte d'eau par évaporation.

15 Le bilan hydrique, climatique, est ici considéré comme la différence entre l'eau entrée dans l'étang via les précipitations et l'eau perdue par l'étang via l'évaporation. Nous le distinguons du bilan hydrologique, qui prend aussi en compte les échanges avec la nappe, les tributaires et l'émissaire.

16 Dans cette recherche, nous ne considérons pas la quantité d'eau infiltrée vers les nappes phréatiques ou fuitée via la chaussée de l'étang comme une perte, car cette quantité va finalement rejoindre le réseau hydrographique.

Bien que le niveau de l'étang ait diminué de 65 cm, en partie par infiltration, cette baisse ne provoque pas vraiment de prolongation de la durée de l'étiage, car la quantité d'eau nécessaire à l'étang pour que celui-ci reprenne son niveau initial est égale à 6 200 m<sup>3</sup>. Pour un bassin versant de 183 ha, une averse de 3 mm suffirait à remplir l'étang, ce qui n'est d'ailleurs pas indispensable pour laisser passer des eaux prises par le fond et repasser par-dessus la dernière planche supérieure de la cloison du moine.

Certes, en cumulant les sept mois, le bilan hydrique de l'étang a été négatif. Mais si nous supposons que l'étang a retenu toutes les pluies tombant directement au-dessus de sa surface, il lui faut moins de 173 mm d'eau provenant de son bassin pour assurer son évaporation. Pour comparaison, si l'étang n'existait pas, une telle quantité pourrait être perdue par certaines formations végétales répandues dans la région, comme par exemple l'interception d'une chênaie. Pour justifier cette hypothèse, nous nous sommes appuyés sur les recherches effectuées par Humbert et Najjar (1992) qui estiment l'interception d'une chênaie entre 22 et 34 % selon la saison et Al Domany (2017) qui a fait ses mesures directes en 2014 et 2015 à moins de 15 km de notre terrain d'étude. Il estime qu'une chênaie intercepte 27,8 % des précipitations annuelles, avec des valeurs maximales de juin à août (tableau. 5).

**Tab. 5** La quantité d'eau perdue de l'étang des Halbrans via l'évaporation, la quantité d'eau entrée via les précipitations et la quantité d'eau qui aurait pu être perdue par l'interception d'une chênaie (QEPI).

*The amount of water lost from the Halbrans pond through evaporation, the amount of water entering the pond via rainfall and the amount of water that could have been lost through interception of by an oak forest (QEPI).*

Mois	E <sub>F</sub> (mm)	Précipitation (P) (mm)	Bilan hydrique (mm)	Interception (%)	QEPI (mm)
Mars 2018	46.1	122.8	+ 76,7	24	29,5
Avril 2018	77.8	130.5	+ 52,7	27	35,2
Mai 2018	90.7	86.1	- 4,6	30	25,8
Juin 2018	125.8	112.5	- 13,3	33	37,1
Juillet 2018	136.4	35	- 101,4	35	12,3
Août 2018	136.2	39.4	- 96,8	35	13,8
Septembre 2018	105.9	20.4	- 85,5	31	6,3
<b>Total</b>	<b>718,9</b>	<b>546,7</b>	<b>- 172,2</b>	<b>31</b>	<b>160</b>

Le tableau (5) montre la quantité d'eau qui peut être perdue par l'interception d'une chênaie de superficie identique à celle de l'étang des Halbrans. La somme des sept mois est égale à 160 mm. La différence avec la quantité d'eau dont

l'étang a besoin de la part de son bassin versant pour assurer son évaporation (172,2 mm) ne dépasserait pas 13 mm.

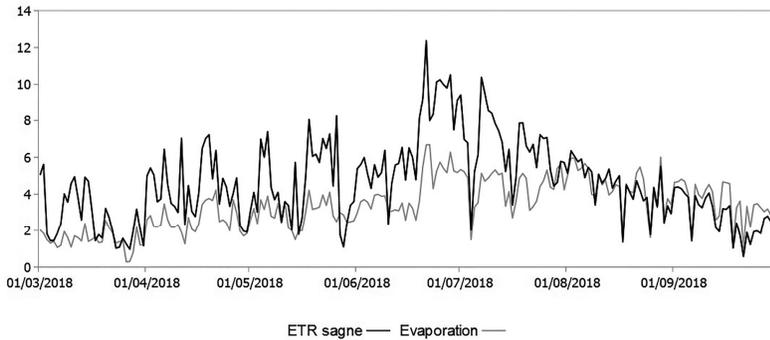
### **5.3 La comparaison entre l'évaporation de l'étang en eau et l'évapotranspiration de l'étang effacé**

Le tableau (6) montre les valeurs mensuelles de l'évaporation mesurée à l'étang des Halbrans et de l'ET<sub>r</sub> de la sagne de Chantecaille (ETR<sub>sagne</sub>). Elle montre aussi le coefficient cultural de cette prairie humide calculé par rapport à l'évaporation de l'étang (ETR<sub>sagne</sub>/E<sub>F</sub>). Nous savons que les deux processus [(physique (évaporation) et physiologique (transpiration)] se produisent en réaction aux conditions climatiques<sup>17</sup>. Ainsi, l'évaporation de l'étang et l'ETR de la sagne augmentent à partir au moins du mois de mars pour enregistrer leur maximum en juin pour l'ETR et en juillet pour l'évaporation. Puis elles diminuent en réponse aux conditions climatiques. Le décalage d'un mois est lié à la température de l'eau (énergie solaire stockée dans l'étang) qui est un facteur jouant un rôle important dans le processus d'évaporation et qui n'a pratiquement aucune influence sur l'ET des plantes. Le tableau (6) montre que la sagne a perdu durant les cinq premiers mois de cette recherche une quantité d'eau supérieure à celle perdue par l'étang. La surface d'échange avec l'atmosphère et le stade végétatif des plantes sont les facteurs les plus importants pour justifier cet écart. Le rôle du stade végétatif est confirmé, en négatif, dans les deux derniers mois, où l'évaporation de l'étang a enregistré des valeurs plus élevées que l'ET des plantes (fig. 5). Nous confirmons que cette diminution d'ETR des plantes ne résulte pas d'un stress hydrique, car le sol de l'évapotranspiromètre était encore humide. Et, comme dit en méthodologie, une quantité d'eau équivalente à celle perdue durant les 24 dernières heures par l'ET des plantes a été ajoutée aux deux échantillons de mesures. Le processus d'ET est lié aux variations quotidiennes des paramètres climatiques, car quand la température de l'air et le rayonnement solaire diminuent, l'ET diminue, et quand ils augmentent, l'ET augmente. Cependant, l'évaporation de l'étang est aussi affectée par la température de l'eau et l'énergie emmagasinée dans la masse d'eau. C'est pourquoi il y a eu plusieurs jours pendant lesquels, y compris en mars et avril, l'évaporation a enregistré des valeurs plus élevées que l'ET<sub>r</sub> des plantes (fig. 5).

En comparant le coefficient cultural trouvé dans cette recherche (1,37) et dans d'autres études, nous constatons que nos résultats sont cohérents avec ceux de Rashed (2014). Après avoir calculé le coefficient cultural de cinq différentes espèces végétales selon l'équation (9), A. Rashed a trouvé les coefficients culturaux suivants : Lentilles d'eau = 0,99 ; Millet rampant = 1,27 ; Roseaux = 1,39 ; Quenouilles = 1,45 et Jacinthe = 1,53<sup>18</sup> :

17 Bien sûr, le processus d'évapotranspiration est affecté aussi par l'humidité du sol, mais nous parlons ici d'une prairie humide où les plantes ne souffrent pas de stress hydrique.

18 Nous avons calculé les valeurs moyennes du Kc des plantes étudiées par Ahmed Rashed pour la période allant de mars à septembre seulement.



**Fig. 5** Les variations quotidiennes de l'évaporation et de l'évapotranspiration mesurées à l'étang des Halbrans et à la sagne de Chantecaille entre le 01er mars et le 30 septembre 2018.

*Daily variations in evaporation and evapotranspiration measured at Halbrans pond and the Chantecaille wetland between March 1st and September 30th 2018.*

$$Kc = ETp / ETb \quad (9)$$

Où :  $Kc$  est le coefficient cultural ;  $ETp$  est l'évapotranspiration réelle des plantes et  $ETb$  est l'évaporation mesurée par un bac évaporatoire de classe A.

**Tab. 6** Les valeurs mensuelles de l'évaporation et de l'ETR mesurées à l'étang des Halbrans et à la sagne de Chantecaille.

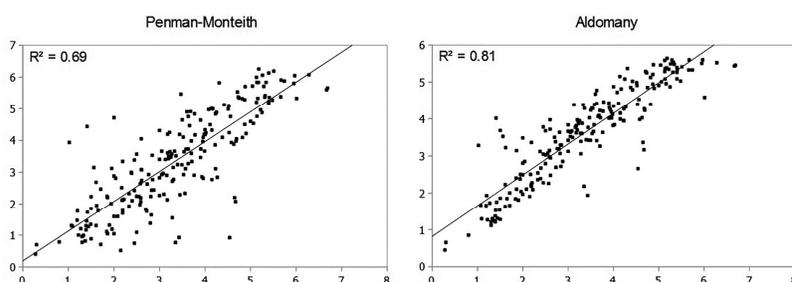
*The monthly values of evaporation and ETR measured at Halbrans pond and Chantecaille wetland.*

Mois	Évaporation (mm)	ETR <sub>sagne</sub> (mm)	ETR <sub>sagne</sub> /Évaporation
Mars 2018	46,1	83,1	1,8
Avril 2018	77,8	130,5	1,68
Mai 2018	90,7	141,2	1,56
Juin 2018	125,8	208,4	1,66
Juillet 2018	136,4	203,5	1,49
Août 2018	136,2	136	1
Septembre 2018	105,9	80,8	0,76
Total	718,9	983,5	1,37

Il est vrai que la méthode de P-M a été utilisée ici pour tester sa validité pour déterminer l'ETR des plantes. Mais, la comparaison entre les sommes mensuelles de l' $ET_0$  obtenue par cette méthode (tab. 3, colonne :  $ET_0$ ) et les sommes mensuelles de l'évaporation mesurée par le bac flottant (tableau. 6,

colonne : Évaporation) a montré une forte similitude. La différence entre l' $ET_0$  et l'évaporation mesurée varie entre 1,4 % pour le mois de juin et 9,1 % pour le mois de septembre. Elle n'a jamais dépassé 10 % et pour le total de la période d'étude, elle est presque nulle (718,9 mm d'évaporation et 718,7 mm d' $ET$  estimée par P-M).

Malgré cette similitude des sommes mensuelles, les résultats de la méthode P-M, au niveau journalier, ont une faible corrélation avec les mesures quotidiennes de l'évaporation effectuées par le bac flottant. Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) entre l'évaporation mesurée et les calculs de la méthode de P-M ne dépasse pas 0,69, bien qu'il dépasse 0,8 entre les mesures du bac flottant et les calculs effectués par la formule « Aldomany » (fig. 6).



**Fig. 6** Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) entre l'évaporation mesurée par le bac flottant et les calculs effectués par les méthodes mathématiques de Penman-Monteith et d'« Aldomany ».

*The coefficient of determination ( $R^2$ ) between the evaporation measured by the floating pan and the calculations made by the mathematical methods of Penman-Monteith and Aldomany.*

Ainsi, nous pensons que l'utilisation de la méthode de P-M pour estimer l' $ET_r$  des plantes des ZH à l'échelle mensuelle devient possible seulement après la prise en compte des coefficients culturaux.

## 6 Conclusion

Dans le cadre d'une année 2018 plus chaude que la normale, dont le printemps était pluvieux, favorisant une  $ET$  maximale des plantes, et l'été sec, provoquant une évaporation maximale des nappes d'eau libres, nos mesures sur les sept mois allant de mars à septembre ont montré que la sagne de Chantecaille perdait près d'une fois et demie plus d'eau que l'étang situé à côté. Sur cette période, les coefficients culturaux moyens du jonc et du gazon ont été respectivement de 1,35 et 1,48. Ainsi, dans les conditions précitées, un étang ne provoque pas de surévaporation et de diminution de la ressource en eau, mais il augmente

au contraire la disponibilité en eau du milieu, alors qu'une ZH la réduit, car elle évapotranspire plus en direction de l'atmosphère. De même, le décalage temporel potentiellement généré par l'étang pour la reprise de l'écoulement en aval de celui-ci en période d'étiage est infime par rapport à une ZH saturée en eau. En effet, le volume d'eau permettant la reprise de l'écoulement au soir du 30 septembre à l'exutoire de l'étang est estimé à 6 200 m<sup>3</sup>. Or, à l'échelle de son bassin-versant de 183 ha, le retard de reprise des écoulements correspond à une pluie d'un peu plus de 3 mm, ce qui n'est pas grand-chose au regard de l'intérêt que représente un étang bien géré.

En conséquence, en termes de politique française de l'eau et d'aménagement du territoire limousin, la préconisation d'effacer les étangs en arguant de leurs effets supposément négatifs dont la diminution de la ressource en eau mérite donc d'être fortement nuancée et de s'appuyer sur plus de données scientifiques rigoureuses.

À l'intérieur du semestre chaud, l'ET de la ZH a dépassé l'évaporation de l'étang de mars à juillet, le contraire s'étant produit en août et septembre. En effet, à l'échelle mensuelle et à des échelles de temps encore plus fines, nos mesures montrent que l'évaporation physique et la transpiration physiologique sont des processus qui suivent les variations des conditions climatiques, et dépendent des types d'espèces végétales, de l'évolution des phases de croissance et de la densité de plantes.

Nos mesures directes *in situ* ont été comparées avec les valeurs données par les équations mathématiques. La formule « Aldomany » est celle qui estime le mieux l'évaporation des étangs, l'écart moyen ne dépassant pas 10 % de l'évaporation mesurée. La méthode de Penman-Monteith, recommandée par la FAO comme standard pour estimer l'ET de référence ne prend pas en considération le stade végétatif des plantes. De fait, elle est plus adaptée pour estimer l'évaporation des plans d'eau libres que l'ET des plantes. Elle peut cependant fournir des estimations acceptables de l'ETR des plantes des ZH qui ne souffrent pas d'un stress hydrique, du moins si le coefficient cultural a été pris en compte. Les coefficients culturaux mis en évidence par cette recherche pour les plantes des zones humides offrent une potentialité de généralisation afin d'estimer l'ETR des prairies humides en utilisant des équations mathématiques, celles-ci n'ayant besoin que de données climatiques facilement accessibles.

Enfin, la présente étude a donné quelques premières indications sur l'importance de la surface d'échange entre la surface évaporante et l'air ambiant pour les processus d'évaporation et d'ET. La surface d'échange entre un étang et la couche d'air sus-jacente est plus petite que celle entre une prairie humide occupée par des plantes et l'atmosphère. Des recherches seraient à lancer pour quantifier précisément cette surface d'échange, non seulement pour les ZH mais

aussi pour tous les autres types d'occupation du sol, y compris les forêts et les champs cultivés.

---

Université d'Orléans  
Laboratoire CEDETE  
10 Rue de Tours  
BP 46527  
45100 Orléans  
mohammad-aldomany@hotmail.com  
laurent.touchart@univ-orleans.fr  
pascal.bartout@univ-orleans.fr  
quentin.choffel@gmail.com

## Bibliographie

---

- Agence de l'Eau Loire-Bretagne. (2016), *Programme de mesures du bassin Loire-Bretagne 2016-2021*. Orléans, 186 p.
- Al Domany, M. (2017), *L'évaporation dans le bilan hydrologique des étangs du Centre-Ouest de la France (Brenne et Limousin)*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 332 p.
- Al Domany, M., Touchart, L., Bartout, P., Choffel, Q. (2018), « Direct measurements and new mathematical methods to estimate the pond evaporation of French Midwest », *Applied science and innovative research*, vol. 2, no. 1, p. 1-24.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (2006), *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements : Irrigation and Drainage Paper No. 56*. United Nations Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 300 p.
- Andriamahefa, H. (1999), *Les hydro-écorégions du bassin de la Loire. Morphologie, hydrologie, pressions anthropiques sur les cours d'eau et les bassins versants*, Saint-Étienne, Université Jean Monnet, CEMAGREF, 272 p.
- Baik, J., Choi, M. (2017), « Evaluation of remotely sensed actual evapotranspiration products from COMS and MODIS at two different flux tower sites in Korea », *International Journal of Remote Sensing*, vol. 36 (1), p. 375-402.
- Bakhtiari, B., Ghilman, N., Liaghat, A. M. Hoogenboom, G. (2011), « Evaluation of reference evapotranspiration models for a semi-arid environment using lysimeter measurements », *Journal of Agricultural Science and Technology*, vol. 13, n° 2, p. 223-237.
- Bartout, P. (2006), *Pour un référentiel des zones humides intérieures de milieu tempéré : l'exemple des étangs en Limousin (France), Typologies, régionalisation*, Université de Limoges, Thèse de doctorat en géographie, 497 p.
- Bartout, P. (2012), *Les étangs du Limousin : des zones humides face au développement durable*, Brive-la-Gaillarde : Les Monédières, 250 p + annexes.
- Bartout, P., Touchart, L. (2013), « L'inventaire des plans d'eau français : outil d'une meilleure gestion des eaux de surface », *Annales de Géographie*, vol. 691, p. 266-289.
- Bartout, P., Touchart, L. (2016), « La notion de limnicité est-elle suffisante pour caractériser l'empreinte spatiale et sociétale des plans d'eau ? », *Revue géographique de l'Est*, vol. 56, p. 1-2.
- Bartout, P., Touchart, L. (2017), « Le territoire limnique, une alternative à la gouvernance des plans d'eau par masses d'eau ? », *VertigO – la revue électronique en sciences de l'environnement*.
- Bernard, P. (1994), *Les zones humides, rapport d'évaluation*, Comité interministériel de l'évaluation des politiques publiques, Premier Ministre – Commissariat Général du Plan, rapport d'évaluation, La Documentation française, 391 p.

- Bouhlassa, S., Paré, S. (2006), « Évapotranspiration de référence dans la région aride de Tafilalet au sud-est du Maroc », *AJEAM-RAGEE*, Vol. 11, p. 1-16.
- Boutet-Berry, L., Bramard, M., Bachelier, E. (2011), « ONEMA, présentation impacts plans d'eau », *Forum techniciens médiateurs de rivières. Impacts des plans d'eau sur les cours d'eau. Mesures correctives et compensatoires. Éléments de réglementation*, Lathus, CPA, 6<sup>e</sup> forum TMR, 31 p.
- Brutsaert, W., Chen, D. (1996), « Diurnal variation of surface fluxes during thorough drying (or severe drought) of natural prairie », *Water Resource Research*, No. 32, p. 2013 – 2019.
- Budyko, M. I., Timofeev, M. P. (1952), « On methods for determining evaporation », *Meteorol. Gidrol.*, No, 9.
- Calanca, P., Smith, P., Holzkämper, A., Ammann, C. (2011), « L'évapotranspiration de référence et son application en agrométéorologie », *Recherche Agronomique Suisse*, vol. 2 (4), p. 176-183.
- Carmie, H. (2012), « Vers une gestion des étangs du bassin de la Vienne pour atteindre le bon état écologique des eaux », *Colloque organisé par l'Établissement public du bassin de la Vienne le 15 février 2012, Actes*, Limoges, Établissement public du bassin de la Vienne, 62 p. 24-25. Communication détaillée non résumée en 28 diapositives.
- Cemagref, groupement de Bordeaux. (1987), *Étude de l'impact des étangs en Limousin, rapport de synthèse des résultats obtenus à l'issue de la première campagne d'observations et de mesures*. Agence de bassin Loire Bretagne, Conseil supérieur de la pêche délégation régionale Auvergne-Limousin, Service régional de l'aménagement des eaux du Limousin, étude n°. 33, 50 p. + annexes.
- Cemagref, groupement de Bordeaux. (1989), *Étude de l'impact des étangs en Limousin, rapport de synthèse des résultats obtenus à l'issue de la seconde campagne d'observations et de mesures*. Agence de bassin Loire Bretagne, Conseil supérieur de la pêche délégation régionale Auvergne-Limousin, Service régional de l'aménagement des eaux du Limousin, étude n° 48, 24 p.
- Cizel, O. (2013), *Cadre juridique*, 26 p., In Oertli, B., Frossard, P.A. *Mares et étangs : écologie, gestion, aménagement et valorisation*, Lausanne, Presses Polytechniques et universitaires romandes, p. 392-417.
- DeBusk, T. A., Ryther, J. H., Williams, L. D. (1983), « Evapotranspiration of *Eichhornia crassipes* (Mart.) solms and *Lemna minor* L. in central Florida : Relation to canopy structure and season », *Aquatic Botany*, vol. 16, N°. 1, p. 31-39.
- Doorenbos, J., Pruitt, W. O. (1977), *Guidelines for predicting crop water Requirements, Irrigation and Drainage Paper 24*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 156 p.
- Estienne, R. (1549), *Dictionnaire françoislatin*, Paris, Imprimerie du Roy, 675 p.
- Estienne, C., Liébault, J. (1583), *L'Agriculture et maison rustique : plus un bref recueil des chasses... et de la fauconnerie*, Lyon, Jacques Dupuys, 395 p. liv IV, ch. I, « L'estang, la mare et la fosse à poisson ».
- Fallet, R. (1974). *Les pieds dans l'eau*, Paris : Mercure de France, 159 p.
- Fisher, J. B., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Anderson, M., Allen, R., et al. (2017), « The future of evapotranspiration : Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources », *Water Resources Research*, vol. 53, p. 2618-2626. <https://doi.org/10.1002/2016WR020175>
- Franchomme, M., Kergomard, C. (2006), « Diversité régionale de la prise en compte des zones humides et de leurs dynamiques », *Développement durable et territoires*, dossier 6, 11 p.
- Gessner, F. (1959), *Hydrobotanik. Die physiologischen Grundlagen der Pflanzenverbreitung im Wasser*. Berlin, Deutscher Verlag der Wissenschaften, T. 2 „Stoffhaushalt «, 701 S.
- Gramond, D. (2002), *Dynamique de l'occupation du sol et variation des usages de l'eau en Anatolie Centrale (Turquie) au cours du xx<sup>e</sup> siècle*. Thèse de Doctorat, Université Paris IV Sorbonne, 359 p.

- Herbst, M., Kappen, L. (1999), « The ratio of transpiration versus evaporation in a reed belt as influenced by weather conditions », *Aquatic Botany*, vol. 63, p. 113-125.
- Howell, T. A., Schneider, A. D., Dusek, D. A., Marek, T. H., Steiner, J. L. (1995), « Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters », *Trans. ASAE*, vol. 38, N° 4, p. 1019-1024.
- Howell, T. A., Steiner, J. L., Schneider, A. D., Even, S. R., Tolk, J. A. (1997), « Seasonal and maximum daily evapotranspiration of irrigated winter wheat, sorghum, and corn Southern High Plains », *Trans. ASAE*, vol. 40, N° 3, p. 623-634.
- Humbert, J., Najjar, G. (1992), *Influence de la forêt sur le cycle de l'eau en domaine tempéré. Une analyse de la littérature francophone*, CEREG Strasbourg, France, 85 p.
- Inra. (1990), *Dictionnaire encyclopédique d'agrométéorologie*. Cifl, Paris, 323 p.
- Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailles, J., Hilal, M., Wavresky, P. (2010), « Les types de climats en France, une construction spatiale. Cybergeog », *European Journal of Geography, Cartographie, Imagerie, SIG, document 501*, p. 1-24.
- Jacobs, A. F., De Bruin, H. A. (1998), « Makkink's equation for evapotranspiration applied to unstressed maize », *Hydrological processes*, Vol. 12, Iss. 7, p. 1063-1066.
- Jarleton, J. (2009), *Identification des Zones Humides d'Intérêt Environnemental Particulier (ZHIEP) et des Zones Stratégiques pour la Gestion de l'Eau (ZSGE) sur le bassin de la Vienne*, Mémoire de Master 2, Université de Tours, EPTB Vienne, 80 p.
- Kalma, J. D., Mccvicar, T. R., Mccabe, M. F. (2008), « Estimating land surface evaporation : A review of methods using remotely sensed surface temperature data », *Surveys in Geophysics*, vol. 29, N°. 4-5, p. 421-469.
- Lavalade, Y. (2003), *Dictionnaire Occitan/français, Limousin, Marche, Périgord*, La Geneytouse, Lucien Souny, 208 p.
- Lecarpentier, C. (1975), « L'évapotranspiration potentielle et ses implications géographiques », *Annuelles de Géographie*, N°, 463, p. 257-274.
- Liaqat, U. W., Choi, M., Awan, U. K. (2015), « Spatio-temporal distribution of actual evapotranspiration in the Indus basin irrigation system », *Hydrological Processes*, vol. 29, N°, 11, p. 2613 – 2627.
- Long, D., Longuevergne, L., Scanlon, B. R. (2014), « Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites », *Water Resources Research*, vol. 50, p. 1131 – 1151. <https://doi.org/10.1002/2013WR014581>
- Ma, Y., Liu, S., Song, L., Xu, Z., Liu, Y., Xu, T., Zhu, Z. (2018), « Estimation of daily evapotranspiration and irrigation water efficiency at a Landsat-like scale for an arid irrigation area using multi-source remote sensing data », *Remote Sensing of Environment*, vol. 216, p. 715 – 734.
- Markfort, C.D., Perez, A.L.S., Thill, J.W., Jaster, D.A., Porté-Agel, F., Stefan, H.G. (2010), « Wind sheltering of a lake by a treecanopy or bluff topography », *Water Resources Research*, Vol 46, No. 3, W03530 : 1-13.
- Marti, P., Zargo, M., Vanderlinden, K. Girona, J. (2015), « Parametric expressions for the adjusted Hargreaves coefficient in Eastern Spain », *Journal of Hydrology*, vol. 529, N°. 3, p. 1713-1724.
- Monteith, J. L., (1965), « Evaporation and environment », *Symposia of the Society for Experimental Biology*, vol. 19, p. 205-234.
- Morell, M., Thébé, B., L'Hôte, Y., (1999), *Acquisition et constitution d'une information hydrologique de base*, Édition \*H\*G\*A\*, Bucarest, 203 p.
- Müller, M. J. (1982), *Selected climatic data for a global set of standard stations for vegetation science*, Dr. W. Junk Publisher, The Hague, Netherlands, 334 p.
- Narcy, J. B. (2004), *Pour une gestion spatiale de l'eau. Comment sortir du tuyau ?*, Bruxelles, Peter Lang, Ed. EcoPolis, 342 p.

- Ndiaye, P. M., Bodian, A., Diop, L., Djaman, K. (2017), « Évaluation de vingt méthodes d'estimation de l'évapotranspiration journalière de référence au Burkina Faso », *Géographie physique et environnement*, Vol. 11, p. 129-146.
- Nicot, J. (1606), *Thresor de la langue françoise*. Paris, David Douceur, 666 p.
- Parcevaux, S., Payen, D., Brochet, P., et al., (1990), *Dictionnaire encyclopédique d'agrométéorologie*. CILF, Paris, 323 p.
- Penman, H.L., (1948), « Natural evaporation from open water, bare soil and grass », *Proceedings of the Royal Society*, London Ser A, vol. 193, p.120 – 145.
- Penman, H. L., (1956), « Estimating evaporation », *Transactions, American Geophysical Union*, vol. 37 (1), p. 43.
- Rao, A. S. (1988), « Evapotranspiration rates of *Eichhornia crassipes* (Mart.), Solms, *Salvinia molesta* D.S. Mitchell and *Nymphaea lotus* (L.) Willd. Linn. in a humide tropical climate », *Aquatic Botany*, vol. 30, p. 215-222.
- Rashed, A. A. (2014), « Assessment of aquatic plants evapotranspiration for secondary agriculture drains (case study : Edfina drain, Egypt) », *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, Vol. 40, Issue 2, p. 117 – 124.
- Rozier, J. B. F. (Abbé) (1786), *Cours complet d'agriculture, théorique, pratique, économique, et de médecine rurale vétérinaire, suivi d'une méthode pour étudier l'agriculture par principe, ou dictionnaire universel d'agriculture*. Paris : Rue et Hôtel Serpente, tome IV.
- Russi, D., ten Brink, P., Farmer, A., Badura, T., Coates, D., Förster, J., Kumar, R., Davidson, N. (2013), *The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Water and Wetlands*. IEEP, London and Brussels ; Ramsar Secretariat, Gland, 84 p.
- Song, L. S., Kustas, W. P., Liu, S., Colaizzi, P. D., Nieto, H., Xu, Z. W., et al. (2016), « Applications of a thermal-based two-source energy balance model using Priestley-Taylor approach for surface temperature partitioning under advective conditions », *Journal of Hydrology*, vol. 540, p. 574 – 587.
- Stan, F. I., Neculau, G., Zaharia, L., Ioana-Toroimac, G. Mihalache, S. (2016), « Study on the evaporation and the evapotranspiration measured on the Clărușani Lake (Romania) », *Procedia Environmental Science*, vol. 32, p. 281-289.
- Thorntwaite, C.W., Holzman, B. (1939), « The determination of evaporation from land and water surfaces », *Monthly Weather Review*, vol. 67, p. 4-11.
- Thorntwaite, C.W., Holzman, B. (1942), *Measurement of evaporation from land and water surfaces*, Technical bulletin (United States. Department of Agriculture), No. 817, Washington, 75 p.
- Touchart, L. (2007), *La définition de l'étang en géographie limnologique*, 41 p., in *Géographie de l'étang, des théories globales aux pratiques locales*, Paris, L'Harmattan, p. 13-53.
- Touchart, L. (2016), « Le bilan thermique des étangs : réflexion épistémologique et application aux étangs limousins », *Annales de Géographie*, Vol. 708 (2), p. 143-169.
- Trout, T. J., DeJonge, K. C. (2018), « Crop Water Use and Crop Coefficients of Maize in the Great Plains », *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 144, No. 6, 04018009, p. 1-13.
- Velpuri, N. M., Senay, G. B., Singh, R. K., Bohms, S., Verdin, J. P. (2013), « A comprehensive evaluation of two MODIS evapotranspiration products over the conterminous United States : Using point and gridded FLUXNET and water balance ET », *Remote Sensing of Environment*, vol. 139, N°. 4, p. 35-49.
- Villoutreix, M. (1995), *Noms de lieux du Limousin, introduction à la toponymie*. Paris, Bonneton, 232 p.
- Wasson, J. G., Chandesris, A., Pella, H., Blanc, L. (2004), « Les hydro-écorégions : une approche fonctionnelle de la typologie des rivières pour la Directive cadre européenne sur l'eau », *Ingénieries – Eau Agriculture Territoires*, vol. 40, p. 3-12.

- Weert, R., Kamerling, G. E. (1974), « Evapotranspiration of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) », *Journal of Hydrology*, vol. 22, p. 201-212.
- Wright, J. L. (1982), « New Evapotranspiration Crop Coefficients », *Journal of irrigation and Drainage Div.*, (ASCE), vol. 108, p. 57-74.
- Wright, J. L., Allen, R. G., Howell, T. A. (2000), « Conversion between evapotranspiration references and methods », *eprints.nwisrl.ars.usda.gov*, p. 251-259.
- Yao, Y., Liang, S., Cheng, J., Liu, S., Fisher, J. B., Zhang, X., *et al.* (2013), « MODIS-driven estimation of terrestrial latent heat flux in China based on a modified Priestley – Taylor algorithm », *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 171, p. 187-202.
- Yao, Y., Liang, S., Li, X., Hong, Y., Fisher, J. B., Zhang, N., *et al.* (2014), « Bayesian multimodel estimation of global terrestrial latent heat flux from eddy covariance, meteorological, and satellite observations », *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, vol. 119, p. 4521 – 4545. <https://doi.org/10.1002/2013JD020864>
- Yang, Z., Zhang, Q., Yang, Y., Hao, X., Zhang, H. (2016), « Evaluation of evapotranspiration models over semi-arid and semi-humid areas of China », *Hydrological Processes*, vol. 4313, p. 4292 – 4313. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10824>.
- Урываев, В. А. (1953), *Études hydrologiques expérimentales à Valdai*, Léninegrad, Gidrometeoizdat, (Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае. Ленинград, Гидрометеоиздат), 232 p.