

Projet pilote adaptation aux changements climatiques

Maintien des ressources en eau dans le bassin versant
des biotopes marécageux d'importance nationale

Dynamique hydrogéologique et bilans hydriques de marais



Guillaume Gianni
Eric Torrejón del Aguila
Prof. Philip Brunner

*Centre d'hydrogéologie et de géothermie de Neuchâtel
Université de Neuchâtel*

Résumé

Les marais en Suisse ont subi de fortes pressions pendant ces derniers siècles et par conséquent les espèces animales et végétales qui vivent dans ces zones humides sont dans de nombreux cas menacées. Outre la biodiversité, ce sont aussi des fonctions écosystémiques essentielles, telles que l'effet tampon des marais pendant les crues, qui sont menacées. La déperdition des marais est en majeure partie causée par la perturbation de leur approvisionnement en eau et par conséquent de leur bilan hydrique.

Les bilans hydriques des marais sont caractérisés par une importante évapotranspiration. Avec les précipitations, les flux de surface et souterrains contribuent à l'alimentation en eau des marais. Une quantité d'eau suffisante, permettant une évapotranspiration optimale de la végétation, est indispensable au maintien de la qualité et quantité de la végétation spécifique des marais.

L'objectif du présent rapport est l'étude de la dynamique hydrogéologique de deux marais suisses situés dans l'Arc jurassien (*La Burtignière*) et les Préalpes (*Lombachalp-Teufen*). Le dispositif de mesure est constitué de stations météorologiques permettant le calcul de la demande en évapotranspiration des marais, de mesures piézométriques permettant d'évaluer la dynamique de la nappe phréatique sous-jacente et de mesures hydrogéologiques permettant de définir les propriétés hydrauliques des marais.

Les résultats obtenus ont permis d'analyser les liens fonctionnels existant entre les marais et leur environnement hydrogéologique. Ces résultats sous-tendent la définition de portions utiles du bassin versant en termes d'approvisionnement suffisant en eau.

Aussi, une méthode basée sur le déficit en eau de pluie par rapport à la demande en évapotranspiration des plantes a été définie afin d'estimer la contribution des eaux souterraines. En mesurant et/ou en estimant les valeurs de précipitations et de l'évapotranspiration des marais et en prenant en compte la dynamique hydrogéologique du marais suite à des événements pluvieux, elle permet d'évaluer le volume d'eau nécessaire au marais, qui devra être fourni par les eaux souterraines sous-jacentes, afin de satisfaire sa demande en évapotranspiration. La méthode a été appliquée aux deux sites étudiés (*La Burtignière* et *Lombachalp-Teufen*) et à trois autres sites de marais (Jura, Préalpes et Sud du Tessin) afin d'estimer la contribution des eaux souterraines à l'évapotranspiration de ces marais. De plus la sensibilité des résultats à certains paramètres de la méthode a été analysée.

Zusammenfassung

In den letzten Jahrhunderten sind die Mooregebiete in der Schweiz unter starken Druck geraten, weshalb in vielen Fällen die Tier- und Pflanzenarten, die in diesen Feuchtgebieten leben, bedroht sind. Neben der Biodiversität sind auch wesentliche Ökosystemfunktionen, wie die Pufferwirkung von Mooregebieten bei Hochwasser-Ereignissen, gefährdet. Der Verlust der Mooregebiete wird hauptsächlich durch die Störung ihrer Wasserversorgung und somit ihrer Wasserbilanz verursacht.

Die Wasserbilanzen der Mooregebiete sind durch signifikante Evapotranspiration gekennzeichnet. Neben den Niederschlägen werden Mooregebiete auch durch Oberflächen- und Grundwasserströmung versorgt. Eine ausreichende Wassermenge, die eine optimale Evapotranspiration der Vegetation ermöglicht, ist wesentlich für die Erhaltung der Qualität und Quantität der spezifischen Vegetation der Mooregebiete.

Ziel des Berichtes ist das Studium der hydrogeologischen Dynamik von zwei Mooregebieten im Jura (*La Burtignière*) und in den Voralpen (*Lombachalp-Teufen*). Die Messanordnung besteht aus meteorologischen Stationen zur Berechnung des Evapotranspirationsbedarfs, piezometrischen Messungen zur Bewertung der Dynamik des darunterliegenden Grundwasserspiegels und hydrogeologischen Messungen zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften.

Die erzielten Ergebnisse ermöglichen die Analyse der funktionalen Verbindungen zwischen den Mooregebieten und ihrer hydrogeologischen Umgebung. Diese Ergebnisse unterstützen die Abgrenzung von Teilen des Wassereinzugsgebiets im Hinblick auf eine ausreichende Wasserversorgung.

Dazu wurde eine Methode vorgeschlagen, welche auf dem Niederschlagsdefizit bezüglich des Evapotranspirationsbedarfs der Vegetation basiert, um den notwendigen Beitrag des Grundwassers abzuschätzen. Durch die Messung und/oder Schätzung des Niederschlags und des Evapotranspirationsbedarfs der Mooregebiete und unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Dynamik des Mooregebietes nach Regenereignissen, konnte die erforderliche Wassermenge, die durch das darunterliegende Grundwasser zur Verfügung gestellt werden muss, bestimmt werden. Die Methode wurde sowohl auf die beiden Untersuchungsgebiete (*La Burtignière* und *Lombachalp-Teufen*) als auch auf drei andere Mooregebiete (Jura, Voralpen und Südtessin) angewandt, um den notwendigen Beitrag des Grundwassers zur Evapotranspiration dieser Mooregebiete abzuschätzen. Des Weiteren wurde die Sensitivität der Ergebnisse in Bezug auf bestimmte Parameter der Methode analysiert.

Contenu

1	Introduction	1
1.1	Contexte.....	1
1.2	Objectifs Généraux	1
1.3	Contributions du CHYN	2
2	Bilan hydrique des marais.....	3
2.1	Composantes du bilan hydrique.....	3
2.2	Échanges atmosphériques.....	4
2.3	Échanges de surface	5
2.4	Échanges souterrains.....	5
3	Outils et méthodes.....	6
3.1	Mesures atmosphériques	7
3.1.1	Précipitations.....	7
3.1.2	Évapotranspiration	7
3.2	Mesures hydrologiques	11
3.3	Mesures hydrogéologiques	14
3.3.1	Carottage de sol	14
3.3.2	Porosité	14
3.3.3	Conductivité hydraulique	15
3.3.4	Relevés piézométriques	17
3.3.5	Potentiel hydrique du sol	18
4	Sites tests : Arc jurassien et Préalpes	19
4.1	Description des sites de mesures	20
4.1.1	Marais de la Burtignière, Vallée de Joux (VD)	20
4.1.2	Marais de Lombachalp-Teufen, Habkern (BE)	24
4.2	Dynamique des échanges hydriques	27
4.2.1	Évapotranspiration et précipitations	27
4.2.2	Dynamique de la nappe phréatique.....	29
4.3	Bilan hydrique de l'aquifère du marais de la Burtignière.....	37
4.3.1	Composantes hydrogéologiques.....	37
4.3.2	Calcul du bilan hydrique.....	38
4.4	Conclusion	40
5	Méthode de calcul du déficit hydrique de marais	41

5.1	Principes de la méthode	41
5.2	Application à des sites de marais	44
5.2.1	Sites tests : La Burtignière et Lombachalp-Teufen.....	44
5.2.2	Autres sites : Jura, Berne et Tessin.....	47
5.3	Discussion et conclusion.....	52
6	Conclusions et Recommandations.....	53
7	Remerciements.....	55
8	Glossaire.....	57
9	Références	59
10	Annexes.....	I
10.1	Marais de la Burtignière	I
10.1.1	Demande d'autorisation – La Burtignière	I
10.1.2	Autorisation – Canton de Vaud – La Burtignière	III
10.1.3	Coordonnées piézomètres – La Burtignière.....	IV
10.1.4	Relevés topographiques de la surface – La Burtignière.....	V
10.1.5	Relevés topographiques du toit de la couche d'argile – La Burtignière	VI
10.1.6	Mesures de la conductivité hydraulique – La Burtignière	VII
10.1.7	Mesures de la porosité – La Burtignière	VII
10.2	Marais de Lombachalp-Teufen	IX
10.2.1	Demande d'autorisation – Lombachalp-Teufen	IX
10.2.2	Autorisation – Canton de Berne – Lombachalp-Teufen.....	XII
10.2.3	Coordonnées piézomètres – Lombachalp-Teufen	XV
10.2.4	Relevés topographiques de la surface – Lombachalp-Teufen	XVI
10.2.5	Relevés topographiques du toit de la couche d'argile – Lombachalp-Teufen.....	XVII
10.2.6	Mesures de la conductivité hydraulique – Lombachalp-Teufen.....	XVIII
10.2.7	Mesures de porosité – Lombachalp-Teufen	XIX

Liste des figures

Figure 1 : Représentation schématique des composantes du bilan hydrique de l'aquifère du marais [Campbell and Jackson, 2004].	3
Figure 2 : Marais de la Burtignière (Automne 2015). De part et d'autre de la route se trouve le marais inondé par une crue de l'Orbe.	6
Figure 3 : Tranchée de drainage ayant conduit à l'assèchement de la zone humide alentour.	6
Figure 4 : Bac d'évaporation de classe A avec sonde de pression et système de remplissage automatique.	8
Figure 5: Configuration et dimensions du bac d'évaporation de classe A utilisé sur les sites d'études.	8
Figure 6 : Station météorologique (Site de la Burtignière, avril 2016). À droite du mât : un pluviomètre. Dans le prolongement du mât : un anémomètre, un thermomètre et un baromètre. À gauche du mât : un radiomètre.	10
Figure 7 : Station météorologique installée dans le marais entre Lombachalp-Teufen (Commune d'Habkern). En plus de l'équipement cité sur la Figure 6, on peut voir le panneau solaire fixé au mât permettant l'alimentation en énergie de la station météorologique.	10
Figure 8 : Mesures du débit (photo) et description de la sonde du Flow Tracker © (Schéma).	12
Figure 9 : Courbe de tarage débit-niveau d'eau de l'Orbe au niveau du pont de la Burtignière. Coordonnées : 502729 157500 (CH-1903/LV03).	12
Figure 10 : Débits journaliers de l'Orbe (station OFEV et à l'exutoire du site d'étude) et précipitations journalières.	13
Figure 11 : Schématisation et représentation des paramètres de l'équation 10 pour le calcul des débits infiltrés ou exfiltrés au niveau de l'Orbe.	13
Figure 12 : Carottage effectué sur le site de la Burtignière. La partie gauche de la photo représente la couche superficielle du terrain et est constituée de tourbe. La partie droite de la photo représente la partie profonde du terrain et est constituée d'argile.	14
Figure 13 : Extraction d'un échantillon de sol afin d'effectuer une mesure de porosité (Site de la Burtignière).	15
Figure 14 : Perméamètre de Guelph (norme ASTM D5126). Description succincte des composants principaux du perméamètre de Guelph.	16
Figure 15 : Schéma du fonctionnement souterrain du perméamètre de Guelph.	16
Figure 16 : Représentation schématique de la constitution des piézomètres installés.	17
Figure 17 : Sonde piézométrique Solinst® Edge – Model 3001	18
Figure 18 : Sonde de potentiel hydrique Decagon MPS-2	18
Figure 19 : La zone de marais de la Burtignière en période estivale (à gauche) et en période de cru de l'orbe (à droite, automne 2015).	19
Figure 20 : La zone verte, légèrement transparente, représente les bas-marais dans la partie aval de la vallée de Joux. Les unités comprises entre le pont de la Burtignière et la frontière avec la France font partie de l'ensemble de bas marais appelé La Burtignière. La zone cerclée de rouge constitue la zone d'étude. Le fond de plan est la carte nationale 1:25'000 CN25...	20
Figure 21 : La zone d'étude, délimitée par le contour jaune, se situe sur des structures géologiques datant du Quaternaire définies dans la légende. La zone d'étude est limitée au	

sud par l'Orbe, à l'est par la route de la Burtignière et au nord et à l'ouest par un drain de faible profondeur (map.geo.admin.ch).....	21
Figure 22 : Bassin versant de l'Orbe au niveau de la zone d'étude de la Burtignière. (Carte Suisse 1:25000, map-geo.admin.ch)	21
Figure 23 : Relevés de sol (profondeur de la tourbe) au niveau des piézomètres installés au site la Burtignière. a) Description des colonnes de sol, b) Carte de localisation des carottages.	22
Figure 24 : Variations des charges hydrauliques (La Burtignière). L'ordonnée 0 représente la surface du sol. Les diminutions rapides de la zone non-saturée sont causées par les précipitations (non représentées sur le graphique).	23
Figure 25 : La zone verte, légèrement transparente, représente les bas-marais entre Lombachalp et Teufen. La zone cerclée de rouge localise le site d'étude. Le site est limité à l'ouest et au nord par une route. L'est et le sud de la zone d'étude sont délimités par le début d'une zone arborée et par un affluent intermittent de l'Emme. Le fond de plan est la carte nationale 1:25'000 CN25.....	24
Figure 26 : Structures géologiques du site de bas marais Lombachalp-Teufen extrait de la carte géologique de la Suisse à l'échelle 1:500'000 (GK500-Geol). En jaune : Flysch ultra helvétique. En vert à points rouges : Flysch du Schlieren (extrémité est de la Nappe du Gurnigel). La zone cerclée de rouge localise le site d'étude.....	25
Figure 27: Vue du site de mesures (Marais Lombachalp-Teufen) à partir de la colline du Bolberg (prise de vue vers l'est). Cercle rouge : Site d'étude préalpin (emplacement de la station météorologique, du bac d'évaporation et des piézomètres). Cercle bleu : Emplacement de l'antenne relais permettant la transmission des mesures de la station météorologique et du bac d'évaporation.	25
Figure 28 : Relevés de sol (profondeur de la tourbe) au niveau des piézomètres installés au site Lombachalp-Teufen. a) Description des colonnes de sol ; b) Carte de localisation des carottages.....	26
Figure 29 : Variations de la charge hydraulique dans le piézomètre LT_04 (Lombachalp-Teufen). La surface du sol est représentée par le trait horizontal marron. L'excédent de pluie ou d'évapotranspiration (c.à.d. la valeur absolue de la différence entre les précipitations mesurées et l'évapotranspiration calculée) est représenté quotidiennement.	26
Figure 30 : Comparaison de l'évapotranspiration de référence, <i>ET0</i> , moyennes sur des périodes de 10 jours obtenues par mesure directe (Bac d'évaporation) et par mesure indirecte (Formule de Penman-Monteith) sur le site de la Burtignière.	28
Figure 31 : Comparaison de l'évapotranspiration de référence, <i>ET0</i> , moyennes sur des périodes de 10 jours obtenues par mesure directe (Bac d'évaporation) et par mesure indirecte (Formule de Penman-Monteith) sur le site de Lombachalp-Teufen.	28
Figure 32 : Évaluation de la corrélation entre les mesures directes (bac d'évaporation) et indirectes (Formule de Penman-Monteith) de l'évapotranspiration de référence. Période avril-novembre, 2015-2016, site de la Burtignière.	29
Figure 33 : Précipitation et Évapotranspiration de référence <i>ET0</i> cumulées sur la période avril 2015 – avril 2016 sur le site de la Burtignière.....	30
Figure 34 : Précipitation et Évapotranspiration de référence <i>ET0</i> cumulées sur la période septembre 2015 – septembre 2016 sur le site de Lombachalp-Teufen	30

Figure 35 : Précipitation journalière et évapotranspiration de référence ET_0 calculée selon Penman-Monteith à partir des mesures climatiques journalières. L'axe des ordonnées est 4 fois plus grand pour les précipitations. Site de la Burtignière.	31
Figure 36 : Précipitation journalière et évapotranspiration de référence ET_0 calculée selon Penman-Monteith à partir des mesures climatiques journalières. L'axe des ordonnées est 4 fois plus grand pour les précipitations. Site de Lombachalp-Teufen.....	31
Figure 37 : Oscillations piézométriques quotidiennes sous l'effet de l'évapotranspiration du marais (Site de la Burtignière, piézomètre B_P04).	32
Figure 38 : Variations cycliques de période d'un jour de la hauteur de la nappe due aux cycles d'évapotranspiration-recharge.	33
Figure 39 : Variations de l'épaisseur de la zone non-saturée (Site de la Burtignière, piézomètre B_P04, hivers 2016).	34
Figure 40 : Variations de l'épaisseur de la zone non-saturée (Site de la Burtignière, piézomètre B_P04, été 2016).....	34
Figure 41 : Variation de saturation du sol proche de la surface (10 cm de profondeur) en fonction de l'abaissement de la surface de la nappe phréatique sous-jacente. Site de la Burtignière.....	35
Figure 42 : Variation du volume d'eau contenu dans le marais du site la Burtignière entre février 2016 et octobre 2016.	36
Figure 43 : Schéma conceptuel du bilan hydrique d'un marais (zone verte) en accord avec l'équation 1.	37
Figure 44 : Représentation schématique de la surface phréatique (Aquifère non confiné) et des variables de l'équation de Dupuit (équation 12).....	38
Figure 45 : Représentation schématique des composantes du bilan hydrique de la végétation du marais.....	41
Figure 46 : représentation schématique de la méthode d'estimation de la valeur la période de disponibilité de l'eau de pluie TD suite à un événement pluvieux	42
Figure 47 : Organigramme du processus d'estimation du déficit en eau de pluie du marais. 43	
Figure 48 : Exemple de résultat du traitement des données climatiques avec un tableur afin d'estimer la valeur du déficit hydrique en eau de pluie du marais.	44
Figure 49 : Dynamique de la surface piézométrique à la suite de précipitations.....	45
Figure 50 : Déficit d'eau de précipitation quotidien sur une période de 1 an pour le site de la Burtignière (Avril 2015 – Mars 2016).....	46
Figure 51 : Déficit d'eau de précipitation quotidien sur une période de 1 an pour le site de Lombachalp-Teufen (Septembre 2015 – Août 2016).....	46
Figure 52 : Localisation des sites de marais JU1 (Jura), BE2 (Berne) et TI1 (Tessin).....	48
Figure 53 : Résultats de l'analyse pour le site de marais JU1 (Jura, canton du Jura) pour les 5 années consécutives 2009, 2010, 2011, 2012 et 2013 et pour des périodes de disponibilité de l'eau de pluie, suite à des précipitations, de valeurs 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30 jours et 1 année. Le rapport entre la surface du bassin versant permettant de couvrir le déficit en eau de pluie et la taille du marais considéré est estimé.....	49
Figure 54 : Résultats de l'analyse pour le site de marais BE2 (Préalpes, canton de Berne) pour les 5 années consécutives 2009, 2010, 2011, 2012 et 2013 et pour des périodes de disponibilité de l'eau de pluie, suite à des précipitations, de valeurs 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30	

jours et 1 année. Le rapport entre la surface du bassin versant permettant de couvrir le déficit en eau de pluie et la taille du marais considéré est estimé.....	50
Figure 55 : Résultats de l'analyse pour le site de marais TI1 (Sud du Tessin, canton du Tessin) pour les 5 années consécutives 2009, 2010, 2011, 2012 et 2013 et pour des périodes de disponibilité de l'eau de pluie, suite à des précipitations, de valeurs 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30 jours et 1 année. Le rapport entre la surface du bassin versant permettant de couvrir le déficit en eau de pluie et la taille du marais considéré est estimé.....	51
Figure 56 : Carte du site d'étude de la Burtignière. Limite de la zone d'étude, emplacement de la station météorologique et des piézomètres.	IV
Figure 57 : Carte topographique de la surface du site d'étude de la Burtignière.	V
Figure 58 : Carte topographique du toit de la couche d'argile de la Burtignière.	VI
Figure 59 : Carte du site d'étude de Lombachalp-Teufen. Limite de la zone d'étude, emplacement de la station météorologique et des piézomètres.....	XV
Figure 60 : Carte topographique de la surface du site d'étude de Lombachalp-Teufen.	XVI
Figure 61 : Carte topographique du toit de la couche d'argile de Lombachalp-Teufen.....	XVII

Liste des tableaux

Tableau 1 : Débit maximum, minimum et moyen mensuel à l'exutoire de l'Orbe sur le site de la Burtignière et à la station de l'OFEV en (m ³ /s)	13
Tableau 2 : Bilan hydrique du site la Burtignière	39
Tableau 3 : Estimation de la surface drainée nécessaire à l'alimentation de l'aquifère du site de la Burtignière.....	39
Tableau 4 : Bilan hydrique de la demande en évapotranspiration du site de marais de la Burtignière.....	47
Tableau 5 : Bilan hydrique de la demande en évapotranspiration du site de marais de Lombachalp-Teufen.....	47
Tableau 6 : Coordonnées géographiques et dimensions des 3 sites de marais.	48

Liste des symboles

Symbole	Description	Unité
<i>Bilan hydrique</i>		
W	Volume d'eau contenue dans le marais	M^3
ΔW	Variation du volume d'eau contenu dans le marais (sur une durée ΔT)	M^3
P	Précipitation	$L.T^{-1}$
ET	Évapotranspiration	$L.T^{-1}$
S_{in}	Entrée d'eaux de surface	$L.T^{-1}$
S_{out}	Sortie d'eaux de surface	$L.T^{-1}$
G_{in}	Entrée d'eaux souterraines	$L.T^{-1}$
G_{out}	Sortie d'eaux souterraines	$L.T^{-1}$
ΔH	Variation de la hauteur d'eau dans le marais (sur une durée ΔT)	L
A	Surface	L^2
A^*	Surface drainée nécessaire à l'approvisionnement en eaux souterraines	L^2
R	Recharge annuelle de l'aquifère approvisionnant le marais	$L.T^{-1}$
<i>Porosité</i>		
θ	Porosité	-
ρ_b	Densité volumique de l'échantillon sec	-
ρ_s	Densité des particules composant l'échantillon de sol	-
<i>Flux de Darcy</i>		
q	Flux d'eaux souterraines	$L.T^{-1}$
h	Charge hydraulique	L
∇h	Gradient hydraulique	-
K	Conductivité hydraulique	$L.T^{-1}$
<i>Flux aquifère non confinée Dupuit</i>		
q'	Flux par unité de largeur (m^2/s) ;	$L^2.T^{-1}$
h_1	Épaisseur de la partie saturée au point 1 ;	L
h_2	Épaisseur de la partie saturée au point 2 ;	L
D	Distance entre les points 1 et 2.	L
S	Section perpendiculaire au flux	L
<i>Évapotranspiration</i>		
ET_0	Évapotranspiration de référence	$L.T^{-1}$
E_{pan}	Évaporation du bac d'évaporation	$L.T^{-1}$
K_{pan}	Coefficient du bac d'évaporation	-
R_N	Bilan radiative ou rayonnement net	$J.L^{-2}.T^{-1}$
G	Flux de chaleur du sol	$J.L^{-2}.T^{-1}$
γ	Constante psychrométrique	$Pa.^{\circ}C^{-1}$

T	Température moyenne journalière de l'air	°C
u_2	Vitesse moyenne journalière du vent	L.T ⁻¹
Δ	Pente de la courbe de pression de vapeur saturante	Pa.°C ⁻¹
e_s	Pression de vapeur saturante	Pa
e_a	Pression de vapeur réelle	Pa
ρ_a	Pression atmosphérique	Pa
C_p	Chaleur spécifique à pression constante	J.°C ⁻¹ .M ⁻¹
ε	Rapport des masses molaires de la vapeur d'eau et de l'air sec	-
λ	Chaleur latente d'évaporation	J.M ⁻¹
ET_m	Évapotranspiration du marais	L.T ⁻¹
K_c	Coefficient de culture	-
<i>Débit</i>		
Q	Débit infiltré ou exfiltré le long de l'Orbe dans la zone d'étude	L ³ .T ⁻¹
Q_{OFEV}	Débit mesuré à la station de l'OFEV	L ³ .T ⁻¹
Q_{Ex_Site}	Débit mesuré à l'exutoire du site d'étude	L ³ .T ⁻¹
L	Distance linéaire le long de l'Orbe entre les 2 stations	L
l	Distance linéaire le long de l'Orbe entre l'amont et l'aval du site d'étude	L

1 Introduction

1.1 Contexte

Les zones humides ont longtemps été considérées comme un frein au développement économique [[Fretwell et al., 1996](#)]. Suivant cette logique, les marais en Suisse ont subi de fortes pressions anthropiques pendant ces derniers siècles et par conséquent les 600 espèces animales et végétales qui vivent dans ces zones humides sont dans de nombreux cas menacées.

La qualité et la quantité des zones humides ont sévèrement et durablement été affectées en grande partie par des assèchements, dus à la mise en place de drains, dans le but de gagner des terres agricoles ou/et pour se protéger des vecteurs de maladie (paludisme, fièvres) [[OcCC and ProClim, 2007](#)], ainsi que par l'exploitation de la tourbe [[WSL and OFEFP, 2002](#)] comme source d'énergie (2,5 millions de tonnes de tourbe pendant la deuxième guerre mondiale).

À titre d'exemple, dans la vallée du Rhône, depuis 1850, c'est 90% des surfaces alluviales et des marécages qui ont disparu. Même ordre de grandeur à l'échelle de la Suisse et ceci en dépit du fait que la protection des zones humides fut inscrite en 1987 dans la constitution fédérale (Initiative du Rothenthurm). La détérioration des marais a continué jusqu'à aujourd'hui.

Entre les périodes de relevé 1997-2001 et 2002-2006, un tiers de l'ensemble des marais en Suisse a vu sa végétation changer en raison de modifications de leurs régimes hydriques [[WSL](#)]. Ceci est souvent la conséquence de la mise en place de systèmes de drainage dans les bassins versant de ces marais. Il apparaît que la prise en compte de l'approvisionnement en eau des marais par leur environnement fait encore défaut lors de la mise en œuvre des prescriptions de protection [[Grosvernier, 2013](#)]. Il est dès lors indispensable de penser la protection des marais en prenant en compte leur environnement et les territoires adjacents afin de recréer une connexion hydrogéologique entre les marais et leur environnement [[U.S. EPA, 2008](#)].

1.2 Objectifs Généraux

La régénération et le maintien des zones humides nécessitent l'établissement de mesures de protection qui sont les objectifs principaux des acteurs de ce projet. L'objectif final est de permettre aux zones humides de remplir leurs fonctions écosystémiques :

- Biodiversité ;
- Tampon de crues ;
- Compensation des émissions de CO₂.

Ces fonctions représentent des avantages socio-économiques essentiels tant du point de vue national, qu'international.

Le projet « **Maintien des ressources en eau dans le bassin versant des biotopes marécageux d'importance nationale** » vise à démontrer les liens fonctionnels existant entre les marais et leur environnement hydrogéologique et ceci à l'échelle du bassin versant. Afin de désigner des portions de bassin versant nécessaires à l'approvisionnement en eau des marais, des études sur les caractéristiques des bassins versants (analyses hydrogéologiques

par SIG) [[Geo7 AG](#)] et du bilan hydrogéologique de marais [[CHYN](#)] ont été effectuées. Un contrôle de l'évolution récente de la végétation des marais est assuré [[WSL](#)] afin de vérifier que les marais en situations hydrogéologiques bien préservées restent stables, contrairement à ceux situés dans un environnement perturbé. La coordination du projet est assurée par le bureau d'étude LIN'eco [[LIN'eco](#)].

En conclusion, à l'instar des zones de protection des eaux souterraines pour l'approvisionnement en eau potable, le projet définira une méthode de délimitation pratique d'une zone de prévention hydrogéologique qui replace les biotopes marécageux dans le contexte de leur bassin versant [[Grosvernier, 2013](#)].

1.3 Contributions du CHYN

Les bilans hydriques des marais sont caractérisés par une importante évapotranspiration. Une quantité d'eau suffisante, permettant une évapotranspiration optimale de la végétation, est indispensable au maintien de la qualité et quantité de la végétation spécifique des marais. Avec les précipitations, les flux de surface et souterrains contribuent à l'alimentation en eau du marais.

La période critique est souvent l'été, quand la demande en évapotranspiration des plantes est la plus élevée (principalement causée par l'augmentation de la température et des radiations) et l'apport en eau de surface (pluies et eaux de ruissellement) est généralement le plus faible. De plus, d'après le rapport [OcCC and ProClim \[2007\]](#) sur l'évolution du climat, les situations de déficit hydrique en périodes estivales vont tendre à augmenter dans un futur proche dues à une diminution des précipitations durant l'été, accentuant la pression sur les écosystèmes dépendant des eaux souterraines [[Klove et al., 2014](#)].

Le CHYN a réalisé, sur deux sites, des mesures hydrogéologiques et climatiques afin d'étudier la dynamique hydrique de ces marais, en prenant en compte l'évapotranspiration et les variations de hauteur de la nappe phréatique sous-jacente.

Les résultats obtenus permettent d'établir les liens fonctionnels existant entre les marais et leur environnement hydrogéologique. Ces résultats sous-tendent la définition de portions utiles du bassin versant en terme d'approvisionnement suffisant en eau [[Grosvernier, 2013](#)]. Une méthode basée sur le déficit en eau de pluie par rapport à la demande en évapotranspiration des plantes a été définie afin d'estimer la contribution des eaux souterraines. En prenant en compte la dynamique hydrogéologique du marais suite à des précipitations elle permet d'évaluer le volume d'eau nécessaire au marais qui devra être fournis par les eaux souterraines sous-jacentes enfin de satisfaire la demande en évapotranspiration de la végétation du marais.

Structure du présent rapport :

- Présentation générale des composantes du bilan hydrique des marais.
- Description des méthodes utilisées dans cette étude.
- Présentation des sites de mesures et des résultats obtenus.
- Présentation de la méthode d'évaluation du déficit hydrique.
- Conclusions et recommandations.

2 Bilan hydrique des marais

Le bilan hydrique est établi afin de déterminer qualitativement et quantitativement les échanges (entrants et sortants) d'eau du système considéré, ici « l'aquifère du marais », désigné par « marais » par la suite. Il permet d'identifier les acteurs clés de ce bilan et d'un point de vue écologique, il permet d'identifier les éventuels déficits mettant la végétation de marais en danger sachant que l'essentiel de la demande en eau des plantes, soit 99%, sert à la régulation thermique qui est directement liée au processus d'évapotranspiration [Meyboom, 1967].

Les marais nécessitent un bilan hydrique excédentaire tout au long de l'année. Une grande partie de ces biotopes sont aujourd'hui sous stress suite aux impacts des drainages toujours actifs, même si les nouveaux drainages sont interdits depuis près de 30 ans. De plus, dans le contexte d'une diminution des précipitations estivales d'ici à 2050, ainsi qu'une répartition plus hétérogène des précipitations, avec de plus nombreux événements de fortes intensités, une menace importante pèse sur la pérennité de ces biotopes.

2.1 Composantes du bilan hydrique

Les échanges peuvent se faire avec l'atmosphère et avec les eaux de surface et souterraines [Orellana et al., 2012; Schicht and Walton, 1961]. La somme de ces échanges pour une période de temps définie résulte en un changement de volume d'eau dans le marais. La variation de la quantité d'eau dans le marais peut s'exprimer par un changement de l'élévation de l'eau dans le marais en divisant ce volume d'eau par la surface du marais. La **Figure 1** présente schématiquement les composantes du bilan hydrique.

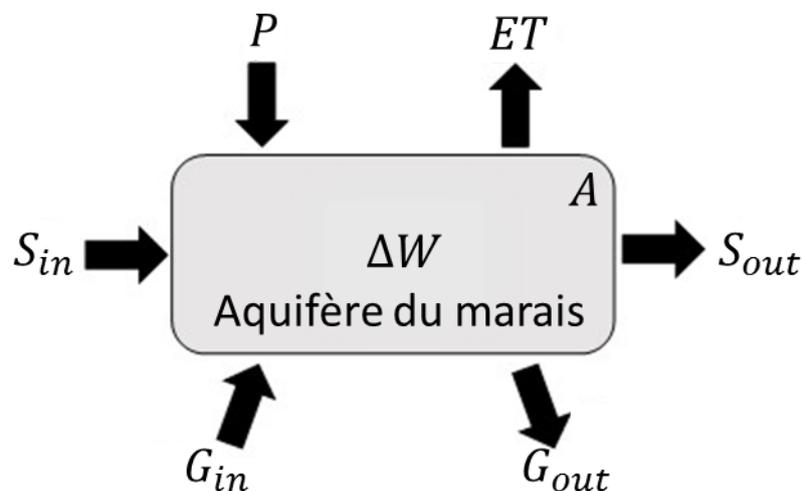


Figure 1 : Représentation schématique des composantes du bilan hydrique de l'aquifère du marais [Campbell and Jackson, 2004].

Le volume d'eau [L³] contenu dans le marais est noté W . Pour une période donnée la variation de ce volume ΔW est :

$$\Delta W = (P - ET) \times A + S_{in} + G_{in} - S_{out} - G_{out} \quad (1)$$

Où :

A : Surface du marais

P : Précipitation
 S_{in} : Entrée d'eaux de surface
 G_{in} : Entrée d'eaux souterraines
 ET : Evapotranspiration
 S_{out} : Sortie d'eaux de surface
 G_{out} : Sortie d'eaux souterraines

La variation moyenne de la hauteur d'eau ΔH dans le marais est :

$$\Delta H = \frac{\Delta W}{A \times \theta} \quad (2)$$

Où :

θ : Porosité moyenne du marais

L'établissement de ce bilan nécessite l'identification et la quantification des volumes d'eau significatifs entrants et sortants de l'espace de marais considéré sur une période de temps considérée.

2.2 Échanges atmosphériques

L'apport d'eau se fait principalement par les précipitations. La perte en eau d'un marais par évaporation et par transpiration des végétaux, appelée évapotranspiration est le principal mécanisme de transfert de l'eau contenue dans le sol vers l'atmosphère [[Soylu et al., 2012](#)]. Les précipitations et l'évapotranspiration peuvent être mesurées directement par l'utilisation de pluviomètres et de bacs d'évaporation et indirectement via la mesure de variables climatiques.

L'évapotranspiration nécessite trois conditions au niveau de la surface :

- Apport d'énergie
- Retrait de l'humidité
- Apport d'eau

Les valeurs des deux premiers paramètres sont influencées par les facteurs météorologiques tels que : la température de l'air, l'humidité de l'air, la vitesse du vent et les radiations. Le dernier paramètre (apport d'eau) est lié à la présence suffisante d'eau dans le marais au niveau de la surface d'évaporation et de la zone racinaire.

Afin de satisfaire le besoin de transpiration des plantes, celle-ci doivent être dans la capacité de prélever cette eau au niveau de leur système racinaire. Soit l'humidité du sol doit être suffisante (zone non saturée), soit une nappe phréatique suffisamment proche de la surface doit être présente (zone saturée) [[Hillel, 2004](#)].

Après un événement pluvieux les couches superficielles sont généralement humides. Cependant, le processus d'évaporation réduisant la teneur en eau, la proximité d'une zone saturée est essentielle en période estivale (précipitations espacées et/ou de faibles intensités et durées) pour recharger en eau par capillarité (processus de remontée capillaire) la surface d'évaporation et la zone racinaire.

En l'absence de nappe phréatique proche de la surface, le processus d'évapotranspiration va tendre à assécher les couches superficielles et par conséquent l'épuisement de l'eau disponible au niveau racinaire va menacer la survie de la végétation.

2.3 Échanges de surface

Les échanges avec les eaux de surface s'effectuent principalement par les ruissellements de pente et les contacts avec des rivières ou autres étendues d'eau (lacs, mers). Lorsqu'une rivière est en crue ou suite à une marée (marais côtiers), et en l'absence de digues, les eaux peuvent inonder de larges étendues de marais. Ce phénomène est observable dans les marais de plaine (c'est le cas pour le site d'étude de la Burtignière [[La Burtignière](#)], voir **Figure 2**).

Inversement le contenu en eau du marais peut être drainé par des cours d'eau adjacents ou par des tranchées d'origine anthropique (**Figure 3**).

2.4 Échanges souterrains

Les flux souterrains sont liés à la notion de gradient des potentiels hydrauliques. Ce gradient contrôle les écoulements d'eaux souterraines.

$$\nabla h = \left[\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}, \frac{\partial h}{\partial z} \right] \quad (3)$$

∇h : Le gradient hydraulique

h : Le potentiel hydraulique

x, y, z : Repère tridimensionnel

$\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}$ et $\frac{\partial h}{\partial z}$: La variation du potentiel hydraulique selon x, y et z respectivement

Le flux d'eaux souterraines q résulte de la combinaison du gradient hydraulique avec la conductivité hydraulique K du milieu souterrain selon la formule de Darcy [[Darcy, 1856](#)] :

$$q = -K \times \nabla h \quad (4)$$

Le signe négatif indique que l'écoulement se fait dans le sens des potentiels hydrauliques décroissants.

L'alimentation en eau du milieu souterrain peut se faire par infiltration des eaux de surface (rivières et étendues d'eau présentant une charge hydraulique supérieure à celle du marais adjacent) et atmosphériques (précipitations sous forme de pluie et fontes de neige) ou par entrées d'eaux souterraines de systèmes souterrains adjacents à celui considéré.

Inversement, l'eau peut sortir du système souterrain considéré par exfiltration vers les eaux de surface, vers des systèmes d'eaux souterraines adjacents ou bien suite à l'assèchement par évapotranspiration des couches superficielles du marais, jusqu'à une profondeur limite [[Shah et al., 2007](#)]. Concernant ce dernier, l'extraction de l'eau se fait par remontée capillaire de la nappe vers le système racinaire de surface. La remontée capillaire étant limitée, cette soustraction ne sera possible que si la nappe phréatique est suffisamment proche de la surface et dépendra aussi de la nature du sol [[Shah et al., 2007](#)].



Figure 2 : Marais de la Burtignière (Automne 2015). De part et d'autre de la route se trouve le marais inondé par une crue de l'Orbe.



Figure 3 : Tranchée de drainage ayant conduit à l'assèchement de la zone humide alentour.

3 Outils et méthodes

3.1 Mesures atmosphériques

3.1.1 Précipitations

La mesure de la quantité de précipitation peut s'effectuer à l'aide d'un pluviomètre. Cet instrument permet de mesurer la quantité d'eau tombée en un point donné. Sur les 2 sites d'études un pluviomètre a été installé. Ils permettront de quantifier le terme P du bilan hydrique (**Figure 1**).

3.1.2 Évapotranspiration

La valeur de l'évapotranspiration en un point donné peut être mesurée directement (variation d'un volume d'eau) ou indirectement (bilan énergétique). Sur les 2 sites d'études du matériel permettant de mesurer directement et indirectement l'évapotranspiration a été installé. Ces mesures permettront de quantifier le terme ET du bilan hydrique (**Figure 1**).

3.1.2.1 Mesures directes - Bac d'évaporation

On appelle mesures directes de l'évapotranspiration, le fait de mesurer la diminution d'une quantité d'eau présente à proximité de la surface d'évapotranspiration étudiée. En pratique une quantité d'eau est placée dans un récipient, celui-ci est laissé au niveau de la surface d'évapotranspiration et la quantité d'eau qui y est soustraite due à l'évaporation est mesurée en fonction du temps. L'utilisation d'un coefficient adapté, fonction de la végétation du milieu environnant et des propriétés physiques du récipient, permet de convertir la quantité d'eau évaporée du récipient en quantité d'eau évapotranspirée par le milieu environnant.

L'outil le plus souvent utilisé pour ces mesures est appelé « bac d'évaporation ». Le modèle le plus recommandé de bac d'évaporation est celui de *classe A*. Ce modèle est utilisé dans cette étude et est présenté sur la **Figure 4** et la **Figure 5**. Ce bac circulaire est constitué de métal galvanisé non peint et est placé sur un support afin que l'air puisse circuler autour. La hauteur d'eau doit être maintenue entre 18 et 20 cm.

Le bac d'évaporation est muni d'une sonde automatique qui mesure la pression entre 0 et 200 mm/H₂O, avec une précision de 0.23% (température opérative entre 0 et 50 °C, signal de sortie brut de 0 à 20 mA, alimentation de 12 V alternatif).

Les valeurs d'évaporation E_{pan} mesurées à l'aide du bac d'évaporation donnent les valeurs de l'évaporation de référence ET_0 par multiplication avec le coefficient de bac K_{pan} empirique de valeur 0.8 (Coefficient propre au bac d'évaporation utilisé).

$$ET_0 = E_{pan} K_{pan} \quad (5)$$

Les résultats obtenus avec le bac d'évaporation sont moyennés sur 10 jours [[Allen et al., 2006](#)] et comparés avec les résultats obtenus via la méthode Penman-Monteith.

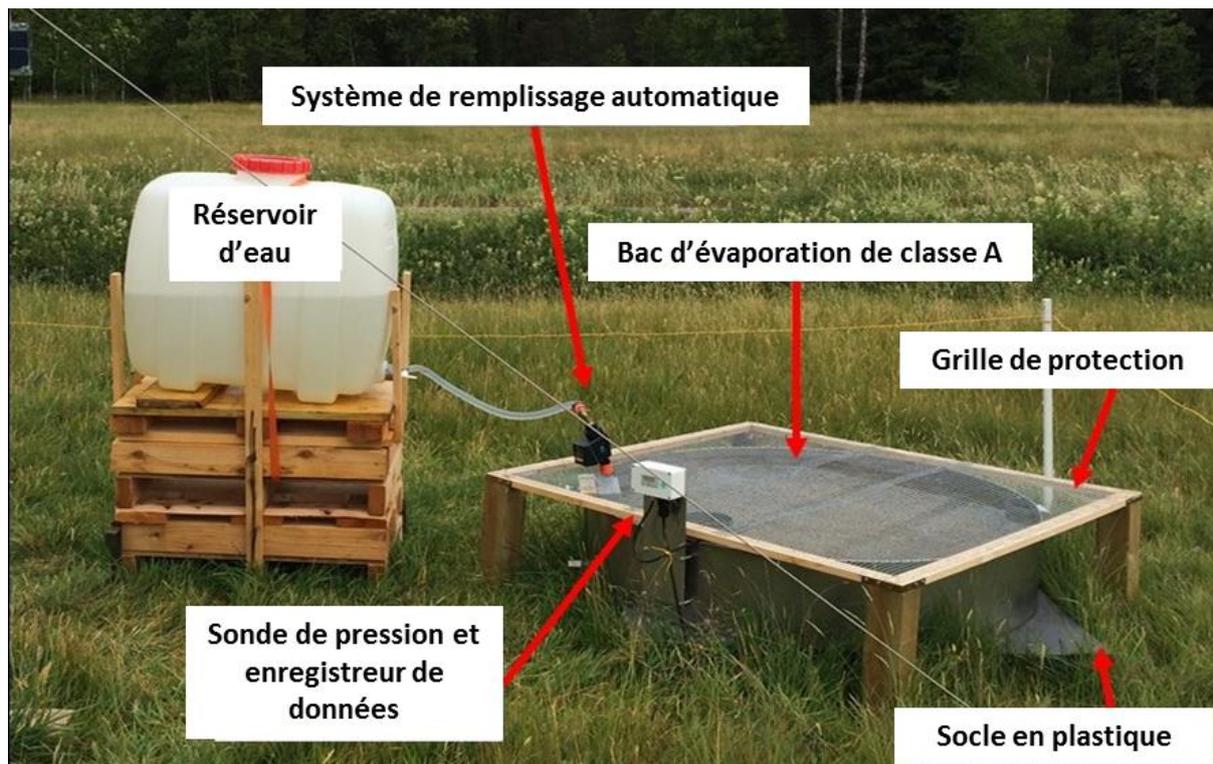


Figure 4 : Bac d'évaporation de classe A avec sonde de pression et système de remplissage automatique.

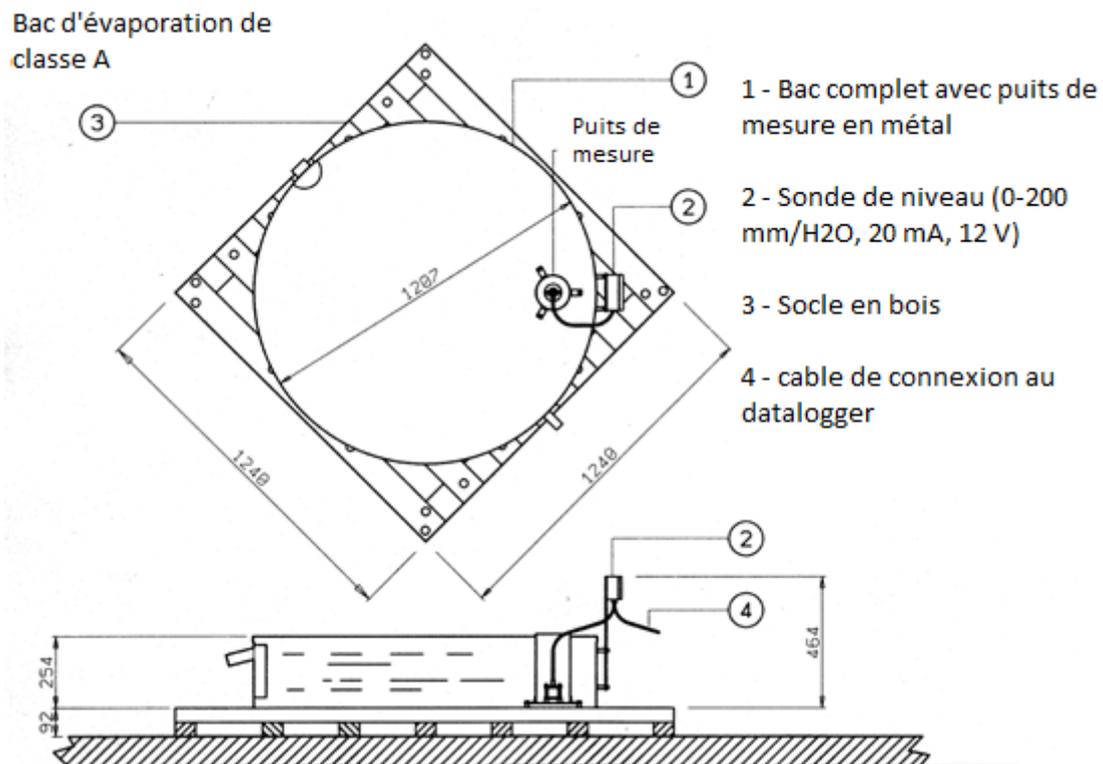


Figure 5: Configuration et dimensions du bac d'évaporation de classe A utilisé sur les sites d'études.

3.1.2.2 Mesures indirectes - Penman-Monteith

La mesure indirecte de l'évapotranspiration consiste à calculer une valeur d'évapotranspiration en se basant sur la mesure ou l'estimation de variables physiques.

Le concept d'évapotranspiration de référence ET_0 , a été introduit par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture [FAO] dans les années 1990. Elle se calcule à partir de l'équation de Penman-Monteith, considérée comme standard et recommandée par la FAO No. 56 [Allen et al., 2006; Calanca et al., 2011].

L'équation de Penman-Monteith (Équation 6) est une méthode de calcul physique qui tient compte à la fois des conditions données par le bilan énergétique pour la surface du sol et des processus d'échange qui déterminent le flux de vapeur d'eau entre la végétation et l'atmosphère et donc la demande en eau imposée par les conditions climatiques. Son calcul nécessite la mesure de plusieurs variables climatiques :

- Température moyenne journalière
- Saturation relative
- Vitesse moyenne du vent à 2 m de la surface du sol
- Radiation nette au niveau de la surface d'évapotranspiration

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_N - G) + \gamma \frac{900}{T + 273.15} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (6)$$

Avec :

R_N : Le bilan radiative ou rayonnement net ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

G : Le flux de chaleur du sol ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

γ : La constante psychrométrique ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

T : La température moyenne journalière de l'air ($^\circ\text{C}$)

u_2 : La vitesse moyenne journalière du vent (ms^{-1})

Δ : La pente de la courbe de pression de vapeur saturante fonction de la température ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

e_s : La pression de vapeur saturante (kPa)

e_a : La pression de vapeur réelle (kPa)

La constante psychrométrique γ , est fonction de la pression atmosphérique ρ (kPa), de la chaleur spécifique à pression constante C_p ($1.0004 \cdot 10^{-3} \text{ MJ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ kg}^{-1}$), du rapport des masses molaires de la vapeur d'eau et de l'air sec ε (0.622) et de la chaleur latente d'évaporation λ (2.5 MJ kg^{-1}).

$$\gamma = \frac{C_p \rho_a}{\varepsilon \lambda} \quad (7)$$

La pression atmosphérique ρ_a est mesurée en continue avec un pas de temps de 1 minute.

La pente de la courbe de pression de vapeur saturante en fonction de la température Δ , est représentée par la dérivée de la pression de vapeur saturante e_s , par rapport à la température T .

$$\Delta = \frac{de_s}{dT} \quad (8)$$

Sur les sites d'études, la température T est mesurée en continue avec un pas de temps de 1 minute (et par conséquent e_s). Les valeurs de e_a , de u_2 et de R_N sont aussi mesurées en continue avec un pas de temps de 1 minute. La valeur du flux de chaleur G est fixée à 0 par

le calcul de ET_0 sur une base journalière, car les flux de chaleur entre le jour et la nuit sont opposés et se compensent [Allen et al., 2006].

Une fois l'évapotranspiration de référence obtenue, celle-ci doit être convertie en évapotranspiration du marais ET_m afin de tenir compte de la végétation concernée. Pour cela un coefficient de culture K_c approprié multiplie ET_0 .

$$ET_m = K_c \times ET_0 \quad (9)$$

Suivant les études de [Drexler et al. [2008]] et [Gasca-Tucker et al. [2007]] un coefficient de culture de 1 pour les marais étudiés est considéré comme approprié. Cela ramène la valeur de l'évapotranspiration du marais à celle de l'évapotranspiration de référence.



Figure 6 : Station météorologique (Site de la Burtignière, avril 2016). À droite du mât : un pluviomètre. Dans le prolongement du mât : un anémomètre, un thermomètre et un baromètre. À gauche du mât : un radiomètre.



Figure 7 : Station météorologique installée dans le marais entre Lombachalp-Teufen (Commune d'Habkern). En plus de l'équipement cité sur la **Figure 6**, on peut voir le panneau solaire fixé au mât permettant l'alimentation en énergie de la station météorologique.

Les variables météorologiques ont été mesurées par une station météo SKYWATCH® AERO (Voir **Figure 6** et **Figure 7**) avec un pas de temps de 1 minute. Les paramètres mesurés sont : l'humidité relative de l'air en pourcentage (%); la température de l'air en degrés Celsius (°C); la vitesse moyenne de l'air en mètre par seconde ($m s^{-1}$); la pression barométrique en hecto Pascal (hPa) et la précipitation en millimètre (mm). Un radiomètre net NR Lite2 (KIPP & ZONEN) a permis la mesure de l'ensemble des radiations (Longues et courtes) atteignant et quittant la surface d'évapotranspiration ($MJ m^{-2}$).

3.2 Mesures hydrologiques

La mesure des variations du niveau des eaux de surface a permis d'établir un hydrographe. Les hydrographes sont des mesures de l'élévation des eaux en fonction du temps, dans ce cas, de l'Orbe, rivière qui longe le site d'étude de la Burtignière. Les eaux montent en réponse à des précipitations et généralement déclinent lentement avec le temps. D'autres phénomènes hydrogéologiques et climatiques peuvent générer des variations de l'élévation des eaux de surface riveraines, comme des changements dans les flux d'eaux souterraines ou encore la fonte de neige.

Sur le site de Lombachalp-Teufen, les écoulements de surface entrants et sortants du site sont considérés comme négligeables.

Sur le site de la Burtignière, les mesures effectuées ont permis de quantifier les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface. L'utilisation du *Flow Tracker* © de SonTek (**Figure 8**) et de jaugeages au sel a permis l'établissement de la courbe de tarage (**Figure 9**). La vitesse moyenne est déterminée en moyennant les vitesses mesurées à 20% et à 80% de la profondeur. Une sonde piézométrique a été installée à l'exutoire de l'Orbe sur le site d'étude (Voir **Annexe 10.1.3**). Le **Tableau 1** montre le débit maximum, minimum et moyen mensuel entre octobre 2015 et septembre 2016, mesuré au niveau de la station de l'OFEV, située 2.61 Km en amont du site d'étude, et à l'exutoire de l'Orbe au niveau du site d'étude. On peut observer sur le **Tableau 1** que les débits mesurés au niveau de l'exutoire de l'Orbe sur le site d'étude sont quasiment toujours plus élevés que ceux mesurés au niveau de la station OFEV en amont du site. Le **Figure 10** montre les variations journalières des débits aux 2 stations et les valeurs journalières des précipitations (mesurées sur le site d'étude). À partir de ces mesures nous pouvons considérer que d'une manière générale l'Orbe draine le marais entre les deux stations de mesures. L'interpolation des débits en amont du site de mesure permet de quantifier les échanges entre le marais et l'Orbe en termes de volumes d'eaux infiltrés ou exfiltrés au niveau de la zone d'étude. Cette valeur Q est calculée suivant l'équation ci-dessous :

$$Q = \left[\frac{Q_{OFEV} - Q_{Ex_Site}}{2L} \right] * l \quad (10)$$

Avec :

Q_{OFEV} : Le débit mesuré à la station de l'OFEV (m³/s)

Q_{Ex_Site} : Le débit mesuré à l'exutoire du site d'étude (m³/s)

L : La distance linéaire le long de l'Orbe entre les 2 stations (m)

l : La distance linéaire le long de l'Orbe entre l'amont et l'aval du site d'étude (m)

Le **Figure 11** schématise la simplification et représente les variables de l'équation 10.

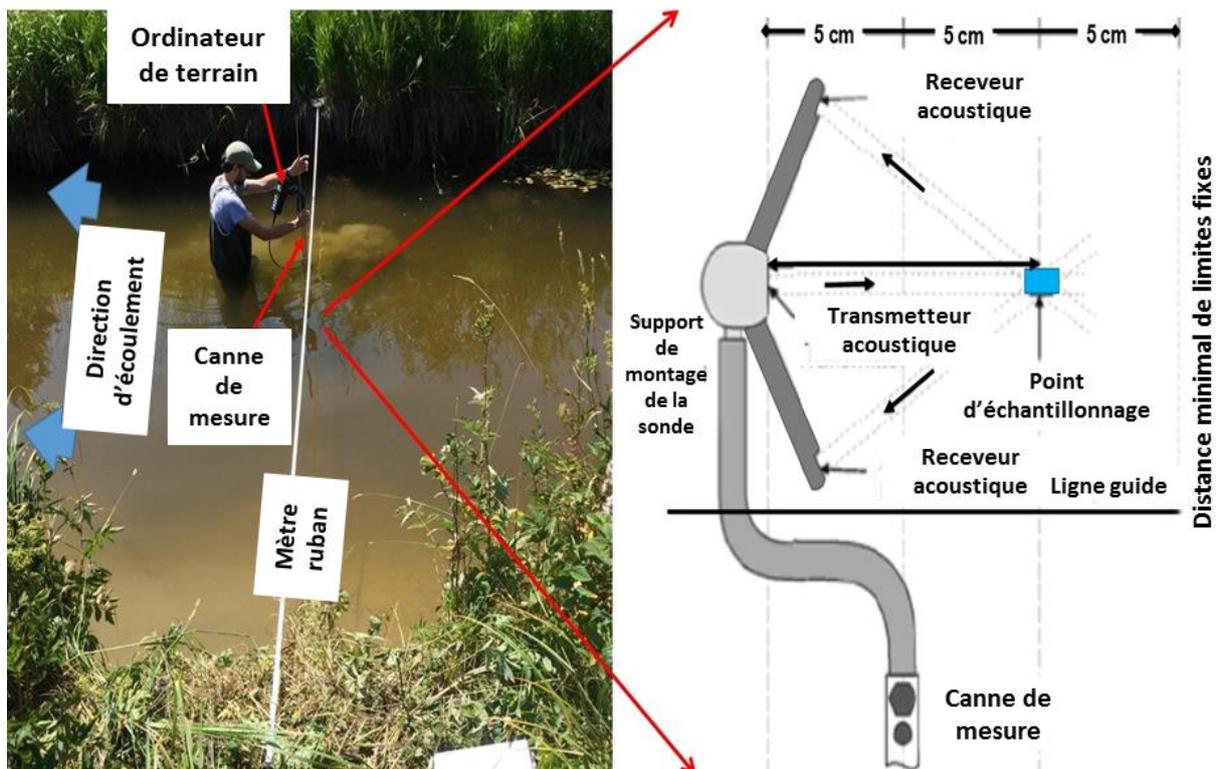


Figure 8 : Mesures du débit (photo) et description de la sonde du Flow Tracker © (Schéma).

Courbe de tarage débit-niveau d'eau

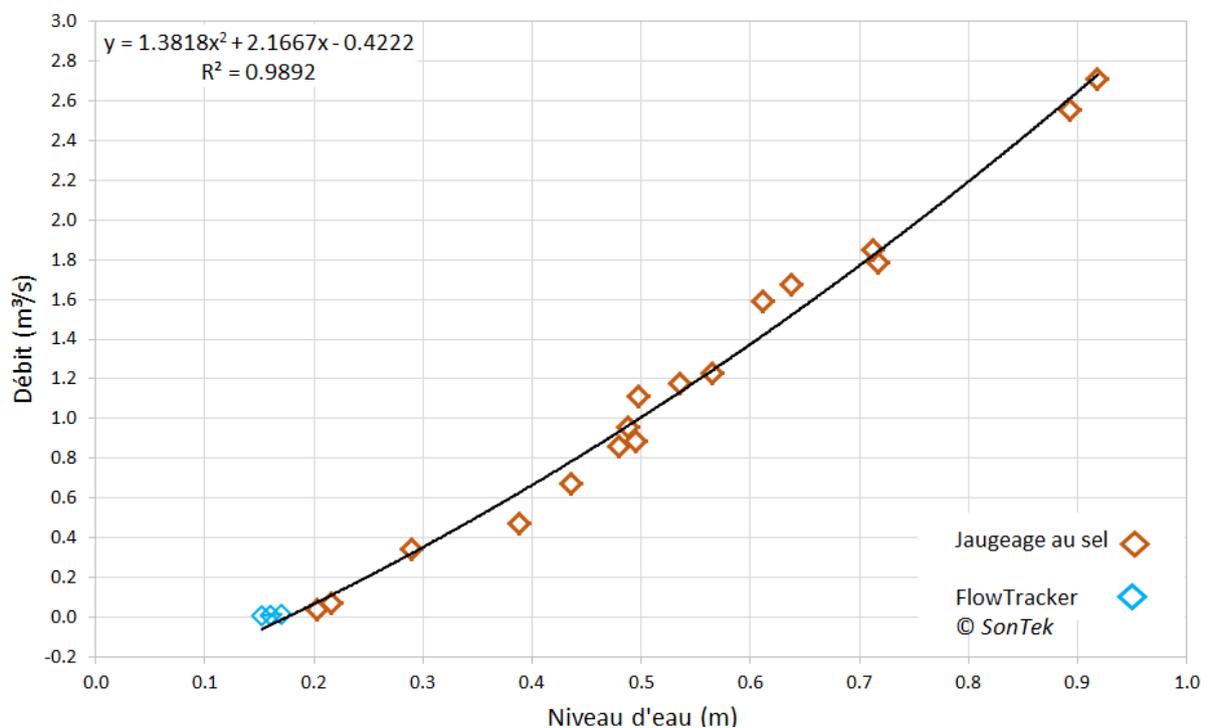


Figure 9 : Courbe de tarage débit-niveau d'eau de l'Orbe au niveau du pont de la Burtignière. Coordonnées : 502729 157500 (CH-1903/LV03).

Tableau 1 : Débit maximum, minimum et moyen mensuel à l'exutoire de l'Orbe sur le site de la Burtignière et à la station de l'OFEV en (m³/s).

Station		2015			2016								
		Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	May	Juin	Juil.	Août	Sept.
Exutoire Orbe Burtignière	Max.	1.6	4.8	2.4	4.8	5.7	2.4	3.9	2.8	3.7	1.2	1.1	1.2
	Moy.	0.5	0.8	1.0	1.8	2.4	1.3	1.8	1.6	2.0	0.7	0.6	0.4
	Min.	0.2	0.2	0.4	0.4	1.2	0.7	1.2	0.8	1.1	0.5	0.3	0.3
Station OFEV	Max.	1.0	3.5	1.8	5.0	6.5	1.9	3.7	2.4	3.0	0.5	0.4	0.9
	Moy.	0.3	0.6	0.7	1.5	2.4	1.0	1.5	1.2	1.4	0.3	0.2	0.2
	Min.	0.1	0.1	0.2	0.2	1.0	0.5	0.9	0.4	0.6	0.2	0.1	0.1

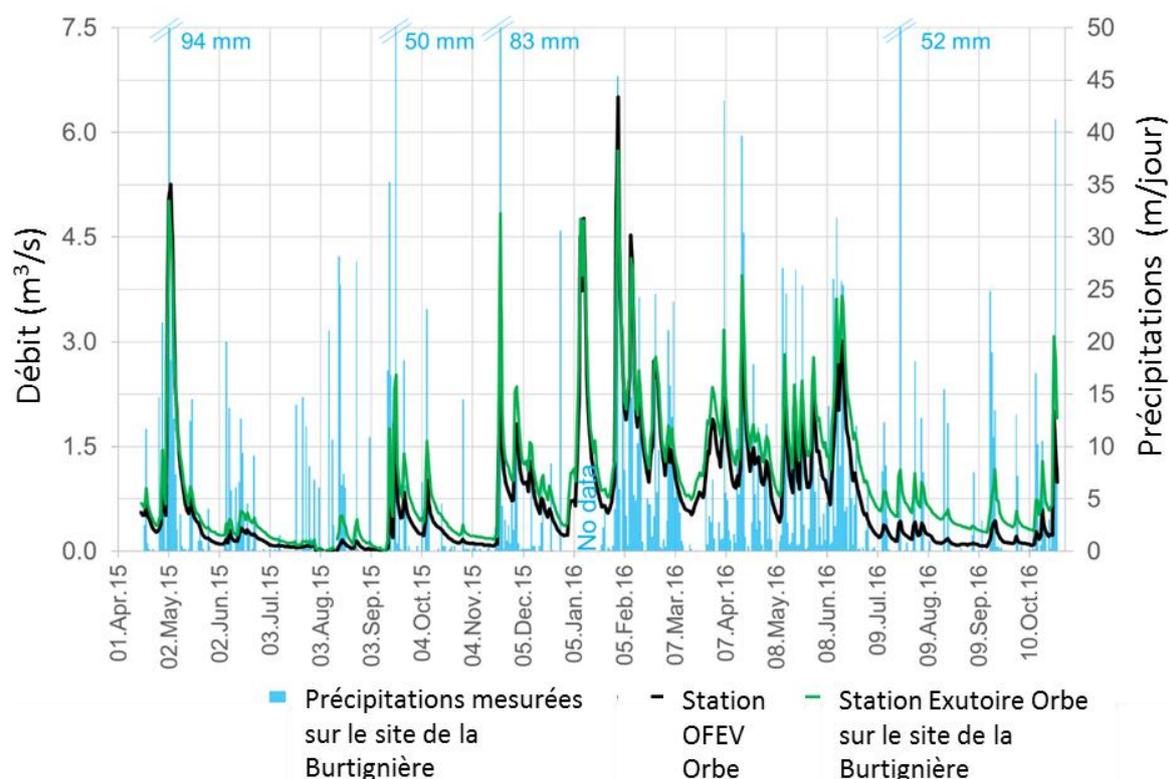


Figure 10 : Débits journaliers de l'Orbe (station OFEV et à l'exutoire du site d'étude) et précipitations journalières.

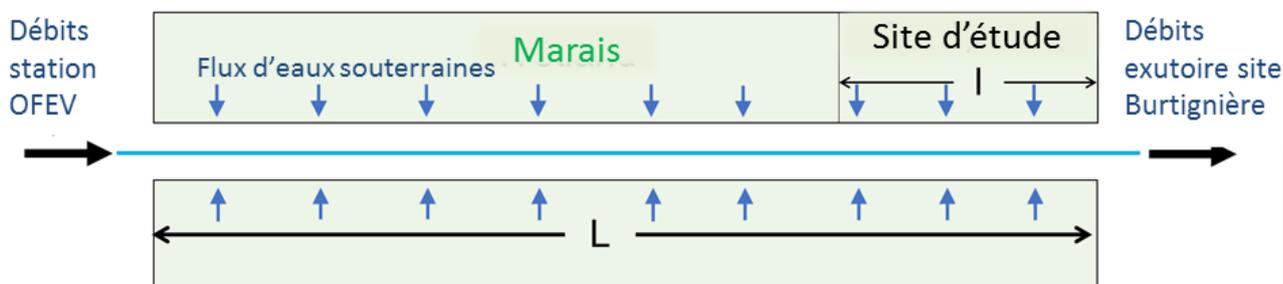


Figure 11 : Schématisation et représentation des paramètres de l'équation 10 pour le calcul des débits infiltrés ou exfiltrés au niveau de l'Orbe.

3.3 Mesures hydrogéologiques

Les mesures hydrogéologiques suivantes ont été effectuées dans les zones d'études :

- Carottages
- Mesures de porosité
- Mesures de conductivité hydraulique
- Relevés piézométriques
- Potentiels hydriques du sol

3.3.1 Carottage de sol

Les sondages du sol ont été effectués à l'aide d'une tarière de 10 cm de diamètre et d'un trépan de 5 cm de diamètre sur des profondeurs maximums de 3.5 m. Les matériaux du sol sortis à l'aide de la tarière ont été observés afin de déterminer leurs compositions, les changements de lithologie (tourbe, argile), les traces d'oxydation et les zones d'aération (**Figure 12**). Des mesures de topographie du terrain combinées avec des mesures de profondeurs du toit de la couche argileuse sur les sites ont permis de déterminer le volume de tourbe des sites étudiés (Voir **Annexes 10.1.4 ; 10.1.5 ; 10.2.4 ; 10.2.5**).



Figure 12 : Carottage effectué sur le site de la Burtignière. La partie gauche de la photo représente la couche superficielle du terrain et est constituée de tourbe. La partie droite de la photo représente la partie profonde du terrain et est constituée d'argile.

3.3.2 Porosité

Les mesures de la porosité ont été effectuées à une profondeur entre 10 et 15 cm selon la méthode standard décrite dans [Fetter \[2001\]](#). Pour chaque échantillon une couronne annulaire d'un volume de 100 ml a été enfoncée dans le sol (**Figure 13**). Les matériaux présents hors du volume lors de l'extraction du sol ont été retirés. En laboratoire, les échantillons ont été pesés (balance de précision de 0.01g), puis séchés à une température de 100°C. En utilisant des valeurs de masse volumique appropriées la porosité de l'échantillon peut être calculée suivant l'équation :

$$\theta = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (11)$$

Où ρ_b est la densité volumique de l'échantillon sec et ρ_s est la densité des particules composant l'échantillon de sol (Voir **Annexes 10.1.7** et **10.2.7**).



Figure 13 : Extraction d'un échantillon de sol afin d'effectuer une mesure de porosité (Site de la Burtignière).

3.3.3 Conductivité hydraulique

Les mesures de conductivité hydraulique (à saturation) ont été effectuées à l'aide d'un perméamètre de Guelph (**Figure 14**). Le perméamètre de Guelph est un système à charge constante (niveau d'eau constant, voir **Figure 15**). L'eau contenue dans l'appareil s'écoule lentement dans le trou de tarière et pénètre dans le sol. Après un certain temps, un bulbe de saturation se forme et le débit d'eau s'écoulant du réservoir du perméamètre atteint une valeur constante, qui est la valeur mesurée. Cette mesure, associée au diamètre du trou et à la hauteur d'eau dans celui-ci, permet de calculer la conductivité hydraulique à saturation du sol.

En pratique la mesure doit être une valeur constante d'infiltration pendant un temps suffisant pour que l'on considère le régime permanent d'infiltration atteint. Ce temps peut varier en fonction du type de sol et des conditions préalables de saturation (de 30 minutes à 2 heures avec une moyenne de 45 minutes sur les sites étudiés). La mesure peut s'effectuer à des profondeurs comprises entre 15 et 75 centimètres de profondeur (20 et 40 cm sur les sites d'étude, Voir **Annexes 10.1.5** et **10.2.5**).

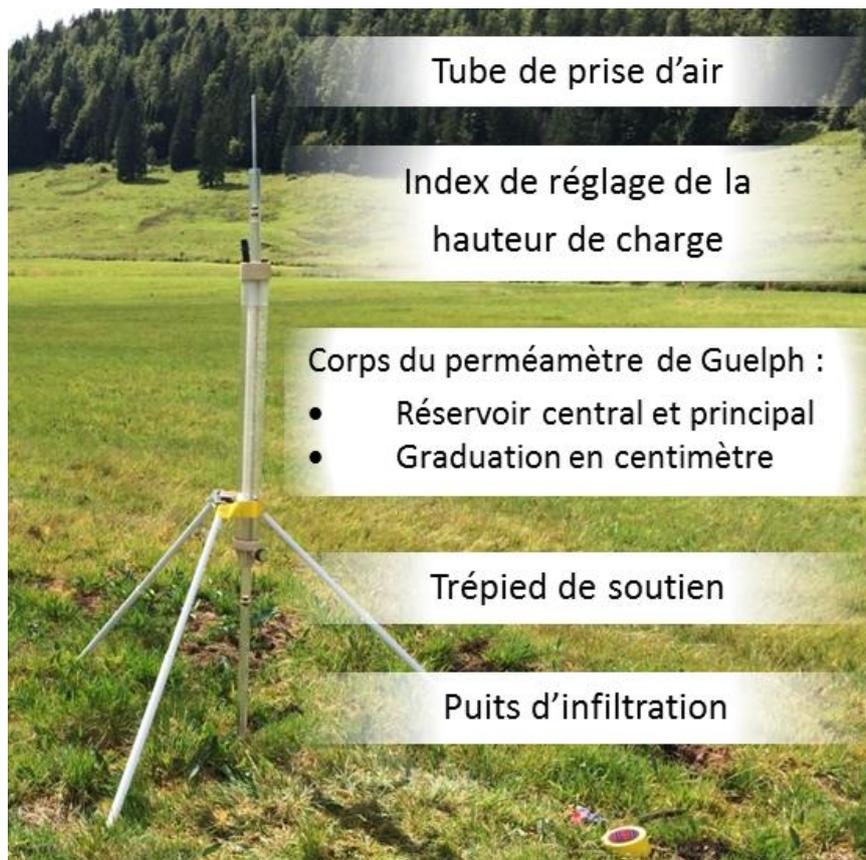


Figure 14 : Perméamètre de Guelph (norme ASTM D5126). Description succincte des composants principaux du perméamètre de Guelph.

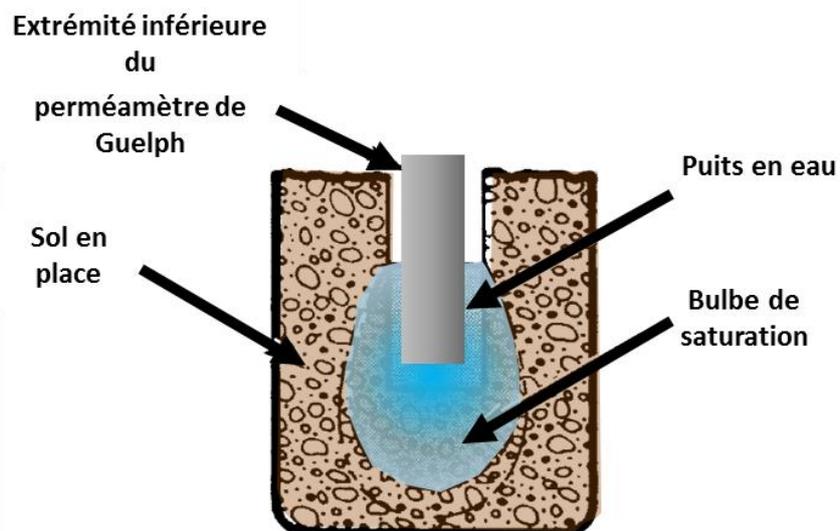


Figure 15 : Schéma du fonctionnement souterrain du perméamètre de Guelph.

3.3.4 Relevés piézométriques

Afin d'enregistrer la dynamique de la nappe, des piézomètres (dont 6 avec des sondes à enregistrement automatique) ont été installés sur les sites d'études. La **Figure 16** représente schématiquement la constitution des piézomètres.

Sur le site de la Burtignière, 4 piézomètres automatiques *Solinst*® Edge Model 3001 (**Figure 17**) avec un pas de temps de mesure de 15 minutes ont été installés et 5 piézomètres manuels (Voir **Annexe 10.1.3**).

Sur le site de Lombachalp-Teufen, 2 piézomètres automatiques *Solinst*® Edge Model 3001 (pas de temps de 15 minutes) ont été installés et 2 piézomètres manuels (Voir **Annexe 10.2.3**).

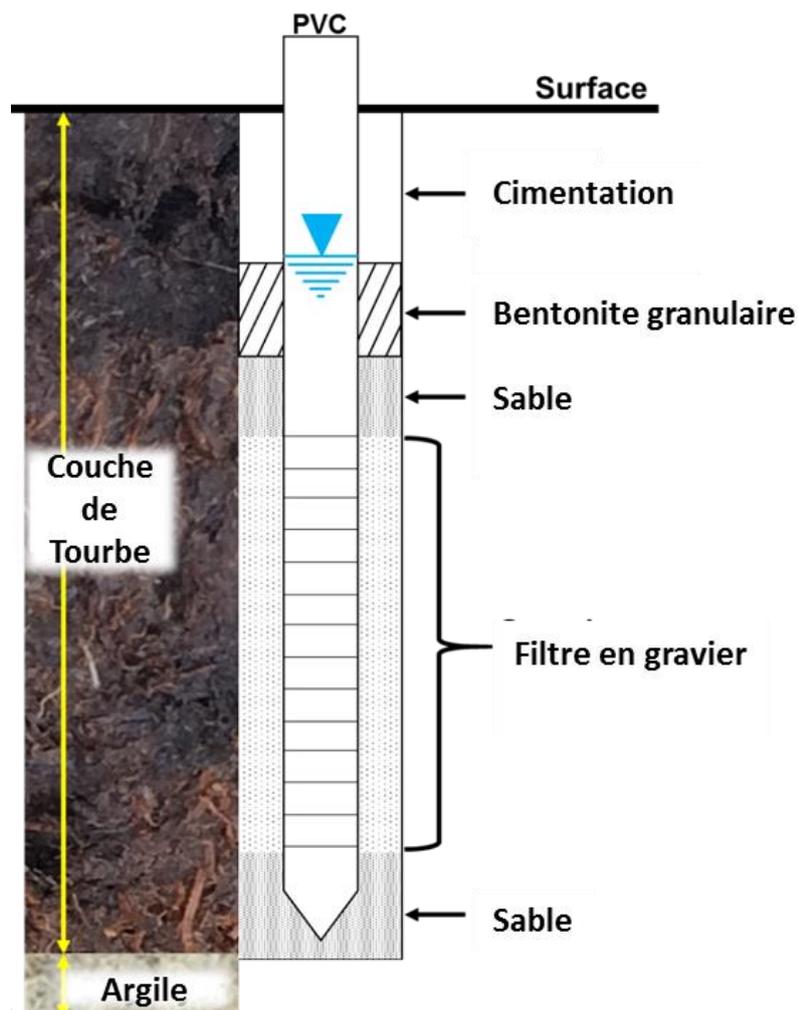


Figure 16 : Représentation schématique de la constitution des piézomètres installés.

Ces mesures ont permis de quantifier la dynamique de la surface piézométrique, d'estimer le gradient de la nappe, la direction de l'écoulement et de calculer les variations moyennes de volume d'eau contenu dans les marais.



Figure 17 : Sonde piézométrique Solinst® Edge – Model 3001.

3.3.5 Potentiel hydrique du sol

Les mesures de potentiel hydrique du sol ont été effectuées à une profondeur de 10 cm à l'aide d'une sonde *Decagon MPS-2* (**Figure 18**) qui mesure des valeurs comprises entre -10 et -500 KPa. Ces mesures ont permis d'identifier les variations de la teneur en eau du sol à proximité de la surface en fonction de l'élévation de la surface piézométrique de la nappe phréatique sous-jacente.



Figure 18 : Sonde de potentiel hydrique Decagon MPS-2.

4 Sites tests : Arc jurassien et Préalpes

Les sites marécageux étudiés dans le cadre de ce projet sont classifiés comme étant des bas-marais. Les bas-marais sont des unités paysagères, biologiques et hydrologiques qui se forment généralement sur des zones plates [[La Burtignière](#)] ou avec de faibles pentes [[Moor zwischen Lombachalp und Teufen](#)]. Elles tendent à se former dans les zones où les eaux de surface et les eaux souterraines s'accumulent [[U.S. EPA, 2008](#)]:

- Dans des dépressions topographiques (plaines d'inondation, cuvettes, etc...)
- Derrière des barrières naturelles ou artificielles (dunes, digues, moraines glacières, etc...)
- Le long des côtes (rivières, lacs, océans)
- Au-dessus de surfaces géologiques à faible conductivité hydraulique (argiles, roches cristallines, permafrost)

Les bas marais sont aussi définis par le fait que leur humidité est maintenue non pas seulement par les eaux de pluie (comme c'est le cas pour les haut-marais) mais aussi par les eaux souterraines, les eaux de ruissellement et/ou les inondations temporaires [[Klove et al., 2011](#); [Office fédéral de l'environnement \(OFEV\), 2007](#)]. Sur le site d'étude de la Burtignière [[La Burtignière](#)] l'Orbe, rivière d'une largeur comprise entre 5 et 7 m et de profondeur de plein bord de 2 m dans la zone d'étude peut recouvrir une grande partie de la plaine en période de crue (**Figure 19**) permettant ainsi de stocker temporairement de grands volumes d'eau. Par leur capacité à retenir et ralentir les écoulements d'eau de surface pendant les crues, les marais constituent d'importants modérateurs des variations hydrologiques [[U.S. EPA, 2008](#)].



Figure 19 : La zone de marais de la Burtignière en période estivale (à gauche) et en période de cru de l'orbe (à droite, automne 2015).

Le choix des sites a été motivé par les observations faites sur l'évolution des bas-marais, à savoir que les régions occidentales du Jura et du nord des Alpes se caractérisent par des environnements dont le caractère marécageux est en baisse et qui présentent souvent une détérioration de leur approvisionnement en eau [[Office fédéral de l'environnement \(OFEV\), 2007](#)].

4.1 Description des sites de mesures

4.1.1 Marais de la Burtignière, Vallée de Joux (VD)

Le premier site d'étude se situe dans la vallée de Joux (**Figure 20**), canton de Vaud et correspond en termes de région naturelle au Jura. La vallée de Joux est une dépression orientée nord-est sud-ouest. Son bassin versant s'écoule en direction du lac de Joux et est parcouru par l'Orbe qui s'écoule en méandres et rejoint le lac de Joux à une altitude de 1011 m. L'Orbe a un régime pluvio-nival saisonnier [Paquet, 2002]. La topographie de la zone présente une faible pente de l'ordre de 3% en direction de l'Orbe. Une bute d'une élévation de 1037 m domine la zone d'étude. La surface de référence étudiée présente une étendue de 19630 m², soit un peu moins de 2 hectares. La station météorologique se situe dans la partie nord à une altitude de 1036,5 m (Voir **Annexe 10.1.3**).

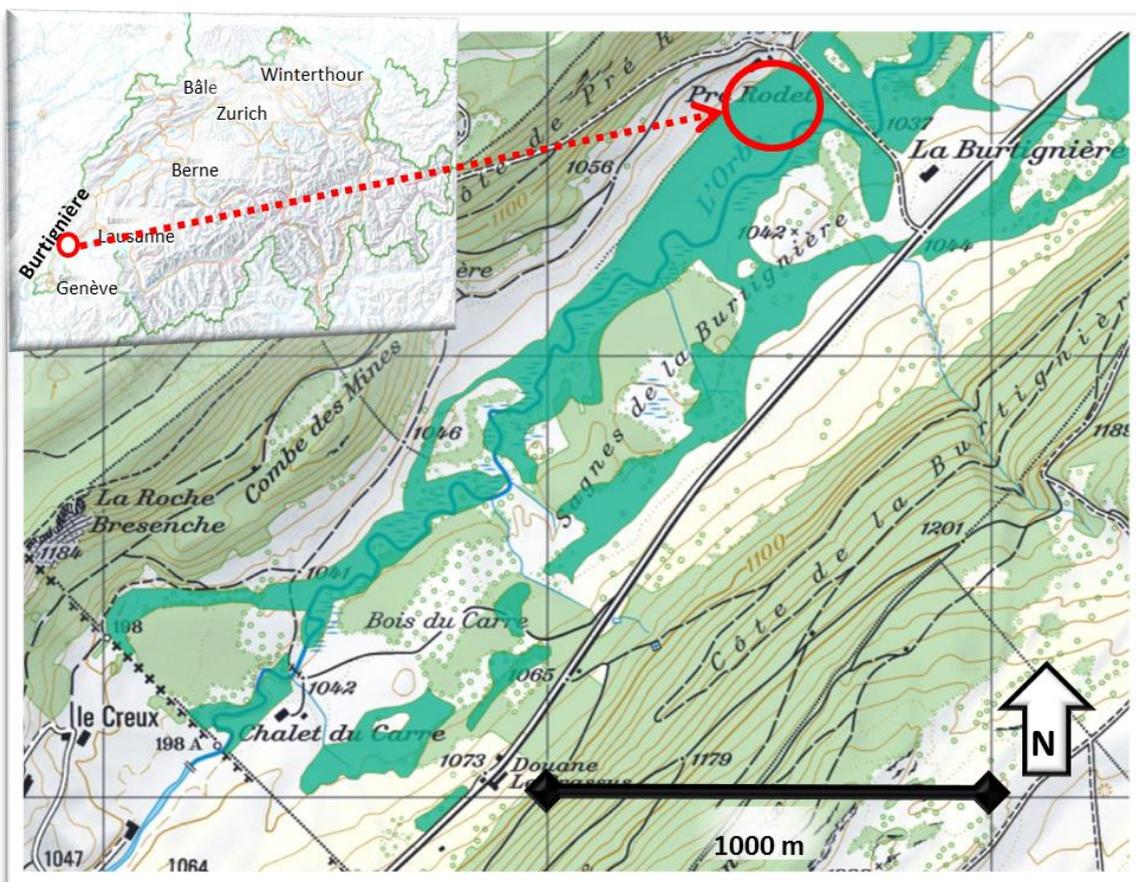


Figure 20 : La zone verte, légèrement transparente, représente les bas-marais dans la partie aval de la vallée de Joux. Les unités comprises entre le pont de la Burtignière et la frontière avec la France font partie de l'ensemble de bas marais appelé La Burtignière. La zone encerclée de rouge constitue la zone d'étude. Le fond de plan est la carte nationale 1:25'000 CN25.

Le site d'étude s'est développé entre des moraines de forme allongée dans la direction de l'axe du synclinal de la vallée de Joux (**Figure 21**). Il se situe aux coordonnées 502584 157589 (CH-1903/LV03). Ce site fait partie d'un bas-marais, appelé *La Burtignière*, [La Burtignière],

qui borde l'Orbe. La **Figure 22** montre l'étendue du bassin versant de l'Orbe au niveau de la zone d'étude), du lieu-dit La Burtignière jusqu'à la frontière avec la France.

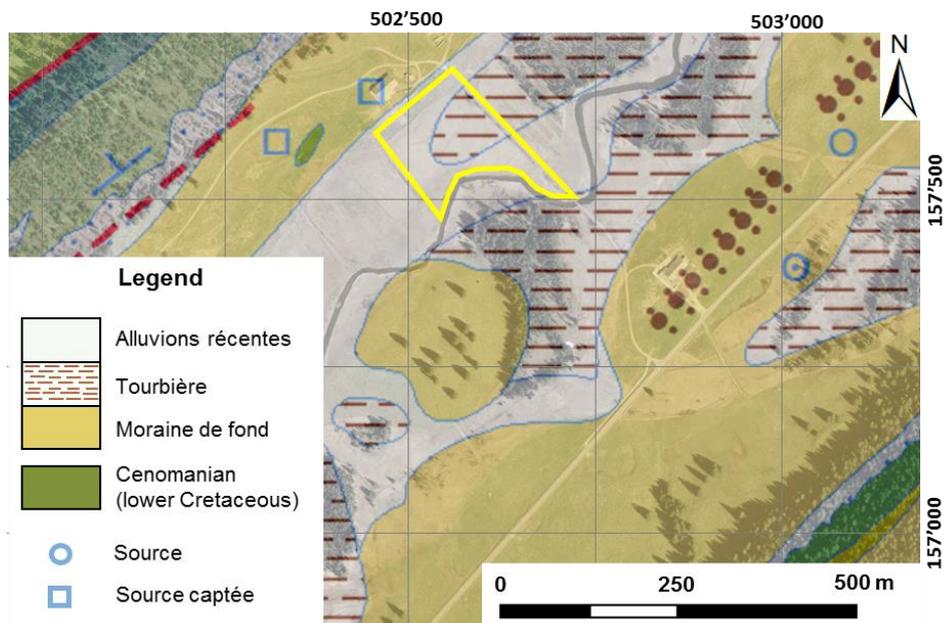


Figure 21 : La zone d'étude, délimitée par le contour jaune, se situe sur des structures géologiques datant du Quaternaire définies dans la légende. La zone d'étude est limitée au sud par l'Orbe, à l'est par la route de la Burtignière et au nord et à l'ouest par un drain de faible profondeur (map.geo.admin.ch).

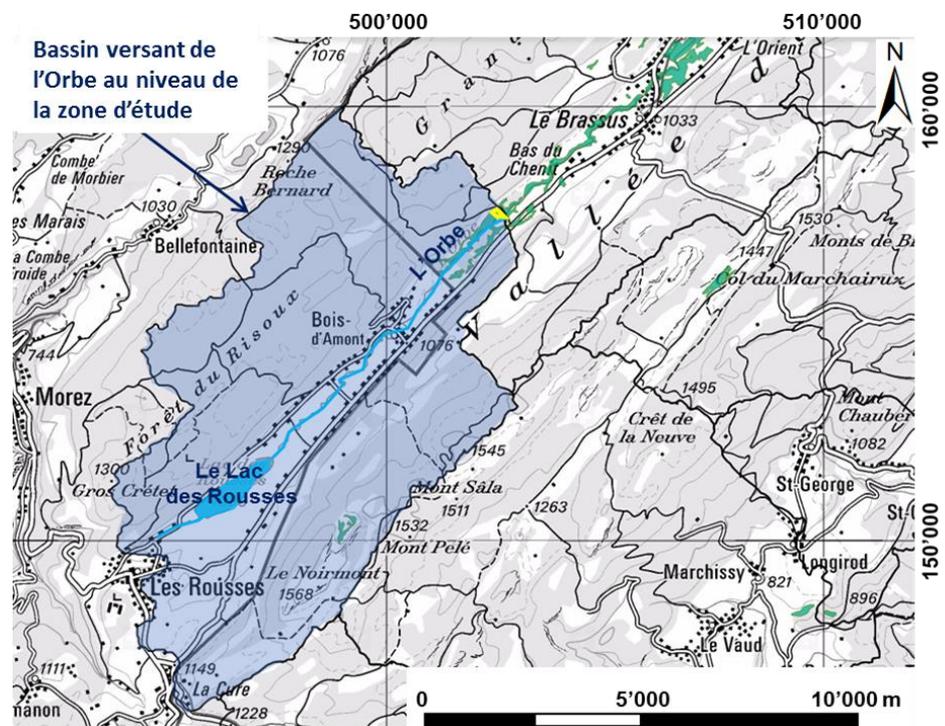


Figure 22 : Bassin versant de l'Orbe au niveau de la zone d'étude de la Burtignière. (Carte Suisse 1:25000, map-geo.admin.ch).

La base du marais est constituée d'argile. Les mesures de la profondeur du toit de la couche d'argile ont permis de déterminer une épaisseur moyenne de la couche de tourbe de 2 m et des valeurs comprises entre 4 m et 0 m (**Figure 23**). On observe une diminution continue de l'épaisseur du marais à l'approche de la rivière avec des affleurements de la couche d'argile en bordure de l'Orbe. Le volume du marais est d'environ 37'000 m³.

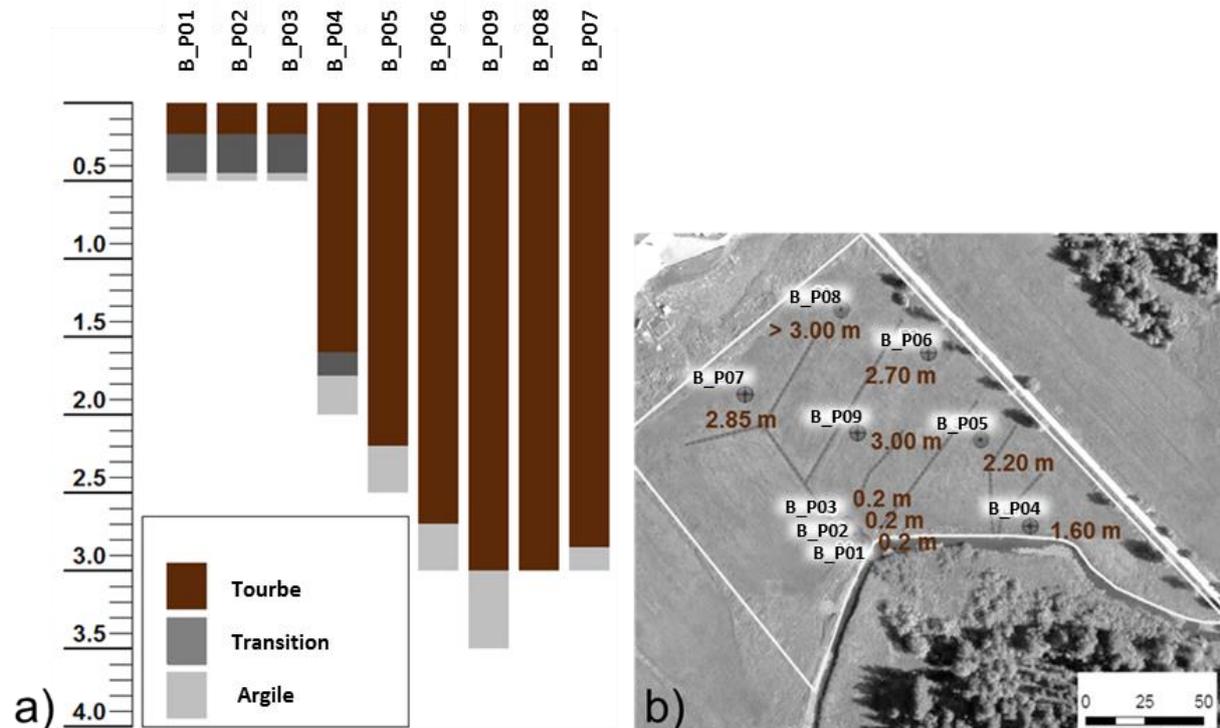


Figure 23 : Relevés de sol (profondeur de la tourbe) au niveau des piézomètres installés au site la Burtignière. a) Description des colonnes de sol, b) Carte de localisation des carottages.

Afin de déterminer la quantité d'eau pouvant être retenue dans le marais, des mesures de porosité ont été effectuées et une porosité moyenne de 70% a été calculée avec des valeurs comprises entre 41% et 86%. En considérant un marais saturé, le volume d'eau dans le marais peut s'élever à 28'000 m³, soit une hauteur saturée d'eau moyenne de 1440 mm.

Cette valeur est proche de la valeur cumulée des précipitations de 1600 mm (soit un volume de 31'000 m³ par an) mesurée durant la période avril 2015 – mars 2016. Sur la même période le cumule de l'évapotranspiration de référence s'élève à 600 mm (soit 9800 m³).

Les mesures piézométriques ont permis d'estimer un gradient hydraulique de 5 ‰ et un écoulement vers l'est sud-est (N120). L'orientation du gradient montre un écoulement contraint à la fois par la pente générale de la vallée de Joux et par la rivière Orbe qui draine les eaux souterraines la majeure partie de l'année, exception faite des périodes de crues de l'Orbe. Compte tenu des mesures de conductivité hydraulique (**Annexe 10.1.6**) un flux de darcy moyen de 4.10⁻² m/j a été calculé.

Des relevés piézométriques en continue effectués durant la période février 2016 – Octobre 2016 ont permis de quantifier de manière plus précise les variations de volume d'eau dans le marais. Cette période comprend la période estivale, qui est la période critique car l'évapotranspiration est la plus importante et les précipitations les plus faibles. Durant les mois de février à juin 2016 le volume d'eau moyen du marais est relativement stable à

25'500 m³. En juillet le volume décroît significativement en raison de l'évapotranspiration élevée et de la raréfaction des précipitations et atteint une valeur moyenne jusqu'en septembre de 22'000 m³, soit une diminution du volume d'eau de 3500 m³ (15 % du volume total estimé). Sur la même période l'épaisseur non saturée de sol passe de 10 cm à 50 cm. La diminution de la saturation du marais, liée à la forte demande en évapotranspiration, est potentiellement un stress important pour la végétation de marais. La **Figure 24** montre les variations de la charge hydraulique au niveau des piézomètres placés dans la zone d'étude. On peut observer les variations de la surface piézométrique due aux apports ou retraits d'eau, sous forme de pluie excédentaire ou d'évapotranspiration excédentaire. Sur ce graphique peut aussi être visualisée l'épaisseur de la couche non saturée, c'est-à-dire la différence entre l'élévation de la surface du sol et l'élévation de la nappe phréatique. L'évolution de la hauteur d'eau du marais montre que l'hydrodynamique du marais est dominée par les apports des précipitations (rapide augmentation de la surface piézométrique) et les soustractions liées principalement à l'évapotranspiration (diminution continue du niveau d'eau, en particulier pendant la période estivale).

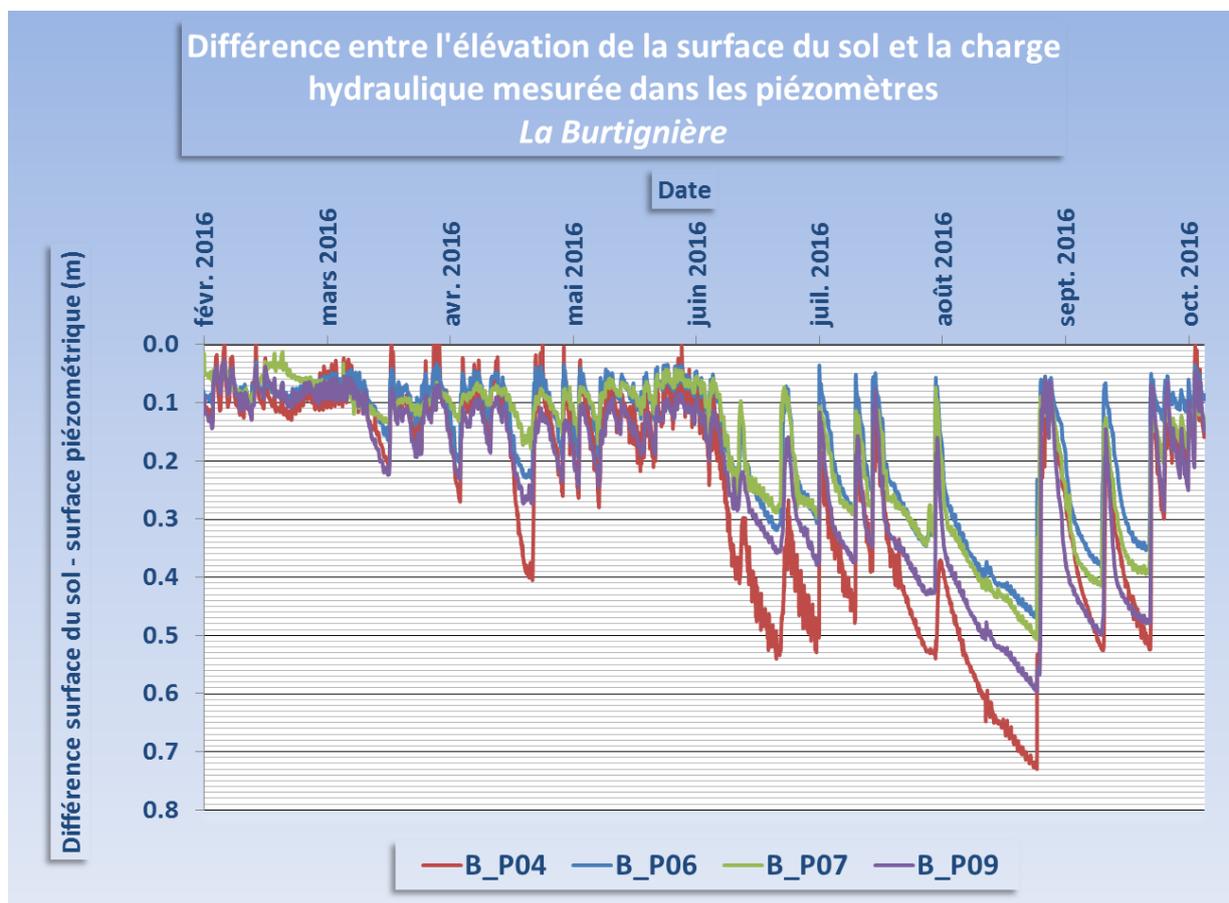


Figure 24 : Variations des charges hydrauliques (La Burtignière). L'ordonnée 0 représente la surface du sol. Les diminutions rapides de la zone non-saturée sont causées par les précipitations (non représentées sur le graphique).

4.1.2 Marais de Lombachalp-Teufen, Habkern (BE)

Le deuxième site de mesure se situe dans les Préalpes suisses (Centre des Alpes septentrionales, voir **Figure 25**) au niveau du marais de Lombachalp-Teufen (numéro de l'objet 3476 - OFEV) et aux coordonnées 634880 178290 (CH-1903/LV03). Il est situé à une altitude de 1596 m. Les précipitations sont de l'ordre de 1500 mm/an, et principalement sous forme de neige durant la période hivernale.

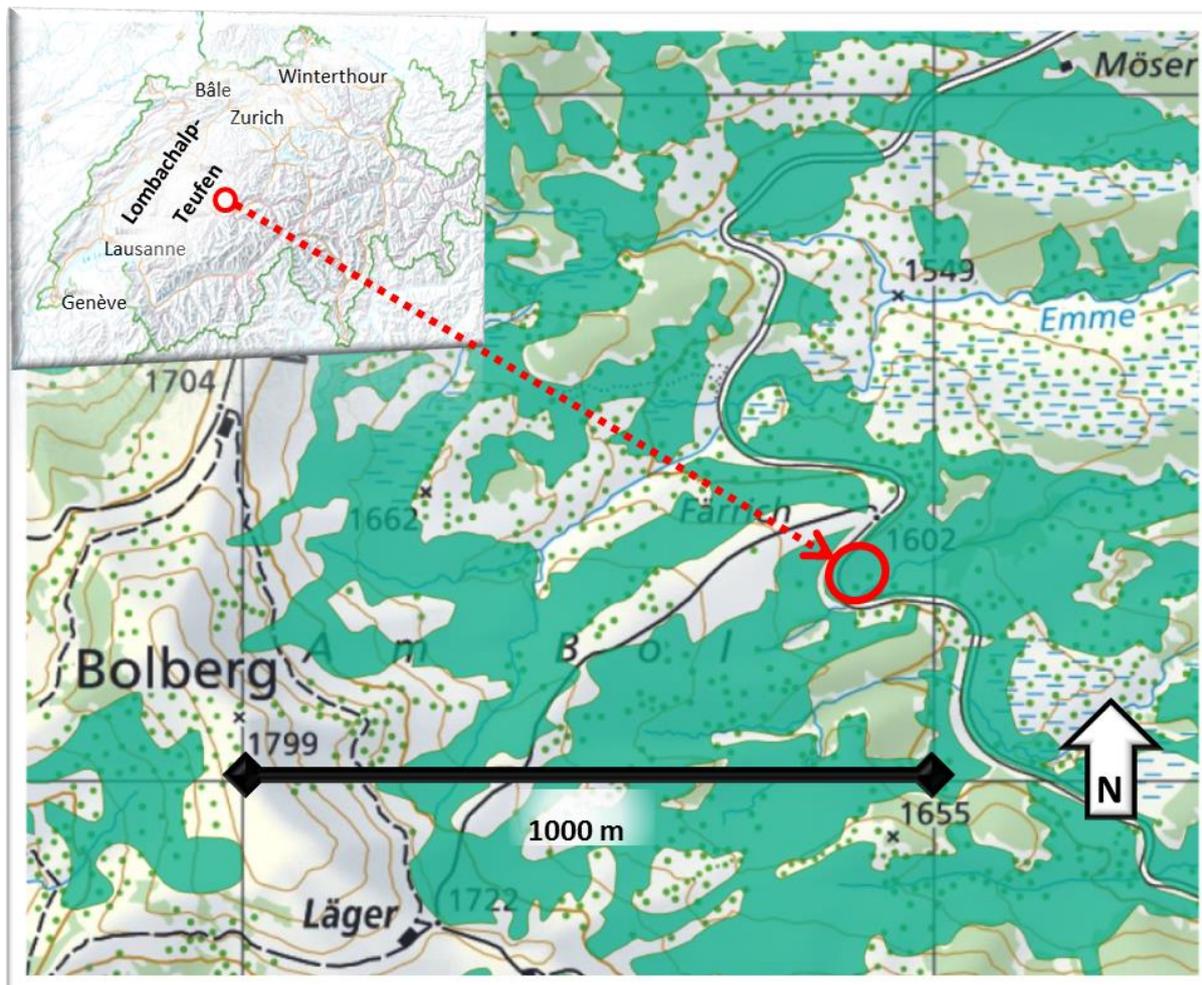


Figure 25 : La zone verte, légèrement transparente, représente les bas-marais entre Lombachalp et Teufen. La zone cerclée de rouge localise le site d'étude. Le site est limité à l'ouest et au nord par une route. L'est et le sud de la zone d'étude sont délimités par le début d'une zone arborée et par un affluent intermittent de l'Emme. Le fond de plan est la carte nationale 1:25'000 CN25.

Ce site se situe au centre de la commune d'Habkern (Oberland Bernois) entre le sommet de l'Hohgant au nord (2197 m) et de l'Augstmatthorn au sud (2137 m). Cette zone constitue la source de l'Emme. Le site d'étude est bordé au sud par un affluent intermittent de l'Emme et est surplombé à l'ouest par le Bolberg (1800 m). **Figure 26** visualise la géologie du site et montre que le site est situé sur les Flysch du Schlieren.



Figure 26 : Structures géologiques du site de bas marais Lombachalp-Teufen extrait de la carte géologique de la Suisse à l'échelle 1:500'000 (GK500-Geol). En jaune : Flysch ultra helvétique. En vert à points rouges : Flysch du Schlieren (extrémité est de la Nappe du Gurnigel). La zone encerclée de rouge localise le site d'étude.



Figure 27: Vue du site de mesures (Marais Lombachalp-Teufen) à partir de la colline du Bolberg (prise de vue vers l'est). Cercle rouge : Site d'étude préalpin (emplacement de la station météorologique, du bac d'évaporation et des piézomètres). Cercle bleu : Emplacement de l'antenne relais permettant la transmission des mesures de la station météorologique et du bac d'évaporation.

L'absence de couverture du réseau téléphonique dans cette région a conduit à l'installation d'une antenne relais sur la colline du Bolberg afin de transmettre les données obtenues par la station météorologique et le bac d'évaporation et ainsi d'assurer le contrôle des mesures effectuées sur le site (**Figure 27**).

Les mesures hydrogéologiques effectuées dans le marais ont permis d'estimer une conductivité hydraulique moyenne du marais de l'ordre de 0.015 m.j^{-1} et une porosité moyenne de 75 %. L'épaisseur moyenne du marais est estimée à 1 m avec des valeurs comprises entre 0.35 m et 1.85 m (**Figure 28**). Le volume du marais est estimé à 5500 m^3 pour une surface de 5500 m^2 , soit un peu plus d'un demi-hectare.

À partir de relevés piézométriques un gradient de 5 % en direction du sud-est a été estimé. Le flux de darcy calculé est de $8.10^{-4} \text{ m/j}^{-1}$. Les mesures piézométriques ont permis de calculer un volume moyen d'eau de 3500 m^3 , soit 65 % du volume total. Des diminutions de l'ordre de 40 cm de hauteur d'eau ont été observées (Voir piézomètre LT_P03, **Figure 29**), ce qui compte tenu de la faible épaisseur moyenne du marais à une forte influence sur la variation relative du volume d'eau. À l'instar du marais de la Burtignière, la zone d'étude de Lombachalp-Teufen présente un marais dont la dynamique de la nappe phréatique est fortement influencée par le rapport entre les précipitations et l'évapotranspiration.

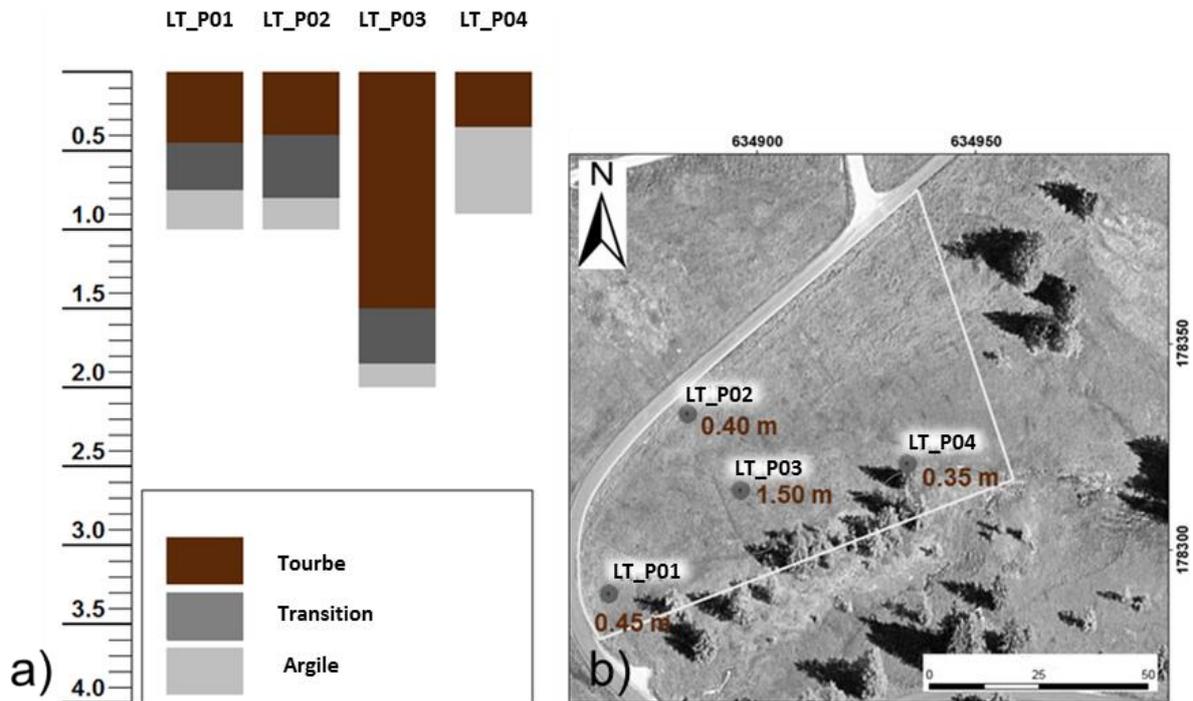


Figure 28 : Relevés de sol (profondeur de la tourbe) au niveau des piézomètres installés au site Lombachalp-Teufen. a) Description des colonnes de sol ; b) Carte de localisation des carottages.

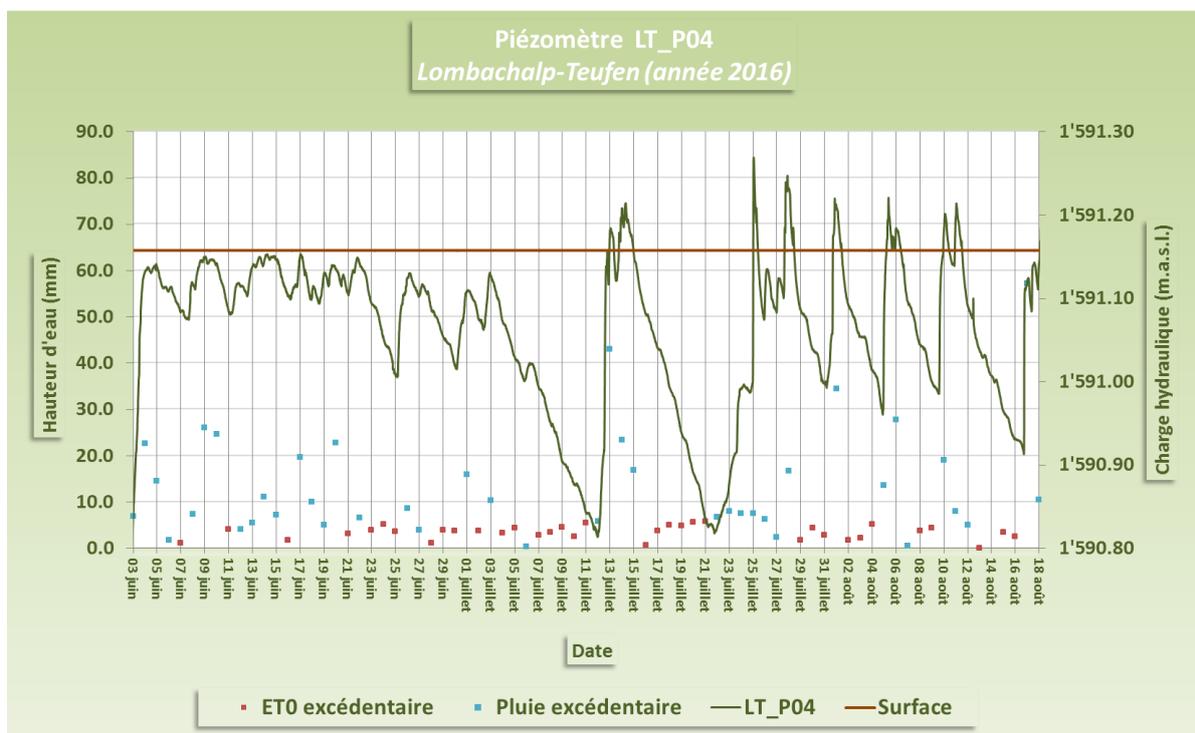


Figure 29 : Variations de la charge hydraulique dans le piézomètre LT_04 (Lombachalp-Teufen). La surface du sol est représentée par le trait horizontal marron. L'excédent de pluie ou d'évapotranspiration (c.à.d. la valeur absolue de la différence entre les précipitations mesurées et l'évapotranspiration calculée) est représenté quotidiennement.

4.2 Dynamique des échanges hydriques

4.2.1 Évapotranspiration et précipitations

Concernant les échanges atmosphériques, les résultats obtenus sur les deux sites d'étude (Voir **Figures 30** et **Figure 31**) montrent des valeurs proches pour les deux types de mesures sur des moyennes de 10 jours (Durée minimum pour l'interprétation des mesures du bac d'évaporation). L'absence de données pour le bac d'évaporation sur les périodes de novembre 2015 à mars 2016 pour le site de la Burtignière et pour les périodes d'octobre 2015 à mai 2016 pour le site de Lombachalp-Teufen est liée à l'impossibilité de faire les mesures pendant les périodes hivernales (précipitations sous forme de neige et gel de l'eau contenue dans le bac d'évaporation).

On peut observer des valeurs d'évapotranspiration qui augmentent pendant la période estivale avec des maximums de 5 mm/j pour le site de la Burtignière et 3 mm/j pour le site de Lombachalp-Teufen. En hiver les valeurs moyennes quotidiennes sont très faibles (inférieures au millimètre) voir nulles. **Figure 32** montre la corrélation entre les valeurs de l'évapotranspiration de référence ET_0 calculées avec la méthode directe et indirecte entre les mois d'avril et novembre pendant les années 2015 et 2016. Le coefficient de détermination R^2 , défini comme le rapport entre la variance expliquée et la variance totale, montre la qualité de la prédiction des droites de régression linéaire établies pour les 2 années. Le coefficient de détermination est 0.92 pour l'année 2015 et 0.52 pour l'année 2016. La corrélation entre les deux types de mesures est donc très satisfaisante pour l'année 2015 (valeur proche de 1). Pour l'année 2016, la diminution du coefficient de détermination peut être expliquée par des différences plus importantes entre les valeurs fournies par les deux types de mesure sur certaines périodes de 10 jours, avec une estimation de ET_0 par Penman-Monteith souvent supérieure à celle obtenue avec bac d'évaporation. Ces différences peuvent être dues, entre autres, à des variations rapides et importantes du volume d'eau contenu dans le bac, qui peut soit se remplir au-dessus de la valeur de calibration suite à de fortes précipitations soit au contraire se vider au-delà de la valeur de calibration suite à une forte demande en évaporation et un déficit de précipitation.

La comparaison des valeurs cumulées et d'évapotranspiration avec les valeurs cumulées des précipitations (Voir **Figures 33** et **Figure 34**) montre clairement l'excédent de précipitation, 1600 mm/an et 1850 mm/an, pour les sites de la Burtignière et de Lombachalp-Teufen respectivement en comparaison de l'évapotranspiration cumulée de 565 mm/an et 415 mm/an pour ces mêmes sites.

Néanmoins, comme identifié précédemment, les écoulements souterrains drainés par le réseau hydrique de surface (Orbe pour la Burtignière et affluent de la source de l'Emme pour Lombachalp-Teufen) ne permettent à la quantité d'eau apportée par chaque précipitation d'être utilisable que sur de courtes périodes de temps. **Les Figures 35** et **36** montrent les flux de précipitation et d'évapotranspiration journaliers calculés avec la formule de Penman-Monteith pour les 2 sites d'étude. On peut observer l'augmentation de la demande en évapotranspiration par le couvert végétal pendant la période estivale et une raréfaction des précipitations sur cette même période.

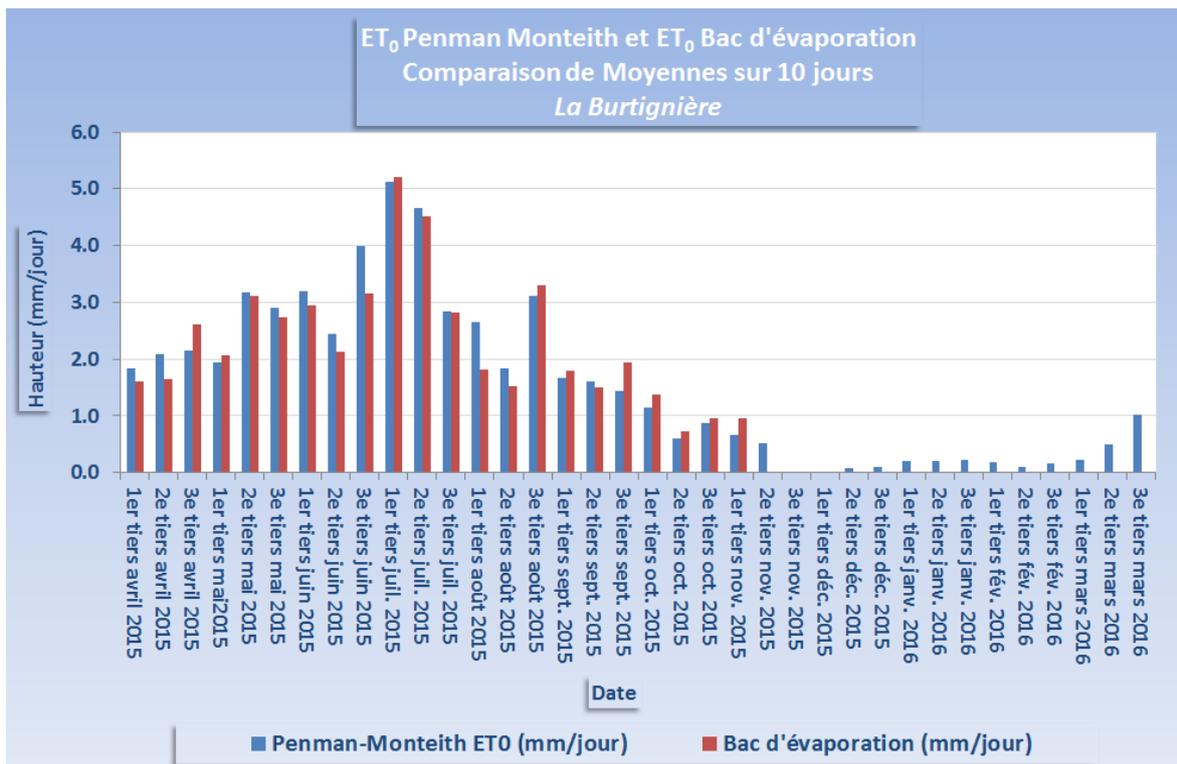


Figure 30 : Comparaison de l'évapotranspiration de référence, ET_0 , moyennes sur des périodes de 10 jours obtenues par mesure directe (Bac d'évaporation) et par mesure indirecte (Formule de Penman-Monteith) sur le site de la Burtignière.

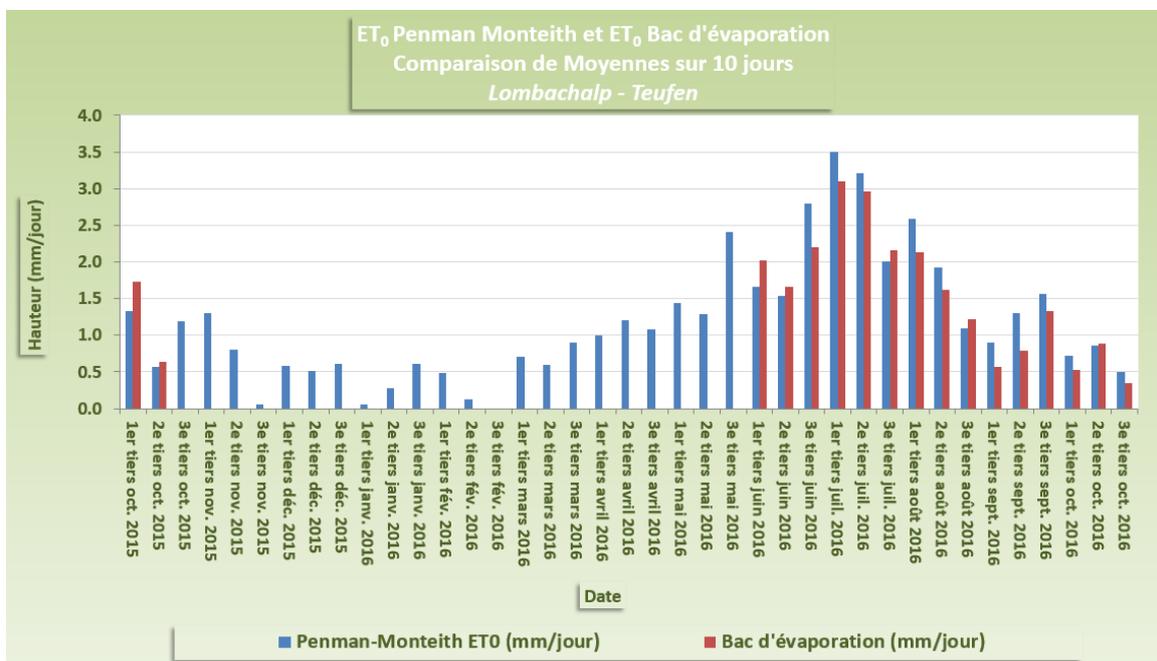


Figure 31 : Comparaison de l'évapotranspiration de référence, ET_0 , moyennes sur des périodes de 10 jours obtenues par mesure directe (Bac d'évaporation) et par mesure indirecte (Formule de Penman-Monteith) sur le site de Lombachalp-Teufen.

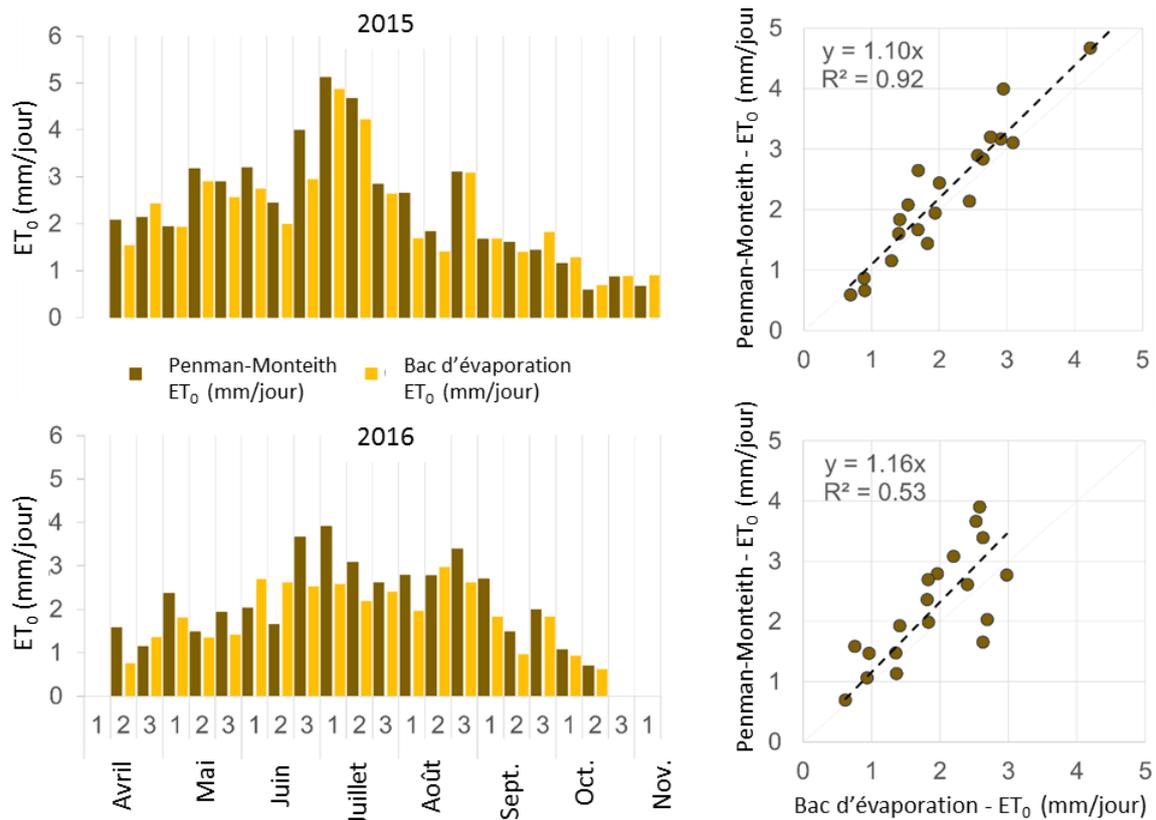


Figure 32 : Évaluation de la corrélation entre les mesures directes (bac d'évaporation) et indirectes (Formule de Penman-Monteith) de l'évapotranspiration de référence. Période avril-novembre, 2015-2016, site de la Burtignière.

4.2.2 Dynamique de la nappe phréatique

Pendant les périodes où la demande en évapotranspiration est significative, l'élévation de la nappe phréatique diminue rapidement pendant la journée sous l'influence de l'évapotranspiration et augmente durant la nuit due à la recharge par les flux latéraux (et verticaux) d'eaux souterraines. La remontée de la nappe n'est que partielle et une tendance générale à la diminution de l'élévation de la surface phréatique peut être observée (**Figure 38**). [Gribovszki et al. \[2010\]](#) remarque que ces variations journalières sont de bons indicateurs de l'occurrence du processus d'évapotranspiration (Méthode simple, comparée à Penman-Monteith qui nécessite de mesurer de nombreuses variables). Cependant, compte tenu de la proximité de la surface phréatique avec la surface du sol (frange capillaire proche de la surface du sol), cette approche peut tendre à surestimer l'évapotranspiration. Aussi cette estimation de l'évapotranspiration basée sur les variations des niveaux piézométriques est dépendante et donc sensible à l'estimation de la porosité du marais.

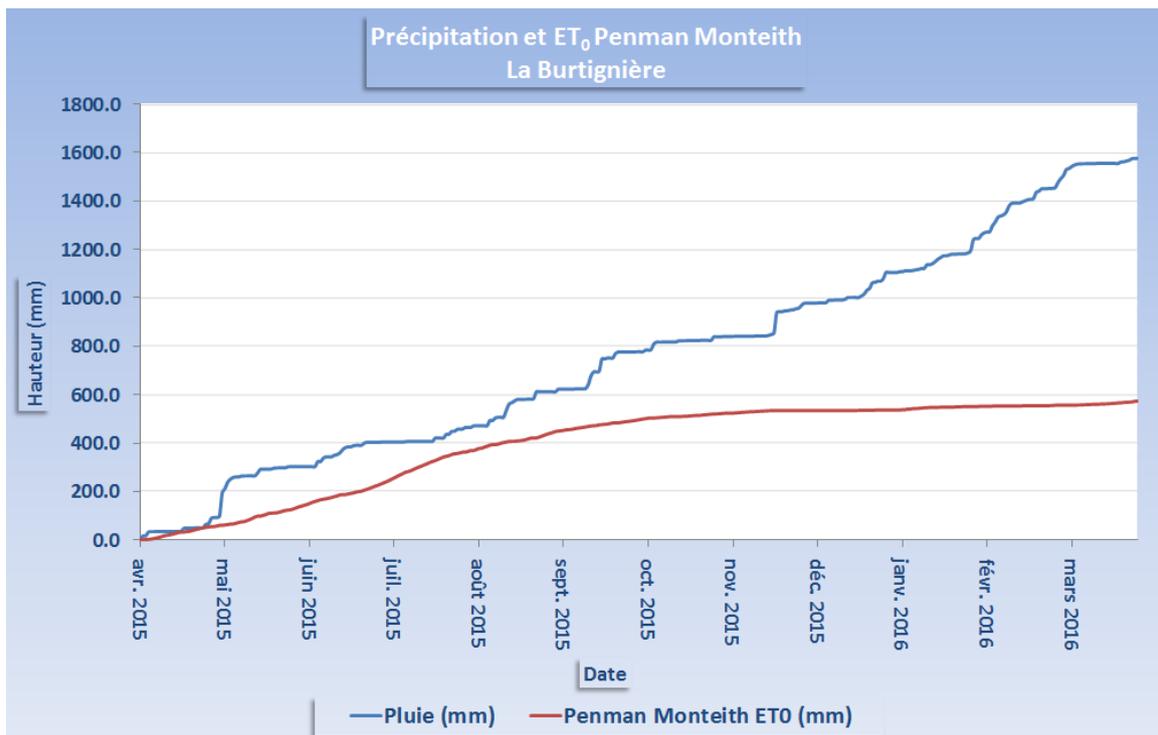


Figure 33 : Précipitation et Évapotranspiration de référence ET_0 cumulées sur la période avril 2015 – avril 2016 sur le site de la Burtignière.

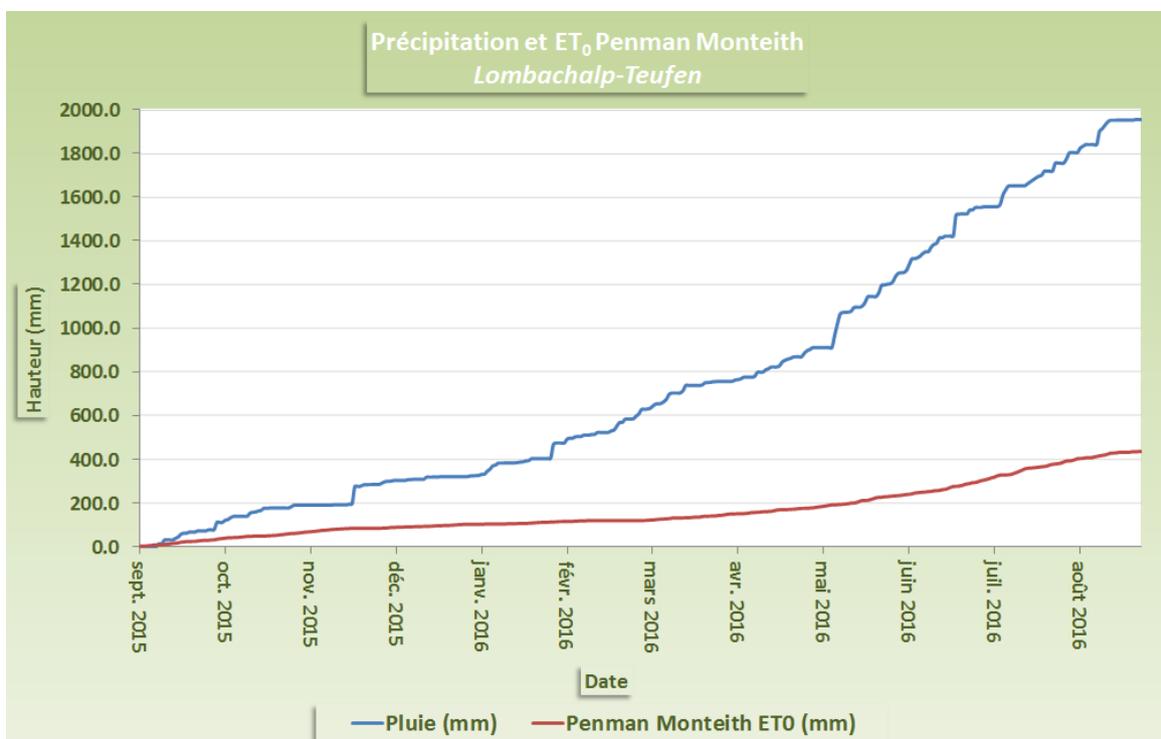


Figure 34 : Précipitation et Évapotranspiration de référence ET_0 cumulées sur la période septembre 2015 – septembre 2016 sur le site de Lombachalp-Teufen.

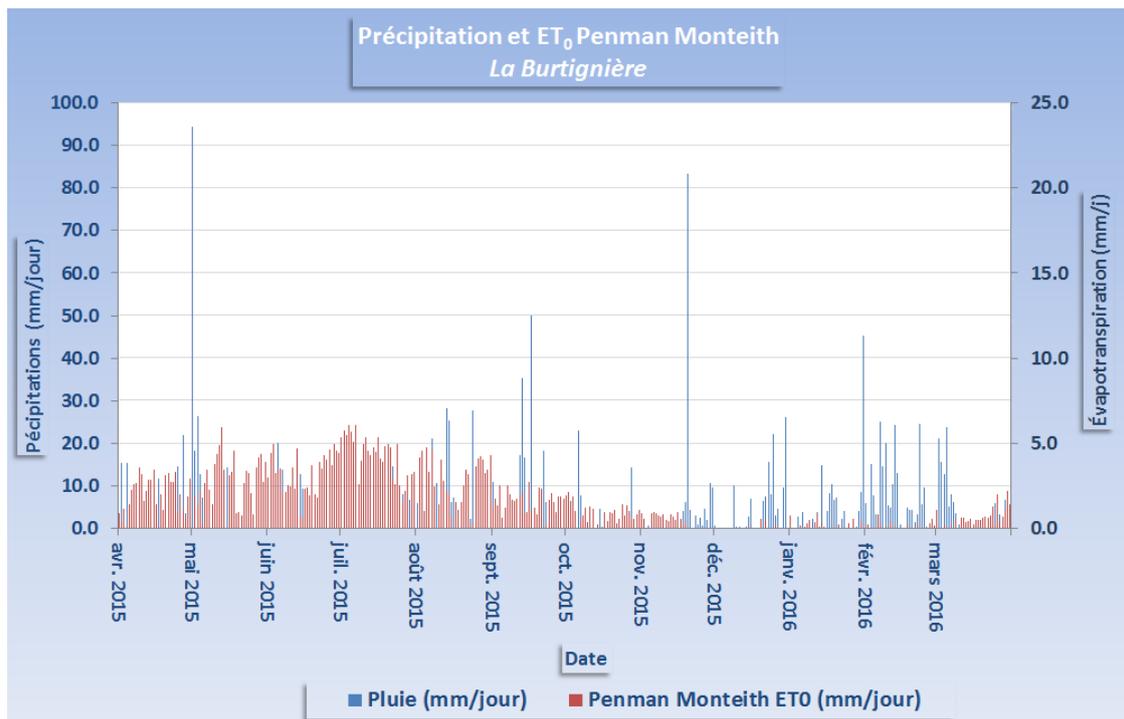


Figure 35 : Précipitation journalière et évapotranspiration de référence ET_0 calculée selon Penman-Monteith à partir des mesures climatiques journalières. L'axe des ordonnées est 4 fois plus grand pour les précipitations. Site de la Burtignière.

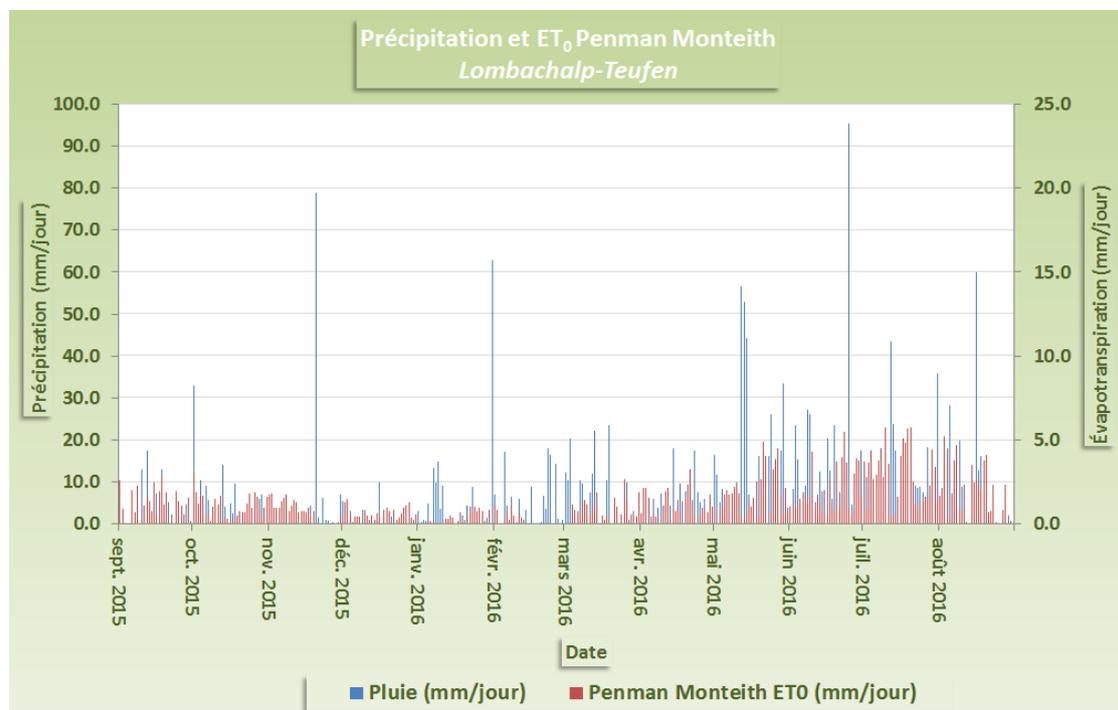


Figure 36 : Précipitation journalière et évapotranspiration de référence ET_0 calculée selon Penman-Monteith à partir des mesures climatiques journalières. L'axe des ordonnées est 4 fois plus grand pour les précipitations. Site de Lombachalp-Teufen.

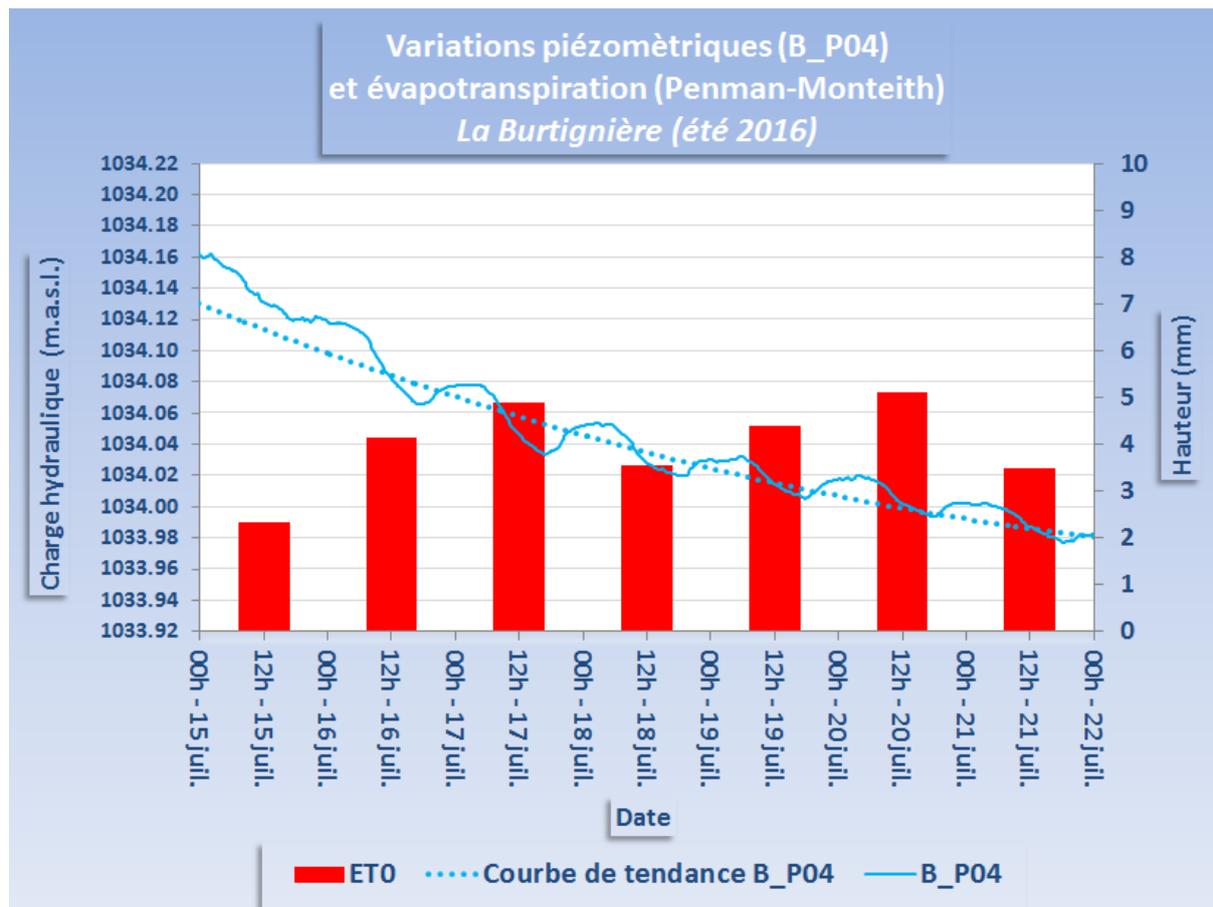


Figure 37 : Oscillations piézométriques quotidiennes sous l'effet de l'évapotranspiration du marais (Site de la Burtignière, piézomètre B_P04).

Dans les environnements où la surface de la nappe phréatique est proche de la surface du sol, les variations du contenu en eau du sol non saturé sont synchrones (décalage positif de quelques heures) avec les variations de l'élévation de la nappe phréatique du fait de la connexion hydraulique entre les deux domaines [Nachabe et al., 2005]. Pour une nappe phréatique proche de la surface, l'eau nécessaire à l'évapotranspiration est fournie directement par la nappe, la zone non saturée permet le transport de l'eau de la nappe et est constamment rechargée en eau [Meyboom, 1967; Shah et al., 2007]. Généralement le niveau de la surface piézométrique commence à diminuer entre 9h et 11h du matin et atteint son minimum journalier entre 7h et 9h du soir. La **Figure 38** schématise la dynamique de la nappe liée aux cycles d'évapotranspiration (pendant la journée) et à la recharge latérale (pendant la nuit). Il est à noter qu'une partie de la recharge peut aussi venir de la rivière (Orbe dans le cas du site de la Burtignière) longeant le marais (Ce flux n'est pas représenté sur la **Figure 38**, mais fonctionne de manière similaire aux entrées d'eaux souterraines).

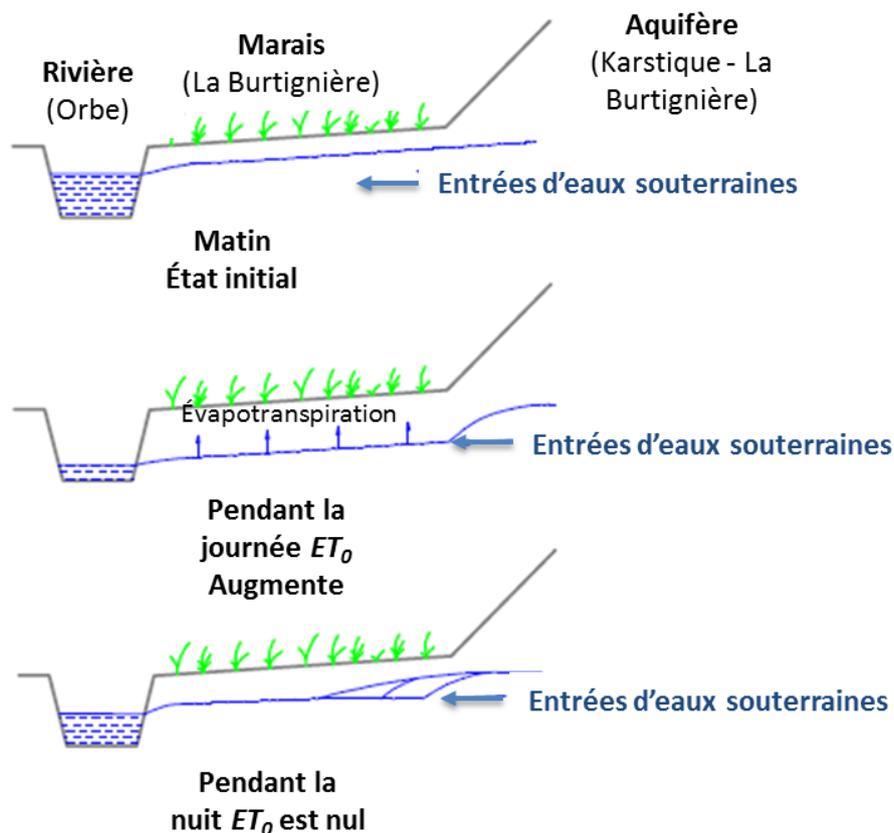


Figure 38 : Variations cycliques de période d'un jour de la hauteur de la nappe dues aux cycles d'évapotranspiration-recharge.

La profondeur limite d'alimentation de la nappe phréatique dépend de la couverture du sol (type de végétation) et de la lithologie. Les fluctuations journalières de la surface piézométrique sont de bons indicateurs de la capacité du marais à pouvoir s'alimenter en eau via la zone saturée ou la frange capillaire sus-jacente. On observe l'absence de fluctuation de la nappe durant l'hiver due à la faible évapotranspiration et au gel du marais (**Figure 39**) en comparaison avec la période estivale (**Figure 40**).

La **Figure 41** montre la désaturation de la surface du marais (sonde de potentiel hydrique). Cette désaturation du sol est liée à l'abaissement général de la nappe phréatique dont l'extrémité supérieure de la frange capillaire sus-jacente n'atteint plus la surface du sol. Les pluies génèrent une rapide augmentation de l'élévation de la surface de la nappe. Cependant cette élévation diminue rapidement (environ 90 % en 3 jours par rapport à l'élévation de la nappe phréatique avant la pluie) sous l'effet de l'évapotranspiration et des drains présents dans le marais. Aussi, l'élévation rapide et disproportionnée par rapport à la recharge par la pluie est caractéristique de zone où la nappe phréatique est proche de la surface [[Gillham, 1984](#); [Heliotis and Dewitt, 1987](#); [Miyazaki et al., 2012](#)].

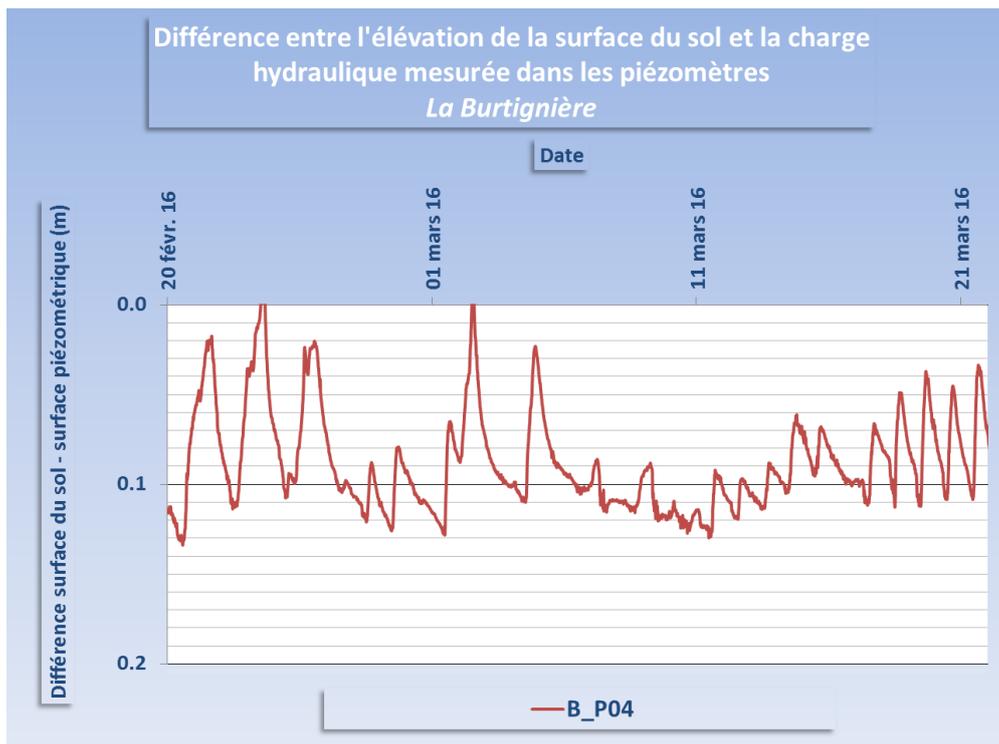


Figure 39 : Variations de l'épaisseur de la zone non-saturée (Site de la Burtignière, piézomètre B_P04, hivers 2016).

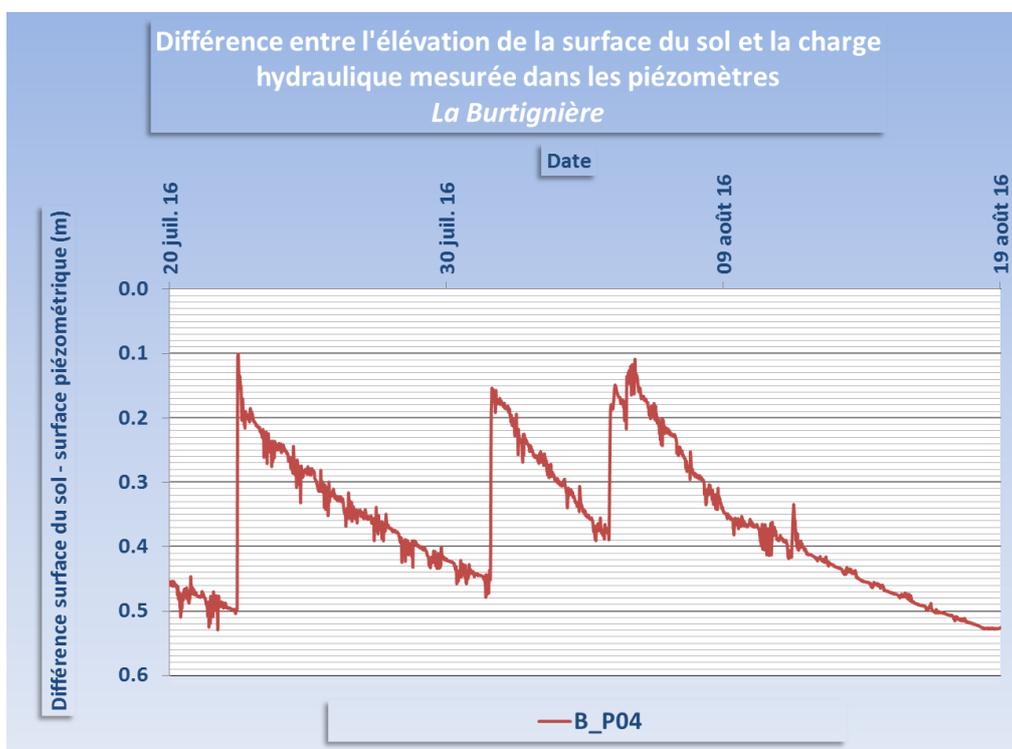


Figure 40 : Variations de l'épaisseur de la zone non-saturée (Site de la Burtignière, piézomètre B_P04, été 2016).

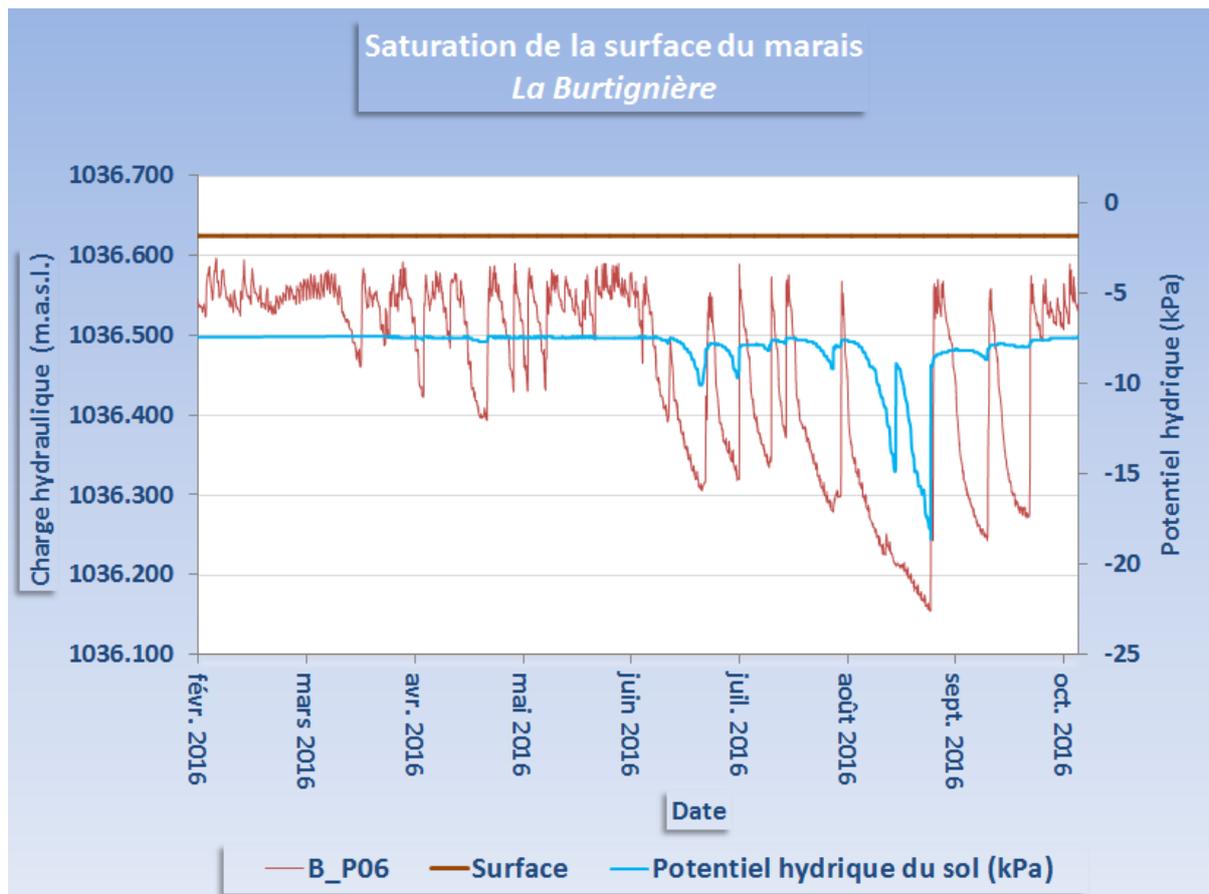


Figure 41 : Variation de saturation du sol proche de la surface (10 cm de profondeur) et de la surface de la nappe phréatique sous-jacente. Site de la Burtignière.

Les processus susceptibles de générer ces variations rapides et disproportionnées de l'élévation de la surface phréatique peuvent être liés à l'effet Weiringermeer [Gillham, 1984; Ibrahimi et al., 2011; Meyboom, 1967]. L'effet Weiringermeer est la conséquence de l'extension de la frange capillaire jusqu'à la surface, une petite quantité d'eau suffisant à remplir le faible déficit de saturation. L'intensité de l'effet Weiringermeer dépend du profil de la teneur en eau du sol au-dessus de la surface piézométrique [Hillel, 2004]. Il peut se produire dans les cas de fortes précipitations mais aussi dans ceux de faibles précipitations et est caractérisé par une rapide et disproportionnée (par rapport à la hauteur d'eau apportée par l'événement pluvieux) élévation de la surface piézométrique, suivie par un déclin rapide du même ordre (Figure 29). La remontée rapide d'eau est due à la conversion de l'eau capillaire en eau phréatique [Heliotis and Dewitt, 1987]. Carsel and Parrish [1988] donnent des valeurs d'entrée d'air d'environ 20 cm pour des sols aux propriétés similaires. Une surface piézométrique à une profondeur sous la surface du sol égale ou inférieure à la valeur d'entrée d'air requiert une faible quantité d'eau pour changer la pression dans la zone de la frange capillaire d'une valeur inférieure à une valeur supérieure à la pression atmosphérique [Brutsaert, 2005; Kim and Bierkens, 1995]. La Figure 41 montre que à une profondeur de 10 cm, profondeur à laquelle est installée la sonde qui mesure le potentiel hydrique du sol, une désaturation apparaît quand l'élévation de la surface phréatique diminue d'environ 15-20 cm au-dessous de cette profondeur (valeurs légèrement inférieures

aux valeurs moyennes de [Carsel and Parrish \[1988\]](#)). Aussi, le second effet produit par le phénomène Weiringermeer est l'augmentation important du gradient entre le marais et la rivière qui génère une augmentation du flux G_{out} vers la rivière [\[Sophocleous, 2002\]](#).

La **Figure 42** présente le volume d'eau dans le marais, W , estimé de la Burtignière entre les mois de février 2016 et octobre 2016 par l'approche de la fluctuation de la surface piézométrique [\[Healy and Cook, 2002\]](#) qui est applicable dans le cas d'aquifère non confiné et qui se base sur les variations piézométriques. On observe une diminution de W à partir du milieu de juin. Cette diminution de la quantité d'eau est observable sur l'ensemble des piézomètres installés (déjà visible sur la **Figure 24**).

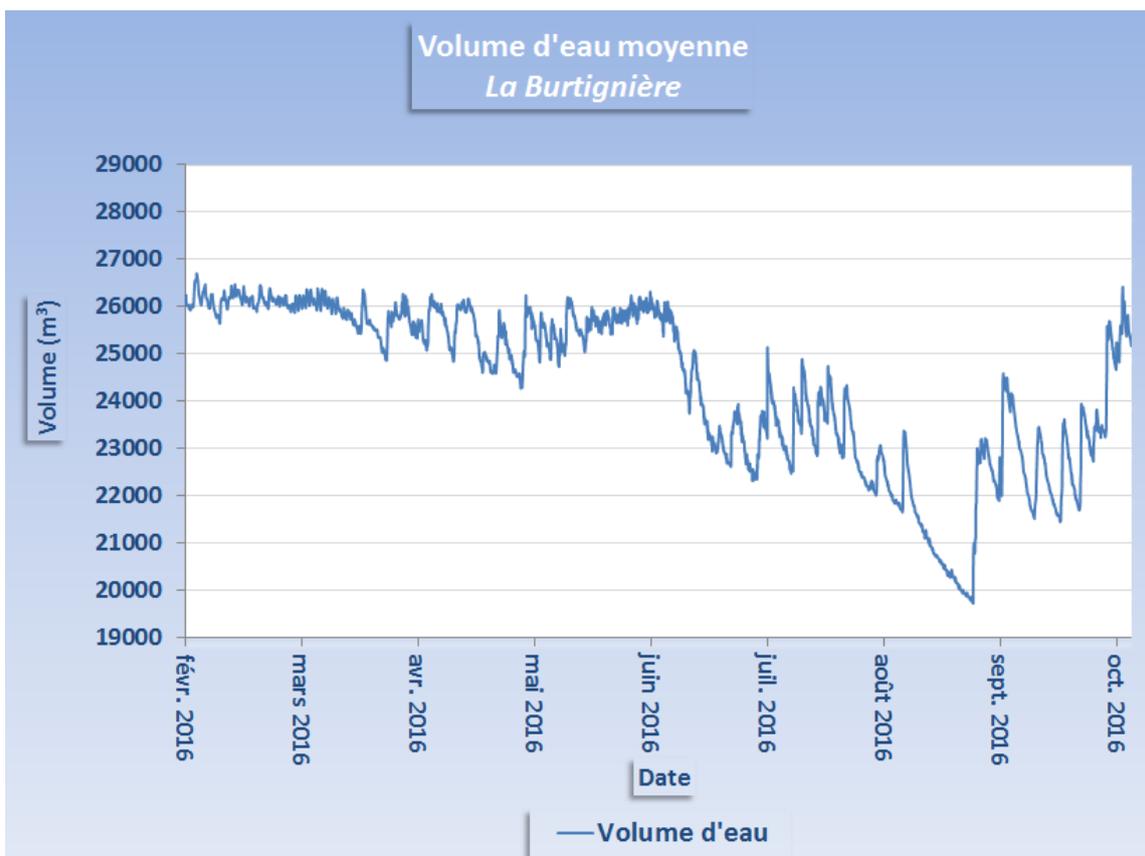


Figure 42 : Variation du volume d'eau contenu dans le marais du site la Burtignière entre février 2016 et octobre 2016.

Cette approche est une simplification du phénomène plus complexe du mouvement de l'eau, flux entrants (P , S_{in} et G_{in}) et sortants (ET , S_{out} et G_{out}), de la nappe phréatique dans la zone considérée. L'avantage est qu'elle peut être facilement utilisée à partir de relevés piézométriques et est représentatif pour de large surface dans le cas d'aquifère poreux. Comme remarqué précédemment le volume d'eaux souterraines varie en fonction des précipitations et de l'évapotranspiration. La forte diminution de la quantité d'eau en période estivale est liée à la demande en évapotranspiration du marais plus élevée, à la diminution des précipitations et à la dynamique générale de l'aquifère entourant le marais.

4.3 Bilan hydrique de l'aquifère du marais de la Burtignière

4.3.1 Composantes hydrogéologiques

Cette section présente le bilan hydrique du marais de la Burtignière en considérant l'ensemble de l'aquifère du marais. En conséquence, le calcul du bilan hydrique reprend comme base l'équation 1.

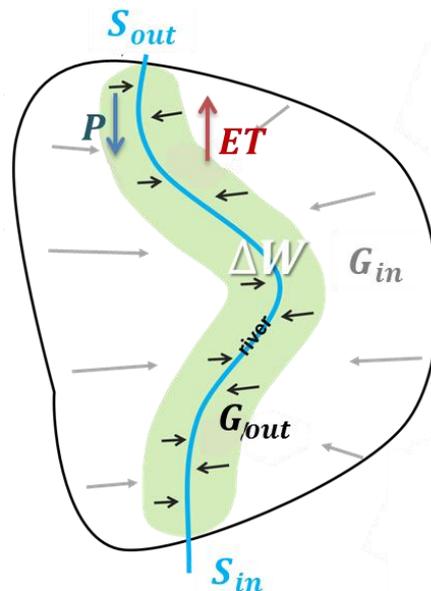


Figure 43 : Schéma conceptuel du bilan hydrique d'un marais (zone verte) en accord avec l'équation 1.

- P : Les précipitations ont été mesurées directement.
- ET : L'évapotranspiration a été calculée suivant la méthode de Penman-Monteith.
- G_{out} : La valeur de G_{out} est calculé suivant l'équation 10 (Voir section 3.2 mesures hydrologiques).
- G_{in} : Les entrées d'eaux souterraines dépendent du gradient hydraulique et de la conductivité hydraulique (Voir section 2.2.4 Échanges souterrains). L'aquifère du marais est considéré comme non confinée. Par conséquent, la formule de Dupuit est utilisée pour le calcul du flux d'eaux souterraines (Figure 44).

$$q' = \frac{1}{2} K \left[\frac{h_1^2 - h_2^2}{D} \right] \quad (12)$$

Avec :

- q' : Le flux par unité de largeur (m^2/s)
- h_1 : Épaisseur de la partie saturée au point 1 (m)
- h_2 : Épaisseur de la partie saturée au point 2 (m)
- D : Distance entre les points 1 et 2 (m)

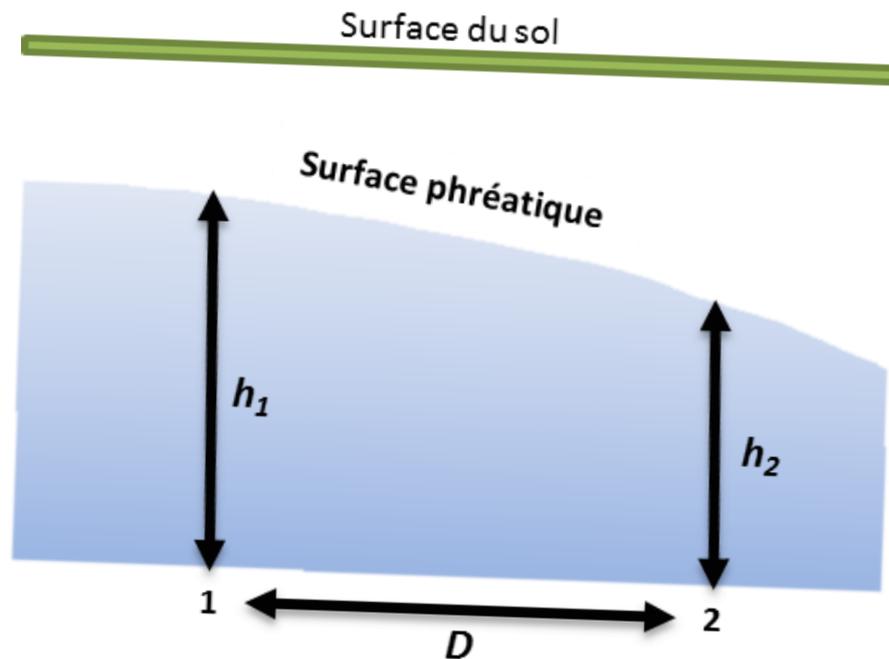


Figure 44 : Représentation schématique de la surface phréatique (Aquifère non confiné) et des variables de l'équation de Dupuit (équation 12).

À partir de q' la valeur du débit est calculé par multiplication avec S , la section perpendiculaire à l'écoulement du flux. Les potentiels apports d'eau par les argiles sous-jacentes ne sont pas pris en compte.

S_{in} et S_{out} : Les valeurs S_{in} et S_{out} sont considérées comme nulles, c'est-à-dire les écoulements à la surface du marais. L'Orbe est considéré comme une limite du modèle, limite utilisée pour le calcul de G_{out} . Aussi les écoulements de surface, en particulier le drainage du marais à saturation par les canaux de faibles profondeurs qui le parcourent, soit S_{out} , ainsi que les apports en eaux de surface par immersion du marais pendant les crues de l'Orbe, soit S_{in} , ne sont pas pris en compte dans le bilan hydrique car non mesurés.

4.3.2 Calcul du bilan hydrique

Le bilan hydrique a été effectué pour une période de 1 an entre octobre 2015 et septembre 2016 (Tableau 2). Les entrées d'eau sont dominées par les entrées d'eaux souterraines G_{in} et les sorties d'eau par exfiltration de la nappe phréatique dans la rivière de l'Orbe. Les précipitations se concentrent sur le mois de février et dans la période mars-avril. Aussi il est important de noter que G_{out} peut être surestimé pendant les périodes de pluies intenses car il compense le fait qu'une partie de l'eau ruisselle et quitte la zone d'étude par l'Orbe, S_{out} . Aussi les variations de G_{in} pendant les 4 premiers mois du bilan hydrique peuvent être liées à l'interpolation des relevés piézométriques manuelles, les enregistreurs automatiques ayant été installés après cette période. Le changement estimé de hauteur de la nappe ΔH à la fin de la période considérée est de 0.07 m ce qui correspond à la variation moyenne des niveaux mesurés entre le début et la fin de la période étudiée (0.11 m).

Tableau 2 : Bilan hydrique du site la Burtignière.

Mois	Entrées				Sorties				ΔW	ΔH
	P	G_{in}	P	G_{in}	ET	G_{out}	ET	G_{out}		
Unité	m ³ /j	m ³ /j	%	%	m ³ /j	m ³ /j	%	%	m ³ /j	m/mois
Oct. 15	39	1425	3%	97%	-19	-827	2%	98%	619	0.98
Nov. 15	89	1126	7%	93%	-8	-826	1%	99%	380	0.58
Déc. 15	39	1260	3%	97%	-1	-1056	0%	100%	242	0.38
Jan. 16	42	1201	3%	97%	-0	-955	0%	100%	287	0.45
Fév. 16	142	1020	12%	88%	-3	-310	1%	99%	849	1.30
Mars 16	77	1502	5%	95%	-13	-1101	1%	99%	466	0.74
Avril 16	140	1168	11%	89%	-27	-1342	2%	98%	-61	-0.09
Mai 16	139	1169	11%	89%	-43	-1550	3%	97%	-285	-0.45
Juin 16	136	1048	12%	88%	-52	-2180	2%	98%	-1046	-1.60
Juil. 16	75	967	7%	93%	-68	-1697	4%	96%	-723	-1.14
Août 16	32	1004	5%	97%	-64	-1466	4%	96%	-494	-0.78
Sept. 16	53	926	5%	95%	-44	-1136	4%	106%	-201	-0.30
Moyenne	84	1151	7%	93%	-28	-1204	2%	98%	3	
Total										0.07

Les incertitudes les plus importantes restent sur les valeurs de G_{in} (calculées avec la formule de Dupuit à partir des informations sur le gradient fournis par les piézomètres, et G_{out} dont les valeurs dépendent de l'interpolation linéaire entre les 2 stations de mesure de débit. Cependant les valeurs estimées de G_{in} permettent une évaluation de la surface moyenne drainée par le marais nécessaire à son approvisionnement en eau.

$$A^* = \frac{G_{in}}{R} \quad (13)$$

A^* : La surface drainée par le marais nécessaire à son approvisionnement en eaux souterraines

R : Recharge annuelle de l'aquifère approvisionnant le marais

Le **Tableau 3** présente les variables du calcul de A^* sur le site de la Burtignière.

Tableau 3 : Estimation de la surface drainée nécessaire à l'alimentation de l'aquifère du site de la Burtignière.

G_{in}	1151	m ³ /j
	420115	m ³ /an
Précipitations	1.574	m/an
Recharge des eaux karstiques	40	%
R (annuel)	0.630	m/an
A^*	667488	m²
	66.7	ha
A^*/A	34	-

La surface nécessaire est estimée à environ 34 fois la zone d'étude.

4.4 Conclusion

L'étude de la dynamique des échanges d'eaux et l'établissement d'un bilan hydrique pour les marais sont essentiels afin de déterminer les mesures de protection pouvant assurer leur pérennité dans un état optimal. Des mesures météorologiques, hydrologiques et hydrogéologiques effectuées sur les sites d'étude de la Burtignière et Lombachalp-Teufen ont permis d'analyser la dynamique des flux hydriques atmosphériques, de surface et souterrains, ainsi que leurs interactions. Leur intégration a permis d'établir un bilan hydrique pour le marais de la Burtignière.

Sur les deux sites, la dynamique de la nappe phréatique est similaire et est caractéristique de nappes non confinées peu profondes (réponses aux précipitations) affectées par la demande en évapotranspiration de la végétation sus-jacente. Cette dynamique de la nappe phréatique est un indicateur du bon fonctionnement du marais et de leurs interactions avec les eaux souterraines pendant les périodes de déficit en eaux de pluie.

Ces résultats montrent l'importance du maintien de l'alimentation en eaux souterraines des zones de marais. Pour cela les flux d'eaux souterraines atteignant le marais ne devraient pas être modifiés significativement. La pérennité et la survie des zones humides dépendent de leur alimentation en eau. L'établissement de zones de protection autour des marais doit garantir une alimentation durable en eaux souterraines. Dans ce sens les résultats de la présente étude support la définition de ces zones d'alimentation en eau, c'est-à-dire la définition de surfaces drainées par le marais, considérées comme indispensables au maintien quantitatif et qualitatif de l'approvisionnement en eaux souterraines et par conséquent à la protection des biotopes marécageux d'importance nationale.

5 Méthode de calcul du déficit hydrique de marais

5.1 Principes de la méthode

La présente méthode de calcul du déficit hydrique en eau de pluie de la « végétation du marais » (désigné par « marais » par la suite) est basée sur le bilan hydrique de la végétation du marais (**Figure 45**) et non sur le bilan hydrique de l'aquifère du marais. Le déficit potentiel en eau est évalué sur une période définie par la différence entre les apports d'eau par les précipitations sous forme de pluie P à la surface du marais et les soustractions d'eau par l'évapotranspiration du marais ET . Quand la différence est négative, c'est-à-dire une évapotranspiration supérieure aux précipitations, alors ce déficit en eau doit être comblé par d'autres apports afin de maintenir les fonctions physiologiques de la végétation de marais et donc d'assurer sa pérennité.

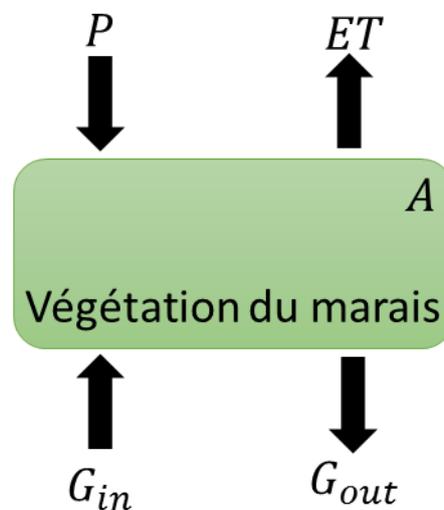


Figure 45 : Représentation schématique des composantes du bilan hydrique de la végétation du marais.

L'apport supplémentaire est supposé être supporté par les eaux souterraines G_{in} dans la zone de marais. Cela implique que l'élévation de la nappe phréatique sous-jacente doit être suffisante afin que la végétation du marais puisse s'alimenter en eau via son réseau racinaire. On considère aussi que la disponibilité de l'eau apportée par les précipitations P est limitée dans le temps car ces précipitations ne s'accumulent pas sur une durée illimitée dans la zone proche de la surface, zone dans laquelle la végétation peut s'approvisionner en eau. Les eaux de pluie sortent de la zone de marais considérée suite à leur infiltration dans les eaux souterraines puis exfiltration au niveau des limites drainantes G_{out} (rivières, drains, etc...), et ceci sur une période de temps fonction des propriétés hydrauliques de la surface et du milieu souterrain, ainsi que des conditions aux limites de la zone considérée.

Par conséquent une période de disponibilité de l'eau de pluie T_D , pour le marais, doit être estimée pour établir ce bilan hydrique. Cette estimation peut être faite à partir de l'observation de la dynamique de la surface piézométrique suite à des événements pluvieux afin d'évaluer le temps au bout duquel la surface piézométrique retrouve une élévation proche de son élévation avant la précipitation (**Figure 46**). La valeur de T_D peut être

considérée comme étant l'intervalle de temps qui sépare le maximum piézométrique suite à l'événement pluvieux et la réduction de 90% de son maximum par rapport à l'élévation piézométrique avant la pluie, en tenant compte de la tendance générale de la nappe (tendance à l'augmentation ou la diminution de la surface piézométrique, due par exemple aux saisons).

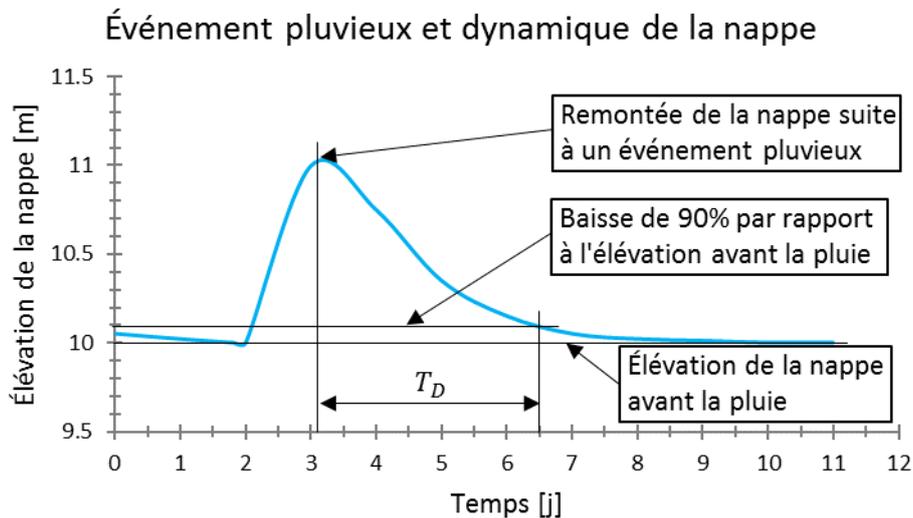


Figure 46 : représentation schématique de la méthode d'estimation de la valeur la période de disponibilité de l'eau de pluie T_D suite à un événement pluvieux.

La période sur laquelle le déficit hydrique en eau de pluie de la végétation du marais doit être définie (Période de N jours j), par exemple sur une base annuelle ou pour des périodes intermédiaires. Les valeurs journalières, sur cette période, des précipitations, sous forme de pluie, P et de l'évapotranspiration du marais ET doivent être mesurées ou estimées (Par exemple, l'estimation de l'évapotranspiration peut être effectuée par la méthode de Penman-Monteith en fonction des variables climatiques qui sont mesurées). Le déficit journalier D_j en eau de pluie du marais ainsi que le déficit cumulé D_c sur la période considérée peut alors être estimé à partir des variables (T_D , N et j) et des vecteurs (P et ET) définis. Pour chaque jour j la valeur des eaux de pluie disponibles $P_{j T_D}$, est calculée par la sommation des pluies P_j sur T_D jours, à partir du jour courant. La différence entre la valeur de l'évapotranspiration du courant jour ET_j et celle de $P_{j T_D}$ est calculée. Si $ET_j > P_{j T_D}$, alors il y a un déficit en eau de pluie pour le courant jour et sa valeur D_j augmente la valeur de D_c (le déficit total sur la période considérée). Le processus est répété pour les N jours constituant la période considérée. La **Figure 47** présente un organigramme du processus d'estimation. Le processus de calcul peut être réalisé à l'aide d'un tableur ou d'un langage de programmation.

Estimation du déficit hydrique en eau de pluie du marais

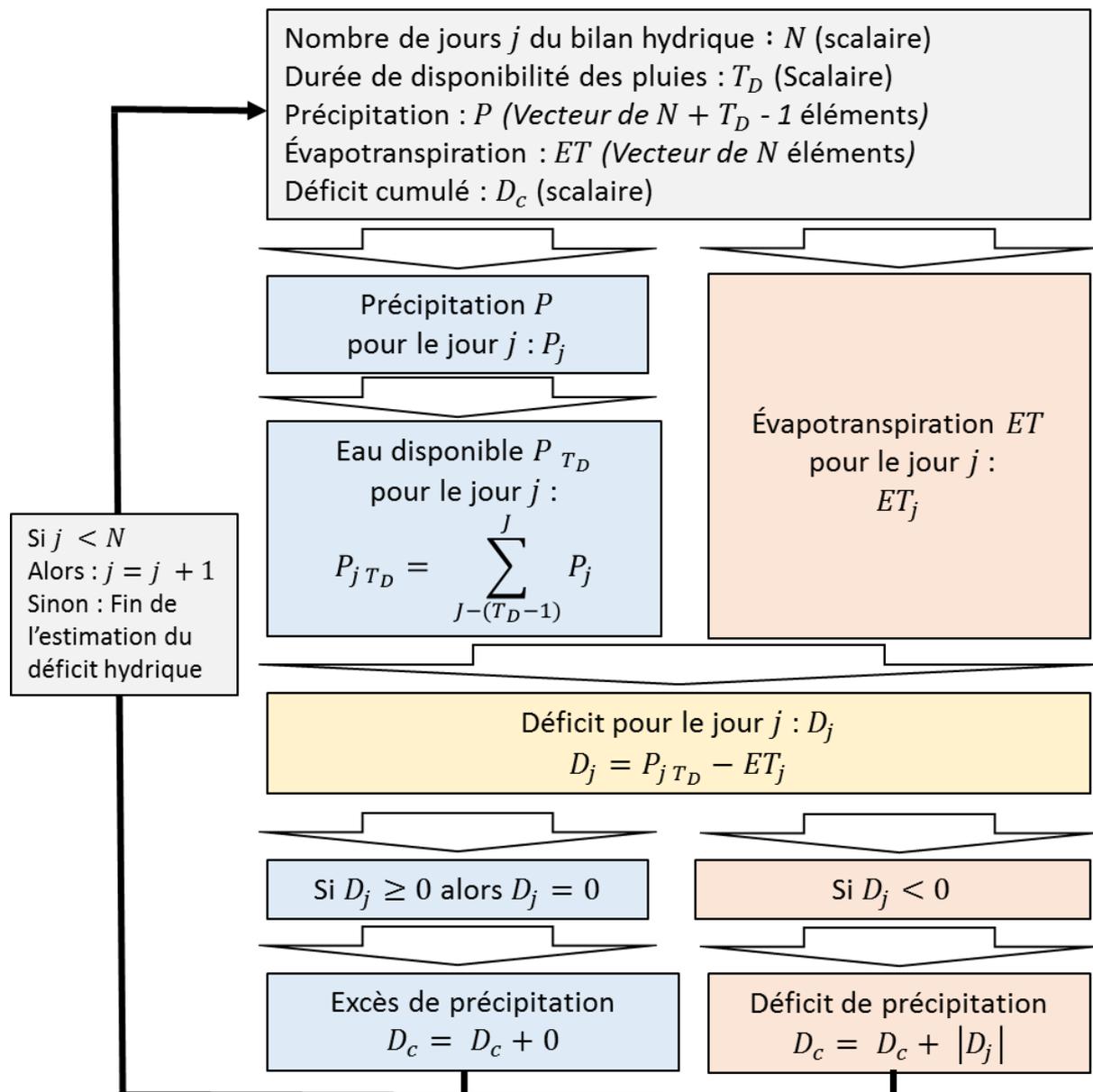


Figure 47 : Organigramme du processus d'estimation du déficit en eau de pluie du marais.

La **Figure 48** montre un exemple du résultat du traitement des données climatiques (Précipitations et évapotranspirations journalières) sur une période de 10 jours (juin 2015). La variable P_{T_D} est estimée pour chaque jour j en sommant les valeurs des précipitations sur T_D jours (ici $T_D = 3$, la sommation est représentée dans les zones **A** et **B** du tableau de la **Figure 48**). Le déficit potentiel est alors calculé dans la colonne *Déficit* à partir des colonnes ET et P_{T_D} et si la valeur de $ET > P_{T_D}$, alors cette valeur est reportée dans la colonne *Déficit*, sinon elle est égale à 0. Les résultats des 3 dernières colonnes du tableau sont reportés sur les graphiques adjacents où les zones **A** et **B** sont aussi localisées, soit le jour 23 et 27 du mois de juin 2015. Les valeurs des cases colorées du tableau sont représentées sous forme de disques de la même couleur sur les graphiques. Ces deux zones montrent une absence et

une présence de déficit réciproquement. La valeur cumulée du déficit D_C n'est pas représentée.

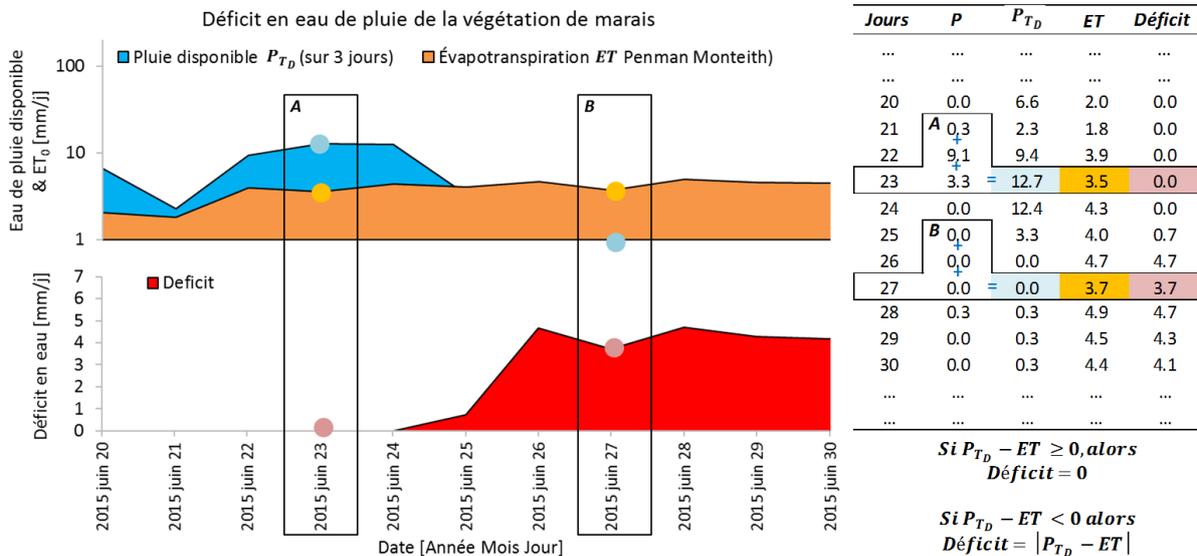


Figure 48 : Exemple de résultat du traitement des données climatiques avec un tableur afin d'estimer la valeur du déficit hydrique en eau de pluie du marais.

5.2 Application à des sites de marais

5.2.1 Sites tests : La Burtignière et Lombachalp-Teufen

À partir des observations faites dans les sections précédentes sur les flux d'évapotranspiration, de précipitation et de dynamique de la nappe phréatique, un bilan de la demande en évapotranspiration est établi. Ce bilan de la demande en évapotranspiration ET considère que cette demande de la végétation de marais doit toujours être satisfaite afin de garantir la pérennité de la végétation.

Les deux apports d'eaux considérés au niveau racinaire de la végétation de marais sont les précipitations P et l'eau de la nappe phréatique G_{in} . Les paramètres P et G_{in} de ce bilan hydrique sont liés à la demande en évapotranspiration et donc aux flux d'eau directement disponible au niveau racinaire du marais. Comme vu précédemment les précipitations annuelles sont largement excédentaires par rapport à la demande annuelle en évapotranspiration des marais sur les sites étudiés. Cependant ces précipitations ne s'accumulent pas sur une durée illimitée de temps dans la zone proche de la surface, zone dans laquelle la végétation peut s'approvisionner en eau. Les eaux apportées par les précipitations sortent de la zone de marais considérée soit par ruissellement, soit par infiltration dans l'aquifère puis exfiltration au niveau des limites drainantes, comme les rivières et les drains, et ceci sur une période de temps fonction des propriétés hydrauliques de la surface et du milieu souterrain, ainsi que des conditions aux limites de la zone considérée. Nous fixons une période de disponibilité de l'eau de pluie, pour la zone racinaire du marais, de 3 jours pour le calcul de ce bilan hydrique. Cette estimation est faite à partir des observations de la dynamique piézométrique qui montre une diminution rapide de la surface phréatique sur 3 jours suivant une précipitation (**Figure 29** et **Figure 49**). La valeur

cumulée de P est donc modulée en fonction du temps pour établir le bilan hydrique de la demande en évapotranspiration du marais.

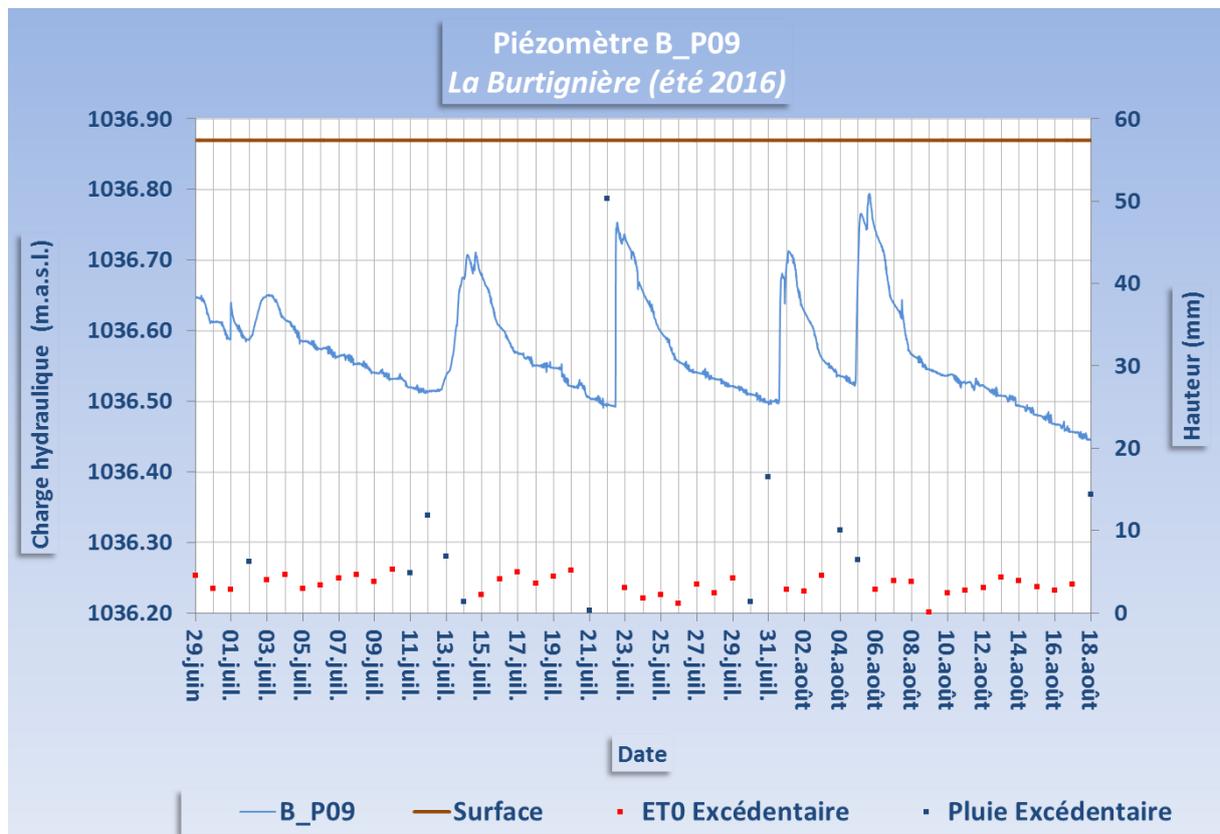


Figure 49 : Dynamique de la surface piézométrique à la suite de précipitations.

Sur la période de temps considérée et en tenant compte d'une disponibilité T_D de 3 jours des précipitations, une valeur de l'eau disponible P_{T_D} est calculée et est comparée à la demande en évapotranspiration ET . Quand cette valeur est positive (Excès de précipitation), alors les précipitations récentes apportent l'eau nécessaire à l'évapotranspiration du marais. Quand cette valeur est négative, alors les précipitations récentes sont insuffisantes pour satisfaire la demande en évapotranspiration du marais (Déficit de précipitation). Considérant que cette demande en évapotranspiration doit être satisfaite pour ne pas menacer l'équilibre physiologique de la végétation du marais, alors cette eau nécessaire est considérée comme venant des eaux souterraines approvisionnées par les flux d'eaux souterraines aux limites de la zone d'étude (bassin versant de la zone d'étude). Donc la variable G_{in} est estimée, pour ce bilan hydrique de la demande en évapotranspiration du marais et est égale au déficit en eau de précipitation.

La **Figure 50** montre, compte tenu des hypothèses de calcul, que des déficits en eaux de précipitations sont importants pendant la période estivale (juin-juillet-août) pour le site de la Burtignière avec un déficit quotidien moyen de 5 mm d'eau (juillet 2015). La **Figure 51** montre les résultats obtenus pour le site de Lombachalp-Teufen.

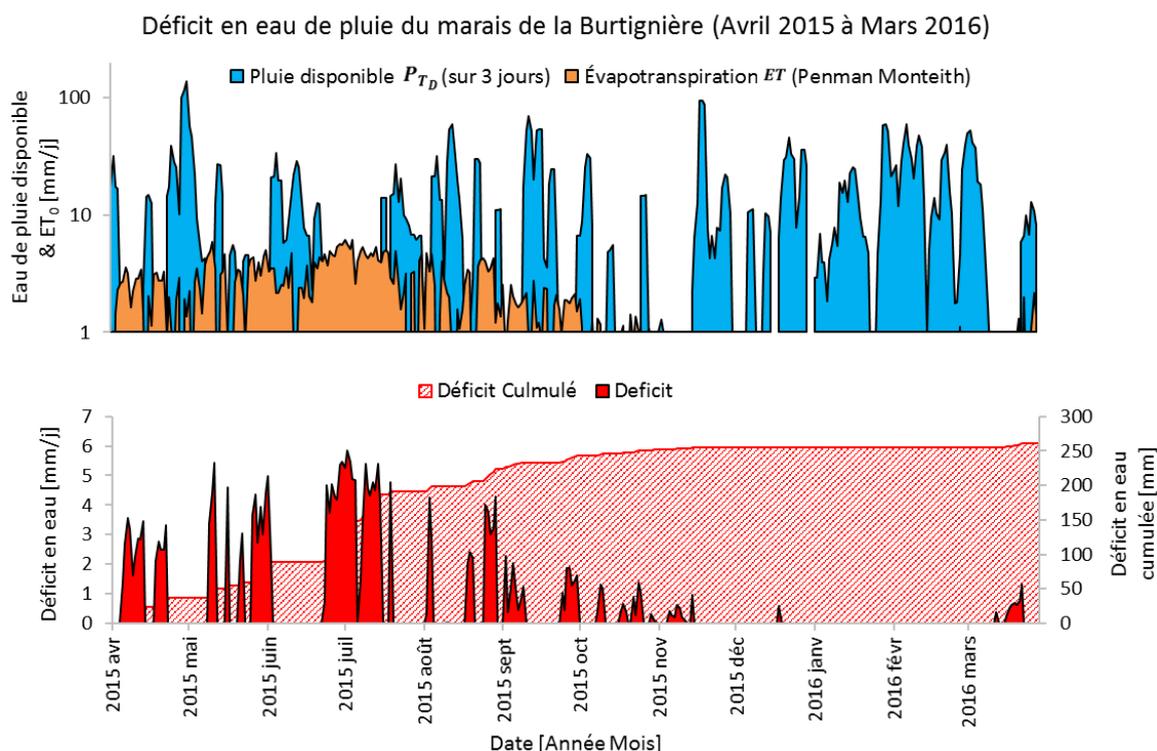


Figure 50 : Déficit d'eau de précipitation quotidien sur une période de 1 an pour le site de la Burtignière (Avril 2015 – Mars 2016).

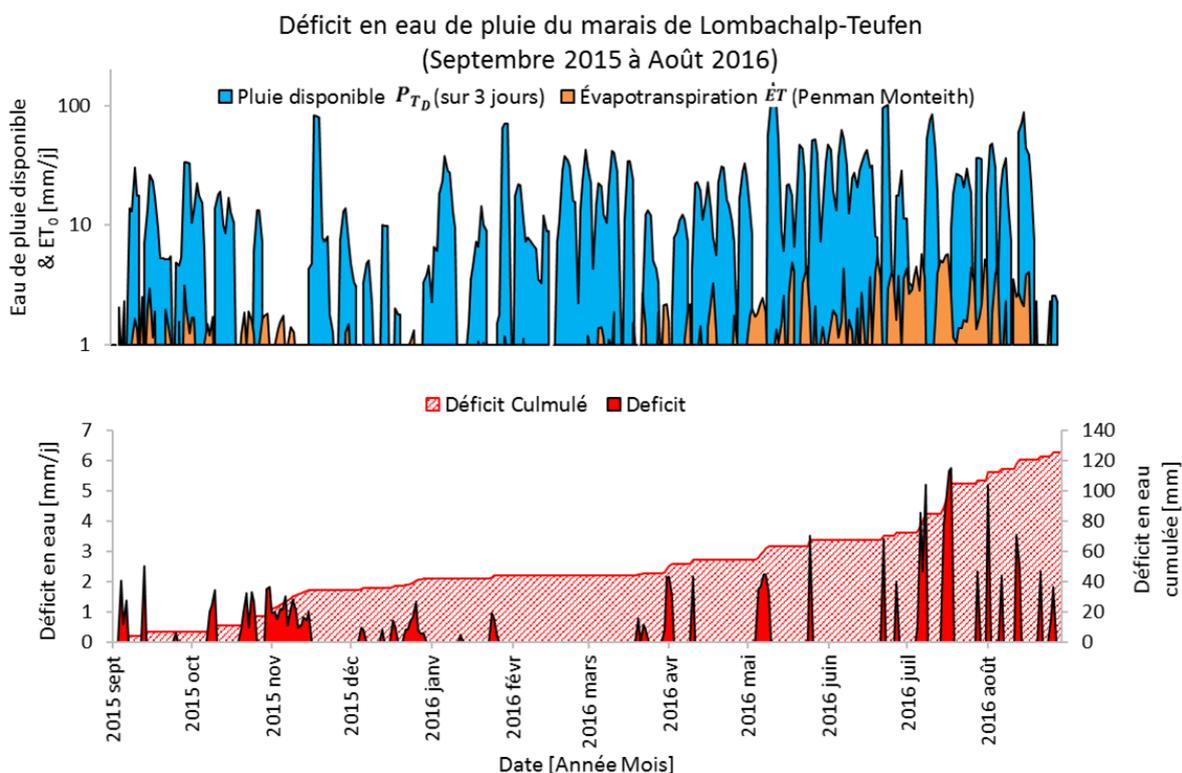


Figure 51 : Déficit d'eau de précipitation quotidien sur une période de 1 an pour le site de Lombachalp-Teufen (Septembre 2015 – Août 2016).

Comme mentionné précédemment ce déficit d'eau est considéré comme étant comblé par les apports directs d'eaux souterraines. En additionnant ces valeurs sur une période de temps définie, le bilan hydrique de la demande en évapotranspiration du marais peut être établi.

Ces bilans hydriques pour les sites d'études sont présentés pour les périodes suivantes :

Marais de la Burtignière : 1 avril 2015 – 31 mars 2016

Marais de Lombachalp-Teufen : 1 septembre 2015 – 31 août 2016

Les quantités d'eau et leurs origines estimées en fonction des valeurs de précipitation et de la demande en évapotranspiration des marais sont présentées dans les tableaux suivants (**Tableau 4** et **Tableau 5**).

Tableau 4 : Bilan hydrique de la demande en évapotranspiration du site de marais de la Burtignière.

Demande en eau du marais (mm)		Répartition de l'apport en eau (mm)	
Évapotranspiration - ET	564 (100%)	304 (54%)	Précipitations - P
		260 (46%)	Eaux souterraines - G_{in}

Tableau 5 : Bilan hydrique de la demande en évapotranspiration du site de marais de Lombachalp-Teufen

Demande en eau du marais (mm)		Répartition de l'apport en eau (mm)	
Évapotranspiration - ET	436 (100%)	311 (71%)	Précipitations - P
		125 (29%)	Eaux souterraines - G_{in}

On peut observer que pour les périodes de temps considérées la demande en évapotranspiration du marais du site de la Burtignière est plus dépendante des eaux souterraines (environ 46%) que le marais du site de Lombachalp-Teufen (environ 29%). Dans les deux cas, la proximité d'une nappe phréatique alimentée par les flux souterrains de son bassin versant est nécessaire pour satisfaire la demande en évapotranspiration des marais étudiés.

5.2.2 Autres sites : Jura, Berne et Tessin

La méthode est appliquée à trois autres sites de marais suisse d'importance nationale localisés sur la **Figure 52** et dont le **Tableau 6** fournis les coordonnées et les dimensions. Les sites sont répartis sur différents ensembles géographiques, le Jura, les Préalpes et le Sud Tessin, sur les cantons du Jura, de Berne et du Tessin, réciproquement.

Contrairement aux sites tests étudiés, il n'y a pas d'estimation de valeur de la période de disponibilité de l'eau de pluie T_D . Afin d'évaluer la sensibilité de la méthode sur ces sites, plusieurs valeurs de T_D ont été utilisées (1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30 jours et 1 année) et les valeurs des variables climatiques de cinq années consécutives (de 2009 à 2013) ont été introduites dans l'estimation du déficit hydrique.

Tableau 6 : Coordonnées géographiques et dimensions des 3 sites de marais.

Nom	Latitude	Longitude	Altitude [m]	Surface [ha]	Surface [km ²]
JU1	47.24	7.05	1000.7	95	0.95
BE2	46.84	7.83	948.6	7	0.07
TI1	46.16	8.91	198.2	8	0.08

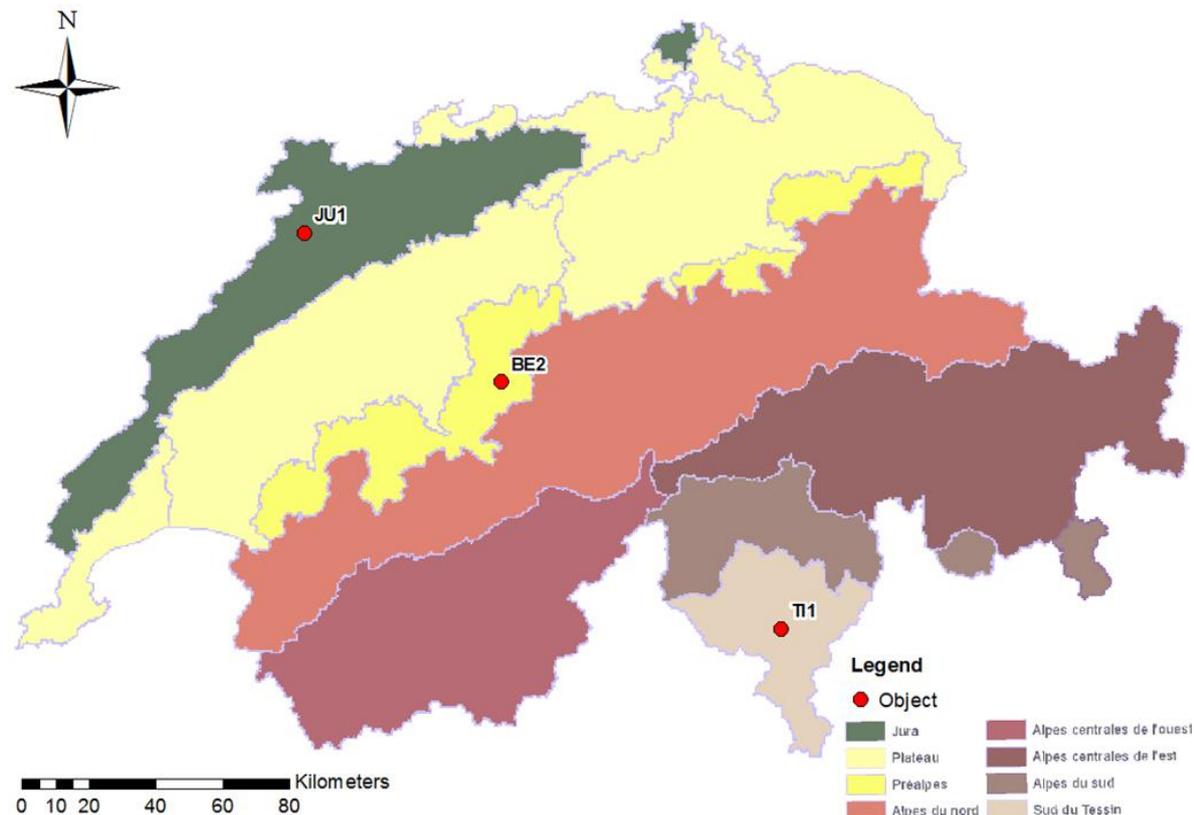


Figure 52 : Localisation des sites de marais JU1 (Jura), BE2 (Berne) et TI1 (Tessin).

Les **Figure 53, 54** et **54**, résument l'ensemble des résultats sur les 3 sites de marais. On peut observer la valeur annuelle des précipitations (mesurées) et de l'évapotranspiration (évapotranspiration de référence selon Penman-Monteith ET_0 , stations OFEV) sur les 3 sites pour les 5 années consécutives (de 2009 à 2013).

On peut observer une augmentation du déficit hydrique inversement proportionnel à la période de disponibilité en eau de pluie disponible. En effet, sur une base de disponibilité d'une année, les valeurs de déficit hydrique estimées sont de 0. Cela est vrai pour l'ensemble des sites étudiés, car les valeurs des précipitations annuelles sont toujours supérieures aux valeurs d'évapotranspirations annuelles. Pour une valeur de disponibilité en eau de pluie minimale, c'est-à-dire 1 jour, on peut observer que le déficit hydrique tant vers la valeur d'évapotranspiration annuelle. Pendant les événements pluvieux les valeurs d'évapotranspiration sont en générale les plus faibles. En considérant que ces précipitations ne sont plus disponibles pour contribuer à l'évapotranspiration les jours suivants, sans précipitation et pendant lesquels la demande en évapotranspiration est davantage présente, alors cette demande se traduit en grande partie en déficit hydrique.

Concernant l'estimation des surfaces de bassin versant nécessaires à l'alimentation en eau permettant de combler le déficit hydrique, celles-ci varient en fonction du déficit hydrique estimé, qui lui-même varie en fonction de la valeur de T_D , et atteignent des valeurs maximales de 1.5 fois la taille du site de marais.

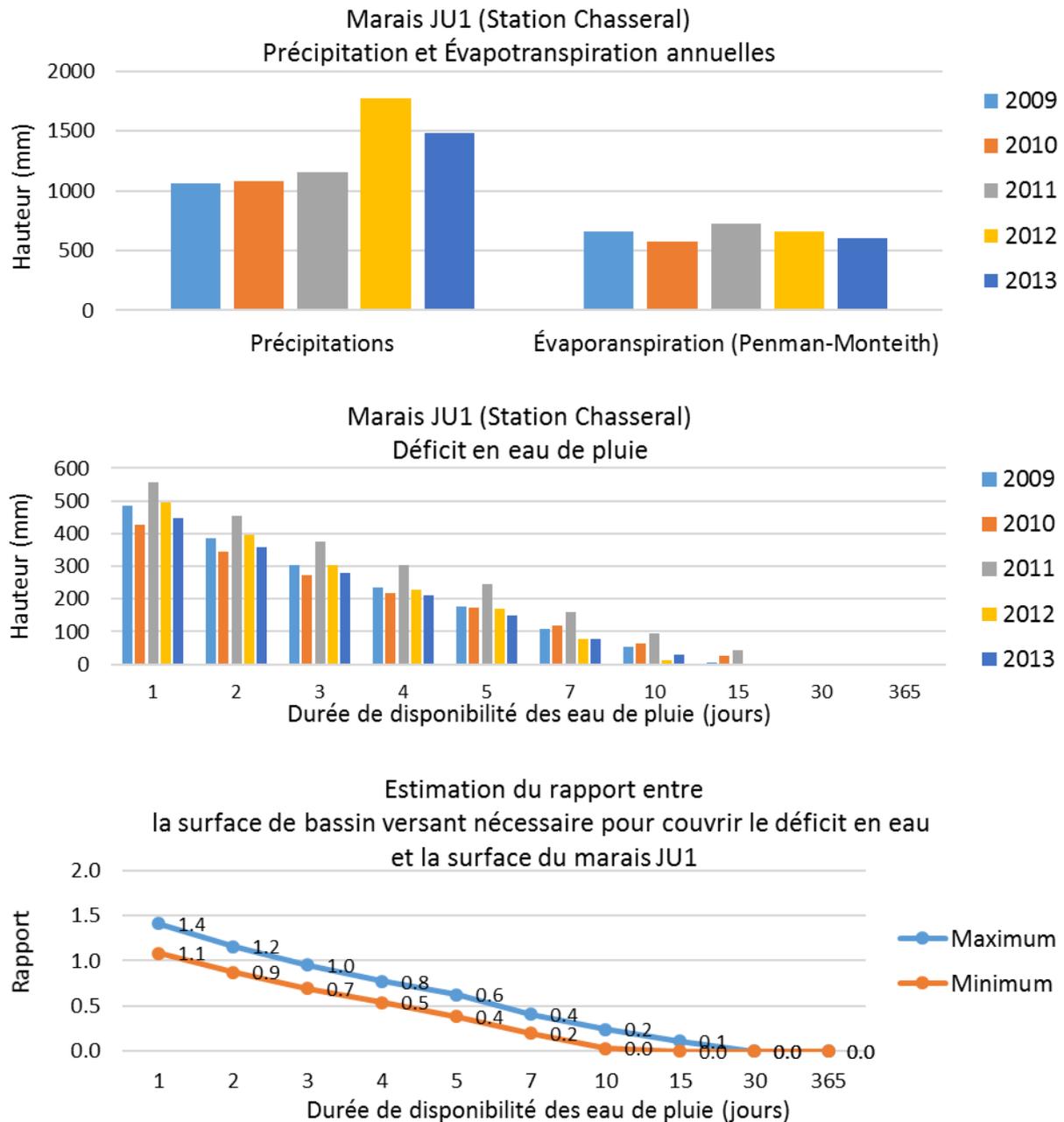


Figure 53 : Résultats de l'analyse pour le site de marais JU1 (Jura, canton du Jura) pour les 5 années consécutives 2009, 2010, 2011, 2012 et 2013 et pour des périodes de disponibilité de l'eau de pluie, suite à des précipitations, de valeurs 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30 jours et 1 année. Le rapport entre la surface du bassin versant permettant de couvrir le déficit en eau de pluie et la taille du marais considéré est estimé.

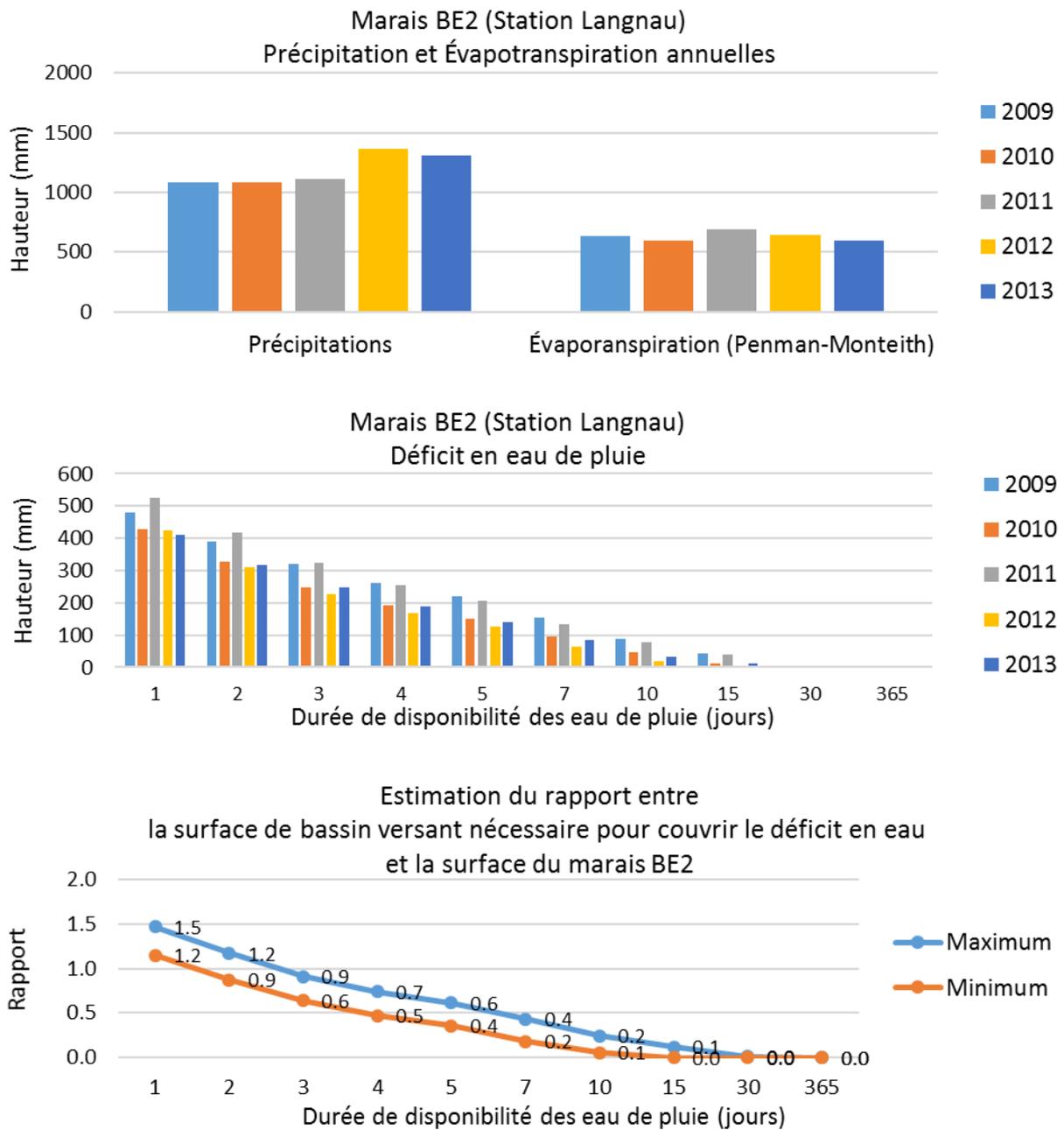


Figure 54 : Résultats de l'analyse pour le site de marais BE2 (Préalpes, canton de Berne) pour les 5 années consécutives 2009, 2010, 2011, 2012 et 2013 et pour des périodes de disponibilité de l'eau de pluie, suite à des précipitations, de valeurs 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30 jours et 1 année. Le rapport entre la surface du bassin versant permettant de couvrir le déficit en eau de pluie et la taille du marais considéré est estimé.

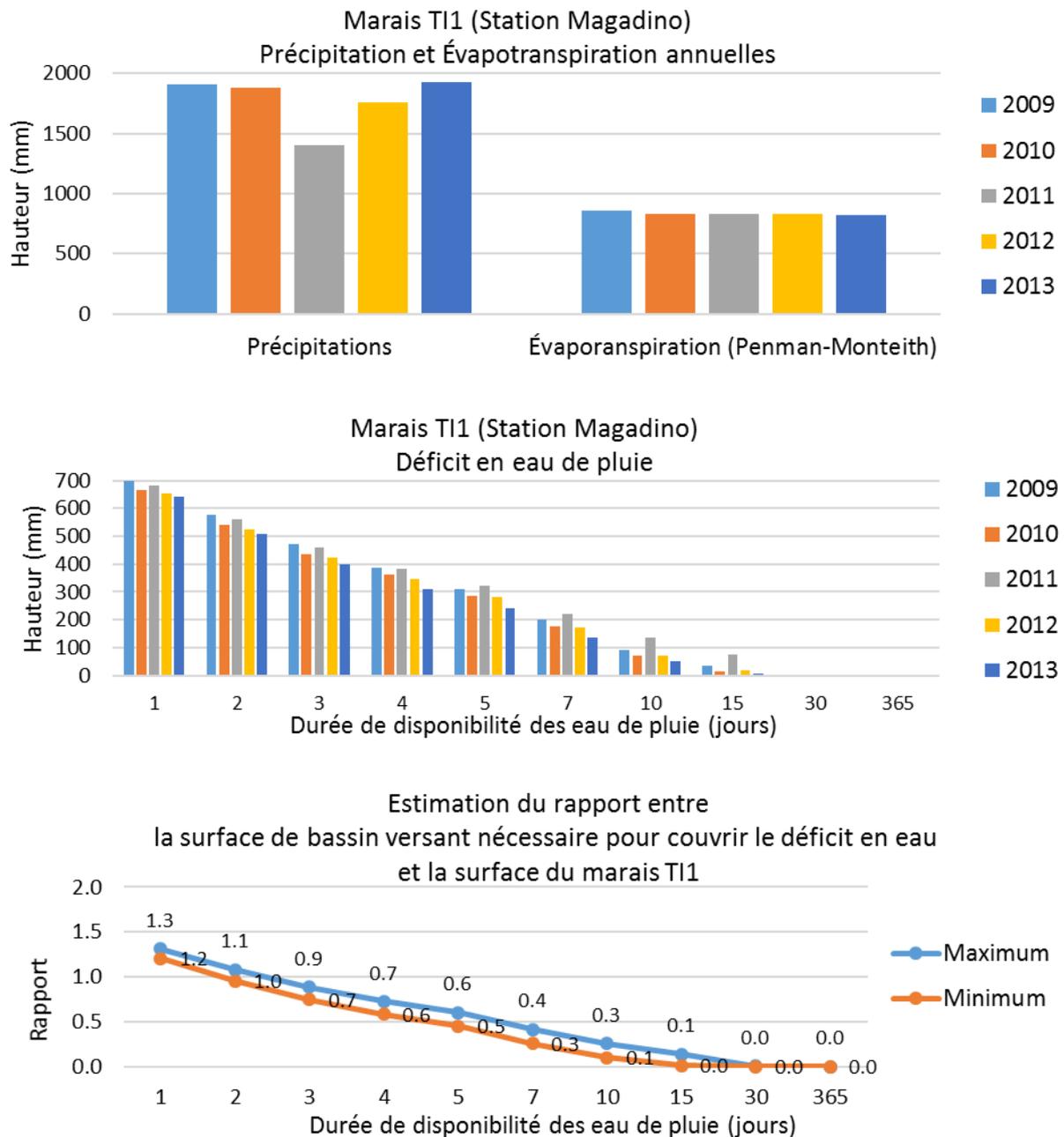


Figure 55 : Résultats de l'analyse pour le site de marais TI1 (Sud du Tessin, canton du Tessin) pour les 5 années consécutives 2009, 2010, 2011, 2012 et 2013 et pour des périodes de disponibilité de l'eau de pluie, suite à des précipitations, de valeurs 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30 jours et 1 année. Le rapport entre la surface du bassin versant permettant de couvrir le déficit en eau de pluie et la taille du marais considéré est estimé.

5.3 Discussion et conclusion

Les mesures climatiques utilisées sont extraites de stations météorologiques OFEV les plus proches des sites de marais concernés. Des mesures faites directement sur les sites de concernés peuvent améliorer les estimations.

Les valeurs d'évapotranspiration sont basées sur le calcul de l'évapotranspiration de référence ET_0 (Penman-Monteith) et on estime que cette valeur est proche de l'évapotranspiration du marais ET_m en supposant que le coefficient de culture des marais K_c est égale à 1. Des valeurs plus précises de ce facteur pour les différentes végétations de marais peuvent permettre d'améliorer les estimations.

La contribution à la demande en évapotranspiration de l'humidité contenue dans la zone non saturée n'est pas spécifiquement prise en compte, car plus complexe à estimer et dépendante des propriétés du sol. Aussi, les potentiels ruissellements des précipitations entrants ou sortants de la surface du marais considéré ne sont pas estimés et donc ne sont pas ajoutés ou soustraits de l'apport en eau de pluie sur le marais.

Il est aussi important de noter que, suivant cette approche, l'estimation des surfaces de bassin versant nécessaires pour couvrir le déficit en eau de pluie suppose que les eaux souterraines sont suffisamment proche de la végétation de marais pour que celle-ci puisse s'y alimenter en eau pendant les périodes de déficit hydrique. Ce sont donc les volumes d'eau extraits au eaux souterraines par la végétation de marais afin de satisfaire sa demande en évapotranspiration. Ce ne sont dès lors pas les surfaces de bassin versant minimales nécessaires pour maintenir l'élévation de la nappe phréatique. Il faut donc considérer que le maintien d'une élévation suffisante de la surface phréatique, en terme d'accessibilité pour le réseau racinaire du marais, demande potentiellement des surfaces de bassin versant supérieures à celles définies par la méthode. Pour la définition de ces surfaces des études hydrogéologiques sur chaque site sont nécessaires afin de définir les propriétés des aquifères de ces marais.

Cependant, en prenant en compte c'est observation, cette approche permet de rapidement estimer les potentielles stress hydriques subis par les marais relatifs à une insuffisance des précipitations. Ces stress hydriques pouvant être annulés par la présence d'une nappe phréatique dont l'élévation est suffisante pour permettre à la végétation de marais de s'y alimenter en eau. Concrètement, le bon fonctionnement de cette alimentation peut être évalué par l'installation de piézomètres dans les sites de marais. Les mesures piézomètres permettent d'une part de vérifier que l'alimentation du marais en eaux souterraines pendant les stress hydriques est effective, par l'observation de fluctuations de l'élévation de la nappe phréatique liées à la demande en évapotranspiration, et d'autre part, ces mesures permettent d'évaluer la valeur du paramètre T_D (période de disponibilité des eaux de pluie) indispensable pour réduire l'incertitude sur l'estimation du déficit hydrique du marais.

6 Conclusions et Recommandations

Conformément aux ordonnances de la Confédération sur la protection des hauts-marais et des bas-marais, les marais ne doivent pas s'assécher [[Conseil fédéral suisse, 2015](#)]. Leur assèchement conduit à la détérioration et à l'affaiblissement des fonctions écosystémiques essentielles que les marais fournissent. Ainsi, le maintien ou le rétablissement du régime hydrique propre aux marais [[Office fédéral de l'environnement \(OFEV\), 2007](#)] doit être supporté par l'établissement de mesures de protection. De ce fait, à l'instar des zones tampons trophiques, il est indispensable que des zones tampons hydrologiques soit définies et respectées afin de protéger les bassins versants des marais contre les interventions susceptibles de porter préjudice à leur régime [[Office fédéral de l'environnement \(OFEV\), 2007](#)].

Les résultats du présent rapport montrent l'importance du maintien de l'alimentation en eaux souterraines des zones de marais. Pour cela les flux d'eaux souterraines atteignant le marais ne devraient pas être modifiés significativement. La pérennité et la survie des zones humides dépendent de leur alimentation en eau. Par conséquent l'établissement de zones de protection autour des marais doit garantir une alimentation durable en eaux souterraines, c'est-à-dire la définition de surfaces drainées par le marais, considérées comme indispensables au maintien quantitatif et qualitatif de l'approvisionnement en eaux souterraines et par conséquent à la protection des biotopes marécageux d'importance nationale.

La végétation de bas-marais survit grâce à la recharge de la nappe phréatique sous-jacente. Si la recharge de cette nappe devient insuffisante suite à des interventions humaines dans les surfaces drainées par le marais alors la surface phréatique peut rapidement être à une élévation insuffisante et ne plus permettre l'alimentation en eau de la végétation de marais sus-jacente et ainsi conduire au dépérissement de cette végétation. D'une manière simple, le bon fonctionnement d'un marais, relatif à son approvisionnement en eaux souterraines pour sa demande en évapotranspiration, peut être observé via les fluctuations de la nappe phréatique, cycle de diminution (évapotranspiration) et augmentation (recharge de la nappe par les flux d'eaux souterraines) de l'élévation de sa surface.

Par conséquent, il semble nécessaire de ne plus remettre en état les conduites de drainage, mais les neutraliser afin de ramener le niveau de la nappe phréatique le plus proche possible de la surface afin de permettre au marais une évapotranspiration optimale pendant les périodes de stress hydrique. Les analyses et les approches exposées dans ce rapport ont montré que le déficit en eau de pluie peut être important en période estivale et de sécheresse et que par conséquent la végétation de marais peut être menacée, à moyen ou long terme, si celle-ci ne peut pas compenser ce déficit par le prélèvement d'eaux souterraines.

7 Remerciements

Les auteurs du présent document tiennent à remercier les autorités du canton de Vaud, Bernadette Droz, et du canton de Berne, Dominique Hindermann, pour l'acceptation des demandes d'autorisation pour l'installation et la maintenance des instruments de mesure, de protection et de transmission sur les sites d'étude (**Annexes 10.1.1, 10.1.2, 10.2.1 et 10.2.2**), ainsi que les gardes forestiers du domaine Lombachalp-Teufen, Stefan Steuri et Lukas Schärer, et le président de la communauté montagnard de Bohl, Heinz von Allmen-Bieri.

Nous sommes également reconnaissants envers les techniciens du centre d'hydrogéologie et géothermie de Neuchâtel, Roberto Costa et Laurent Marguet pour l'aide à l'installation et à la maintenance des dispositifs.

Enfin nous remercions sincèrement le porteur du projet, Philippe Grosvernier (LIN'eco) et les autres intervenants du projet, Meinrad Küchler (WSL) et l'équipe du bureau Geo7, Peter Gsteiger, Peter Mani et Ursin Caduff pour les réunions de projet enrichissantes.

8 Glossaire

Anémomètre	: Instrument mesurant la vitesse du vent.
Bas marais	: Marais caractérisés par une alimentation principale en eau venant du sous-sol.
Bassin versant	: Portion de territoire définie par un point de convergence des eaux et délimitée par des lignes de partage des eaux.
Bilan hydrique	: Comparaison entre les apports et les pertes en eau dans un lieu et pour une période.
Biotope	: Milieu défini par des caractéristiques physicochimiques stables et abritant une communauté d'être vivants (Biocénose).
Carottage	: Prélèvement d'un échantillon du sous-sol à l'aide d'un tube.
Crépine (Piézomètre)	: Filtre permettant la pénétration de l'eau souterraine dans le tube constituant le piézomètre.
Évapotranspiration	: Quantité d'eau évaporée par le sol, les étendues d'eau et transpirée par les plantes.
Évapotranspiration de référence	: Notée ET_0 , représente l'évapotranspiration d'un couvert végétal idéal (souvent différent du couvert végétal en place), disposant d'eau à volonté. Dépend seulement des conditions atmosphériques.
Évapotranspiration du marais	: Représente l'évapotranspiration d'un couvert végétal de marais, disposant d'eau à volonté. Dépend des conditions atmosphériques et du couvert végétal en place.
Fonctions écosystémiques	: Représentent les services tirés des écosystèmes au bénéfice des hommes.
Initiative de Rothenturm	: Initiative populaire fédérale pour la protection des marais approuvée par le peuple et les cantons le 6 décembre 1987. Elle inscrit dans la constitution fédérale l'interdiction de construire dans les marais « d'une beauté particulière et présentant un intérêt national ».
Piézomètre	: Instrument permettant la mesure de l'élévation de la nappe phréatique en un point géographique.
Radiomètre	: Instrument mesurant l'énergie des rayonnements.
Radiomètre net	: Instrument mesurant l'équilibre entre les rayonnements entrants et sortants.
Station météorologique	: Ensemble de capteurs mesurant des paramètres météorologiques liés aux variations du climat.
Tourbe	: Matière organique fossile formée par l'accumulation de végétaux dans un milieu saturé en eau et sur de longues périodes.
Zone humide	: De l'anglais « Wetland ». Région où l'écologie est dominée par l'influence de l'eau.

9 Références

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith (2006), FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 333 p.
- Brutsaert, W. (2005), *Hydrology, An Introduction*, Cambridge University Press, New York, 605 p.
- Calanca, P., P. Smith, A. Holzkamper, and C. Ammann (2011), Reference evaporation and its application in agrometeorology, *Agrarforsch Schweiz*, 2(4), 176-183.
- Campbell, D., and R. Jackson (2004), Hydrology of wetlands, in *Freshwaters of New Zealand*, edited by J. Harding, P. Mosley, C. Pearson and B. Sorrell, pp. 20-21 - 20-14, New Zealand Hydrological Society and New Zealand Limnological Society, New Zealand.
- Carsel, R. F., and R. S. Parrish (1988), Developing Joint Probability-Distributions of Soil-Water Retention Characteristics, *Water Resour Res*, 24(5), 755-769.
- CHYN Centre d'hydrogéologie et géothermie de Neuchâtel, *Bâtiment UniMail, Rue Emile-Argand 11, 2000 Neuchâtel, Suisse, +41 32 718 26 00/02*.
- Conseil fédéral suisse (2015), Ordonnance sur la protection des bas-marais d'importance nationale, 38 p.
- Darcy, H. (1856), *Les Fontaines Publiques de la ville Dijon*, Dalmont, Paris.
- Drexler, J. Z., F. E. Anderson, and R. L. Snyder (2008), Evapotranspiration rates and crop coefficients for a restored marsh in the Sacramento-San Joaquin Delta, California, USA, *Hydrol Process*, 22(6), 725-735.
- FAO United Nation Food and Agriculture Organization, *Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy, +39 06 57051*.
- Fetter, C. W. (2001), *Applied Hydrogeology*, Person Education International, 598 p.
- Fretwell, J. D., J. S. Williams, P. J. Redman, and Geological Survey (U.S.) (1996), *National water summary on wetland resources*, viii, 431 p. pp., U.S. G.P.O. : For sale by the U.S. G.P.O., Supt. of Docs., Washington, D.C.
- Gasca-Tucker, D. L., M. C. Acreman, C. T. Agnew, and J. R. Thompson (2007), Estimating evaporation from a wet grassland, *Hydrol Earth Syst Sc*, 11(1), 270-282.
- Geo7 AG Geowissenschaftliches Büro, *Neufeldstrasse 5, 3012 Bern, Suisse, +41 31 300 44 33*.
- Gillham, R. W. (1984), The Capillary-Fringe and Its Effect on Water-Table Response, *J Hydrol*, 67(1-4), 307-324.
- Gribovszki, Z., J. Szilagyi, and P. Kalicz (2010), Diurnal fluctuations in shallow groundwater levels and streamflow rates and their interpretation - A review, *J Hydrol*, 385(1-4), 371-383.
- Grosvernier, P. (2013), Programme pilote Adaptation aux changements climatiques - Demande de projet, 10 p.
- Healy, R. W., and P. G. Cook (2002), Using groundwater levels to estimate recharge, *Hydrogeol J*, 10(1), 91-109.
- Heliotis, F. D., and C. B. Dewitt (1987), Rapid Water-Table Responses to Rainfall in a Northern Peatland Ecosystem, *Water Resour Bull*, 23(6), 1011-1016.
- Hillel, D. (2004), *Introduction to environmental soil physics*, xvi, 494 p. pp., Elsevier Academic Press, Amsterdam ; Boston.
- Ibrahimi, M. K., T. Miyazaki, K. Nishikawa, T. Nishimura, and H. Imoto (2011), Experimental and Modeling Investigations in relation to Reverse Wieringermeer Effect, *Open Journal of Soil Science*, 1, 17-24.
- Kim, C. P., and M. F. P. Bierkens (1995), A Formula for Computation of Time-Varying Recharge of Groundwater - Comment, *J Hydrol*, 171(1-2), 191-193.
- Klove, B., et al. (2014), Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems, *J Hydrol*, 518, 250-266.

- Klove, B., et al. (2011), Groundwater dependent ecosystems. Part I: Hydroecological status and trends, *Environ Sci Policy*, 14(7), 770-781.
- La Burtignière, map.geo.admin.ch, CH1903/LV03 502'478 157'426.
- LIN'eco Dr Ph. Grosvernier, écologue conseil, REG A Environnement, Rue du Dr Tièche 13, case postale 80, 2732 Reconvilier, Suisse, +41 32 481 29 55.
- Meyboom, P. (1967), Groundwater Studies in the Assiniboine River Drainage Basin. Part II: Hydrologic Characteristics of Phreatophytic Vegetation in South-Central Saskatchewan., *Geological Survey of Canada. Department of Energy Mines and Resources.*, 64 p.
- Miyazaki, T., M. K. Ibrahim, and T. Nishimura (2012), Shallow Groundwater Dynamics Controlled by Lisse and reverse Wieringermeer Effects, *Journal of Sustainable Watershed Science & Management*, 1(2), 36-45.
- Moor zwischen Lombachalp und Teufen, map.geo.admin.ch, CH1905/LV03 635'027 178'358.
- Nachabe, M., N. Shah, M. Ross, and J. Vomacka (2005), Evapotranspiration of two vegetation covers in a shallow water table environment, *Soil Sci Soc Am J*, 69(2), 492-499.
- OcCC, and ProClim (2007), Les changements climatiques et la Suisse en 2050, 168 p.
- Office fédéral de l'environnement (OFEV) (2007), État et évolution des marais en Suisse, 30/07, p. 99.
- Orellana, F., P. Verma, S. P. Loheide, and E. Daly (2012), Monitoring and Modeling Water-Vegetation Interactions in Groundwater-Dependent Ecosystems, *Rev Geophys*, 50.
- Paquet, G. (2002), Biologie et écologie de l'ombre commun dans l'Orbe à la vallée de Joux, canton de Vaud, Suisse, *Thèse de doctorat Faculté des Sciences de l'Université de Lausanne*, 136 p.
- Schicht, R. J., and W. C. Walton (1961), Hydrologic budgets for three small watersheds in Illinois, *Illinois State Water Survey, Report of Investigation 40*, 40 p.
- Shah, N., M. Nachabe, and M. Ross (2007), Extinction depth and evapotranspiration from ground water under selected land covers, *Ground Water*, 45(3), 329-338.
- Sophocleous, M. (2002), Interactions between groundwater and surface water: the state of the science (vol 10, pg 52, 2002), *Hydrogeol J*, 10(2), 348-348.
- Soylu, M. E., J. D. Lenters, E. Istanbuloglu, and S. P. Loheide (2012), On evapotranspiration and shallow groundwater fluctuations: A Fourier-based improvement to the White method, *Water Resour Res*, 48.
- U.S. EPA (2008), Methods for Evaluating Wetland Condition: Wetland Hydrology., *Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. EPA-822-R-08-024*.
- WSL Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf, Suisse, +41 44-739 21 11.
- WSL, and OFEFP (2002), Les marais et leur protection en Suisse, 68 p.

10 Annexes

10.1 Marais de la Burtignière

10.1.1 Demande d'autorisation – La Burtignière



UNIVERSITÉ DE
NEUCHÂTEL

CHYN

Centre d'hydrogéologie
et de géothermie

Rue Emile-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel

Le 1 Septembre 2014
À Neuchâtel

Mme Catherine STREHLER-PERRIN
Mme Bernadette DROZ
Département du territoire et de l'environnement
Direction générale de l'environnement – DGE
Biodiversité et paysage
Ch. Du Marquisat 1, CH – 1025 St-Sulpice

Cadre : Programme pilote : « *Maintien des ressources en eau dans le bassin versant des biotopes marécageux d'importance nationale* »

Objet : Demande d'autorisation : Installation de matériel de mesure dans la vallée du Joux entre la Burtignière et le Chalet du Carré.

Motivation du choix du site d'étude

Le canton de Vaud finançant une partie du projet « *Maintien des ressources en eau dans le bassin versant des biotopes marécageux d'importance nationale* » nous proposons la mise en place temporaire d'instruments de mesure dans une partie du site marécageux d'importance nationale situé dans la vallée du Joux.

Finalité de l'étude du CHYN dans la vallée du Joux

Détermination du bilan hydrique de la zone marécageuse étudiée.

Demande d'autorisation

Autorisation de déploiement du matériel et du personnel sur le site d'étude, pour l'étude concernée et pendant la durée du projet.

Note : Les coordonnées sont données dans le système de référence CH 1903.

- **Zone d'étude :**

Localisation : Vallée du Joux de La Burtignière au Chalet du Carré. Coordonnées définissant les côtés d'un polygone dans le sens horaire autour de la zone. 500800/156500 - 502600/157800 - 503200/157100 - 501800/155600

Durée : Octobre 2014 à Octobre 2017

- **Station météorologique et bac d'évaporation :**

Emprise spatiale (clôtures comprises) : 3 mètres de large, 3 mètres de long et un mât de 3 mètres de haut.

Emplacement de l'installation : 502550/157600 +/- 150m (voir Figure 1)

Durée de l'installation : Octobre 2014 à Octobre 2017. A noter que l'installation du matériel se fera entre ces deux dates et non obligatoirement pendant le mois d'Octobre 2014.

Maintenance de l'installation : environ 1 à 2 fois par mois pendant 3 ans (variation de la périodicité de maintenance possible, en fonction du bon ou mauvais fonctionnement de l'installation).

- **Piézomètres :**

Emprise spatiale : Tubes de plusieurs centimètres de diamètre placés dans l'Orbe (rivière) sous le pont ou dans le sol de la zone d'étude jusqu'à 5 m de profondeur.

Emplacement de l'installation : 502725/157500 +/- 50m et dans d'autres endroits de la zone d'étude à définir

Durée de l'installation : Octobre 2014 à Octobre 2017. A noter que l'installation du matériel se fera entre ces deux dates et non obligatoirement pendant le mois d'Octobre 2014.

Maintenance de l'installation : environ 1 à 2 fois par mois pendant 3 ans (variation de la périodicité de maintenance possible, en fonction du bon ou mauvais fonctionnement de l'installation).

- **Mesures du débit de l'Orbe :**

Zone de mesure : 502725/157500 +/- 100 m

Fréquence des mesures : variable en fonction de la variation du niveau de la rivière.

Durée : Octobre 2014 à Octobre 2017

Philip BRUNNER
Professeur
Université de Neuchâtel
Centre d'hydrogéologie et géothermie (CHYN)
E-mail : philip.brunner@unine.ch
Tel : +41 (0) 32 718 26 74

Guillaume GIANNI
Assistant de recherche et Doctorant
Université de Neuchâtel
CHYN
E-mail : guillaume.gianni@unine.ch
Tel : +41 (0) 32 718 26 99

10.1.2 Autorisation – Canton de Vaud – La Burtignière



Direction générale
 de l'environnement (DGE)
 Biodiversité et paysage
 Chemin du Marquisat 1
 1025 St-Sulpice

www.vd.ch – T 021 557 86 30 – F 021 557 86 50
 info.fauenature@vd.ch

Autorisation spéciale

Autorisation n° 2112

art. 10 et 14 du règlement concernant la protection de la flore (RPF) du 2 mars 2005.

1 Délivrée à

UNINE - Centre d'hydrogéologie
Guillaume Gianni
Rue Emile-Argand 11
2000 Neuchâtel

2 Le détenteur de la présente attestation est autorisé

à installer du matériel de mesure pour la détermination du bilan hydrique de la zone marécageuse et à en assurer la maintenance (1-2 fois par mois).

Zones d'étude : Vallée de Joux, de La Burtignière au Chalet du Carré (station météorologique et bac d'évaporation, piézomètres et mesures du débit de l'Orbe).

Durée : octobre 2014 à octobre 2017.

Conditions : Nous vous rendons attentif au fait que les habitants et exploitants de La Vallée sont très sensibles aux restrictions de circulation et de gestion qui leur sont imposées. Nous vous invitons en conséquence à informer les propriétaires et exploitants concernés si vous deviez pénétrer sur des terrains privés en zone agricole.

3 Expiration de la validité 31 décembre 2017	4 La demande d'autorisation est agréée moyennant observation des conditions ci-dessous : Cette autorisation nous sera retournée à son échéance.
5 Emolument (facture suivra par prochain courrier) SFr. 0.00	6 Voie de recours La présente décision peut faire l'objet d'un recours du Tribunal cantonal. L'acte de recours doit être déposé auprès du Tribunal cantonal, Cour de droit administratif et public, dans les trente jours suivant la communication de la décision attaquée; il doit être signé et indiquer les conclusions et motifs du recours. La décision attaquée est jointe au recours. Le cas échéant, ce dernier est accompagné de la procuration du mandataire.
7 Lieu et date d'établissement St-Sulpice, le 11 septembre 2014	

Timbre et signature :

Direction générale
 de l'environnement (DGE)
 Biodiversité et paysage
 Ch. du Marquisat 1
 1025 ST-SULPICE

10.1.3 Coordonnées piézomètres - La Burtignière

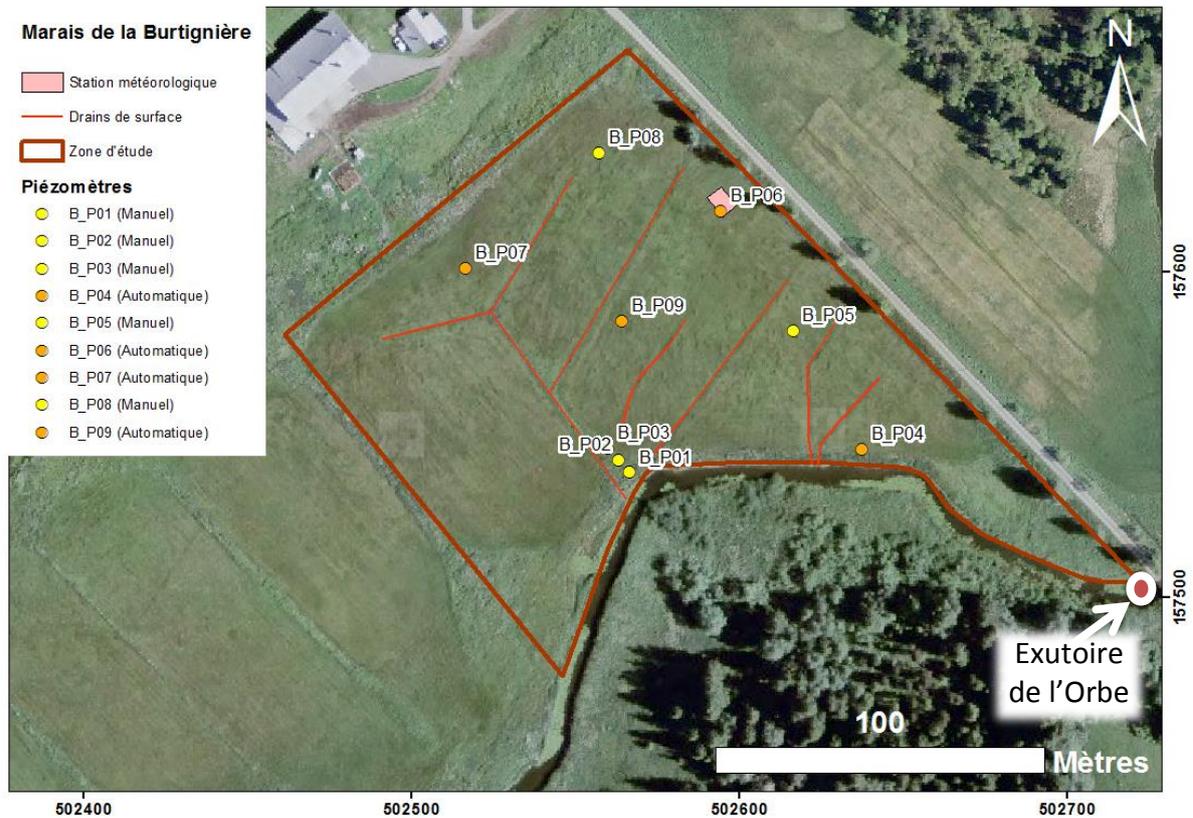


Figure 56 : Carte du site d'étude de la Burtignière. Limite de la zone d'étude, emplacement de la station météorologique et des piézomètres.

	X	Y	Relevé
B_P01	502566.74	157538.43	Manuel
B_P02	502563.29	157542.03	Manuel
B_P03	502559.98	157545.84	Manuel
B_P04	502637.47	157545.41	Automatique
B_P05	502616.53	157581.73	Manuel
B_P06	502594.40	157618.46	Automatique
B_P07	502516.71	157600.97	Automatique
B_P08	502557.39	157636.54	Manuel
B_P09	502564.29	157584.69	Automatique

10.1.4 Relevés topographiques de la surface – La Burtignière

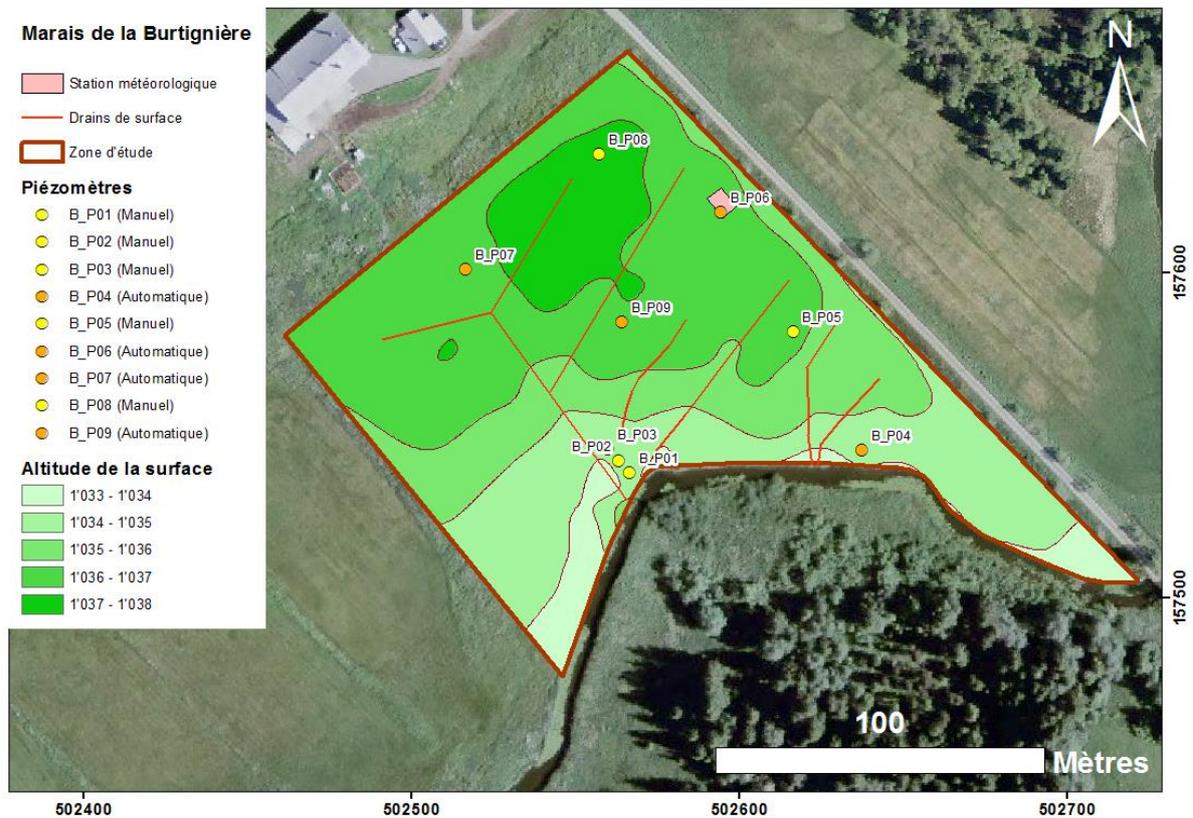


Figure 57 : Carte topographique de la surface du site d'étude de la Burtignière

10.1.5 Relevés topographiques du toit de la couche d'argile – La Burtignière

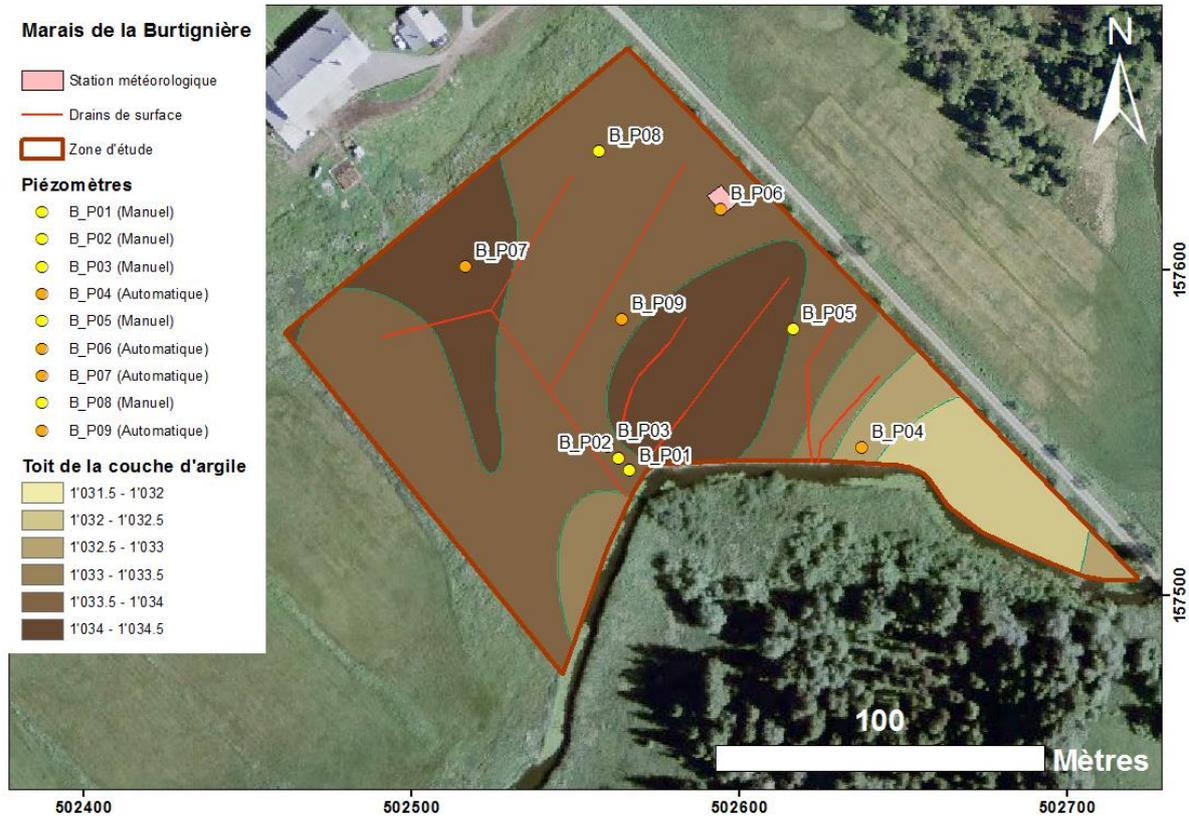


Figure 58 : Carte topographique du toit de la couche d'argile de la Burtignière.

10.1.6 Mesures de la conductivité hydraulique - La Burtignière

	X	Y	Conductivité hydraulique (m.j ⁻¹)
B_HC01	502599	157622	33.0
B_HC02	502559	157649	10.8
B_HC03	502530	157631	1.4
B_HC04	502501	157601	1.1
B_HC05	502540	157582	2.5
B_HC06	502573	157549	24.2
B_HC07	502570	157609	2.3
B_HC08	502603	157578	0.8
B_HC09	502617	157547	1.1
B_HC10	502669	157545	9.3
B_HC11	502645	157572	30.8
B_HC12	502634	157591	23.4
B_HC13	502599	157622	10.8
B_HC14	502559	157649	0.1
B_HC15	502530	157631	0.3
B_HC16	502501	157601	0.5
B_HC17	502540	157582	0.7
B_HC18	502570	157609	0.2
B_HC19	502603	157578	0.5
B_HC20	502617	157547	1.0
			Moyenne (m.j⁻¹)
			7.7

10.1.7 Mesures de la porosité - La Burtignière

	X	Y	Porosité (-)
B_P01	502565	157654	0.83
B_P02	502533	157639	0.67
B_P03	502473	157589	0.69
B_P04	502526	157590	0.73
B_P05	502569	157596	0.80
B_P06	502615	157607	0.74
B_P07	502660	157553	0.78
B_P08	502609	157550	0.73
B_P09	502564	157541	0.44
B_P10	502718	157507	0.76
B_P11	502546	157478	0.60
B_P12	502498	157546	0.67
B_P13	502462	157581	0.68

B_P14	502566	157667	0.82
			Moyenne (-)
			0.71

10.2 Marais de Lombachalp-Teufen

10.2.1 Demande d'autorisation – Lombachalp-Teufen



UNIVERSITÉ DE
NEUCHÂTEL

CHYN
Centre d'hydrogéologie
et de géothermie
Rue Emile-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel

Freitag, den 19. Juni
In Neuchâtel

Herr Dominique Hindermann
Amt für Landwirtschaft und Natur
Abteilung Natuförderung
Bereich Arten und Lebensräume
Schwand 17, 3110 Münsingen, Bern

Betreff : Gesuch um Bewilligung einer Installation von Messgeräten im Moor Nummer 3476, Moor zwischen Lombachalp und Teufen.

Rahmen:

Pilotprojekt zur Anpassung an den Klimawandel « *Erhaltung der Wasserressourcen im Einzugsgebiet von Moorbiotopen von nationaler Bedeutung* »

<http://www.bafu.admin.ch/klima/13877/14401/14916/14940/index.html?lang=de>

Begründung der Wahl der Untersuchungsstelle :

Der Kanton Bern finanziert einen Teil des Projekts: « *Erhaltung der Wasserressourcen im Einzugsgebiet von Moorbiotopen von nationaler Bedeutung* ». Wir sind an diesem Projekt beteiligt und müssen einen geeigneten Feldstandort für eine zeitlich begrenzte Periode mit Messinstrumenten ausstatten. Das Moor 3476 ist ein idealer Standort.

Ziel dieser Studie:

Ermittlung der Wasserbilanz im Untersuchungsgebiet.

Gesuch um Bewilligung:

Genehmigung für die Einrichtung der Messgeräte und der Personaleinsatz während der Studiendauer. Die Messungen wird 3 Jahre (Juli 2015 bis Juli 2018) dauern.

Potentielle Untersuchungsgebiete :

Bei einer Feldbegehung letzten Monat identifizierten wir 2 potentielle Standorte für die Messungen (siehe Abbildung 1).

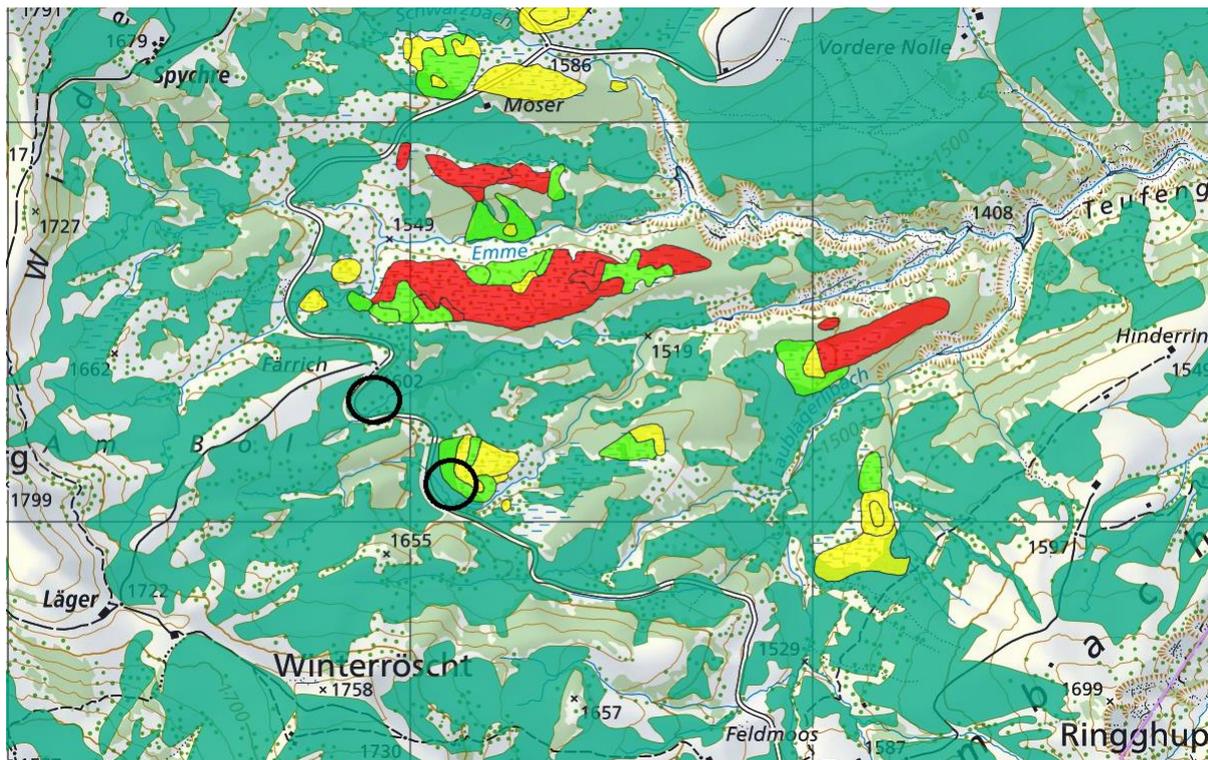


Abbildung 1 : Moor zwischen Lambachalp und Teufen (Nummer 3476). Die schwarzen Kreise zeigen die potentiellen Standorte.

Beschreibung des Materials

- **Wetterstation und Verdunstungspfanne :**

Räumliche Dimension (Zaun durchgemessen) : 3 Meter breit de large, 3 Meter lange und ein 3 Meter Mast.

Wartung der Anlage : Ungefähr 1- bis 2-mal pro Monat während 3 Jahren (Mögliche Abweichungen in Abhängigkeit von dem Messgerätenzustand).

Abbildung 2 zeigt eine ähnliche Installation, die wir im Vallée de Joux (Kanton Waadt) eingerichtet haben.



Abbildung 2 : *Wetterstation und Verdunstungspfanne. La burtignière, Gemeinde Le Chenit, Kanton Waadt (Vallée de Joux).*

Philip BRUNNER

Professeur

Université de Neuchâtel

Centre d'hydrogéologie et géothermie (CHYN)

E-mail : philip.brunner@unine.ch

Tel : +41 (0) 32 718 26 74

Guillaume GIANNI

Assistant de recherche et Doctorant

Université de Neuchâtel

CHYN

E-mail : guillaume.gianni@unine.ch

Tel : +41 (0) 32 718 26 99

10.2.2 Autorisation – Canton de Berne – Lombachalp-Teufen

Amt für Landwirtschaft
und Natur
des Kantons Bern

Office de l'agriculture
et de la nature
du canton de Berne

Abteilung Naturförderung
(ANF)

Service de la Promotion de la nature
(SPN)

Schwand 17
3110 Münsingen
Telefon 031 720 32 20
Telefax 031 720 33 51
info.anf@vol.be.ch
www.be.ch/natur

University of Neuchâtel – CHYN
Philip Brunner
Rue Emile Argand 11
2000 Neuchâtel

Dominique Hindermann
Tel. 031 720 32 28
dominique.hindermann@vol.be.ch

31. Juli 2015

Reg.-Nr. 4.1.2.6.FM3476

Ausnahmebewilligung Naturschutz



Gemeinde:	Habkern
Gesuchstellerin:	University of Neuchâtel – CHYN, Philip Brunner Rue Emile Argand 11, 2000 Neuchâtel
Standort:	Am Bol, 634900 / 178300 & 635100 / 178100
Vorhaben:	Pilotprojekt zur Anpassung an den Klimawandel „Erhaltung der Wasserressourcen im Einzugsgebiet von Moorbiotopen“.
Flachmoor-Objekt:	Nr. 3476 – Moor zwischen Lombachalp und Teufen
Erforderliche Ausnahmen:	Ausnahmebewilligung für Eingriffe in Flachmoore von nationaler Bedeutung nach Art. 18 Abs. 1bis und 1ter, Art. 21 und 22 Abs. 2 des Bundesgesetzes über den Natur- und Heimatschutz vom 1.7.1966 und Art. 4 und 5 der Verordnung über den Schutz der Flachmoore von nationaler Bedeutung vom 7.9.1994.
Beurteilungsgrundlagen:	Bundesgesetz über den Natur- und Heimatschutz (NHG) SR 451 Verordnung über den Natur- und Heimatschutz (NHV) SR 451.1 Naturschutzgesetz (NSchG) BSG 426.11 Naturschutzverordnung (NSchV) BSG 426.111 Verordnung über den Schutz der Flachmoore von nationaler Bedeutung (Flachmoorverordnung) SR 451.33

1. Ausgangslage

1.1. Vorhaben

Im Auftrag des BAFU führt die Gesuchstellerin (Uni Neuchâtel) ein Pilotprojekt durch, in welchem erforscht wird, wie die Wasserressourcen im Einzugsgebiet von Moorbiotopen von nationaler Bedeutung auch unter Einfluss des Klimawandels erhalten werden können. Ziel der Studie ist es die Wasserbilanz im Untersuchungsgebiet zu ermitteln. Der Kanton Bern finanziert einen Teil dieses Projektes. Die Gesuchstellerin hat für die Untersuchungen ideale Standorte im Gebiet Lombachalp/Bol gefunden.

Um die Untersuchungen wie geplant durchführen zu können beantragt die Gesuchstellerin eine Bewilligung für die Einrichtung von Messgeräten im Flachmoorobjekt Nr. 3476 für die Untersuchungsdauer von 3 Jahren mit Beginn August 2015. Die Standorte für die Messgeräte befinden sich ungefähr an den oben unter „Standort“ aufgeführten Koordinaten-Schnittpunkten. Die angrenzenden Hochmoorobjekte, respektive die kantonalen Naturschutzgebiete werden durch die Installationen nicht tangiert.

Die Untersuchungen werden folgendermassen ausgeführt:

- Installation einer Wetterstation und Verdunstungspfanne: Die räumlichen Dimensionen der Anlage inklusive Abzäunung (da in Weidefläche) beläuft sich auf ein 3x3-Meter-Quadrat inklusive eines 3 Meter hohen Masts.
- Die Anlage wird ungefähr 1 bis 2-Mal pro Monat während 3 Jahren gewartet, wobei je nach Messgerätezustand Abweichungen auftreten können.

1.2. Rechtliche Rahmenbedingungen

Objekte des nationalen Flachmoorinventars müssen gemäss Art. 4 der Flachmoorverordnung ungeschmälert erhalten werden. Weiter dürfen gemäss Art. 5 der Flachmoorverordnung keine Bauten und Anlagen errichtet werden. Hiervon sind jedoch Bauten, Anlagen und Bodenveränderungen ausgenommen, sofern diese der Aufrechterhaltung des Schutzziels dienen.

2. Beurteilung

Die Anlagen für die Untersuchungen werden nur vorübergehend (während 3 Jahren) an den erwähnten Standorten aufgestellt und danach wieder vollständig abgebaut. Des Weiteren werden die Untersuchungsergebnisse wichtige Erkenntnisse für den Moorschutz liefern. Das Projekt wird zu keinen bleibenden Installationen oder irreversiblen Veränderungen im Flachmoor-Objekt und den angrenzenden Hochmoorflächen, respektive in den Naturschutzgebieten führen. Es ist davon auszugehen, dass nach dem Abbau am Standort der Messanlage nach 1 bis 2 Vegetationsperioden keine Spuren der lokalen Beeinträchtigung zu sehen sein werden. Die Betreuung der Anlage durch monatlich 1 bis 2 Begehungen wird zu keinen Schäden an Oberboden und Vegetation führen.

3. Entscheid

Die Ausnahmegewilligung für die Eingriffe in das Flachmoorobjekt von nationaler Bedeutung wird unter den nachstehend genannten Auflagen erteilt:

4. Auflagen

- 4.1. Diese Bewilligung ist befristet. Sie gilt vom 1. August 2015 bis 31. August 2018.
- 4.2. Die vorliegende Bewilligung gilt nur für die in diese Forschungsarbeit involvierten Personen.
- 4.3. Die Untersuchungen sind gemäss Projektbeschreibung auszuführen. Sie haben sich auf das absolut nötige Minimum zu beschränken.
- 4.4. Nach Abschluss der Feldarbeiten sind sämtliche Fremdgegenstände aus dem Flachmoor und den angrenzenden Flächen zu räumen.
- 4.5. Falls durch die Arbeiten Schäden an der Flachmoorvegetation oder am Oberboden entstehen, ist die Gesuchstellerin dazu verpflichtet angemessene Wiederherstellungs-Massnahmen umzusetzen.
- 4.6. Bestehende Fahrbeschränkungen, sind einzuhalten. Ausnahmen davon sind bei der Gemeindeverwaltung Habkern zu beantragen.
- 4.7. Die projektverantwortliche Person muss das Einverständnis der betroffenen Grundeigentümer und Bewirtschafter vor Beginn der Untersuchungen einholen.
- 4.8. Die projektverantwortliche Person muss vor Beginn der Untersuchungen die Moorlandschafts-Ranger über die geplanten Arbeiten informieren.
- 4.9. Diese Bewilligung ist während den Arbeiten im Naturschutzgebiet auf sich zu tragen und den Kontrollorganen auf Verlangen vorzuweisen.
- 4.10. Nach Abschluss der Untersuchungen sind der Abteilung Naturförderung die Resultate bzw. der Schlussbericht zuzustellen.

5. Hinweis

Da die Untersuchungsreinrichtung von der Strasse her zu sehen sein wird, empfiehlt die Abteilung Naturförderung mit den Grundeigentümern/Bewirtschaftern sowie den Moorlandschafts-Rangern abzuklären, ob Bedarf an einem Informationsplakat besteht. Bei vorhandenem Bedarf soll die Gesuchstellerin ein Info-Plakat erarbeiten und dieses an geeigneter Stelle platzieren.

6. Rechtsmittel

Gegen diese Verfügung kann innert 30 Tagen nach Eröffnung schriftlich und begründet Beschwerde erhoben werden. Die Beschwerde ist zusammen mit einer Kopie dieser Bewilligung bei der Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, Rechtsabteilung, Münsterplatz 3a, 3011 Bern, einzureichen.

7. Gebühren

Gestützt auf die Verordnung über die Gebühren der Kantonsverwaltung (Anhang II B, Ziffer 12) vom 22.11.2003 ist für unsere Aufwendungen eine Gebühr von **Fr. 0.--** zu erheben.

Freundliche Grüsse

**Amt für Landwirtschaft und Natur
des Kantons Bern**
Abteilung Naturförderung



Dominique Hindermann
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Kopien:

- Bruno Dauwalder, Wildhüter
- Flurin Baumann, AGR
- Ruedi Wyss, Gebietsbetreuer ANF
- Peter Fischer, Obmann FNA
- Lukas Frei, Ranger Moorlandschaft Habkern-Sörenberg
- Stefan Steuri, Ranger Moorlandschaft Habkern-Sörenberg

10.2.3 Coordonnées piézomètres – Lombachalp-Teufen

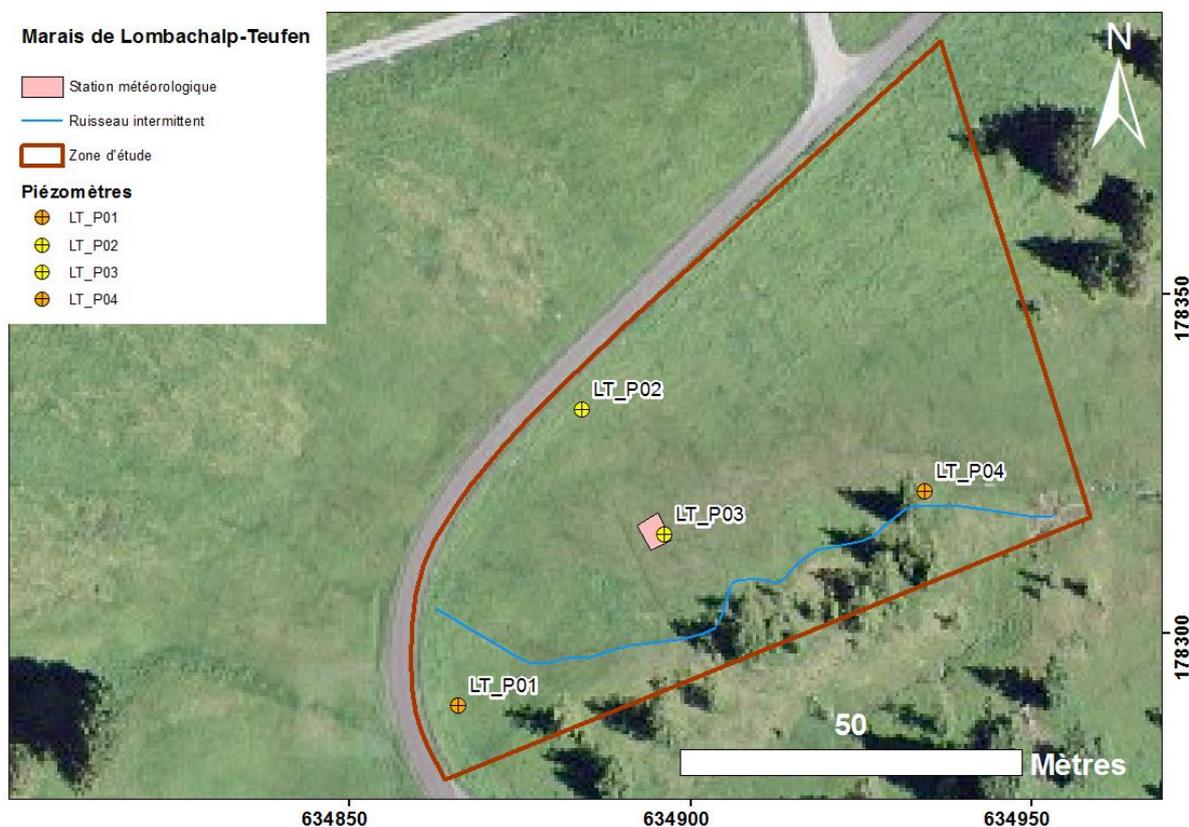


Figure 59 : Carte du site d'étude de Lombachalp-Teufen. Limite de la zone d'étude, emplacement de la station météorologique et des piézomètres.

	X	Y	Relevé
LT_P01	634866.07	178289.32	Automatique
LT_P02	634884.11	178333.01	Manuel
LT_P03	634896.21	178314.57	Manuel
LT_P04	634934.33	178320.91	Automatique

10.2.4 Relevés topographiques de la surface – Lombachalp-Teufen

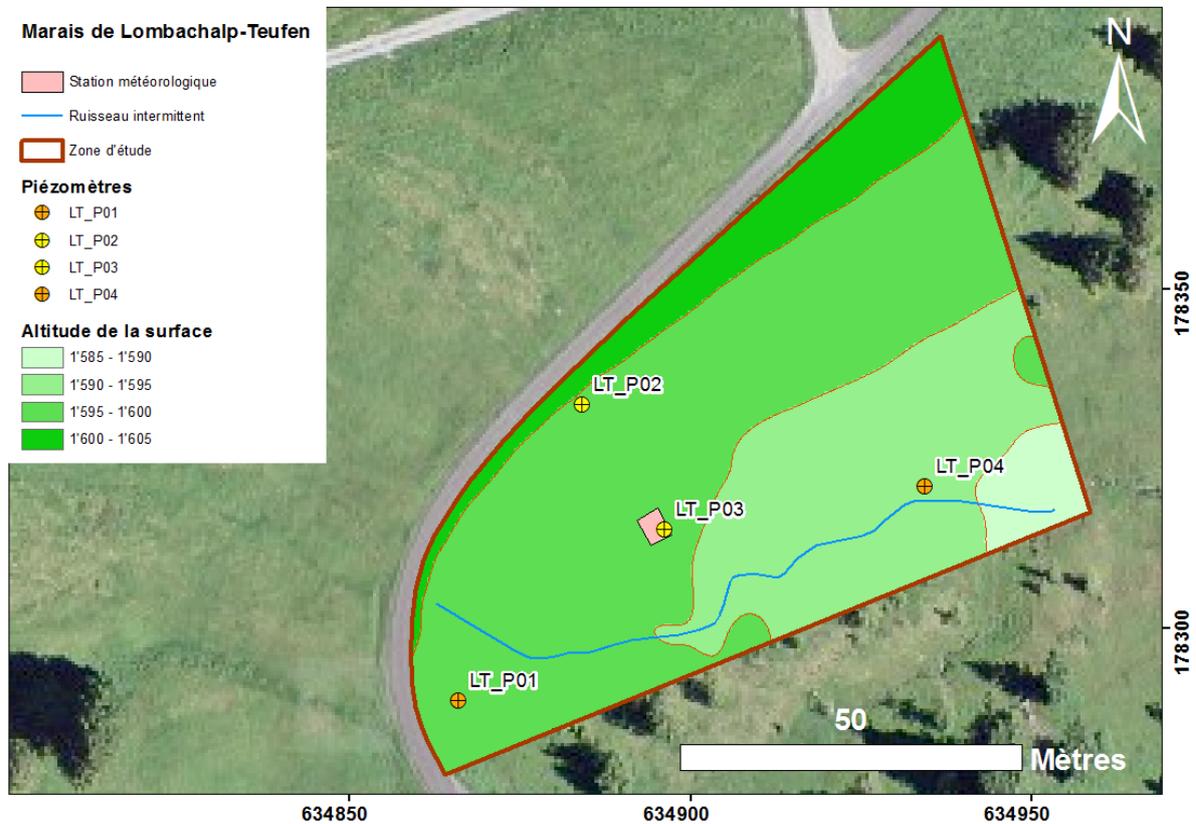


Figure 60 : Carte topographique de la surface du site d'étude de Lombachalp-Teufen.

10.2.5 Relevés topographiques du toit de la couche d'argile - Lombachalp-Teufen

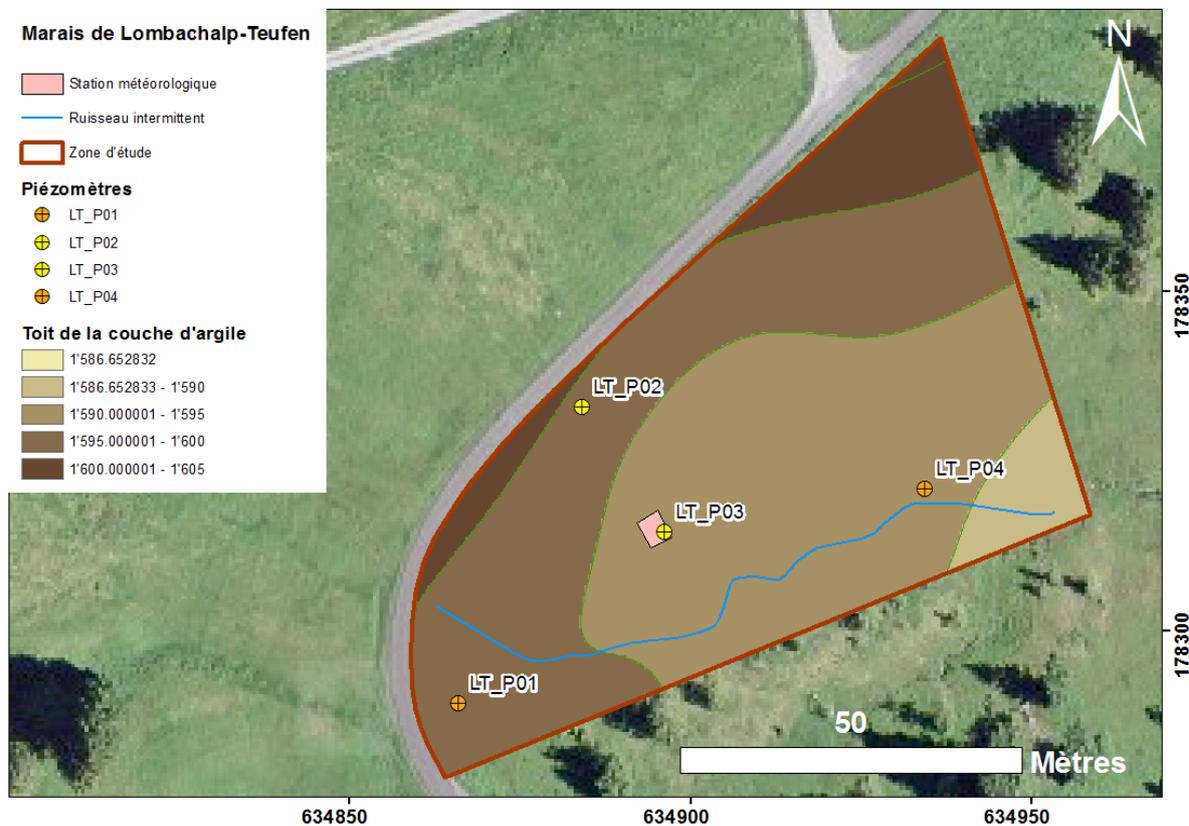


Figure 61 : Carte topographique du toit de la couche d'argile de Lombachalp-Teufen.

10.2.6 Mesures de la conductivité hydraulique – Lombachalp-Teufen

	X	Y	Conductivité hydraulique (m.j ⁻¹)
LT_HC01	634944	178334	0.023
LT_HC02	634935	178316	0.008
LT_HC03	634907	178310	0.012
LT_HC04	634884	178332	0.036
LT_HC05	634878	178306	0.000
LT_HC06	634862	178290	0.017
			Moyenne (m.j⁻¹)
			0.016

10.2.7 Mesures de porosité - Lombachalp-Teufen

	X	Y	Porosité (-)
LT_P01	634869	178285	0.82
LT_P02	634872	178311	0.58
LT_P03	634899	178307	0.90
LT_P04	634913	178347	0.79
LT_P05	634934	178327	0.84
LT_P06	634946	178349	0.58
			Moyenne (-)
			0.75