



# RestHAlp

**WP3 – Promouvoir les services écosystémiques pour l'émergence de projet de restauration : outils et méthodes**

**Act. 3.1 – Evaluer les services écosystémiques**

## **NOTE DE CADRAGE DE L'ACTION ET METHODOLOGIE D'ACQUISITION DES DONNEES**

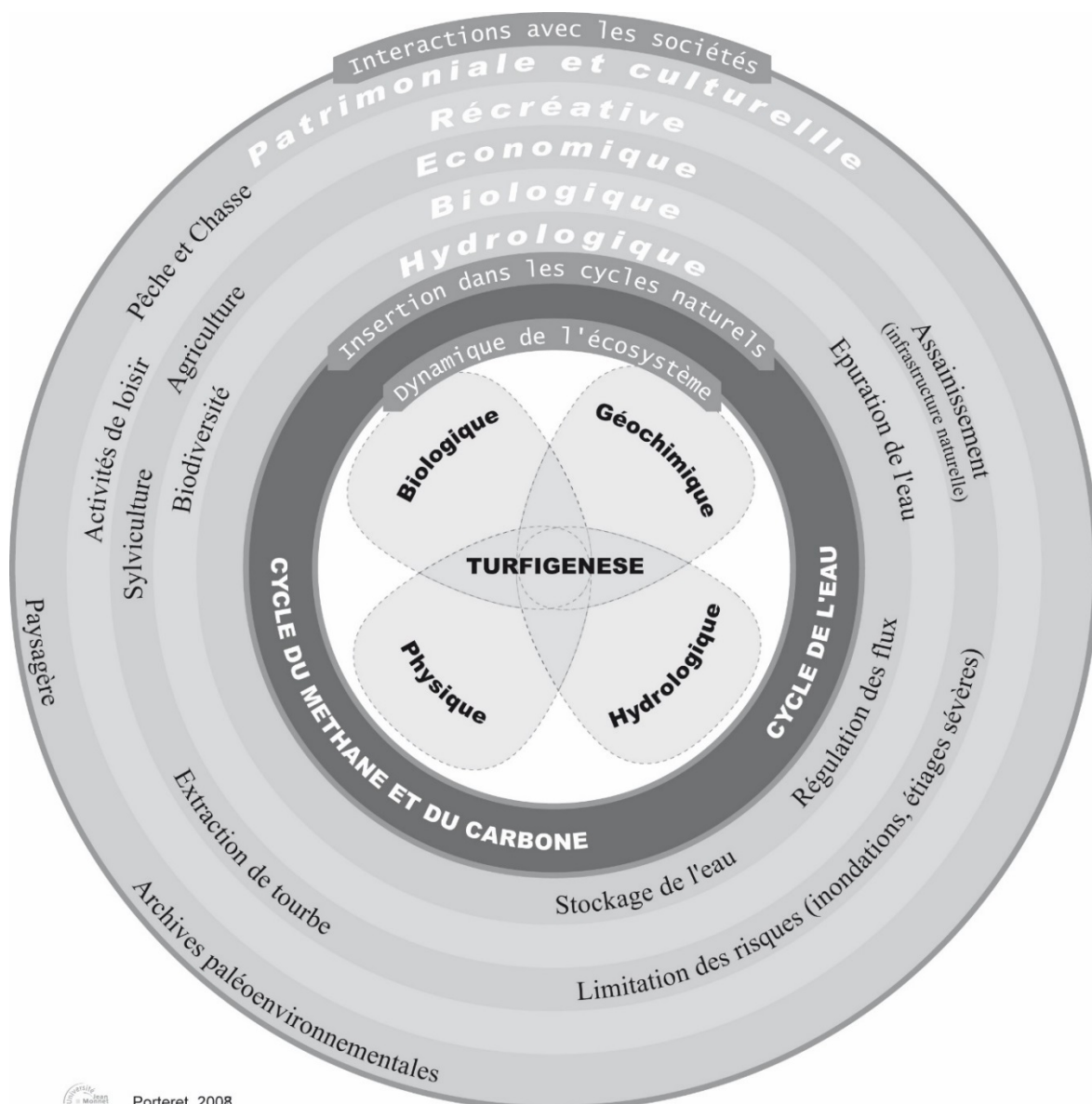
*Rédacteur : Jérôme PORTERET, CEN Savoie*

*Date : septembre 2017*



Les écosystèmes et plus généralement la biodiversité soutiennent et procurent de nombreux services dits services écologiques ou services écosystémiques, généralement classés comme bien commun et/ou bien public car vitaux ou utiles pour l'humanité, les autres espèces et les activités économiques [UICN]. Les notions d'évaluation (économique et parfois marchande) de la biodiversité et des services fournis par les écosystèmes, basée sur une vision anthropocentrée de la nature ont émergé dans les années 1970-1990 avec notamment les travaux de Westman (1977) puis de Randall (1988), Pearce & Moran en 1994 et de Perrings (1995). Elles ont pris une ampleur internationale avec l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (2005) et nationale en France, avec par exemple une « expertise collective » pilotée par l'INRA sur le thème agriculture-biodiversité dans la stratégie nationale pour la biodiversité.

Cette démarche qui ainsi été appliquée aux zones humides (Adamus 1983, Barnaud 1996, Fustec et Lefeuvre 2000) a permis de mettre en évidence les fonctions remplies par ces écosystèmes et promouvoir l'intérêt de leur préservation. Le schéma ci-dessous illustre par exemple les interactions entre le fonctionnement d'un écosystème tourbeux et les fonctions et services qu'il assure pour les sociétés humaines. Toutefois les exemples quantifiés d'évaluation restent peu nombreux.



# Méthode d'évaluation des services écosystémiques des zones humides

Le rapport technique RAMSAR «**Évaluation des zones humides : Orientations sur l'estimation des avantages issus des services écosystémiques des zones humides** » 2007 - De Groot, Stuip, Finlayson, et Davidson, permet de cadrer notre démarche d'évaluation.

Nous nous situons à l'étape 3 du processus à savoir l'analyse fonctionnelle des sites d'étude. Les processus et éléments écologiques du fonctionnement des zones humides sont étudiés, puis traduits en liste de services écosystémiques. Les avantages de ces services seront ensuite analysés et quantifiés en unité de valeur appropriées, comme l'envisage l'étape 4 de la démarche d'évaluation RAMSAR.

Ces deux étapes nécessitent de collecter et/ou rassembler des données biotiques et abiotiques sur le fonctionnement du milieu. Nous intéresserons plus particulièrement aux éléments du fonctionnement hydrologique et biologique qui permettent d'assurer les services d'approvisionnement, d'appui et de régulation, sans oublier les services de culture et d'agrément.

## Description de principales étapes de la démarche d'évaluation RAMSAR

**ÉTAPE 1 : ANALYSE DES PROCESSUS POLITIQUES ET DES OBJECTIFS DE GESTION (POURQUOI ENTREPRENDRE L'ESTIMATION ?)**

**ÉTAPE 2 : ANALYSE ET PARTICIPATION DES ACTEURS (QUI ENTREPREND L'ESTIMATION ET POUR QUI?)**

**ÉTAPE 3 : ANALYSE FONCTIONNELLE (IDENTIFICATION & QUANTIFICATION DES SERVICES) (QUE FAUT-IL ESTIMER ?)**

**ÉTAPE 4 : ESTIMATION DES SERVICES (COMMENT ENTREPRENDRE L'ESTIMATION?)**

**ÉTAPE 5 : COMMUNIQUER LES VALEURS DE LA ZONE HUMIDE (A QUI FOURNIR LES RESULTATS DE L'ESTIMATION)**

Dans le cadre du projet, sont donc étudiés les fonctions et services :

- *liés aux fonctions hydrologiques*
  - *Évaluation de la capacité de stockage de l'eau*
  - *Évaluation de rôle de régulation des écoulements*
- *liés aux cycles biogéochimiques*
  - *Évaluation du stockage du carbone*
  - *Évaluation de l'accumulation de la matière organique*
- *liés aux fonctions socio-économiques et patrimoniales*
  - *Évaluation écologique (biodiversité, patrimoine naturel)*
  - *Évaluation économique (valeur fourragère, fréquentation)*
- *liés aux fonctions patrimoniales*
  - *Évaluation paléo-environnementale (archive)*
  - *Évaluation des perceptions (valeur paysagère)*

## Rappel des éléments de fonctionnement des zones humides et des paramètres à évaluer

### Le fonctionnement hydrologique

*Le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique des zones humides est un domaine qui est encore peu exploré, particulièrement en France. Les études très ponctuelles, [...], fournissent en général peu d'informations et peuvent même conduire à des conclusions erronées. La connaissance du fonctionnement hydrologique global de ces milieux humides est pourtant fondamentale...*

*[Bendjoudi et Marsilly 2000]*

Les zones humides peuvent être considérées, suivant une approche systémique [Chorley et Kennedy 1971], comme des hydrosystèmes, c'est-à-dire des portions d'espace où, dans les trois dimensions, circulent des flux hydriques [Dacharry 1996]. Cette approche systémique permet de mettre l'accent sur les processus et les modes de circulation de l'eau. Leur fonctionnement hydrologique peut être décrit et étudié par l'intermédiaire du bilan de l'eau. Ce concept vise à établir une comptabilité des entrées et des sorties d'eau de l'unité hydrologique au cours d'une période de temps donnée [Cosandey 1996]. La formulation la plus générale est proposée à l'échelle d'un système considéré comme fermé, le bassin versant. Elle s'écrit :

$$P = Q + Ev + \Delta R$$

avec:

P, précipitations

Q, écoulements (débits)

Ev, évapotranspiration

$\Delta R$ , variation de la réserve

Il s'agit donc ici de quantifier les paramètres du bilan.

### Données du bilan de l'eau

Les données peuvent être acquises auprès de fournisseurs de données ou collectées in situ après instrumentation des sites. Pour établir des bilans des variations des volumes d'eau qui transitent dans la zone humide, les valeurs **décadaires à mensuelles** sont utilisées. Pour aller plus loin dans la compréhension de la dynamique hydrologique et l'analyse de la réponse du milieu aux différents types de phénomènes météorologiques, il convient de disposer de données **horaires à journalières**.


- **Récupération de données météorologiques et hydrologique de station proche (situation géographique similaire : altitude, versant, vallée, etc.).**

Suivant les normes et recommandations de l'Organisation Météorologique Mondiale, les stations météorologiques des grands réseaux de mesure nationaux disposent de métadonnées permettant de caractériser la validité et qualité de la mesure des différents paramètres. Il convient dans ce cas de disposer de la plus longue série de

données possible en raison des importantes variations interannuelles des conditions climatiques. Nous nous intéresserons donc :


- Aux précipitations en mm
- A l'évapotranspiration en mm ou aux paramètres permettant le calcul suivant la formule de Penman (température, hygrométrie, ensoleillement, etc.)
- Aux débits en mm


*Exemple de fiche descriptive de poste météorologique Météo France*



Édité le 15/05/2017  
Données du 15/05/2017 à 15:00 UTC

**73329001**  
**CHAMBERY-AIX**  
**AERODROME**





**LOCALISATION**

Département: SAVOIE(73)  
Commune: VOGLANS  
Lieu-dit: AERODROME

Latitude: 45°38'29" Nord  
Longitude: 5°52'41" Est  
Date localisation: 29/02/2012

Altitude: 235 m

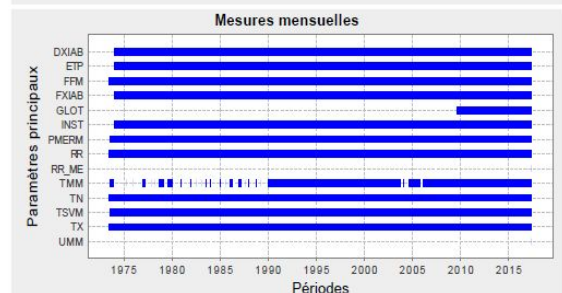
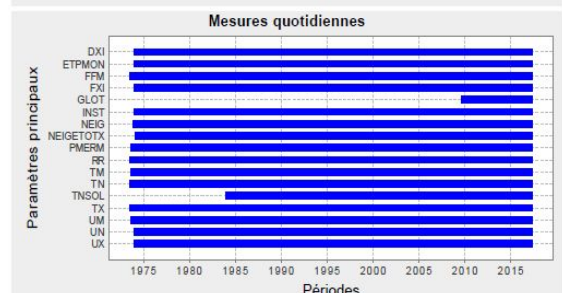
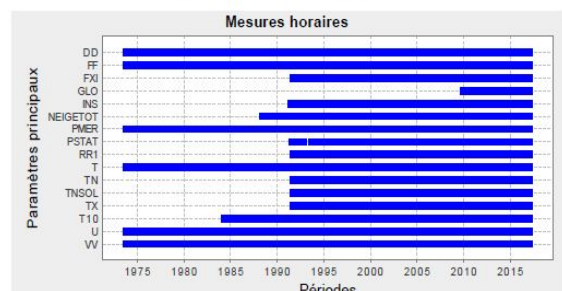
Date d'ouverture: 01/07/1973  
Date de fermeture: Ouvert

EMPLACEMENTS SUCCESSIFS		
Lieu dit (lat,lon,altitude)	du	au
AERODROME (45°38'12" Nord, 5°52'59" Est, 235 m)	01/07/1973	19/09/2007
AERODROME (45°38'29" Nord, 5°52'41" Est, 235 m)	20/09/2007	

QUALITE DU SITE							
Paramètre	Classe(*)	Ref.	Début	Fin	Méthode	Date du relevé	Commentaire
Humidité	2	NR35	25/05/2011		3	24/05/2011	Ombres portées, source de chaleur
Humidité	3	NR35	01/09/1999	24/05/2011		01/09/1999	Ombres portées, source de chaleur
Pluie	1	NR35	01/09/1999		3	24/05/2011	classé aux jumelles le 24 mai 2011
Ray. glo. diff	3	NR35	24/05/2011		3	24/05/2011	première classification
Rugosité e	4	NR35	24/05/2011		3	24/05/2011	première classification
Rugosité n	3	NR35	24/05/2011		3	24/05/2011	première classification
Rugosité c	6	NR35	24/05/2011		3	24/05/2011	première classification
Rugosité s	3	NR35	24/05/2011		3	24/05/2011	première classification
Température	2	NR35	25/05/2011		3	24/05/2011	Ombres portées, source de chaleur
Température	3	NR35	01/09/1999	24/05/2011		01/09/1999	Ombres portées, source de chaleur
Vent	1	NR35	01/09/1999		3	24/05/2011	classé aux jumelles le 24 mai 2011

CLASSE MESURES						
Paramètre	Classe(**)	Ref.	Début	Fin	Date du relevé	Commentaire
Humidité	B	NR37	01/03/2012		01/03/2012	sonde changée le 29/02/2012
Humidité	C	NR37	02/12/2010	29/02/2012	01/12/2010	retard étalonnage
Humidité	B	NS/162/07	02/11/2007	01/12/2010	02/11/2007	
Pluie	B	NS/162/07	02/11/2007		02/11/2007	
Pression	B	NS/162/07	02/11/2007		02/11/2007	
Tempe_a	B	NS/162/07	02/11/2007		02/11/2007	
Température	B	NS/162/07	02/11/2007		02/11/2007	
Tempe_s	B	NS/162/07	02/11/2007		02/11/2007	

Catalogue des mesures principales pour CHAMBERY-AIX (73329001)  
Ces diagrammes ne tiennent pas compte d'une absence de données inférieure à 4 mois.



○ **L'instrumentation**

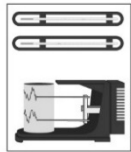
Elle est nécessaire lorsqu'il n'est pas possible de disposer par ailleurs de données collectées dans des conditions similaires au site d'étude. Comme il ne sera pas possible à l'échelle du projet de disposer de longue série temporelle de données, nous nous focaliserons sur l'analyse d'épisodes hydrométéorologiques caractéristiques. Le détail des principes et méthodes de mesure des paramètres suivant est présenté en annexe :

- pluviométrie
- évapotranspiration : capteur de température, d'hygrométrie, d'ensoleillement (radiation et durée d'ensoleillement), vent
- débit : seuil et capteur de hauteur d'eau
- stockage : piézomètre et capteur de niveau d'eau

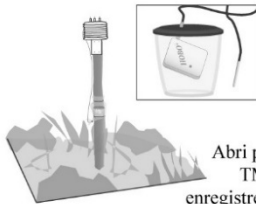
## EQUIPEMENT DES BASSINS VERSANTS



Abri pour thermomètres et thermo-hygromètres  
Précis mécanique



Température et hygrométrie



Apport énergétique solaire et albédo



Vitesse et gradient de vent

Albédomètre CN7B

Anémomètre APM 22/11

Formule de Penman-Monteih (1981)

$$ETO = \frac{(Rn \cdot \Delta + \frac{\rho \cdot Cp \cdot \delta e}{ra})}{(\lambda(\Delta + \gamma))}$$

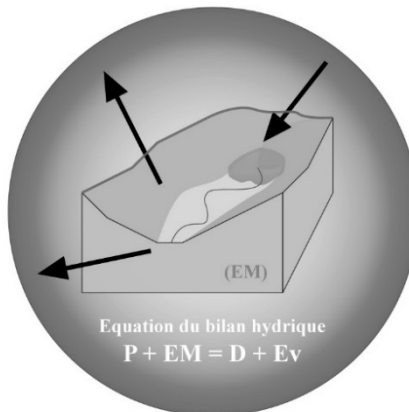
$C_p$  : capacité thermique de l'air humide [ $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{C}^{\circ-1}$ ]  
 $\delta e$  : différence entre pression de vapeur saturante et pression de vapeur effective dans l'air [kPa]  
 $\lambda$  : chaleur latente de vaporisation de l'eau [ $\text{MJ.kg}^{-1}$ ]  
 $\gamma$  : constante psychrométrique [ $\text{kPa.C}^{\circ-1}$ ]  
 $Rn$  : rayonnement net [ $\text{W.m}^{-2}$ ]  
 $\Delta$  : pente de la courbe de pression de vapeur à la température moyenne de l'air [ $\text{kPa.C}^{\circ-1}$ ]  
 $\rho$  : densité de l'air à pression constante [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]

### Evapotranspiration

Mesure du volume d'eau évaporée et consommée par la végétation

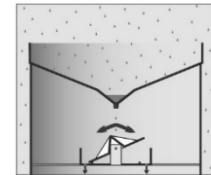
(EV)

(P)



### Précipitations

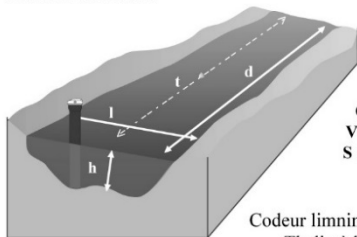
Mesure du volume d'eau précipitée sous forme liquide ou solide



Fonctionnement du pluviographe à augets basculeurs

### Débits

Mesure du volume d'eau qui s'écoule à l'exutoire du bassin versant (D)



Q : débit  
V : vitesse  
S : surface

Codeur limnimétrique Thalimède - OTT

$$Q = S * V$$

en  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$

avec  $S = h * l$  en  $\text{m}^2$   
 $V = d / t$  en  $\text{m.s}^{-1}$

h : hauteur de la section  
l : largeur de la section  
d : longueur de la section  
t : temps

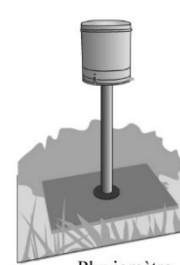


### Stock d'eau

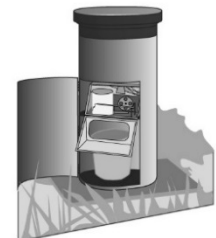
Mesure du volume d'eau stocké dans le bassin versant



Piezomètres en PVC à relevé manuel ou équipé d'un codeur Thalimède - OTT



Pluviomètre à enregistrements numérique type 3029/2



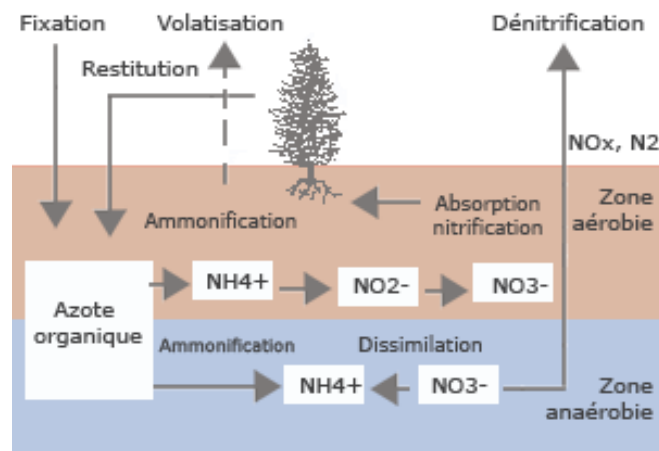
Pluviomètre et pluviographe type 3020 Précis mécanique



Station sur le site de Gourgon

## Le fonctionnement biogéochimique

De par les processus physiques et chimiques qui se produisent dans zones humides, elles interviennent fortement sur les flux de matières minérales et organiques. Les microorganismes (bactéries, champignons...) présents dans les sols saturés en eau, dépourvus d'oxygène, mettent en place des processus d'oxydoréduction qui leur permettent de respirer et transforment les composés contenant de l'oxygène (nitrates, oxyde de fer, sulfate...) en minéraux sont assimilables par les animaux et les organes souterrains des végétaux (racines...). Ce fonctionnement biogéochimique se traduit par de propriétés spécifiques du milieu vis-à-vis des différents cycles de la matière et notamment du carbone, de l'azote et du phosphore. Ainsi, on leur confère un rôle important pour recycler et transformer les nutriments, stocker le carbone et produire une biomasse riche et diversifiée.



*Exemple du cycle de l'azote*

## Données du fonctionnement biogéochimique

Dans le projet notre attention portera sur le sol et plus particulièrement sur le stockage de carbone, ainsi que sur biomasse produite.

### Le sol

C'est dans les premiers centimètres de sol, lieu d'interface de l'atmosphère, de l'hydrosphère et de la lithosphère, que se produisent les processus biogéochimiques qui nous intéressent. Il convient donc de bien connaître ce sol qui peut être classé dans deux grandes catégories pour les zones humides. En effet, si l'hydromorphie, c'est-à-dire la formation de marques physiques d'une saturation régulière en eau, est commune à toutes les zones humides, elle se traduit soit par l'accumulation de matières organiques, soit par des phénomènes d'oxydoréduction réduction du fer. Les opérations suivantes sont proposées :

- l'étude stratigraphique
  - description pédologique des horizons du sol
  - sondage de profondeur du sol hydromorphe, cartographie de l'épaisseur du sol hydromorphe
- prélèvements et analyses pour caractériser le sol

- taux de matière organique, teneur en argiles, limons et sables

Le taux de matière minérale et de matière organique est un élément déterminant du comportement hydraulique du sol et traduit la dynamique d'accumulation de la matière. Pour déterminer les proportions de ces différentes fractions qui composent le sol, les échantillons sont analysés en laboratoire en réalisant une perte au feu.

- porosité totale et porosité efficace

La porosité correspond à la présence de vides interstitiels interconnectés ou non dans un sol ou une roche et s'exprime par le rapport du volume de ces vides au volume total du milieu [Margat 2000]. Pour la tourbe par exemple, elle est rarement inférieure à 0,8, alors que pour un sol minéral elle varie entre 0,4 et 0,6 [Letts et al. 2000]. De cette porosité dépend la quantité d'eau que peut contenir le sol. On peut exprimer la teneur en eau du sol [ $\eta$ ] en établissant le rapport du volume de l'eau [Ve] contenu dans un volume donné de tourbe [Vt] [Ivanov 1981] :

$$\eta = \frac{V_e}{V_t}$$

- datation 14C de la base de l'horizon tourbeux, s'il existe.

De nombreux laboratoires réalisent des datations par le radiocarbone, technique bien adaptée à la datation de la mise en place des zones humides. En effet, leur développement coïncide bien avec le domaine d'application de la méthode par le carbone 14, de quelques centaines d'années jusqu'à 50000 ans.

### La biodiversité

Pour analyser les services d'approvisionnement (alimentation, matière première), d'appui (biodiversité) et ensuite étudier les services culturels (patrimoine, esthétique, éducatif, récréatifs), l'ensemble des données disponibles suivantes sont mobilisées :

- Inventaires naturalistes
  - liste de l'ensemble des espèces connues sur le site (faune/flore)
  - liste des habitats (et cartographie si elle existe)
- Indicateurs d'état du fonctionnement
  - BAO de suivi de l'état des zones humides

Il s'agit d'un recueil d'indicateurs, associant protocole de collecte de données, méthode de calcul de valeurs indicatrices et éléments d'analyse et d'interprétations, développé et déployé sur le territoire de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse depuis 2010.



## Données sur l'utilisation des zones humides

L'évaluation de la valorisation socio-économique des zones humides nécessite d'acquérir des données économiques sur les produits issus des sites d'étude, mais également de s'intéresser à des domaines plus difficiles à cerner comme la fréquentation ou la perception des zones humides par les populations locales. Si des exemples d'études de ce type existent, elles restent rares. Une méthodologie est à construire et s'appuiera sur les données suivantes :

- Approvisionnement
  - Surface agricole du site
  - Production de fourrage
  - Production forestière
- Culture et agrément
  - Identification et évaluation des activités de loisir (Enquête, questionnaire)
  - Fréquentation du site (installation d'écocompteur)

## Les sites d'étude

1. Les marais de Chautagne (220 m). Site Natura 2000 N° FR8201771 - Ensemble lac du Bourget, Chautagne, Rhône. Habitats : bas marais alcalins [54.2], cladiaies [53.3], magnocariçaias [53.2], prairies à molinie [37.31], roselières sèches [53.112] et terrains cultivés.

2. Le marais des Chassettes (300 m). Habitats : aulnaies glutineuses à reine des prés [44.311], prairies à molinie [37.31] et magnocariçaias [53.2].

3. Le marais de la Plesse (578 m). Site Natura 2000 N°FR8201772 - Réseau de zones humides de l'Albanais. Habitats : magnocariçaias [53.2], mégaphorbiaies à reine des prés [37.1], roselières sèches [53.112].

4. La tourbière de Montendry (1330 m). Site Natura 2000 N°FR8201781 - Réseau de zones humides et alluviales des Hurtières. Habitats : prairies à molinie [37.31], radeaux à *Menyanthes trifoliata* et *Potentilla palustris* [54.59] et chenaux, cuvettes profondes [51.121].

5. Tourbière du Plan de l'Eau (1750 m). Habitats : tourbières basses à *Carex davalliana* [54.23] et tourbières tremblantes basiclines à *Carex rostrata* et sphaignes [54.5321].

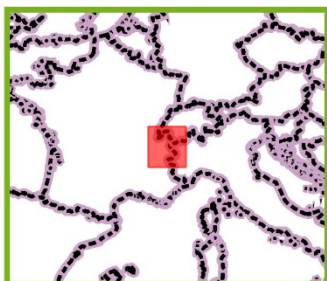
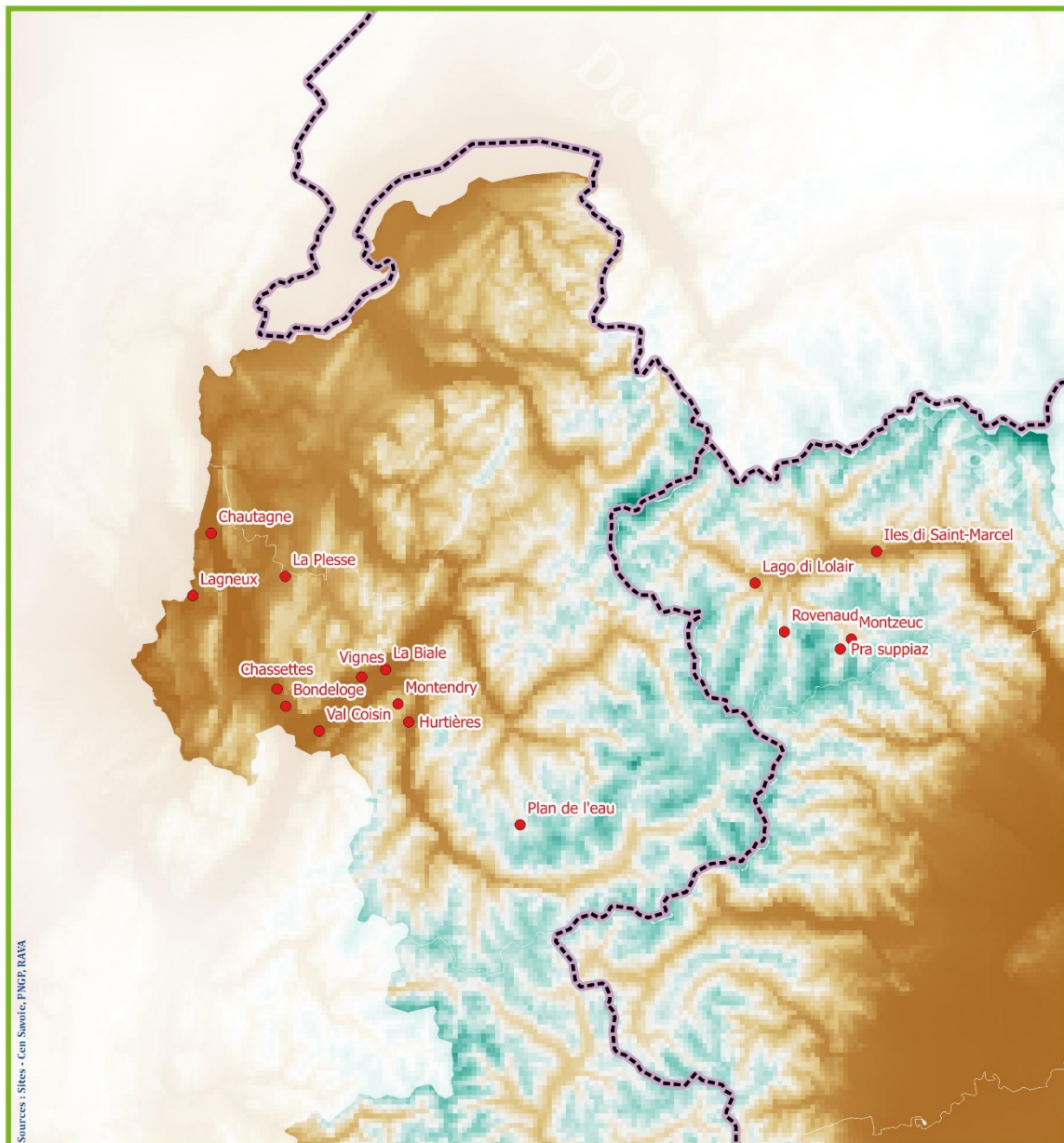
6. .

7. .

### ***Équipement et acquisition de données***

Site		Météorologie	Débitométrie	Piézométrie	Etude sol	Fréquentation
1	Marais de Chautagne	Déjà équipé	A instrumenter	Déjà équipé	Existante	/
2	Marais des Chassettes	Météo-France	A instrumenter	Déjà équipé	A réaliser	A réaliser
3	Marais de la Plesse	Météo-France	A instrumenter	A instrumenter	A réaliser	/
4	Tourbière de Montendry	A instrumenter	A instrumenter	A instrumenter	A réaliser	/
5	Tourbière du Plan de l'Eau	Météo-France	Banque Hydro	Déjà équipé	A réaliser	A Réaliser
6						
7						

## RestHALp - localisation des sites du projet



### Légende

altitudes

- 100
- 1075
- 2050
- 3025
- 4000

Frontières

0 10 20 30 km



RestHALp

Février 2016

LOC

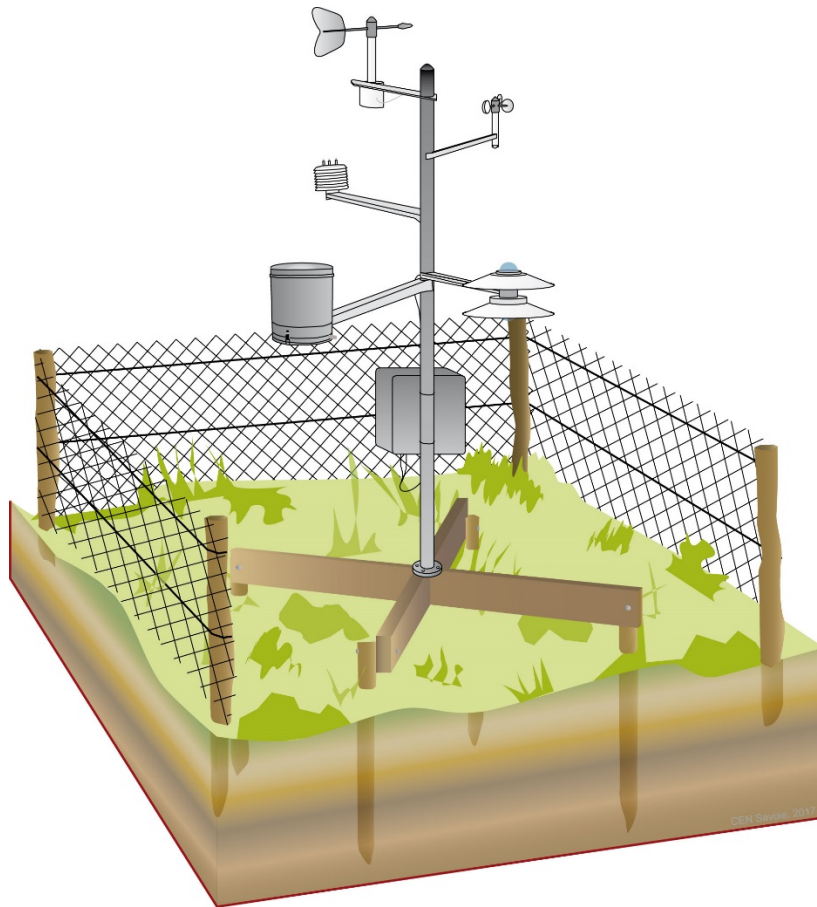
... établir une fiche descriptive et rassembler les données SIG suivante :

- localisation de la zone humide : polygone et point (centroïde)
- attributs : identifiant, nom, structure référente

# Annexe 1

## La mesure des paramètres hydrologiques : fondements et procédures

L'installation de matériel en zone humide, sur des sols peu portants, parfois inondés et généralement loin de réseau d'alimentation électrique, génère quelques contraintes qu'il convient d'avoir à l'esprit. Les différents instruments de mesure des variables climatiques doivent être mis à niveau pour éviter les erreurs de mesure. Il est conseillé de les fixer solidement au sol. Nous proposons donc d'installer des plates formes robustes sur pilotis pour accueillir les différents appareils de mesure. Pour éviter les problèmes liés au gibier ou à la malveillance une clôture de la station est fortement conseillée.



*Dispositif d'installation des appareils de mesure sur pilotis*

### Les apports d'eau : la pluviométrie

Il s'agit de mesurer l'ensemble des eaux météoriques qui tombent sur la surface du sol sous forme liquide (pluie) ou solide (neige). La lame d'eau précipitée est exprimée en millimètres et correspond à un volume d'un litre d'eau uniformément réparti sur une surface d'un mètre carré. L'instrument de base de la mesure des précipitations est le pluviomètre. Il est constitué d'un réceptacle, généralement en forme d'entonnoir, dont la surface est calibrée. L'eau collectée est ensuite mesurée et enregistrée. Parmi les différents dispositifs de mesure existants (à auget, à pesée, à siphon), nous avons choisi, pour des raisons techniques et économiques, d'équiper les sites d'étude avec des

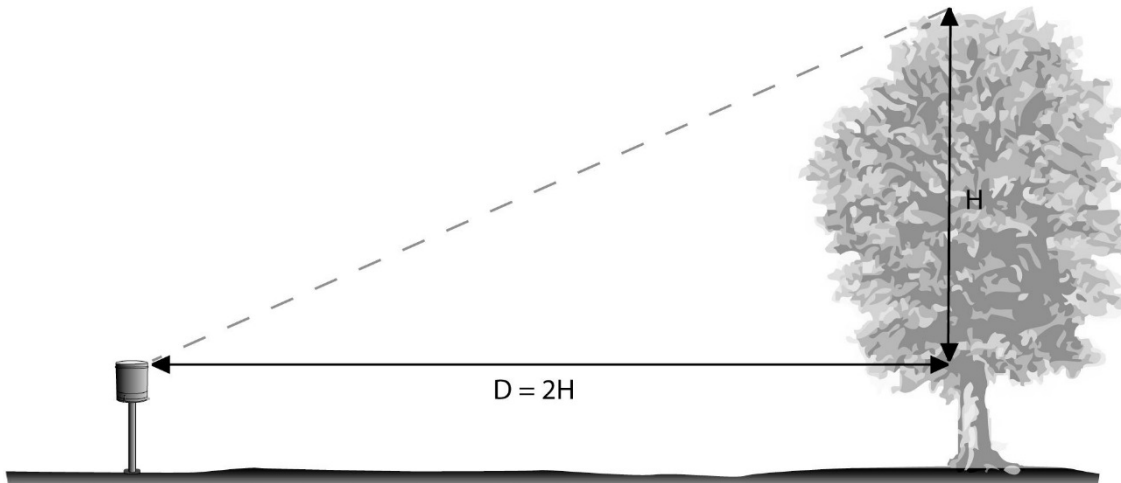
pluviomètres à auget basculeur. Ce système de mesure très largement utilisé, est un dispositif ancien et éprouvé. Inventé au XVII<sup>e</sup> siècle par C. Wren, et perfectionné par R. Hooke, il mesure l'eau précipitée en enregistrant chaque basculement d'un auget calibré.

Si la quantité de précipitations est un paramètre facile à mesurer, il ne faut pas négliger les erreurs de mesure liées aux caractéristiques et/ou au positionnement de l'appareil. En dehors des problèmes liés au réglage des appareils, il s'agit surtout d'erreurs dues à la captation des précipitations. Le vent est souvent en cause. Il entraîne l'inclinaison de la pluie et provoque des turbulences autour de l'appareil. L'écart entre la hauteur d'eau mesurée par le pluviomètre et celle qui atteint réellement le sol peut varier de 3 à 30% selon l'Organisation Mondiale de la Météorologie et dépasse 50% lorsque le vent atteint 90 km.h<sup>-1</sup> (Royal Meteorological Society). Le problème est encore plus important lorsque les précipitations sont neigeuses (de 5 à 80% d'erreur [Musy et Higy 2004]). La neige très légère peut complètement éviter le réceptacle du pluviomètre pour aller s'accumuler quelques mètres plus loin près d'un obstacle. Des écrans anti-vent ont été développés pour supprimer les turbulences autour de l'appareil et maintenir la verticalité des précipitations au-dessus du réceptacle. Lorsque les précipitations sont neigeuses, il est nécessaire de disposer d'un système de chauffage. Il permet de faire fondre la neige, pour qu'il n'y ait pas de décalage entre l'occurrence des précipitations et le basculement de l'auget, et évite ainsi qu'elle ne s'accumule et déborde du réceptacle entraînant la perte de l'information. Toutefois, ce dispositif est coûteux et contraignant. Gourmand en énergie, il conditionne la localisation des postes de mesure à proximité des sources d'alimentation électrique (hameau, village, etc.).

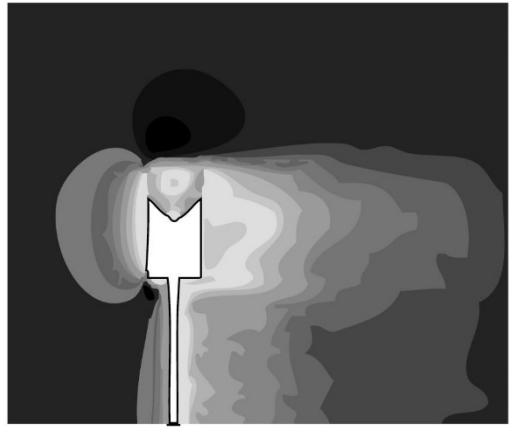
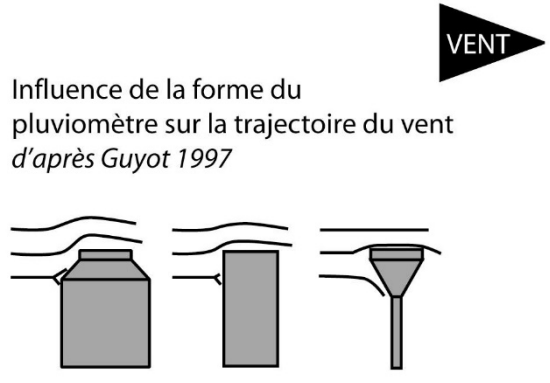
Dans certaines situations météorologiques, comme les orages, l'eau frappe violemment la paroi du réceptacle et une partie des précipitations peut rejaillir hors du réceptacle (1% d'erreur [Musy et Higy 2004]). Il est donc nécessaire d'apporter un soin particulier à la localisation et à l'installation du pluviomètre. Il est indispensable de s'assurer de l'horizontalité du dispositif car une faible inclinaison du support peut influencer sur le basculement de l'auget et fausser les mesures. Ensuite, il faut que le site soit bien dégagé, pour que la captation ne soit pas influencée par la présence d'un obstacle (turbulences). En pratique, on recommande que cette distance soit supérieure à deux fois la hauteur des obstacles voisins [Remenerias 1976]. Pour que la mesure soit bien représentative de l'ensemble du bassin versant, il faut positionner avec soin l'appareil et éviter les secteurs pentus et ventés.

### Les pertes d'eau : l'évapotranspiration

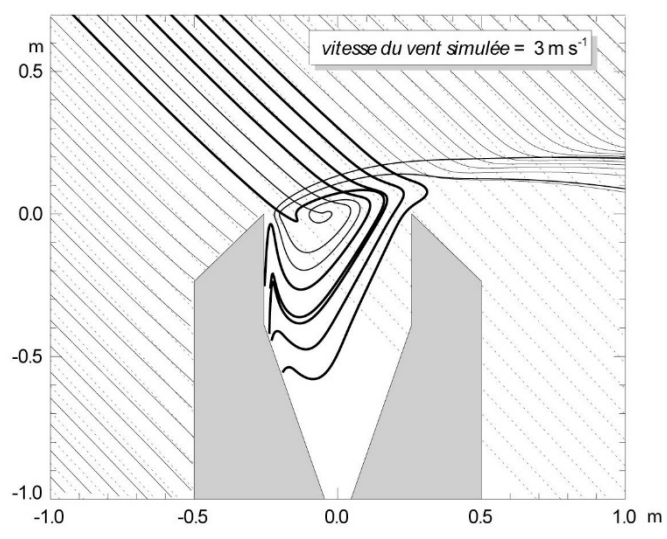
L'évapotranspiration est un processus complexe de transfert de l'eau de l'hydrosphère et de la biosphère vers l'atmosphère [Cosandey et Robinson 2000]. C'est une composante fondamentale du cycle de l'eau. Elle se compose d'une évaporation physique (eau libre, neige, glace) et d'une évaporation physiologique (transpiration des végétaux). Ces processus dépendent des conditions météorologiques, de la disponibilité de l'eau dans le sol, mais également des propriétés physiques et physiologiques de la couverture végétale. Il faut donc distinguer l'évapotranspiration potentielle ou de référence ( $ET_0$ ), qui désigne la quantité d'eau maximale susceptible d'être évaporée et transpirée par un couvert végétal continu en pleine croissance et bien alimenté en eau, et l'évapotranspiration réelle (ETR) qui dépend du niveau d'humidité du sol et du stade phénologique et sanitaire des plantes. L'évapotranspiration est un paramètre difficile à quantifier que l'on peut mesurer directement *in situ* ou estimer par différentes méthodes de calcul.



Distance aux obstacles d'installation d'un pluviomètre  
d'après Roche 1963



Simulation des vitesses du vent autour  
d'un pluviomètre  
d'après Newman et Kucera, 2005



Simulation de la trajectoire des gouttes de pluie  
d'après Krajewski, Kruger et Nespor

Porteret, 2008 

En effet, il existe des dispositifs de mesure directe de l'évaporation et de la transpiration des végétaux. Il s'agit par exemple des bacs d'évaporation ou des évaporimètres, mais ces dispositifs demandent un suivi important difficilement possible sur nos sites montagneux et/ou isolés. Les lysimètres, cuves étanches enterrées, ouvertes sur la surface du sol, permettent de déduire la quantité d'eau évapotranspirée à partir des variations du stock d'eau du sol couvert de végétation. Complexe et coûteux à mettre en œuvre, parce qu'il nécessite d'importants travaux pour le creusement et l'installation de la cuve, ce dispositif n'a pas été envisagé pour nos sites d'étude.

Généralement, et c'est la méthode que nous avons choisie, l'évapotranspiration est une valeur obtenue de manière indirecte par calculs. Diverses formules, empiriques ou analytiques, ont été développées.

### Calcul de l'évapotranspiration potentielle

Il s'agit de calculer l'eau susceptible d'être perdue sous forme de vapeur d'eau lorsque sa disponibilité pour la végétation n'est pas un facteur limitant. Cette notion de consommation potentielle en eau a été introduite par Penman (1948). Elle ne dépend que des facteurs climatiques. En France, elle est calculée à partir de mesures météorologiques effectuées au-dessus d'un gazon (fétuque manade) couvrant complètement le sol, en phase active, et bien alimenté en eau. Il existe diverses formules de calcul de l'ETP.

Les formules de calcul empiriques ou semi-empiriques reposent sur une analyse statistique des observations lysimétriques pour les zones géographiques auxquelles elles s'appliquent. Ces formules sont faciles à mettre en œuvre, car elles nécessitent la connaissance d'un nombre minimum de paramètres climatiques. C'est le cas, par exemple, des formules de Thornthwaite, de Braney Criddle qui ne demandent que la mesure de la température moyenne mensuelle (voir annexe). Mais nous ne développerons ici que la formule de Turc (1961) qui permet d'obtenir de bonnes estimations de l' $ET_0$  dans les régions tempérées, à un pas de temps mensuel [Musy et Higy 2004]. Elle nécessite la mesure des températures moyennes et du rayonnement global et s'écrit :

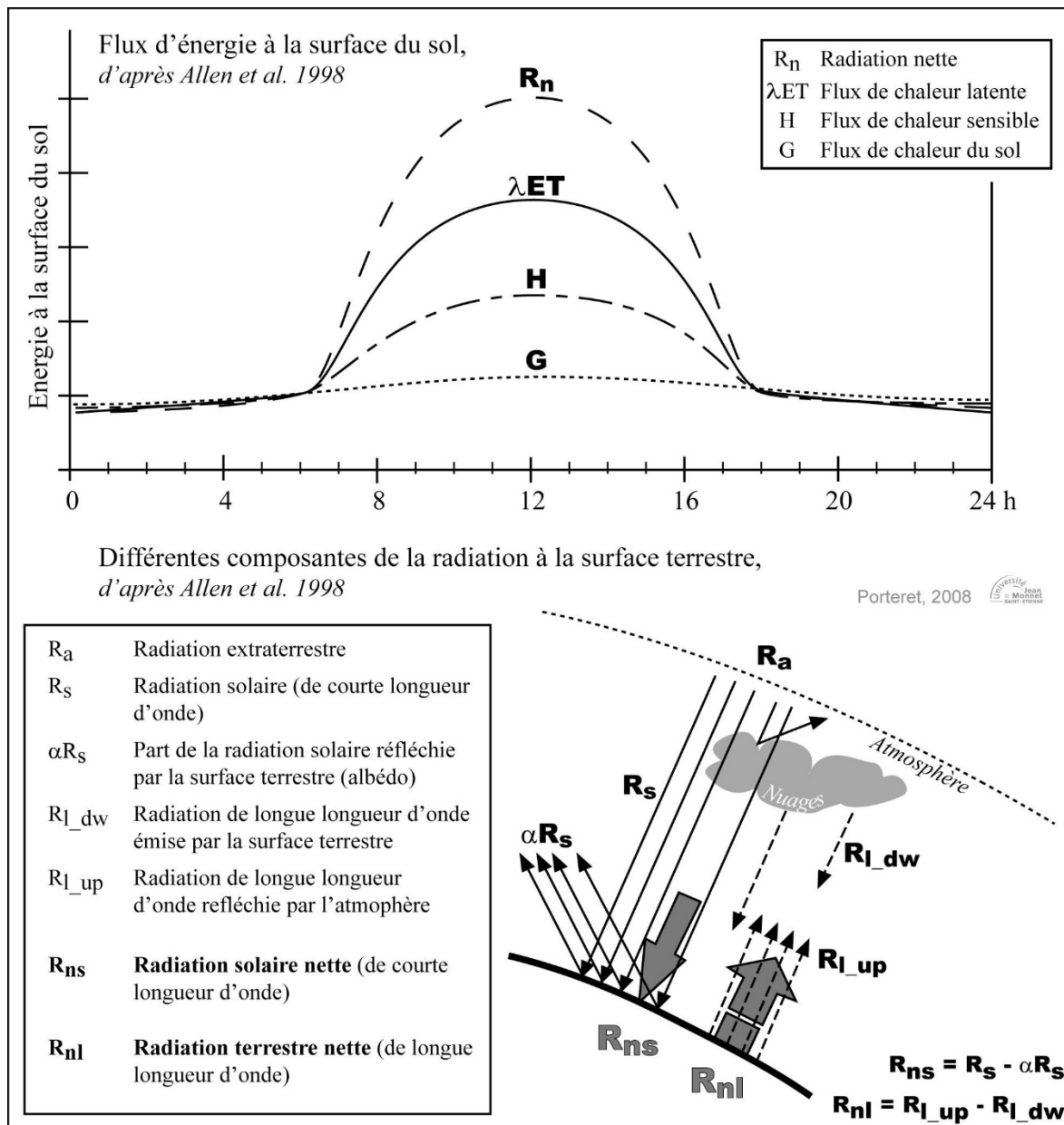
$$ET_0 = k \frac{t}{t + 15} (I_g + 50)$$

Cette formulation simple reste toutefois limitée dès lors que l'on veut étudier le phénomène à des pas de temps plus fins.

- avec
- k** : coefficient relatif au pas de temps de calcul  
0.37 pour février  
0.4 pour les autres mois  
0.13 pour le calcul de l'ETP décadaire
  - t** : température moyenne mensuelle
  - I<sub>g</sub>** : radiation solaire globale en cal / cm<sup>2</sup> / j

si **I<sub>g</sub>** n'est pas mesurée on peut l'évaluer avec :  $I_g = I_{ga} \left( 0.18 + 0.62 \frac{h}{H} \right)$

- h** : durée d'insolation mensuelle réelle en heure
  - H** : durée théorique de l'ensoleillement mensuel en heure
  - I<sub>ga</sub>** : radiation globale théorique
- Ces deux derniers paramètres peuvent être obtenus à l'aide d'abaque



### Les flux d'énergie à la surface terrestre

Pour calculer l'évapotranspiration potentielle de façon plus précise (pas de temps journalier par exemple), il faut utiliser les formules de type analytique. Il s'agit de formulations mathématiques des processus physiques qui régissent l'évaporation et la transpiration. Elles sont fondées sur le bilan d'énergie à la surface du système sol/végétation qui permet de calculer la quantité de vapeur d'eau que l'air peut absorber compte tenu de l'énergie disponible, de son déficit de saturation et de la turbulence. Ces formules à base physique sont donc beaucoup plus complexes à mettre en œuvre parce qu'elles nécessitent la mesure d'un nombre de paramètres importants.

Pour connaître la quantité de chaleur disponible, il faut mesurer le rayonnement net, c'est à dire la quantité d'énergie radiative disponible à la surface de la terre ( $R_n$ ). Ce rayonnement net correspond de manière simplifiée à la fraction du rayonnement incident global absorbée par la surface terrestre. La capacité de l'air à stocker l'eau s'exprime par l'humidité spécifique et correspond à l'humidité en



kilogramme d'eau par kilogramme d'air humide. La pression atmosphérique et le vent interviennent dans le calcul de l'humidité spécifique en modifiant la capacité de stockage de l'eau par l'air.

Nous avons utilisé la formule FAO Penman-Monteih (1981). Elle est dérivée de la formule originale de Penman-Monteih pour laquelle on a simplifié les termes des résistances aérodynamique et de surface. Elle est proposée comme formule standard de calcul de l'évapotranspiration et a montré sa fiabilité quel que soit le type de climat. Une notice détaillée permet sa mise en œuvre [Allen et al. 1998]. Pour l'évapotranspiration journalière, nous utiliserons :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

$R_n$  : rayonnement net [ $W.m^{-2}$ ]

$\Delta$  : pente de la courbe de pression de vapeur à la température moyenne de l'air [ $kPa.C^{-1}$ ]

$T$  : température [ $^{\circ}C$ ]

$u_2$  : vitesse du vent à 2 mètre du sol [ $m.s^{-1}$ ]

$(e_s - e_a)$  : différence entre la pression de vapeur saturante et la pression de vapeur effective dans l'air [ $kPa$ ]

$\gamma$  : constante psychrométrique [ $kPa.C^{-1}$ ]

Pour l'évapotranspiration horaire, la formule s'écrit ainsi :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^{\circ}(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

$T_{hr}$  : température horaire [ $^{\circ}C$ ]

$e^{\circ}(T_{hr})$  : pression de vapeur saturante pour la température horaire  $T_{hr}$  [ $kPa$ ]

### Calcul de l'évapotranspiration réelle

Une première approche de l'ETR peut être proposée avec l'utilisation de la formule de Turc (en mm/mois) :

$$ETR = \frac{P}{\left(0.9 + \frac{P^2}{L^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{avec :} \quad \begin{array}{l} L = 0.05T^3 + 25T + 300 \\ P \quad \text{précipitations en mm} \\ T \quad \text{température moyenne en } ^{\circ}C \end{array}$$

Pour quantifier plus précisément l'évapotranspiration réelle, nous avons utilisé la méthode du rapport de Bowen et du bilan global d'énergie. Cette méthode, qui permet la détermination de l'ETR sur de courtes périodes, a largement été utilisée pour l'étude des tourbières hautes [Bavina 1967, Beloserkovskaya et al. 1969, Price 1991, Campbell et Williamson 1997, Thompson et al. 1999, Kellner 2001]. Le principe est de déterminer la part d'énergie consommée par l'évapotranspiration et d'en déduire la lame d'eau évaporée. Pour cela, on considère que l'évaporation d'un millimètre d'eau consomme  $59 \text{ cal.cm}^{-2}$ . Les comparaisons des résultats avec les valeurs obtenues par des lysimètres confirment la fiabilité de la méthode [Pruitt et al. 1987].

Pour aller à l'essentiel, nous ne ferons apparaître ici que les équations du bilan d'énergie et du rapport de Bowen permettant d'obtenir la formule de calcul de l'ETR. Toutefois, l'ensemble de la démonstration est proposé en annexe. L'équation du bilan d'énergie est formulée de la manière suivante par Brutsaert (1982) :

$$\mathbf{Rn} = \mathbf{H} + \mathbf{L} + \mathbf{L} - \mathbf{IF} - \mathbf{AD} + \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t}$$

ou

$$\mathbf{Rn} = \mathbf{RS}(1 - \alpha_s) - (\epsilon_s - \epsilon_a)$$

H : densité de flux de chaleur sensible

L : densité de flux de chaleur latente

G : flux de chaleur dans le sol

IF : densité de flux photochimique

Ad : énergie apportée par advection

$\delta W / \delta t$  : stockage d'énergie

Le rapport de Bowen s'écrit :

$$\beta = \frac{\text{Flux.de.chaleur.sensible}}{\text{Flux.de.chaleur.latente.de.vaporisation}} = \frac{\mathbf{H}}{\lambda \mathbf{ET}}$$

D'où la formule de calcul de l'ETR

$$\mathbf{ETR} = \frac{\mathbf{R}_n - \mathbf{G}}{\lambda(1 + \beta)}$$

Le calcul nécessite de connaître **Rn** (rayonnement net en J.m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>), **G** (fraction transportée vers le sol), **T** (température K = °C + 273,15) et **e** (pression de vapeur).

#### L'acquisition des données nécessaires au calcul de l'évapotranspiration

Le calcul de l'évapotranspiration réelle et potentielle par les formules analytiques nécessite la mesure de différents paramètres climatiques que détailler ici. Il s'agit de la température, de la vitesse du vent, de la pression, du rayonnement global, de l'humidité et de l'albédo.

#### Les températures et l'hygrométrie

La température et l'hygrométrie sont des paramètres indispensables pour le calcul de l'évapotranspiration. Ils conditionnent de nombreux processus physiques tel que les changements d'états de l'eau ou l'activité de la végétation, qui sont autant d'éléments qui influent sur le bilan de l'eau. C'est durant l'antiquité grecque que fut inventé le premier instrument de mesure de la température (Galien), mais les premiers thermomètres de précision voient le jour à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, après l'invention des échelles de mesure utilisées actuellement (1714 pour le degré Fahrenheit et 1745 pour le degré Celsius). Les systèmes de mesure automatisés apparaissent à partir de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Si longtemps les mesures étaient réalisées par un procédé mécanique lié à la dilatation d'une lame métallique, aujourd'hui l'ensemble des instruments repose sur la conversion des températures en énergie électrique (résistivité d'un filament de platine enroulé autour d'une tige de verre – sonde PT100). Pour l'hygrométrie, il s'agit de sondes à capteurs capacitifs en couches minces linéarisées. Compensées en température, elles ont un temps de réponse rapide à la variation d'humidité relative. La mesure des températures et de l'hygrométrie s'effectue dans des abris normalisés à 1,5 m du sol. Il s'agit d'éviter de soumettre les sondes aux rayonnements directs ou indirects, tout en permettant le renouvellement de l'air.

### *La radiation solaire : pyranomètre, albédomètre*

La quantité d'énergie solaire est mesurée par les pyranomètres. Sensible à la lumière naturelle, ils expriment la puissance du rayonnement solaire total en Watts/m<sup>2</sup>. L'assemblage de deux pyranomètres, l'un orienté vers le ciel, l'autre vers le sol constitue un albédomètre. Il permet de faire le rapport entre le rayonnement réfléchi par la surface du sol et le rayonnement global dans le spectre visible et moyen infrarouge de la lumière (300 à 3000 nm). Les pyranomètres sont fixés à l'extrémité d'un mât télescopique peint en noir, pour éviter tous rayonnements réfléchis parasites et ils sont orientés vers l'équateur (sud). Ils sont placés à 1,5 m au-dessus du sol recouvert d'une végétation herbacée rase. Le mât télescopique doit être solidement fixé au sol pour conserver l'horizontalité des pyranomètres et éviter les erreurs de mesure lorsque le soleil a un faible azimut. L'enregistrement des données est effectué par un datalogger. L'entretien de l'appareil est relativement contraignant, puisqu'il faut, autant que possible, enlever le givre ou la rosée qui peut se former à la surface des dômes des pyranomètres et s'assurer que les capteurs restent secs.

### *La vitesse du vent*

Le vent a un effet desséchant sur la végétation et contribue largement à l'accentuation du processus d'évapotranspiration. Les formules de calcul de l'évapotranspiration nécessitent souvent la connaissance du vent passé par jour (distance parcourue par le vent en 24h). La mesure de la vitesse du vent s'effectue avec un anémomètre. Les moulinets à coupelles sont aujourd'hui concurrencés par les systèmes à ultrasons. Cette vitesse est influencée par la rugosité de la surface du sol et de la végétation. Avec l'altitude, cette vitesse augmente puisque les obstacles sont moins nombreux.

### *Les écoulements et les variations des nappes*

Les variables hydrologiques du bilan de l'eau sont les volumes d'eau écoulés (Q) et les volumes d'eau stockés dans le bassin versant ( $\Delta S$ ). La mesure des débits, qui exprime la quantité d'eau qui s'écoule pour un laps de temps donné, s'effectue suivant les protocoles et les méthodes de l'hydrométrie. Les choses sont plus complexes pour l'évaluation des réserves en eau contenue dans la tranche superficielle du sol (réserve hydrique) et du sous-sol (réserve hydrologique). Nous présenterons donc le dispositif que nous avons choisi de mettre en place pour analyser les variations des stocks d'eau dans les sols et dans la tourbe.

### *Mesure des débits : hydrométrie*

La mesure des débits nous indique la quantité d'eau qui s'écoule dans le réseau hydrographique au point de mesure pour une unité de temps. Mis à part la mesure au seau et au chronomètre qui permet de connaître directement le débit en unité de volume d'eau écoulée par unité de temps, les nombreuses méthodes existantes pour mesurer les débits (Q) nécessitent de mesurer deux variables : la surface de la section d'écoulement (S) et la vitesse d'écoulement (V), suivant :

$$Q = S \times V$$

Ils s'expriment généralement en mètres cubes (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) ou en litres par seconde (l.s<sup>-1</sup>). La mesure de la surface de la section d'écoulement ne présente pas de difficulté pour les petits cours d'eau de nos têtes de bassins versants (mesure de la profondeur moyenne de la section multipliée par sa largeur moyenne). Autant que possible, les différents manuels d'hydrométrie recommandent de choisir une section d'écoulement la plus stable possible car la géométrie du lit peut être considérablement modifiée lors de crues importantes. Si cette difficulté aurait pu être résolue par la mise en place

d'ouvrages calibrés (canal ou déversoir), cela n'a pas été possible pour des raisons techniques, réglementaires et parce que nous avons la volonté d'installer des dispositifs légers et amovibles. Nous avons donc effectué des mesures fréquentes de la section en travers.

S'il existe de nombreuses méthodes pour la mesure de la vitesse d'écoulement, elles ne sont pas toutes applicables pour les petits rus qui drainent les têtes de bassin versant que nous avons étudiées. En effet, l'utilisation de moulinets à hélice et autres courantomètres est impossible une majeure partie de l'année, parce que le niveau d'eau et/ou les vitesses sont trop faibles (<5 cm). Il existe aussi des méthodes physico-chimiques par dilutions (injection et mesure de la variation de la concentration d'un corps en solution dans le cours d'eau). Mais la méthode la plus simple pour notre type d'étude consiste à mesurer le temps de parcours d'un flotteur à la surface de l'eau. Avec cette méthode, on ne mesure que la vitesse de surface. S'il existe des coefficients pour obtenir la vitesse moyenne de l'écoulement dans la section (0,4 à 0,9 fois la vitesse de surface [Musy et Higy 2004]), ils ne s'applique pas lorsque la tranche d'eau dans la section est faible (10 cm), comme c'est le cas la majeure partie du temps pour notre étude. Cette méthode présente donc des risques d'erreur, mais donne de bonnes approximations du débit.

Pour passer de la mesure ponctuelle à la mesure en continu des débits, il est nécessaire d'enregistrer en continu les variations de la hauteur d'eau. En effet, il existe une relation entre le débit et la hauteur d'eau que l'on établit par une courbe de tarage. La courbe de tarage est construite à partir des mesures ponctuelles de débit effectuées au cours de l'année hydrologique. Un minimum de dix points, répartis entre les hautes et les basses eaux, est indispensable à l'établissement de la courbe, mais des vérifications régulières sont nécessaires et plus le nombre de points est important, plus la courbe est de qualité. Pour mesurer les variations de la hauteur d'eau, nous avons utilisé une sonde de pression de type orpheus mini (OTT) installée dans un tube en PVC perforé ( $\varnothing = 50$  mm). Ce tube sert de puits de tranquillisation pour éviter d'enregistrer des fluctuations du niveau de l'eau liées aux remous résultants de l'écoulement. L'ensemble est relativement simple à installer, même si un aménagement sommaire de la section du cours d'eau peut être nécessaire. En effet, pour améliorer la relation entre les hauteurs d'eau et le débit, il est préférable de disposer d'une section de largeur et de profondeur régulière.

#### *Variation des stocks d'eau : piézométrie*

Pour étudier le fonctionnement des nappes souterraines, et plus particulièrement dans les tourbières, nous avons installé des réseaux de piézomètres. Ces puits d'observations permettent de mesurer la hauteur de la nappe d'eau. Il s'agit de tubes en PVC perforés sur toute leur longueur (tous les 10 centimètres). S'il est parfois préconisé de recouvrir le tube d'un géotextile, pour empêcher le matériel du sol de rentrer dans le tube, cela n'est pas nécessaire dans la tourbe, dans la mesure où les perforations sont de petite taille (inférieure à 10 mm). Les tubes dépassent du sol de 30 à 50 centimètres au minimum pour faciliter leur repérage au milieu de la végétation. Une barre métallique traverse le tube de part en part au niveau du sol pour matérialiser le niveau 0 et s'assurer que le piézomètre ne bouge pas au fil du temps. Dans les tubes des capteurs de pression permettent le suivi en continu des variations de la nappe. Le principe général consiste à mesurer la pression absolue en profondeur, correspondant à la somme de la pression atmosphérique et de la pression due à la colonne d'eau, pour la convertir en hauteur. Pour cela, il est donc nécessaire de compenser la pression absolue par la pression atmosphérique enregistrée en surface et ainsi isoler la pression uniquement liée au poids de la colonne d'eau.

## Annexe 2

### Exemple d'équipement et devis

La consultation de quatre entreprises fournissant ce type de matériel a été effectuée par mail le 14 juin 2017. Les quatre candidats ont transmis un devis :

**1 – SDEC France** – BP27 - Tauxigny, ZI de la gare – 37310 REIGNAC SUR INDRE

**2 – OTT France** – Europarc de Pichaury Bât D2, BP 395 – 13 799 AIX-EN-PROVENCE Cedex 3

**3 – HydroServices** – 36 rue du Cerf UBERACH 67350 VAL DE MODER

**4 – C2AI** – Parc de Pivolles, 9 rue de Catalogne – 69153 DECINES Cedex

Le choix du candidat s'effectue sur la base du prix proposé et de la proposition technique.

- La note relative au prix (/10 points) est attribuée à chaque candidat, calculée de la manière suivante :  
$$\text{Note relative} = 10 \times \text{offre la moins-disante} / \text{offre du candidat}$$
- La note technique (/10 points) est attribuée sur la base des descriptifs techniques fournis par les candidats

L'offre considérée comme économiquement et techniquement (précision et robustesse des capteurs) la plus avantageuse sera celle obtenant le meilleur classement (note la plus élevée).

Les offres retenues sont présentées dans les pages suivantes :

- Station météorologique (mesure des précipitations et de calcul de l'évapotranspiration)

EP17/0471

- Sonde de mesure des niveaux d'eau (suivi de la nappe, suivi des débits)

EP17/0470

- Courantomètre (mesure des débits)

EP17/0472

**Conservatoire d'espaces naturels**

de la Savoie

Le Prieuré - B.P. 51

73372 LE BOURGET DU LAC CEDEX

A l'attention de Monsieur Jérôme Porteret

# Devis

N° Devis	Date de devis	Date de validité	Code client	Devise du devis	Votre contact
EP17/0471	21/06/2017	30/09/2017	CPNS	Euro	Ephrem Charmois

Code article	Désignation article	Qté	P.U.	R	Total HT
L.8380.U01	<p><b><u>Capteurs Météo</u></b>            WS700-UMB : T, RH, P atm, Vit &amp; Dir vent, compas, précipitations et rayonnement global.            Capteurs météorologiques intelligents pour mesurer la température de l'air, l'humidité relative, la pression atmosphérique, la vitesse et la direction du vent (avec compas électronique intégré), l'intensité et le type des précipitations, ainsi que le rayonnement global.            La sortie des données soutient les protocoles suivants:            UMB-binaire, UMB-ASCII, SDI-12, MODBUS            Câble de 10 m inclus.</p>	1	2 575.00	10 %	2 317.50
L.8367.TRAV1	<p>Traverse pour fixation WSxxx sur mât, avec 4 colliers de serrage (les capteurs WSxxx peuvent également être fixés au sommet d'un tube de 2")</p>	1	134.00	10 %	120.60
K.369701	<p>CMB1, équerre de jonction mât            Equerre de montage</p>	1	295.00	10 %	265.50
DIVERS	<p>CSD3 + 15m de câble - Kipp &amp; Zonen            CSD 3 Capteur de Durée d'Ensoleillement</p> <p>Selon l'OMM, la durée de l'ensoleillement représente la période durant laquelle le rayonnement solaire direct dépasse le seuil de 120 W/m<sup>2</sup>.</p> <p>Gamme spectrale 400 to 1100 nm            Gamme de températures de service -40 to +70 °C            Signal de sortie 1 ±0.1 V (rayonnement direct &gt; 120 W/m<sup>2</sup>)            Précision &gt; 90% (heures d'ensoleillement mensuelles)            Précision &gt; 90% (signal direct pour ciel clair)            Signal de sortie analogique 1 mV/Wm<sup>2</sup>            Non stabilité &lt; 2 % modification par an</p>	1	2 333.00	10 %	2 099.70









Code article	Désignation article	Qté	P.U.	R	Total HT
	Dépendence en température < 0.1 %/°C Temps de réponse < 1 m s Alimentation 12 VDC				
<b>Sous-Total</b>					<b>4 803.30</b>
<b><u>Hydrosystème A (Alimentation solaire)</u></b>					
66100.001.3.2	HydroSystem A, comprenant : - coffret inox 500x380x210 mm, IP65 (IP66 si vertical) - OTT netDL 500 avec carte d'entrée 4-20 mA (type A1) - régulateur OTT Solar (panneau solaire et batterie non compris) - Intégration des composants et fourniture d'un schéma de câblage	1	2 366.00	10 %	2 129.40
66100.090.2.2	Fixation en inox pour mât de diamètre 1" à 4"	1	66.00	10 %	59.40
65010.046.9.2	Panneau solaire 12V/30W avec fixation mât (2"-4") et 10 m de câble	1	677.00	10 %	609.30
65000.030.3.2	Batterie 12V/26Ah sans entretien avec câble et porte fusible au plomb,gélifiée,étanche,176x167x126 mm,	1	165.00	10 %	148.50
<b>Sous-Total</b>					<b>2 946.60</b>
<b><u>Mât pour support capteur, coffret station et panneau solaire</u></b>					
65000.022.9.2	Mât 2" pour panneau solaire et fixation coffret, avec platine 250 x 250 mm et kit de fixation au sol. Longueur 1,1 m à 3,5 m, à confirmer au dm à la commande (le prix proposé est sur une base de 3 m, impact de 24 € HT par m.)	1	380.00	10 %	342.00
<b>Sous-Total</b>					<b>342.00</b>
FRAIS_TRANS	Frais de port et d'emballage pour livraison en France métropolitaine avec emballage standard 30 € H.T. si commande < 1000 € H.T. 40 € H.T. si commande comprise entre 1000 € et 2000 € H.T. 50 € H.T. si commande comprise entre 2000 € et 4000 € H.T. 60 € H.T. si commande comprise entre 4000 € et 10000 € H.T. au-delà de 10000 € H.T., détermination des frais en fonction du colisage réel.	1	60.00	0 %	60.00
Sincères Salutations					
<b>Devise</b>	<b>Total HT</b>	<b>TVA</b>		<b>Total TTC</b>	
<b>Euro</b>	<b>8 151.90</b>	<b>1 630.38</b>		<b>9 782.28</b>	

# Lufft UMB Sensor Overview

	Wind	Temperature Rel. humidity Air pressure	Temperature Rel. humidity Air pressure Precipitation	Temperature Rel. humidity Air pressure Radiance (solar radiation)
Titan				
	Ventus			WS310
Platinum				
				WS301/303
Gold				
	V200A	WS300	WS400	WS304
Professional				
	WS200		WS401	WS302





Temperature Rel. humidity Air pressure Wind speed Wind direction	Temperature Rel. humidity Air pressure Wind speed Wind direction Radiance (solar radiation)	Temperature Rel. humidity Air pressure Wind speed Wind direction Precipitation	Temperature Rel. humidity Air pressure Wind speed Wind direction Precipitation Radiation	2 Channel EXPANDER	Protocols
				ANACON	UMB MODBUS ASCII SDI12
	WS510				
				ANACON	UMB MODBUS ASCII SDI12
	WS501/503				
				ANACON	UMB MODBUS ASCII SDI12
WS500	WS504	WS600	WS700		
				ANACON	UMB MODBUS ASCII SDI12
	WS502	WS601			



# Lufft WS700-UMB – Temperature, Relative Humidity, Precipitation, Solar Radiation, Air Pressure, Wind, Electronic Compass

From the WS product family of professional intelligent measurement transducers with digital interface for environmental applications.

Integrated design with ventilated radiation protection for measuring:

- Air temperature
- Relative humidity
- Precipitation intensity
- Precipitation type
- Precipitation quantity
- Air pressure
- Wind direction
- Wind speed
- Solar radiation

Relative humidity is measured by means of a capacitive sensor element; a precision NTC measuring element is used to measure air temperature.

Ultrasonic sensor technology is used to take wind measurements.

Measurement output can be accessed by the following protocols:  
UMB-Binary, UMB-ASCII, SDI-12, MODBUS

**One external temperature sensor is connectable.**



All in One  
Aspirated temperature/humidity measurement  
Open communication protocol:  
- UMB-ASCII  
- UMB-Binary  
- SDI-12  
- MODBUS  
- Analogue outputs in combination with 8160.UDAC

Lufft WS700-UMB Smart Weather Sensor			Order No.
<b>WS700-UMB</b>			<b>8380.U01</b>
<b>Technical Data</b>	Dimensions	Ø approx. 150mm, height 317mm	
	Weight	Approx. 1.5kg	
<b>Temperature</b>	Principle	NTC	
	Measuring range	-50 ... 60 °C	
	Accuracy	± 0.2 °C (-20 °C ... +50 °C), otherwise ± 0.5 °C (> -30 °C)	
<b>Relative humidity</b>	Principle	Capacitive	
	Measuring range	0 ... 100% RH	
	Accuracy	± 2% RH	
<b>Precipitation intensity</b>	Resolution	0.1mm/h	
<b>Precipitation quantity</b>	Resolution	0.01mm	
	Measuring range	Drop size 0.3 ... 5mm	
	Reproducibility	Typ. >90%	
<b>Precipitation type</b>	Rain/snow		
<b>Radiation</b>	Response time (95%)	< 1s	
	Spectral range	300 to 1100nm	
	Measuring range	1400W/m <sup>2</sup>	
	Accuracy	5%	
<b>Air pressure</b>	Principle	MEMS capacitive	
	Measuring range	300 ... 1200hPa	
	Accuracy	± 0.5 hPa (0...+40°C)	
<b>Wind direction</b>	Principle	Ultrasonic	
	Measuring range	0 ... 359.9°	
	Accuracy	< 3° RMSE >1.0m/s	
<b>Wind speed</b>	Principle	Ultrasonic	
	Measuring range	0 ... 90m/s	
	Accuracy	±0.2m/s or ±2% RMS of reading, whichever is greater (0...65m/s) else ±5%	
<b>General Information</b>	Heating	20VA at 24VDC	
	Protection type housing	IP66	
	Interface	RS485, 2-wire, half-duplex	
	Operating voltage	4...32VDC	
	Operating humidity range	0 ... 100%	
	Operating temperature range	-50 ... 60 °C	
<b>Accessories</b>	Surge protection		<b>8379.USP</b>
	Power supply 24V/4A		<b>8366.USV1</b>
	UMB Interface converter ISOCON-UMB		<b>8160.UISO</b>
	Digital-analog-converter DAICON8-UMB		<b>8160.UDAC</b>
	Temperature Sensor WT1		<b>8160.WT1</b>
	Connection cable, 20m		<b>8370.UKAB20</b>



**Conservatoire d'espaces naturels**

de la Savoie

Le Prieuré - B.P. 51

73372 LE BOURGET DU LAC CEDEX

A l'attention de Monsieur Jérôme Porteret

# Devis

N° Devis	Date de devis	Date de validité	Code client	Devise du devis	Votre contact
EP17/0470	21/06/2017	30/09/2017	CPNS	Euro	Ephrem Charmois

Code article	Désignation article	Qté	P.U.	Total HT
55440.002.3.2	<p>Orpheus Mini : Enregistreur de niveau d'eau</p> <p>Cellule de mesure céramique avec compensation de la température</p> <p>Gamme de mesure 0-4 m</p> <p>Précision : 0.05 % de la pleine échelle</p> <p>Résolution : 0.01 % de la pleine échelle</p> <p>Stabilité à long terme : +/- 0.1 % max de la pleine échelle par an</p> <p>Capteur de température : précision : 0.5 °C, résolution 0.1 °C</p> <p>Option capteur de température avec précision 0,1 °C (au lieu de 0.5 °C) et résolution 0,01 °C au lieu de (0.1 °C) : plus value 137 €</p> <p>Mémoire : 500 000 données</p> <p>Diamètre : 22 mm</p> <p>Prix du câble : 5 € HT le mètre - 2 m inclus. Attention : la longueur à considérer est celle du système en entier (y compris le capteur et l'unité logistique)</p> <p>inclus 3 piles LR6 1.5 V, kit de plateaux d'adaptation 1", 2", 4" et 6" et bride de suspension 55440.025.9.2</p> <p>en option : piles lithium autonomie 5 ans au pas d'acquisition 1 heure : 30 € (fournies par 3)</p> <p>Garantie : 2 ans</p> <p>Option extension de garantie de 2 à 3 ans : 10 % du montant du poste</p>	8	1 046,00	7 531,20
FRAIS_TRANSI	<p>Frais de port et d'emballage</p> <p>pour livraison en France métropolitaine avec emballage standard</p> <p>30 € H.T. si commande &lt; 1000 € H.T.</p>	1	60,00	60,00

**Conservatoire d'espaces naturels**

de la Savoie

Le Prieuré - B.P. 51

73372 LE BOURGET DU LAC CEDEX

A l'attention de Monsieur Jérôme Porteret

# Devis

N° Devis	Date de devis	Date de validité	Code client	Devise du devis	Votre contact
EP17/0472	21/06/2017	30/09/2017	CPNS	Euro	Ephrem Charmois

Code article	Désignation article	Qté	P.U.	R	Total HT
	<b><u>Courantomètre électromagnétique sur perche</u></b>				
10405.005.9.5	Courantomètre électromagnétique OTT MF pro version proposée : - sans capteur de profondeur d'immersion et avec câble de 2 m (câble 6 m : plus value 56 € HT)  autres versions disponibles : - avec capteur de profondeur d'immersion et avec câble de 2 m, plus value : 1498 € HT  câble également disponible en longueurs 12 m et 30 m, nous consulter	1	1 694.00	10 %	1 524.60
10405.406.9.5	Kit de fixation courantomètre MF Pro sur perche de diamètre 20 mm ou système HERES	1	168.00	10 %	151.20
10405.001.9.5	Lecteur/enregistreur de terrain pour courantomètre MF pro avec accessoires : - bride de fixation lecteur pour perche de 20 mm ou système de relevage heres - alimentation 220 Vca (chargeur) - câble USB pour liaison PC - sacoche de transport - bandoulière lecteur de terrain	1	4 214.00	10 %	3 792.60
<b>Sous-Total</b>					<b>5 468.40</b>
	<b><u>Perche (2 m) et système de relevage (1 m)</u></b>				
16000.136.9.2	Perche diamètre 20 mm de 2 m en 2 parties, divisée en cm  ou si option capteur de profondeur intégré retenue :	1	605.00	10 %	544.50

Code article	Désignation article	Qté	P.U.	R	Total HT
16000.126.9.2	Perche diamètre 20 mm de 2 m en 2 parties, divisée en dm		336.00	10 %	
16000.088.3.2	Elément inférieur du dispositif de relevage HERES, seul, longueur 1 m, prévoir clé en T 16.000.034.5.2 (ce dispositif de relevage est adapté aux perches de longueur 2 m)	1	420.00	10 %	378.00
16000.034.5.2	Clé en T pour HERES formant indicateur de direction perche	1	50.00	10 %	45.00
16000.007.2.1	Etui en toile pour perche diamètre 20 mm et dispositif de relevage	1	202.00	10 %	181.80
<b>Sous-Total</b>					<b>1 149.30</b>
	Option extension de garantie de 2 à 3 ans : 10% du montant du poste				
FRAIS_TRANS	Frais de port et d'emballage pour livraison en France métropolitaine avec emballage standard 30 € H.T. si commande < 1000 € H.T. 40 € H.T. si commande comprise entre 1000 € et 2000 € H.T. 50 € H.T. si commande comprise entre 2000 € et 4000 € H.T. 60 € H.T. si commande comprise entre 4000 € et 10000 € H.T. au-delà de 10000 € H.T., détermination des frais en fonction du colisage réel.	1	60.00	0 %	60.00
<b>Devise</b>	<b>Total HT</b>	<b>TVA</b>	<b>Total TTC</b>		
<b>Euro</b>	<b>6 677.70</b>	<b>1 335.54</b>	<b>8 013.24</b>		

## Annexe 3

### Etude du sol : prélèvements et analyses des échantillons

#### La perte au feu

L'objectif est de connaître le taux de matière organique de l'échantillon. La perte au feu provoque l'oxydation totale de la matière organique de l'échantillon, qui se transforme en substances volatiles. Elle entraîne également la perte de l'eau résiduelle contenue dans les cellules de la matière organique ou dans les argiles (estimée à 10 % du poids) et la destruction des carbonates (pour environ 44% de leur poids total). Il convient donc d'adapter la méthode au type d'échantillon suivant la présence ou non de carbonates et d'argiles.

La première étape consiste sécher les échantillons dans une étuve à 80 degrés, pendant 48 heures. Ensuite ils sont broyés finement, avant d'être pesés.

- Pour le substrat minéral.

Peser 5 g (poids P)

Mise au four pendant 3 heures, avec deux paliers, de 350° à une heure et 450° à deux heures, avant de monter jusqu'à 750°.

Laisser refroidir, mettre au dessiccateur, puis peser le poids résiduel (Q)

Calcul du pourcentage de M.O. 
$$\% \text{ M.O.} = 100 * \left( \frac{P - Q}{P} - \frac{\% \text{ argiles}}{10} - \frac{44 * \% \text{ calcaire}}{100} \right)$$

- Pour la tourbe

Peser 2 g (poids P)

Mise au four pendant 3 heures avec un palier de 350° à une heure et deux heures à 450°

Laisser refroidir, mettre au dessiccateur, puis peser le poids résiduel (Q)

Calcul du pourcentage de M.O. 
$$\% \text{ M.O.} = 100 * \frac{P - Q}{P}$$

#### Analyses granulométriques et densimétriques

« Les caractéristiques granulométriques d'un sédiment sont le reflet des conditions dynamiques au moment exact de l'accumulation » (D.BAISE). Cette analyse permet de déterminer la répartition statistique des particules minérales d'un échantillon, inférieures à deux millimètres. La répartition en classes granulométriques doit alors donner une image du type d'horizon pédologique en présence. On peut subdiviser les particules fines (< 2 mm) en 3, 5 ou 8 fractions de la manière suivante

Echelle des dimensions des particules

		en µm ←										
		2	20	50	100	200	500	1000	2000			
		← en mm										
				0,05	0,1	0,2	0,5	1	2			
A	LF	LG	SF <sub>1</sub>	SF <sub>2</sub>	SG <sub>1</sub>	SG <sub>2</sub>	SG <sub>3</sub>	EG				
A	LF	LG	SF		SG			EG				
Argile	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins		Sables grossiers			EG				
A	LT = limons totaux		ST = sables totaux					EG				

(Classification d'après le *Guide des analyses courantes en pédologie* de Denis BAIZE).

Il existe deux grands types d'analyses granulométriques. Il s'agit des analyses, avec ou sans décarbonatation artificielle. Elle est censée simuler la décarbonatation naturelle telle qu'elle pourrait intervenir au cours de la pédogénèse.

L'analyse granulométrique réalisée est dite « à sec » (*dry sieving*), sur les fractions sableuses, c'est à dire pour les particules comprises entre 2 mm et 50  $\mu\text{m}$ . Lorsque la proportion des particules inférieures à 50  $\mu\text{m}$  dépassait 20 %, une densimétrie Mériaux peut être réalisée.

La méthode employée est basée sur la loi de Stokes. La première étape du traitement préalable de l'échantillon doit permettre à désagréger complètement les agrégats. Un premier traitement à l'eau oxygénée permet la destruction de la matière organique. Ensuite, s'il n'y a pas de ciments particuliers, une longue agitation dans l'eau, en présence d'un sel dispersant (hexamétaphosphate de sodium), permet d'obtenir une bonne dispersion des particules de l'échantillon. Après une dernière agitation, on laisse libre cours à la sédimentation de l'échantillon, sous la seule action de la gravité. Cette sédimentation est, selon la loi de Stokes, fonction de la taille des particules et de la température de l'eau. Ainsi, en prélevant une aliquote de la suspension au temps  $t$  et à la profondeur  $p$ , grâce à une pipette, on peut après évaporation de l'eau, déterminer le poids de particules inférieures au seuil de grosseur choisi (poids des particules qu'il reste en suspension une fois que les particules du seuil de grosseur choisi sont toutes passées à la profondeur  $p$  à l'instant  $t$ ). On mesure les particules inférieures à 20  $\mu\text{m}$  à environ 4 minutes 45 secondes et 10 centimètres de profondeur, et les particules de la fraction argile à 8 heures et 10 centimètres de profondeur avec une eau à 20 degrés. Les proportions pondérales des autres fractions sont obtenues par tamisage. On réalise alors différents tamisages à sec sur des tamis de 200 et 50  $\mu\text{m}$ .

Divers problèmes peuvent exister quant à la dispersion du matériel, notamment s'il y a une mauvaise solubilité des particules. La loi de Stokes suppose des particules sphériques, or elles ne le sont pas toutes. Cela peut influencer leur vitesse de sédimentation. Toutefois, les analyses densimétriques sont indispensables pour caractériser un horizon pédologique et sa perméabilité.

## La datation par le radiocarbone

### Objectifs et méthodes

L'objectif des datations par le radiocarbone ou carbone 14, est d'estimer l'âge des échantillons de tourbe. Dans les années 30, W.LIBBY, fait les premières mesures du taux de radioactivité du  $^{14}\text{C}$ . Cet isotope du carbone provient de la transformation de l'azote par les rayons cosmiques en haute atmosphère. Le  $^{14}\text{C}$  est présent en proportion constante dans les êtres vivants, car il est assimilé combiné avec l'oxygène sous la forme du  $^{14}\text{CO}_2$ . A la mort des organismes vivants, les échanges gazeux s'interrompent, le  $^{14}\text{C}$  n'est plus renouvelé. Sa radioactivité décroît suivant une période de  $5568 \pm 30$  ans. Ainsi, en comptant l'activité radioactive d'un échantillon, on peut en déduire la période de temps écoulée depuis la mort de l'organisme. Aujourd'hui de nombreux laboratoires réalise ce type d'analyse.

## Annexe 4

Cahier des charges pour la caractérisation et l'étude du sol des zones  
humides 