



Système de contrôle automatisé de l'eau en culture de sphaigne

Mémoire

Guillaume Goulet

Maîtrise en génie agroalimentaire - avec mémoire
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

Système de contrôle automatisé de l'eau en culture de sphaigne

Mémoire

Guillaume Goulet

Sous la direction de :

Robert Lagacé, directeur de recherche

Stéphane Godbout, codirecteur de recherche

Résumé

La culture de sphaigne est la production durable de biomasse de sphaigne sur une base renouvelable et cyclique. Un système de contrôle de l'eau est nécessaire pour maintenir le niveau de la nappe phréatique à une valeur définie au cours de la saison de croissance dans un contexte de conditions climatiques variables. Peu d'information et de documentation sont disponibles concernant la conception et l'opération de systèmes de contrôle de l'eau dans les bassins de culture de sphaigne.

Les objectifs de ce projet sont de définir, concevoir et réaliser le système de drainage et d'irrigation souterraine pour la culture de sphaigne et de développer un système de contrôle correspondant aux contraintes du site de Shippagan au Nouveau-Brunswick installé en 2014. La définition d'un système d'irrigation et de drainage adapté est basée sur les connaissances du drainage et de l'irrigation en agriculture et des besoins physiologiques de la sphaigne. Le développement des équipements a été réalisé en adaptant les concepts du système aux contraintes du site.

L'analyse du système comprend les mesures à effectuer, les éléments à contrôler et les consignes d'opération. Les appareils de mesure du niveau de l'eau permettent d'évaluer et de transmettre au contrôle central les niveaux d'eau des fossés et de la nappe phréatique. Le contrôle central analyse les conditions et contrôle les pompes et les barrages à hauteur variable. L'énergie est fournie par un système de panneaux solaires et de batteries. Les barrages à hauteur variable permettent d'ajuster le niveau d'eau dans les fossés.

Le système et les équipements développés répondent aux objectifs de conception. Des améliorations et une optimisation sont à faire. Le système permettra de continuer les travaux notamment au niveau de la modélisation de l'écoulement de l'eau et du contrôle prédictif.

Abstract

Sphagnum farming is the cultivation of *Sphagnum* mosses to produce biomass of non-decomposed *Sphagnum* fibers on a cyclic and renewable basis. A water control system is required to maintain the water table level through the season, in the context of variable weather conditions. A drainage and sub-irrigation system has been designed and installed in 2014 on the *Sphagnum* farming site near Shippagan (N.B). The objectives of this project are to define the drainage and irrigation system for *Sphagnum* farming and develop an adapted system for the site.

The design of the system is based on the *Sphagnum* requirements, agricultural knowledge of drainage and irrigation and respect of site constrains. Water level measurement equipment allows evaluation and transmission of the water table level and the water level in ditches to the central control. The central control analyzes the conditions and control the pumps and the variable level dams. The energy is supplied by a system of solar panels and batteries. The variable level dam adapts the water output level in the control structure.

The developed system achieves the design objectives. Improvement and optimization are planned. The system will be the basis of future research, in particular about flow modeling and predictive control.

Table des matières

| | |
|---|------|
| Résumé | ii |
| Abstract..... | iii |
| Table des matières | iv |
| Liste des figures..... | vi |
| Liste des tableaux | viii |
| Introduction | 1 |
| Chapitre 1 Revue de littérature | 3 |
| 1.1 Caractéristiques de la sphaigne | 3 |
| 1.1.1 Physiologie de la sphaigne | 3 |
| 1.1.2 Expérience en culture de sphaigne du Nord-Est américain | 4 |
| 1.2 Hydrologie des tourbières..... | 6 |
| 1.3 Lois de l'écoulement..... | 7 |
| 1.3.1 Loi de Darcy..... | 7 |
| 1.3.2 Hypothèse de Dupuit-Forcheimer | 8 |
| 1.3.3 Modèle d'irrigation et drainage en régime permanent..... | 8 |
| 1.4 Contrôle prédictif | 10 |
| Chapitre 2 Définition du système de gestion de l'eau..... | 12 |
| 2.1 Représentation du système de gestion de l'eau..... | 12 |
| 2.2 Opération du système | 13 |
| 2.3 Détermination des consignes opération | 13 |
| Chapitre 3 Description du site..... | 14 |
| 3.1 Localisation du site et historique..... | 14 |
| 3.2 Aménagement et établissement des bassins | 14 |
| 3.3 Objectifs et contraintes spécifiques du système..... | 16 |
| 3.4 Présentation des équipements et des interactions | 17 |
| 3.4.1 Stratégie de développement | 17 |
| 3.4.2 Prévision des travaux..... | 17 |
| Chapitre 4 Développement et intégration..... | 19 |
| 4.1 Système développé et interactions..... | 19 |
| 4.2 Énergie et pompage | 20 |
| 4.2.1 Objectifs et contraintes | 20 |
| 4.2.2 Description du système..... | 20 |
| 4.3 Contrôle central | 22 |
| 4.3.1 Objectifs et contraintes..... | 22 |
| 4.3.2 Description du système..... | 23 |

| | | |
|--|--|----|
| 4.4 | Structure de programmation | 26 |
| 4.4.1 | Objectifs et contraintes..... | 26 |
| 4.4.2 | Logique du contrôle | 26 |
| 4.4.3 | Opérations du programme | 27 |
| 4.4.4 | Présentation de la structure de programmation | 28 |
| 4.4.5 | Principales étapes du programme principal | 29 |
| 4.6 | Principales difficultés..... | 31 |
| 4.5 | Mesure du niveau de l'eau..... | 31 |
| 4.5.1 | Objectifs et contraintes..... | 31 |
| 4.5.2 | Recherche de solutions..... | 32 |
| 4.5.3 | Description du design..... | 35 |
| 4.5.4 | Installation et mise en fonction..... | 36 |
| 4.6 | Barrage à hauteur variable | 37 |
| 4.6.1 | Objectifs et contraintes..... | 37 |
| 4.6.2 | Recherche de solutions..... | 38 |
| 4.6.3 | Banc d'essai..... | 40 |
| 4.6.4 | Développement..... | 43 |
| Chapitre 5 Fonctionnement du système | | 46 |
| 5.1 | Système énergétique et pompage..... | 46 |
| 5.1.1 | Puissance mesurée..... | 46 |
| 5.1.2 | Consommation énergétique des pompes | 46 |
| 5.2 | Contrôle central | 47 |
| 5.3 | Mesure du niveau de l'eau..... | 47 |
| 5.3.1 | Effets de la température sur la précision des capteurs | 47 |
| 5.3.2 | Essais avec température variable et distance avec plusieurs capteurs | 50 |
| 5.3.3 | Amélioration des appareils de mesure du niveau de l'eau..... | 51 |
| 5.4 | Barrage à hauteur variable | 52 |
| 5.4.1 | Fonctionnement des barrages | 52 |
| Conclusion | | 54 |
| Bibliographie..... | | 55 |
| Annexe A Installation des bassins | | 58 |
| Annexe B Installation du système énergétique et de pompage | | 59 |
| Annexe C Plan du système de puissance et de pompage..... | | 61 |
| Annexe D Programmation des barrages à hauteur variable | | 63 |
| Annexe E Installation des capteurs pour les essais de précision en serre | | 71 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 Alimentation en eau d'une sphaigne (Hahni 2013). | 3 |
| Figure 2 Relation entre la profondeur de la nappe phréatique et la production primaire | 3 |
| Figure 3 Variations du niveau de l'eau dans les bassins (Pouliot et al., 2015). | 5 |
| Figure 4 Coupe d'un bassin en situation de drainage. | 9 |
| Figure 5 Coupe d'un bassin en situation d'irrigation. | 10 |
| Figure 6 Procédure du contrôle prédictif (Haber et al., 2011). | 11 |
| Figure 7 Système de gestion de l'eau. | 12 |
| Figure 8. Exploitation d'une tourbière par bloc (Robert et al., 1999). | 14 |
| Figure 9 Localisation du site (Google Map) | 15 |
| Figure 10 Aménagement du site (schéma de Rémy Pouliot) | 15 |
| Figure 11 Aménagement des structures de contrôles en bleu les fossés, en noir les tuyaux de drainage et la profondeur du niveau de la nappe phréatique visée. | 16 |
| Figure 12 Cheminement du développement du projet. | 17 |
| Figure 13 Étapes du projet. | 18 |
| Figure 14 Interactions et disposition des équipements. | 19 |
| Figure 15 Composantes principales du système de pompage. | 22 |
| Figure 16 Disposition des équipements du contrôle central. | 23 |
| Figure 17 Logique simplifiée d'opération du système de gestion de l'eau. | 27 |
| Figure 18 Hiérarchie de la programmation. | 29 |
| Figure 19 Exemple d'une classe du programme principale. | 30 |

| | |
|---|----|
| Figure 20 Schéma d'un appareil de lecture de niveau d'eau. | 32 |
| Figure 21 Organisation du réseau sans fil ZigBee. | 33 |
| Figure 22 Principales étapes du fonctionnement de l'appareil de mesure du niveau d'eau. | 34 |
| Figure 23 Droite: prototype avec ATtinny et Gauche; Stalker. | 35 |
| Figure 24 Intégration physiques des composantes pour la mesure du niveau de l'eau : | 36 |
| Figure 25 Schéma des composantes d'un barrage à hauteur variable. | 38 |
| Figure 26 Concept d'une valve contrôlée par flotteur (Innotag, système de contrôle de drainage). | 39 |
| Figure 27 Fonctionnement d'un clapet, le câble est représenté par une barre sur l'image. | 39 |
| Figure 28 Composantes internes d'un barrage à hauteur variable. | 41 |
| Figure 29 Banc d'essai et le clapet à angle et bras de levier ajustable. | 42 |
| Figure 30 Composantes électroniques. | 44 |
| Figure 31 Installation d'un barrage à hauteur variable. | 45 |
| Figure 32 Essai avec température variable. | 49 |
| Figure 33 Exemple de fonctionnement d'un barrage à hauteur variable. | 53 |
| Figure 34 Installation des bassins. | 58 |
| Figure 35 Installation du système énergétique à l'intérieur du conteneur. | 59 |
| Figure 36 Station de pompage. | 59 |
| Figure 37 Schéma électrique du circuit de puissance. | 61 |
| Figure 38 Installation du banc d'essais des sonars. | 71 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1. Éléments et méthodes d'évaluation pour la caractérisation de l'hydrologie des tourbières. | 7 |
| Tableau 2. Équipement, caractéristiques et fabricants des composantes du système énergétique et de pompage | 21 |
| Tableau 3 Comparaison en deux ordinateurs à carte unique | 24 |
| Tableau 4 Caractéristiques des équipements LabJack et accessoires (PS12DC et DB15). | 25 |
| Tableau 5 Liste des principales opérations..... | 30 |
| Tableau 6 Description des prototypes. | 35 |
| Tableau 7 composantes du capteur de niveau d'eau. | 36 |
| Tableau 8 Liste des commandes pour les barrages à hauteur variable..... | 43 |
| Tableau 9 Composantes électroniques des barrages à hauteur variable..... | 45 |
| Tableau 10 Données observées concernant l'énergie nécessaire au pompage 29 juin 2014. | 47 |
| Tableau 11 Résultats selon les méthodes de correction (hiver 2015). | 51 |
| Tableau 12 Résultats des essais avec trois différentes distances..... | 51 |

Introduction

L'extraction canadienne de la tourbe représentait une valeur de 262 M\$ en 2013 pour la ressource brute (Natural Resources Canada, 2014). La principale utilisation de cette tourbe est comme substrats horticoles. Toutefois, l'extraction de la tourbe a un impact sur les tourbières où l'extraction est effectuée (Jobin et al., 2014). Les producteurs de tourbe horticole font face à plus en plus de pression de la part de leurs clients et de la société pour qu'ils limitent leur activité sur des tourbières naturelles.

L'industrie de la tourbe cherche à mettre sur le marché des produits plus écologiques et à valeurs ajoutées. Une façon de réduire l'impact sur les tourbières naturelles serait de remplacer dans certaines proportions la tourbe par un ou des substituts comme les fibres de bois, les écorces compostées, le compost et les fibres de noix de coco (Schmilewski, G., 2009). Il est aussi possible d'incorporer de la fibre de sphaigne dans les substrats à base de tourbe blonde¹ tout en conservant leurs qualités (Pouliot et al., 2015). Il est aussi possible d'ajouter de la fibre de sphaigne à une tourbe de moindre qualité (tourbe brune) pour l'améliorer (Jobin et al., 2014). Toutefois, les fibres de sphaigne ne peuvent pas être récoltées dans une tourbière naturelle si l'objectif est de réduire l'utilisation des tourbières naturelles. La culture de sphaigne est la production durable de biomasse de sphaigne sur une base renouvelable et cyclique (Pouliot et al., 2015) .

Un premier site de culture de sphaigne a été aménagé au Nouveau-Brunswick en 2003 et a démontré la faisabilité de la culture de sphaigne à grande échelle, même sans système d'irrigation actif (Pouliot et al., 2015). L'absence d'apport en eau causait cependant d'importantes variations de la profondeur de la nappe phréatique au cours des saisons de croissance, ce qui diminuait la productivité (Pouliot et al., 2015).

Dans cette optique, un nouveau site comprenant six bassins de 1000 m² a été aménagé dans la même région durant l'été 2014. Ce site a été aménagé pour répondre à plusieurs objectifs soit: l'optimisation des taux de croissance, la comparaison de différentes espèces de sphaigne, la mesure des émissions de gaz à effet de serre, l'influence des plantes compagnes et le contrôle de l'écoulement de l'eau. Le présent mémoire se concentre sur la gestion de l'eau dans les bassins de culture de sphaigne. L'objectif principal de ce mémoire était de mettre en fonction un système de gestion de l'eau pour les six bassins du site.

¹ Fibres de sphaigne : partie non décomposée de la plante de sphaigne; tourbe blonde :tourbe peu décomposée, très bon potentiel pour substrats, tourbe brune :: tourbe très décomposée, de moindre qualité horticole.

L'objectif du système de gestion de l'eau est de maintenir le niveau de l'eau à 10 cm ou à 20 cm selon les bassins. Pour ce faire, le système de gestion de l'eau doit être analysé et défini. Ensuite, il doit être conçu, développé et installé sur le site.

Ce mémoire est divisé en deux sections. La première comprend l'analyse théorique de la gestion de l'eau dans les bassins de culture de sphaigne. Elle couvre la revue des connaissances et la définition d'un système d'irrigation et de drainage adapté aux bassins. Cette analyse permet de définir les contraintes du site et la logique de développement. La deuxième section présente l'adaptation des concepts identifiés dans la première section au nouveau site expérimental de culture de sphaigne. Elle couvre le développement, la mise en fonction des prototypes et l'analyse de leurs performances.

Chapitre 1 Revue de littérature

1.1 Caractéristiques de la sphaigne

1.1.1 Physiologie de la sphaigne

La sphaigne est une plante non vasculaire de la famille des bryophytes. La sphaigne est dépourvue de structures actives de transport d'eau et de nutriments (Clymo, 1973). L'eau et les nutriments parviennent du sol jusqu'aux cellules vivantes par capillarité externe. La sphaigne dépend donc de la remontée capillaire dans la tourbe puis le long des tiges et rameaux et des précipitations pour l'approvisionnement en eau. L'acheminement de l'eau pour une sphaigne déposée sur de la tourbe nue est présenté à la figure 1.

Les capacités de prélèvement de l'eau varient entre les différentes espèces de sphaigne. La figure 2 présente la relation entre la profondeur de la nappe et la production primaire de la sphaigne. La croissance est maximale quand la nappe phréatique est entre 5 et 20 cm de profondeur (Thomson, 2008, adaptée de Tuittila et al., 2004).

Le dessèchement survient lorsque l'eau s'évapore plus rapidement que l'apport en eau. L'importance du remouillage en restauration est expliquée par la faible capacité d'approvisionnement en eau de la sphaigne. Le

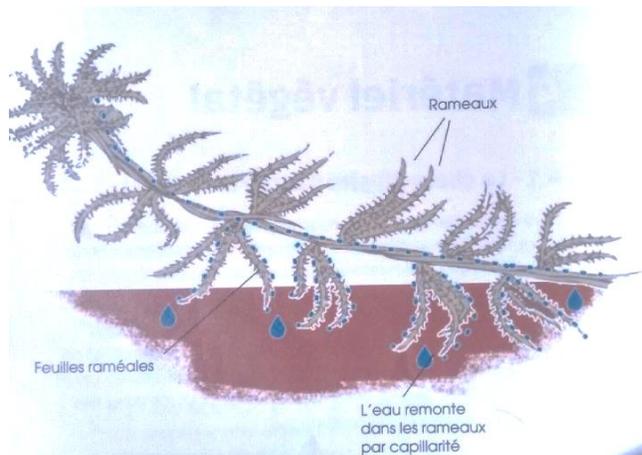


Figure 1 Alimentation en eau d'une sphaigne (Hahn 2013).

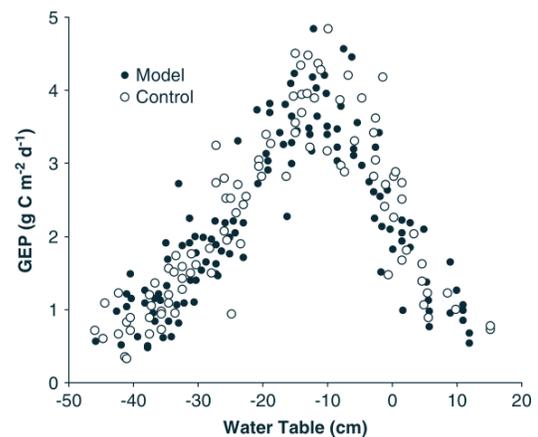


Figure 6. Gaussian relationship between water table and photosynthesis in a *Sphagnum* hummock (modified from Tuittila *et al.*, 2004). The relationship is computed using constrained non-linear regression standardized to *Sphagnum* area = 97%, PAR = 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Black dots represent data points used to construct the model, and white dots are control observations.

Figure 2 Relation entre la profondeur de la nappe phréatique et la production primaire

(Thompson et Waddington, 2008).

dessèchement peut être quantifié par la tension. Pour les espèces cibles de la culture de sphaigne, les tensions de dessèchement sont de 100 à 200 cm (Hayward et al., 1982). Pour les plantes vasculaires, la tension maximale est généralement estimée à 15 atmosphères, soit environ 15 000 cm. La capacité d'une sphaigne à s'alimenter en eau est 50 fois plus faible qu'une plante vasculaire.

Durant les conditions sans précipitation, le profil vertical se divise en trois sections soient : la section saturée sous le niveau de la nappe phréatique, la section non saturée au-dessus de la nappe phréatique et finalement le tapis de sphaigne. Le flux disponible pour la sphaigne provient donc de la zone non saturée. L'écoulement vertical est donc non saturé.

La tension limite est au niveau des rameaux exposés à la lumière. Le potentiel est lié au niveau de la nappe phréatique puisque la tension est à 0 cm au niveau de la nappe phréatique. Le profil de la tension est à la valeur la plus élevée à la surface en situation d'évaporation. Pour une plante vasculaire, le système racinaire permet d'atteindre l'eau dans le sol, là où elle est disponible. Pour la sphaigne, le flux vertical est influencé par la demande atmosphérique, mais limité par la capacité de la tourbe et la sphaigne à transporter l'eau (Ketcheson et al., 2014). Le potentiel d'élévation additionné au potentiel de pression ne devrait pas dépasser 100 à 200 cm (équation 1).

$$\varphi_{Sp} = \varphi_{Grav} + \varphi_{pres} \quad (1)$$

Où

- φ_{Sp} = potentiel de la sphaigne
- φ_{Grav} = potentiel d'élévation, sphaigne jusqu'à la nappe
- φ_{ec} = potentiel de pression induit par l'écoulement non saturé entre la nappe et la sphaigne

1.1.2 Expérience en culture de sphaigne du Nord-Est américain

L'expérience acquise en ce qui a trait à de la restauration des tourbières est le point de départ des connaissances en culture de sphaigne. L'objectif principal de la restauration des tourbières est de rétablir un écosystème accumulateur de tourbe (Quinty et Rochefort 2003). Pour ce qui est de la culture de sphaigne, l'objectif est d'obtenir un bon taux de croissance de la sphaigne pour les récolter de façon cyclique. La restauration et la culture de sphaigne cherchent à obtenir un tapis de sphaigne à partir de fragments de sphaigne étendus sur la tourbe nue. L'implantation de la sphaigne en culture de sphaigne se fait selon la méthode de

restauration des tourbières (Quinty et Rochefort 2003). Cette méthode consiste à prélever des tiges de sphaigne vivantes d'un site donneur et à les étendre sur la surface à restaurer, connue sous la méthode par transfert du tapis muscinal (Quinty et Rochefort 2003, Graff et al., 2012, Pouliot et al., 2015). Les premiers essais de culture de sphaigne ont montré l'importance d'un meilleur contrôle de l'eau dans les bassins. La croissance est plus importante si le niveau de la nappe phréatique est bien contrôlé (Pouliot et al., 2015). Le contrôle se limitait à bloquer les canaux de drainage au printemps pour limiter l'évacuation de l'eau. Le niveau de contrôle des barrages était de 5 à 10 cm sous la surface de la tourbe dans les bassins de Shippagan aménagés de 2006 à 2012. Le niveau de contrôle correspond au niveau maximum avant que l'eau s'écoule par l'ouverture du barrage. Aucun système de pompage ne permettait de rajouter de l'eau durant les périodes de déficit hydrique (Pouliot et al., 2015) ce qui laissait le niveau de la nappe phréatique descendre profondément (figure 3).

La sphaigne est cultivée dans des bassins. Les bassins sont nivelés et dénudés de végétation existante si elle est présente. Ces bassins peuvent être rabaissés afin d'approcher la surface de la nappe phréatique environnante lors de l'aménagement du site (Pouliot et al. 2015). Les bassins doivent être nivelés pour obtenir des conditions constantes sur toute la parcelle (Quinty et Rochefort 2003). La littérature présente très peu de détails concernant la conception des bassins de culture de sphaigne tels que les écartements, la profondeur des fossés, les appareils et les consignes d'opération. Plusieurs éléments sont à adapter des connaissances agricoles.

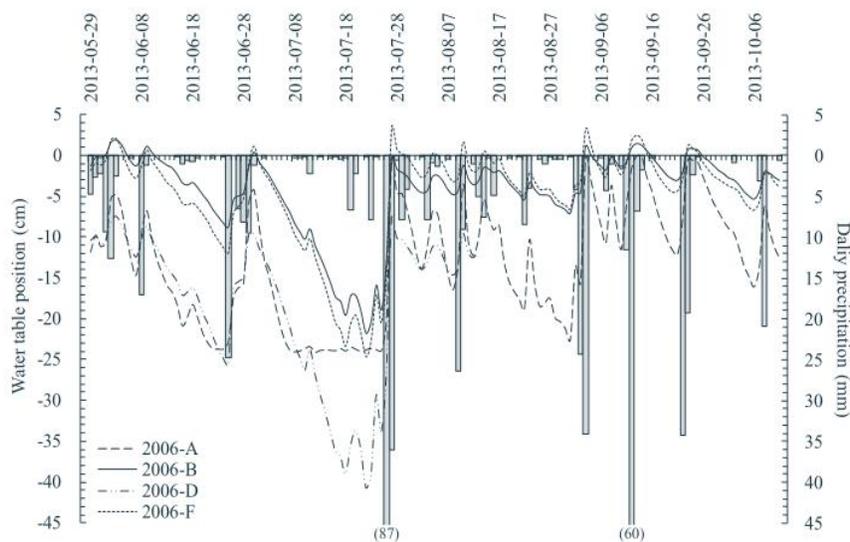


Fig. 6. Changes of water table depth during the 2013 growing season in the remaining production cycles started in 2006. Water table values were recorded by automated level loggers. From the one value recorded per hour, the daily mean was calculated before analyses. Data were recorded from May 29th to October 11th excepted for the 2006-D cycle (until August 13th). For two days, the daily precipitation exceeded 45 mm and the real amount was noted in parenthesis.

Figure 3 Variations du niveau de l'eau dans les bassins (Pouliot et al., 2015).

Plusieurs types d'aménagement pour la restauration ont été expérimentés durant les années 1990 tels que l'irrigation par aspersion et de surface (Rocheffort, 2001; Rocheffort et Bastien, 1998). L'irrigation souterraine est cependant mieux adaptée que les autres modes d'apport en eau. C'est aussi le type d'irrigation retenue pour le site de Shippagan entre 2006 et 2012 (Pouliot et al., 2015). L'irrigation souterraine est souvent utilisée en agriculture. Elle utilise soit des fossés ou des tuyaux de drainage et elles assurent aussi le drainage lors des événements pluvieux.

1.2 Hydrologie des tourbières

L'hydrologie des tourbières de l'Est du Canada a largement été étudiée au cours des dernières décennies. Ces études étaient principalement basées sur une approche de bilan volumique (Schlotzhauer et Price, 1999; Van Seters et Price, 2001; Ketcheson et Price, 2014). Les variations de la profondeur de la nappe phréatique sont reliées à des flux d'évaporation et de précipitation :

$$P - Ev + (SO_{De} - SO_{Ds}) + (SU_{De} - SU_{Ds}) = \Delta h \times S_y \quad (2)$$

Où

- P = précipitations.
- Ev = évaporation,
- SO = eau souterraine,t
 - De = indice du débit entrant
 - Ds = indice débit sortant
- SU = eau de surface,
- $\Delta h \times S_y$ variation d'eau emmagasinée
- Δh =variation du niveau de la nappe
- S_y = porosité de drainage

Les débits (SO) peuvent être évalués avec les modèles d'écoulement (section 1.3). L'évaluation des paramètres physiques de la tourbe est bien détaillée dans la littérature. Les principaux paramètres utilisés lors de l'étude de l'hydrologie des tourbières et leurs méthodes de mesure sont présentés au tableau 1.

Tableau 1. Éléments et méthodes d'évaluation pour la caractérisation de l'hydrologie des tourbières.

| Notation | Élément physique | Méthodes ou références |
|--------------------------|---|---|
| Physique du sol | | |
| K _{sat} | Conductivité hydraulique saturée (m/s) | (Surridge et al., 2005; Price et al., 2008) |
| K _{unsat} | Conductivité hydraulique non saturée (m/s) | (Price et al., 2008) |
| S _y | Porosité de drainage (Vol./Vol.) | (Van Seters et al. 2001) |
| z | Hauteur totale de tourbe | Mesure directe |
| ρ _s | Densité apparente (g/cm ³) | Mesure directe |
| θ | Teneur en eau volumétrique (g/cm ³) | Mesure directe |
| Évaluation des gradients | | |
| H | Hauteur de la nappe (cm) | Puits d'observation |
| Ψ | Pression hydraulique totale (cm) | Piézomètre |
| Météorologie | | |
| ET | Évapotranspiration (mm) | (Priestley et Taylor 1972) |
| P | Précipitation (mm) | Pluviographe |

1.3 Lois de l'écoulement

1.3.1 Loi de Darcy

L'écoulement de l'eau dans un sol tourbeux est supposé suivre la loi de Darcy (Kennedy et Price. 2004; Ballard et al., 2011). :

$$Q = K_{sat} \frac{\Delta H}{\Delta L} A \quad (3)$$

Où

- Q = débit (L³T⁻¹),
- K_{sat} = conductivité hydraulique saturée (LT⁻¹),
- H = charge hydraulique (L)
- L = longueur de l'écoulement (L)
- A = surface de l'écoulement (L²).

La loi de Darcy correspond à l'écoulement dans une colonne de sol avec débit constant. Pour l'écoulement entre deux structures de contrôle, le débit selon la position des niveaux d'eau et peut être soumis à des régimes transitoires. Des hypothèses, des modèles et des méthodes mathématiques permettent de transposer la loi de Darcy à des situations réelles.

1.3.2 Hypothèse de Dupuit-Forcheimer

Dans un écoulement quasi-horizontale, le flux vertical d'eau est négligeable et il permet d'utiliser l'hypothèse de Dupuit-Forcheimer. Cette hypothèse est souvent utilisée pour la modélisation du drainage agricole et l'irrigation souterraine (l'équation 4). L'hypothèse a déjà été utilisée pour une tourbière (Ballard et al., 2011). L'équation de la continuité à trois dimensions de l'écoulement basée sur la loi de Darcy est simplifiée avec l'hypothèse de Dupuit-Forcheimer (équation 3).

$$-S_y \frac{dh}{dt} = \frac{d}{dx} \left(K_x \frac{dh}{dx} h \right) + \frac{d}{dy} \left(K_y \frac{dh}{dy} h \right) + P - Et \quad (4)$$

Plusieurs méthodes de résolution de cette équation ont été développées pour différentes situations. L'équation 4 peut être résolue par intégration et les conditions frontières ou par une méthode numérique telle que l'analyse par éléments finis. Les bassins de culture de sphaigne sont soumis à des régimes transitoires oscillant entre le drainage et l'irrigation.

1.3.3 Modèle d'irrigation et drainage en régime permanent

L'objectif du drainage est de contrôler l'évacuation de l'eau, lorsque le niveau de la nappe phréatique est plus élevé que désiré. L'irrigation souterraine est l'approvisionnement des plantes en eau par le maintien d'une nappe artificiellement élevée (Lagacé, 2015). L'apport en eau peut être assuré par des fossés ou des drains, dont le niveau de l'eau est plus élevé que dans la parcelle en irrigation. Le modèle se représente sous deux conditions, en précipitation ou en évaporation. Les figures 4 et 5 sont une représentation d'une coupe d'un bassin entre deux structures de contrôles parallèles, en situation de drainage et d'irrigation respectivement. En situation de drainage le débit sortant est négatif et en situation d'irrigation de débit est positif.

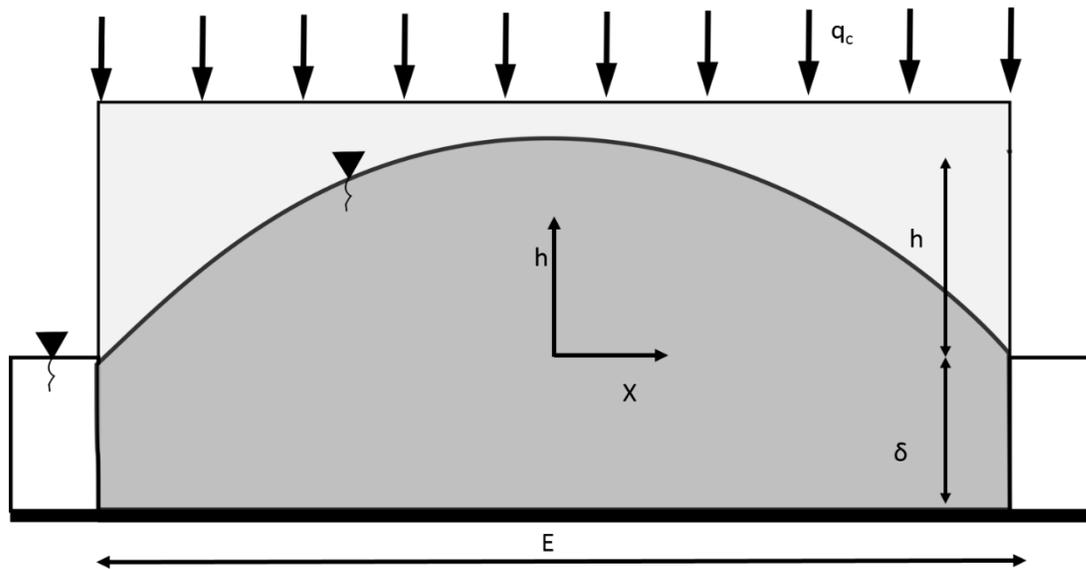


Figure 4 Coupe d'un bassin en situation de drainage.

En mode drainage (figure 4), le débit de l'écoulement peut être évalué en connaissant la position de la nappe phréatique par l'équation suivante :

$$q_c = -4 \left(\frac{K_x h^2}{E^2} \right) - 8 \left(\frac{K_x \delta h}{E^2} \right) \quad (5)$$

Où

- E = écartement (m)
- K_x = conductivité hydraulique saturée (m/j)
- q_c = débit de drainage (m/j)
- δ = niveau d'eau dans les fossés (m)
- h = charge hydraulique

L'écoulement en situation d'irrigation souterraine est présenté à la figure 5 et peut être estimé par l'équation suivante :

$$q_c = 8 \left(\frac{K_x m(\delta)}{E^2} \right) + 4 \left(\frac{K_x m^2}{E^2} \right) \quad (6)$$

Où

- E = écartement (m)
- K_x = Conductivité hydraulique saturée (m/j)
- q_c = débit d'irrigation (m/j)
- $\delta = H - m$
- m = déflexion de la nappe (m)

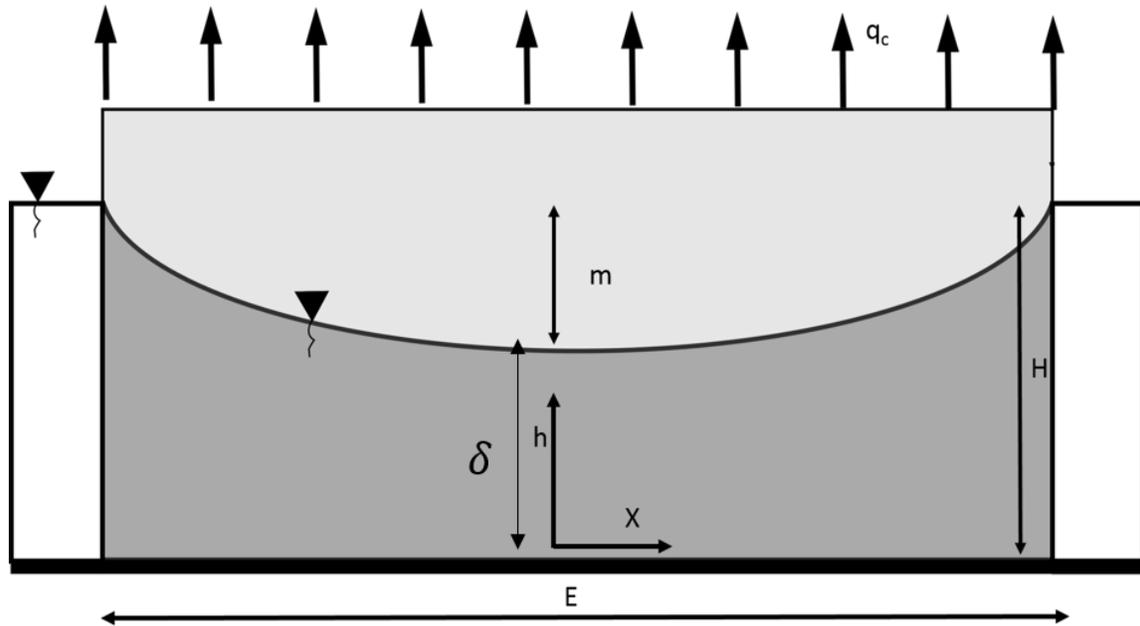


Figure 5 Coupe d'un bassin en situation d'irrigation.

En régime permanent, le débit d'irrigation ou de drainage correspond respectivement à l'évaporation et aux précipitations. Dans les deux situations, l'écoulement est quantifiable par la position de la nappe phréatique et du niveau d'eau dans la structure de contrôle puisque les valeurs E et K ne changent pas. La hauteur d'eau dans la structure de contrôle permet d'obtenir le débit désiré afin de maintenir le niveau de la nappe phréatique à la valeur désirée.

Les hypothèses du régime permanent ne sont pas toujours respectées. L'évaporation ou les précipitations varient avec les conditions météorologiques. Des modèles plus complexes permettent de présenter les systèmes en condition d'irrigation et de drainage en régime variable. Guyon (1972) propose un modèle pour le drainage et Skagg (1979) pour irrigation souterraine.

1.4 Contrôle prédictif

Le contrôle prédictif est une méthode basée sur un modèle décrivant les réactions d'un système. Le contrôle prédictif est constitué de variables cibles et de variables de contrôle. Des itérations mathématiques, suivant le modèle, permettent de trouver la meilleure valeur de contrôle pour optimiser une ou plusieurs variables cibles. Quelques exemples de contrôle prédictifs sont disponibles pour l'irrigation en agriculture (Park et al., 2009; Park et al., 2011; Negenborn et al., 2009). Le contrôle prédictif pourrait être utilisé pour les bassins de culture de sphaigne en utilisant les modèles d'écoulement et l'hypothèse de Dupuit-Forcheimer.

La démarche du contrôle prédictif est présentée à la figure 6 tirée de Haber et al., (2011). Premièrement, les conditions passées sont utilisées pour calculer la valeur prédite "predicted controlled signal". Les valeurs mesurées au pas de temps précédent sont définies par "past controlled signal". La trajectoire de référence "reference trajectory" est la valeur à contrôler et pour la culture de sphaigne, il s'agirait du niveau optimal de la nappe phréatique. Le contrôle prédictif optimise la variable contrôlée afin de minimiser l'erreur de contrôle. L'erreur de contrôle représente la différence entre la trajectoire de référence et le contrôle signalé. À chaque pas de temps, le contrôle prédictif refait la même routine.

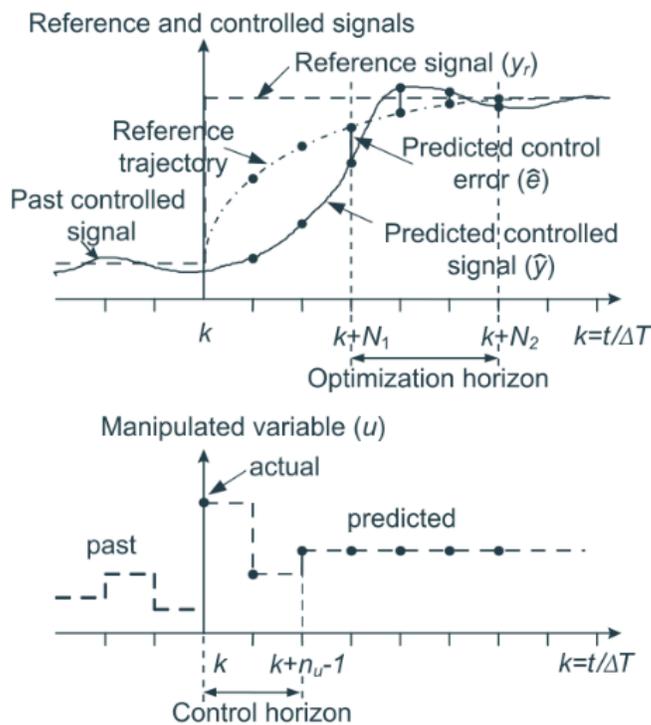


Figure 6 Procédure du contrôle prédictif (Haber et al., 2011).

Chapitre 2 Définition du système de gestion de l'eau

2.1 Représentation du système de gestion de l'eau

Les sphaignes sont sensibles au dessèchement. Pour assurer les conditions optimales de croissance la tension doit demeurer faible au niveau de la sphaigne. L'alimentation en eau des tiges de sphaigne est assurée par l'écoulement vertical non saturé (figure 7). Pour un niveau de la nappe phréatique plus élevé, la tension à la surface sera plus faible pour un même flux. L'eau du flux non saturé provient de la section saturée, c'est-à-dire du niveau de la nappe phréatique. L'écoulement souterrain horizontal achemine l'eau jusqu'au milieu du bassin. Si l'évaporation, causant le flux vertical de l'eau, est égale à l'écoulement saturé horizontal, le niveau de la nappe phréatique demeurera constant. Si l'évaporation ou la précipitation ne sont pas égales à l'écoulement, la position de la nappe variera selon l'équation 4. Le flux de l'écoulement souterrain est contrôlé par le niveau de

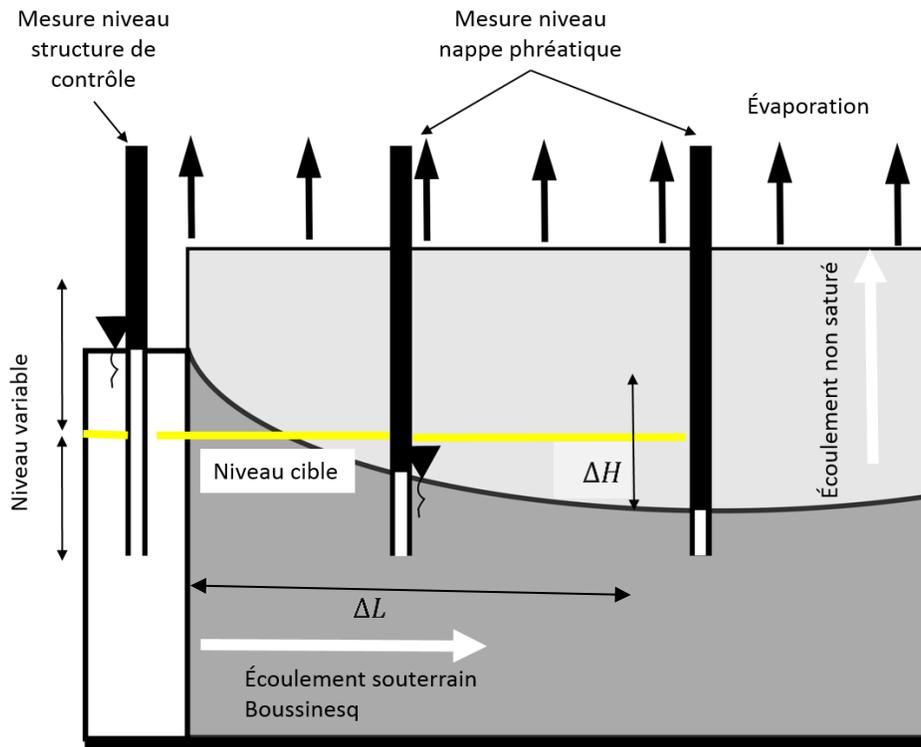


Figure 7 Système de gestion de l'eau.

l'eau dans la structure de contrôle, le niveau de la nappe phréatique et le flux est proportionnel au gradient $\frac{\Delta H}{\Delta L}$ de la loi de Darcy. Le niveau de la nappe phréatique et le niveau de l'eau dans la structure de contrôle doit être mesuré afin d'évaluer le gradient.

2.2 Opération du système

L'opération du système est importante pour définir les équipements et les opérations nécessaires du système de gestion de l'eau. L'opération peut être basée sur une consigne fixe de niveau d'eau ou avec des consignes de niveaux d'eau variables en fonction des conditions climatiques. La consigne principale est le niveau de la nappe phréatique pour ce projet. La boucle d'opération est présentée ci-dessous.

1. Le système doit mesurer le niveau de la nappe phréatique et le niveau d'eau dans la structure de contrôle
2. Le système compare les mesures de la profondeur de la nappe phréatique et le niveau cible pour déterminer si le système est en situation de drainage ou d'irrigation
3. Le système ajuste le niveau de la structure de contrôle pour créer le gradient permettant l'écoulement latéral souterrain nécessaire (drainage ou irrigation).

2.3 Détermination des consignes opération

Les consignes d'opération peuvent être variables ou fixes. Les consignes variables ont pour objectif d'adapter les consignes en fonction des conditions ou prévisions météorologiques. Ainsi des optimisations pourront être réalisées, par exemple remonter la nappe avant un épisode de journées chaudes et sèches.

- Exemple d'opération avec consignes fixes :
 - La consigne de niveau de l'eau est fixe à 10 cm sous la surface.
 - En fonction d'un modèle d'écoulement, le niveau d'eau à maintenir dans la structure de contrôle est déterminé afin de maintenir le niveau de l'eau moyen à la profondeur désirée.
- Exemple d'opération avec cibles variables
 - Déterminer le niveau moyen optimum en fonction :
 - Conditions météorologiques
 - Prévisions météorologiques
 - Déterminer quel est le niveau optimum de la nappe phréatique dans les bassins pour maintenir les conditions hydrologiques acceptables pour la sphaigne.

Utiliser des analyses numériques et d'algorithmes de contrôle prédictif est nécessaire pour déterminer le niveau dans les structures de contrôles pour conserver le niveau de la nappe phréatique à la valeur désirée.

Chapitre 3 Description du site

3.1 Localisation du site et historique

Le site est situé sur la tourbière ombrotrophe #530 près de Shippagan au Nouveau-Brunswick (figure 9). La tourbière a été en exploitation entre 1942 et 1970 (New-Brunswick Minerals and Petroleum, 2014 ; Robert et al., 1999). La méthode d'extraction était par découpage par bloc à la main (figure 8). Cette méthode d'extraction laisse un réseau de tranchées et de chemins. Ce type d'extraction se prête bien à l'aménagement de bassin de culture de sphaigne car les chemins permettent le déplacement de la machinerie et le niveau de la tranchée est généralement près du niveau de la nappe phréatique environnante.

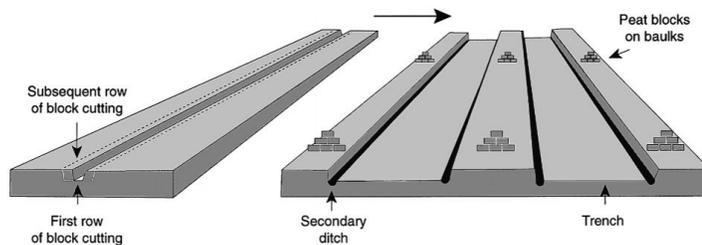


Figure 8. Exploitation d'une tourbière par bloc (Robert et al., 1999).

3.2 Aménagement et établissement des bassins

L'aménagement du site a débuté en mai 2014. La localisation du site est présentée à la figure 9. La première étape a été de retirer la végétation et de creuser les fossés de drainage. Ensuite, les parcelles ont été nivelées avec la machinerie et à la main. L'implantation de la sphaigne a été effectuée durant le mois de juin. Trois traitements de sphaigne ont été implantés : *Sphagnum flavicomans*, *Sphagnum magellanicum* et un mélange. L'aménagement du site est présenté à la figure 10.

Les étapes sommaires de l'aménagement:

1. Retirer la végétation et niveler les bassins,
2. Installer les structures de contrôle, tuyaux de drainage, fossés et barrages,
3. Épandre les fragments de sphaigne suivant le plan expérimental,
4. Épandre le paillis de paille,
5. Maintenir le niveau d'eau dans les bassins à -10 ou -20 cm en fonction des traitements

Six bassins de 1000 m² chacun ont été aménagés avec trois types de structures de drainage : drains souterrains latéraux, drain souterrain central et fossés périphériques (figure 10 et 11). L'écartement nominal des structures de contrôle est sensiblement le même pour toutes les configurations de bassin. Le contrôle du drainage s'effectue initialement par des barrages fixes dans les fossés. Ces fossés se dirigent vers la mer. L'eau

acheminée par le système de pompage est déversée dans les structures de contrôle. Les drains sont installés à environ 75 cm de profondeur et rejoignent un fossé à une extrémité. La station de pompage se situe à environ 150 m des bassins et le conteneur contenant le système de contrôle est situé à 50 m de la station de pompage (figure 10).



Figure 9 Localisation du site (Google Map)

Le site est aménagé avec trois types différents des structures de drainage. Les structures de drainage comprennent des fossés et des drains agricoles. La combinaison des différentes composantes permettra de mesurer leur efficacité, la durabilité dans le temps et l'efficacité de travail. Si les drains sont suffisamment efficaces, la réduction du nombre de fossés facilitera le déplacement des machineries en plus de réduire l'évaporation inutile des fossés.

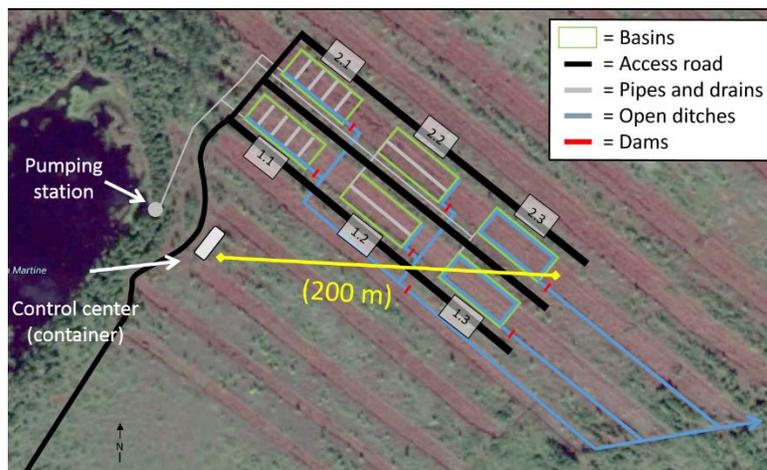


Figure 10 Aménagement du site (schéma de Rémy Pouliot)

L'aménagement le plus simple est le fossé périphérique. Ces bassins sont simplement entourés d'un fossé. La principale caractéristique de cet aménagement est la constance du niveau de la nappe phréatique au niveau des bordures. Les bordures du bassin sont les conditions limites du bassin (figure 11 et annexe 1).

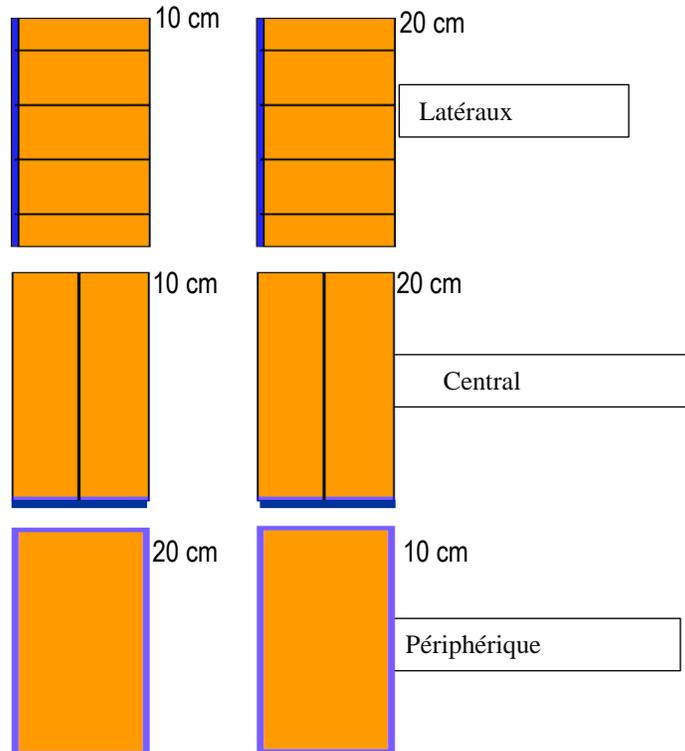


Figure 11 Aménagement des structures de contrôles en bleu les fossés, en noir les tuyaux de drainage et la profondeur du niveau de la nappe phréatique visée.

L'aménagement des bassins avec drain central se limite à un petit fossé relié à un drain qui parcourt le bassin sur sa longueur. Les côtés ne sont pas aménagés, donc le niveau de la nappe phréatique à l'interface entre le chemin et le bassin est influencé par les conditions du chemin. Dans une situation où il y aurait plusieurs drains parallèles, le demi-écartement représenterait le niveau de flux nul.

Les bassins avec les drains latéraux sont constitués de drains parallèles placés perpendiculairement à un fossé latéral dans ce cas l'écartement nominal était de 10 m.

3.3 Objectifs et contraintes spécifiques du système

L'objectif expérimental est de maintenir le niveau dans chaque bassin à une hauteur prédéterminée. Pour ce faire, le système devra maintenir un niveau acceptable dans les structures (drains ou fossés) en mode drainage ou d'irrigation. Pour ce faire le système devra mesurer continuellement les niveaux d'eau dans les bassins et les structure de contrôle.

3.4 Présentation des équipements et des interactions

3.4.1 Stratégie de développement

Le présent projet a été développé en parallèle à l'aménagement du site. Le développement des équipements s'est effectué en continu et en coordination avec les exigences des bassins. Par exemple, le système de pompage doit fonctionner dès l'implantation de la sphaigne. Différentes étapes clés sont définies afin de planifier le développement et sont présentés à la figure 12. Les éléments présentés en pointillé ne sont pas réalisés dans le cadre de ce projet, mais leur identification permet de concevoir un système pouvant permettre de continuer le projet par un futur étudiant.

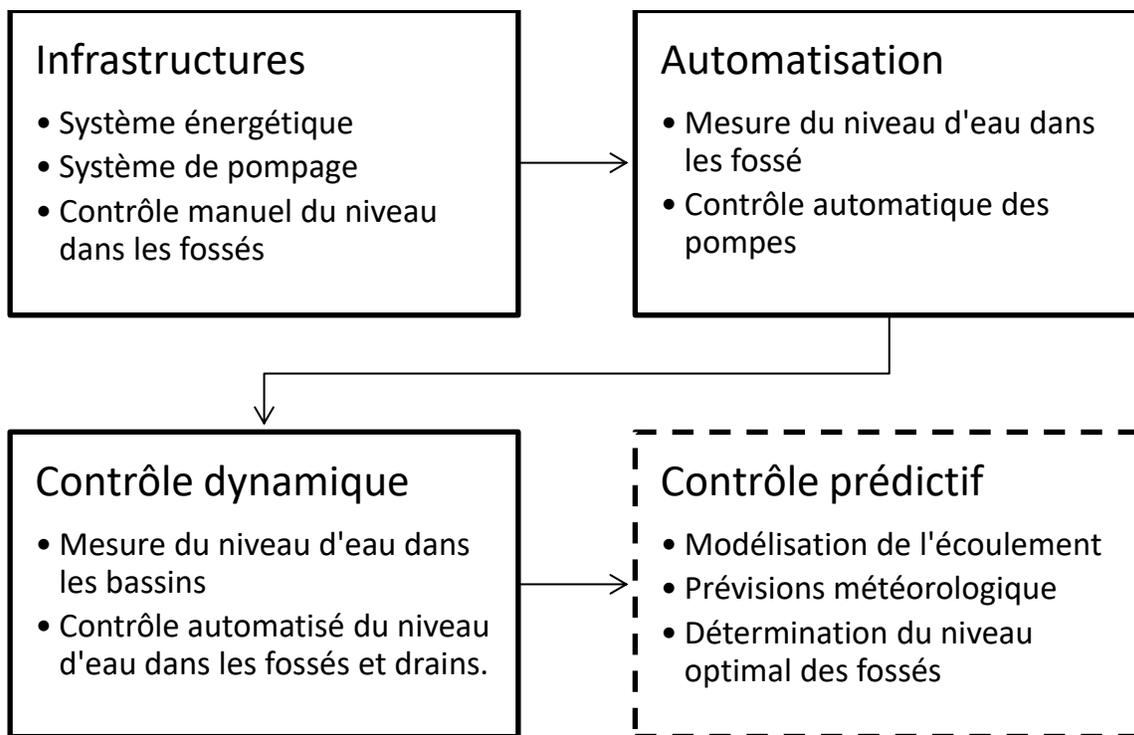


Figure 12 Cheminement du développement du projet.

3.4.2 Prévision des travaux

Les étapes principales du projet sont présentées à la figure 13. Plus de détails concernant les étapes sont présentés dans la section développement et intégration. Les étapes suivent un ordre logique d'intégration qui permet d'intégrer un à un les équipements sur le site.

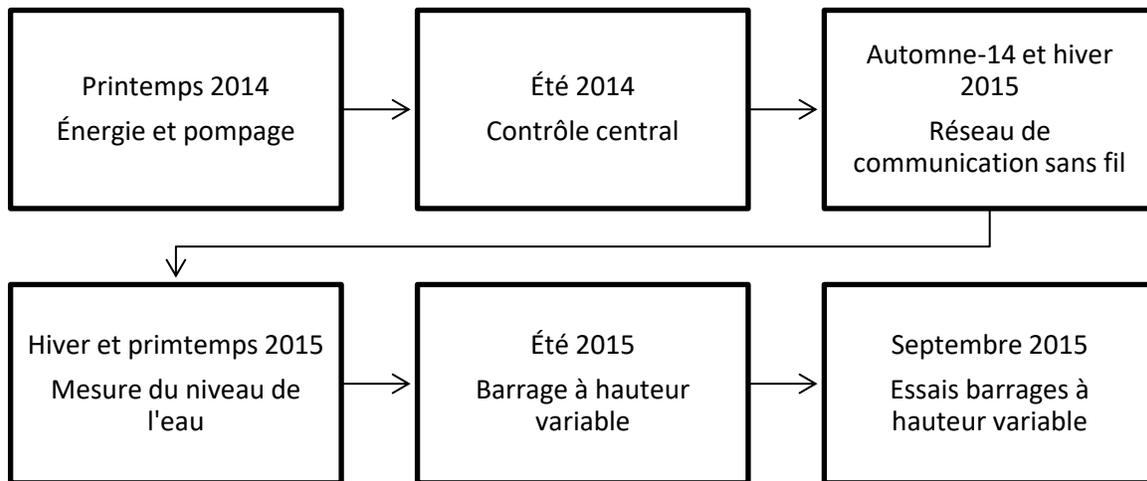


Figure 13 Étapes du projet.

Les éléments développés sont : l'énergie, le pompage, le contrôle central, la lecture du niveau de l'eau en temps réel et les barrages à hauteur variable. L'énergie et le pompage sont les premiers éléments qui ont été mis en fonction sur le site afin de permettre le maintien manuel du niveau de l'eau dans les structures de contrôle. Le développement de capteurs de niveau d'eau en temps réel et la programmation du contrôle central permettent l'automatisation du contrôle de l'irrigation et du drainage. Finalement l'intégration des barrages à hauteur variable permet d'intégrer le contrôle du niveau de l'eau dans les structures de contrôle.

Chapitre 4 Développement et intégration

L'objectif de ce chapitre est de présenter les principaux éléments développés. Les objectifs poursuivis et les contraintes à respecter sont décrits pour chaque élément. Suit le développement et les prototypes. La conception finale et l'intégration sur le site sont ensuite décrites. Pour conclure, une courte analyse de la performance et les recommandations sont présentées. Les éléments présentés sont l'énergie, le pompage, le contrôle central, la programmation, le mesure du niveau de l'eau et les barrages à hauteur variable.

4.1 Système développé et interactions

Les équipements développés sont regroupés en quatre grandes sections : l'énergie, le contrôle de l'eau, le contrôle central et les appareils de mesure du niveau de l'eau. La figure 14 présente de façon schématisée les différents éléments et les liens entre eux. Il y a trois types d'interactions sur le site : énergie, eau et les communications. L'opérateur peut contrôler directement les pompes par des commutateurs ou par un ordinateur par une connexion internet. Les capteurs de niveau d'eau et les barrages à hauteur variable doivent pouvoir communiquer avec le contrôle central. L'énergie électrique doit être suffisante et doit suffire aux besoins des pompes et autres appareils. La communication est assurée par un réseau sans fil.

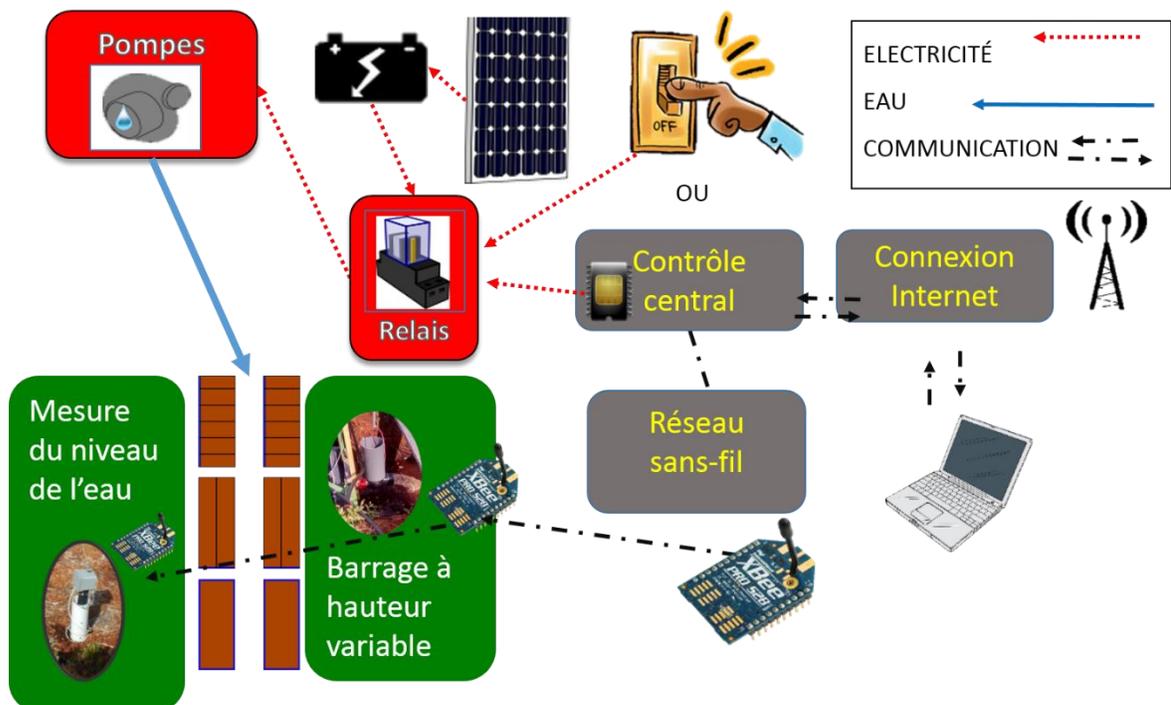


Figure 14 Interactions et disposition des équipements.

4.2 Énergie et pompage

4.2.1 Objectifs et contraintes

Comme les principaux besoins énergétiques sont principalement pour le pompage, ils sont présentés dans la même section. Le design du système de pompage est lié au système énergétique et vice-versa. L'objectif principal du système d'énergie et de pompage est d'acheminer l'eau nécessaire pour compenser l'évaporation dans les bassins. Ce système assure aussi la distribution de l'énergie vers les pompes et les autres équipements électroniques, soit par commutateur manuel ou avec le contrôleur électronique. Le système doit aussi assurer la protection des équipements contre les surtensions ou les courts-circuits, afin d'éviter les bris et les risques d'incendie.

L'emplacement du site a été retenu selon plusieurs contraintes, principalement d'ordre biologique, hydrologique et réglementaire. Le branchement du site sur le réseau électrique présentait un coût prohibitif pour le projet. Plusieurs sources alternatives ont été étudiées.

Trois technologies ont été analysées pour fournir l'énergie : générateur à essence, petite éolienne et des panneaux solaires. Le générateur à essence a rapidement été écarté à cause des risques d'incendie et des risques de contamination par le carburant et l'huile, en plus des difficultés de ravitaillement. Les petites éoliennes sont plus complexes à installer. Pour sa part, les panneaux solaires n'ont aucune pièce mobile, n'ont pas besoin d'être installés en hauteur et ils sont plus discrets. Un autre facteur est qu'en cas d'augmentation de la consommation d'énergie, un ou des panneaux peuvent être rajoutés sans modifications importantes au système. Le conteneur où les équipements sont installés est à plus de 20 m de la source d'eau. Le système énergétique doit acheminer efficacement l'énergie aux pompes.

4.2.2 Description du système

Système énergétique

Le système est constitué d'une section de conversion d'énergie et d'une réserve d'énergie (figure 15). Les composantes de la conversion d'énergie sont les panneaux solaires et le contrôleur de charge. La source d'énergie est constituée de trois panneaux de 250 W de 24 V branchés en série. Le contrôleur de charge contrôle la tension pour charger et effectuer les cycles d'entretien de la réserve énergétique. La réserve énergétique est constituée de 4 batteries à décharge profonde de 6 V et 232 AH reliées en série, (figure 15 et tableau 2)

Tableau 2. Équipement, caractéristiques et fabricants des composantes du système énergétique et de pompage

| Équipements | Caractéristiques | Fabricant |
|----------------------|--|------------------------------|
| Panneau solaire | 250 W nominal EWS-250-P | Enerwatt (Canada) |
| Contrôleur de charge | Maximum power point tracking 1.2kW TS-MPPT-45 | <i>Morningstarcorp (USA)</i> |
| Batterie | Décharge profonde 6 V et 232 AH US 2200 | US battery (USA) |
| Pompes | 24 V haut débit basse pression 50844-0024 | Jabsco-xylem (USA) |

Design du système de pompage

Les 6 bassins à alimenter sont situés entre 60 et 180 mètres de l'étang (figure 10). Plusieurs configurations ont été analysées quant à leur efficacité énergétique, la capacité de contrôle et le coût. Par exemple, une valve contrôlée par solénoïde nécessite une certaine perte de charge, pour opérer, donc une consommation énergétique plus élevée. Une valve à guillotine avec actuateur est plus dispendieuse et compliquée que d'acheter plusieurs petites pompes. L'approche retenue est d'utiliser une pompe par bassin, avec un tuyau semi-rigide de 50 millimètres jusqu'à chacun des bassins. Cette configuration est simple, car elle utilise un relais, une pompe et un tuyau pour chacun des bassins. Le volume de pompage pour chaque bassin peut être estimé à partir du temps de fonctionnement.

Description du système de contrôle

Le système de contrôle des pompes est constitué de 6 unités, une pour chaque pompe. Chaque unité de contrôle est constituée d'une alimentation reliée aux batteries, d'un fusible de 5 A pour protection contre les surcharges et d'un relais 24 V. Le contrôle du relais s'effectue par un commutateur. Le commutateur possède trois positions, marche, arrêt et contrôle automatique, ainsi qu'un indicateur lumineux indique si la pompe est alimentée, figure 15). L'annexe B présente l'installation du système et l'annexe C le plan détaillé du circuit électrique

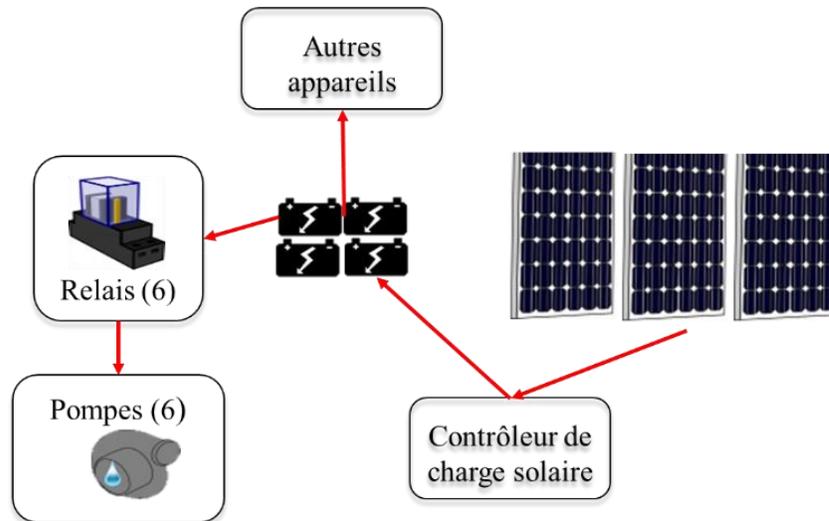


Figure 15 Composantes principales du système de pompage.

4.3 Contrôle central

Le contrôle central est situé dans le conteneur maritime près du système énergétique central. Le contrôle central effectue la coordination entre les capteurs, les consignes et le système de pompage. Il a pour objectifs principaux de contrôler les départs et arrêts des pompes conformément aux consignes, d'effectuer la prise et l'analyse des données et de les sauvegarder. Le contrôle central doit pouvoir fonctionner avec le système de courant continu du système énergétique et avoir une faible consommation.

4.3.1 Objectifs et contraintes

Analyse des contraintes

L'ordinateur doit pouvoir compiler et exécuter des programmes dans les principaux langages de programmation tels que C, C++, Ruby, Python. De plus, le système doit pouvoir exécuter plusieurs opérations simultanément. Par exemple, le contrôle des pompes nécessite de recevoir les données des capteurs et gérer la connexion à distance, effectuer les calculs et l'analyse des consignes et gérer le contrôleur des relais. La capacité de calcul doit être suffisante pour effectuer des analyses numériques en temps réel pour l'intégration du contrôle prédictif. L'utilisateur doit être capable de modifier les paramètres et la configuration du système durant l'opération. Le contrôle central doit pouvoir mettre en fonction les relais de pompage et de mesurer la tension des batteries pour évaluer la réserve énergétique.

La communication doit être assurée à deux niveaux, la première à l'intérieur du site, la deuxième par internet pour la connexion externe. Pour communiquer de l'information sur quelques centaines de mètres, les signaux

digitaux sont supérieurs aux signaux analogiques. Le système de communication intrasite doit donc assurer l'échange de commandes et de données dans les deux directions soit du contrôle central aux capteurs et barrages à hauteur variable et de ceux-ci vers le contrôle central. La communication externe, par internet, doit être possible avec l'ordinateur principal. Pour ce faire, une adresse IP fixe peut être utilisée. Avec ce type de connexion, l'utilisateur peut télécharger ou envoyer des fichiers et modifier les fichiers de programmation en temps réel et à distance.

La consommation électrique du contrôle central doit être faible étant donné que l'ordinateur n'est pas relié au réseau électrique. Par un exemple, un ordinateur conventionnel peut consommer jusqu'à 150 W² en continu. En estimant que la consommation pouvant être réduite jusqu'à 25 W, cela représente 0,6 kW-h par jour. Le pompage typique d'une journée consomme environ 1,2 kW-h, donc l'utilisation d'un ordinateur conventionnel nécessite un ajustement important de la conception du système énergétique car il représente une charge d'environ 50 % du pompage. L'ordinateur central doit consommer moins d'énergie possible afin de ne pas nécessiter d'augmentation du nombre de panneaux solaires.

4.3.2 Description du système

Sommaire du design

Le système de contrôle est constitué d'un ordinateur à carte unique, un appareil de mesure analogique et de contrôle de relais USB, un module de communication radio USB et un modem cellulaire pour la connexion internet (figure 16). Les appareils USB sont versatiles et ils peuvent être facilement remplacés.

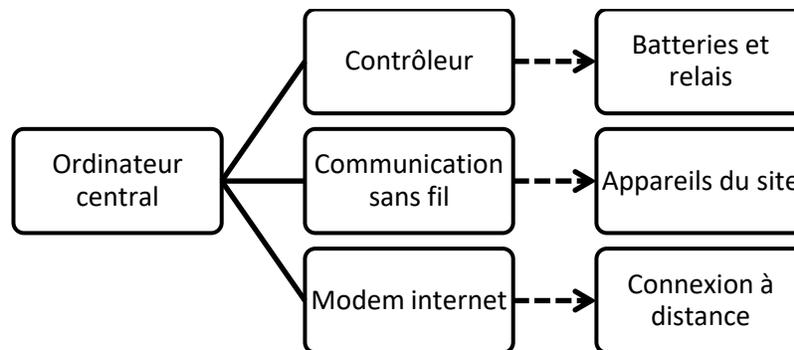


Figure 16 Disposition des équipements du contrôle central.

² Par exemple, le régulateur de tension d'un ordinateur EliteBook 8570w est 19,5 V et 7,7 A=150W

Les ordinateurs à carte unique permettent de diminuer la consommation électrique en limitant le nombre de composantes. Ces ordinateurs n'ont pas de disque dur et d'écran. Ils opèrent sur des systèmes d'opération allégés de Windows ou de Linux. Ces ordinateurs ont besoin de moins de performance et la licence est gratuite. Deux ordinateurs peuvent être utilisés Raspberry Pi (RPI) et BeagleBone Black (BBB). Les principales caractéristiques de ces ordinateurs sont présentées au tableau 3. Les performances de ces ordinateurs sont suffisantes pour faire des analyses numériques nécessaires au contrôle.

Tableau 3 Comparaison en deux ordinateurs à carte unique (données de 2014).

| | Raspberry Pi A | BeagleBone Black (BBB) |
|-------------------------|----------------|------------------------|
| Linux | oui | oui |
| Ubuntu | Non(2014) | oui |
| Drivers disponible | + ou - | oui |
| Processeur | 700 MHz | 1000 MHz |
| Mémoire vive | 256 MB | 512 MB |
| UBS et SD | oui | oui |
| Consommation électrique | 1.5 watt | 1.05 à 2,3 W |
| Prix | moins 50\$ | moins de 70\$ |

Ces ordinateurs sont équipés de ports USB, de lecteur de carte SD et d'un port Ethernet. L'alimentation électrique est de 5 V. La consommation maximale de courant est de 1 A. La consommation normale d'opération est inférieure 2W. L'énergie utilisée pour une journée est d'environ 0,06 kW-h représentant moins de 5 % de l'énergie de pompage. Des régulateurs de tension permettant de passer du système 24 volts à 5 volts sont communs et peu coûteux. L'utilisation de régulateur de type *stepdown* (typique 'RECOM' série R-78) est nécessaire, car l'efficacité est supérieure 85 %. Un régulateur résistif dissiperait une grande proportion de l'énergie en chaleur.

Le choix s'est arrêté au BBB pour le projet. La principale raison est qu'une version d'Ubuntu est disponible pour le BBB. Le développement est facilité puisque le système d'exploitation Ubuntu est installé sur un ordinateur portable. Un serveur web est intégré au BBB assurant la capacité de connexion à distance pour faciliter le développement.

Sortie numérique et acquisition de données USB.

Des sorties et entrées sont disponibles sur le BBB, toutefois ces sorties ne sont pas protégées, la tension et le courant maximums sont faibles. Pour ces raisons, l'interface électrique est assurée par un autre équipement. Ce type d'équipement connecté par USB possède des protections contre les surtensions et l'électricité statique.

Il peut aussi opérer les sorties à plus haute tension que 5 V. L'appareil retenu doit posséder au minimum 7 sorties pouvant contrôler des relais 24 V.

La facilité de programmation est aussi importante. L'appareil doit posséder une librairie de commandes dans un langage de programmation commun et il doit être contrôlé par l'ordinateur central.

Le tableau 4 présente les différentes configurations d'accessoires du LabJack U3. Le DB15 et le PS12DC peuvent être connectés afin de compléter le U3. Comme l'objectif de l'appareil est de pouvoir contrôler 7 relais, la combinaison U3 et PS12DC est mieux adaptée à la situation. La librairie LabJack Python rend possible d'effectuer une lecture analogique ou changer l'état d'un relais avec une seule ligne de programmation.

Tableau 4 Caractéristiques des équipements LabJack et accessoires (PS12DC et DB15).

| | E analogue et E/S digital | Sortie relais | Sortie analogique | Autres |
|------------|---------------------------|---------------|-------------------|-----------------|
| LabJack U3 | 8 | 0 | 2 | 2 compteurs |
| PS12DC | 0 | 12 | 0 | 0 |
| DB15 | 8 | 0 | 0 | 4 sorties fixes |

E= entré, S=sortie

Interface de communication avec les capteurs :

Différentes solutions sont envisageables pour la communication intrasite. Un réseau RS-485 ou par radio ont été intégrés. Le réseau RS-485 a été aménagé à l'été 2014 et c'est révélé moins fiable et plus complexe qu'espéré. Les composantes achetées n'étaient pas adéquates pour la distance à parcourir. Le système par onde radio a donc été envisagé à l'automne 2014. Le protocole ZigBee permet une communication efficace entre les différents capteurs et l'ordinateur ayant l'approche d'envoyer un message avec '« adresse : données »' qui facilite la gestion de l'information puisque l'adresse est unique pour chaque module radio associé à un capteur. La méthode de fonctionnement est relativement simple et est présentée dans la section du développement des capteurs de niveau d'eau.

Connexion internet par réseaux cellulaires locaux

Un modem connecté à un réseau cellulaire assure la connexion à internet. Le modem doit avoir une connexion avec adresse IP fixe. La procédure de connexion est semblable à un serveur web conventionnel. L'utilisateur se connecte en Secure Shell à l'adresse IP avec le port défini.

4.4 Structure de programmation

L'objectif de base de la programmation est de définir les opérations nécessaires au contrôle du système d'irrigation et de drainage en langage exécutable par un ordinateur. Les opérations de contrôle portent sur la communication, l'analyse, les calculs et le contrôle du système. La programmation doit aussi effectuer la sauvegarde des données et rendre possible la connexion à distance.

4.4.1 Objectifs et contraintes

Le programme doit être développé selon une approche orientée objet. Cette approche permet d'obtenir un programme facilement ajustable selon les circonstances en plus de faciliter le développement. Chaque objectif ou tâche du programme sera comprise dans une classe. Chaque classe correspond à un objet qui est initialisé au départ du programme selon les informations contenues dans un fichier de configuration.

L'utilisation d'un gestionnaire de messages entre les objets permet l'enchaînement des opérations sans appeler directement la fonction suivante. Le gestionnaire de messages utilisé est la librairie « PyPubSub ³ ». Le gestionnaire des messages crée en quelque sorte une centrale qui reçoit les messages puis appelle les fonctions associées. Un message peut démarrer plus d'une opération. De plus, le message peut contenir des informations. Cela permet d'alléger la programmation en évitant de créer une structure rigide et des variables supplémentaires.

Le programme doit pouvoir fonctionner sans la supervision d'un opérateur. Le système doit être en mesure de démarrer lors de la mise sous tension de l'ordinateur ou de redémarrer si le programme s'arrête. Le système doit éteindre les pompes en cas d'anomalie. Par exemple, si une ou des pompes sont en fonction lors d'un redémarrage, le système doit éteindre les pompes.

4.4.2 Logique du contrôle

La logique du contrôle principale (figure 17) comprend quatre conditions principales, soit le niveau d'eau, l'énergie disponible dans les batteries, le temps de pompage journalier maximum et le délai entre les pompages. Lorsqu'une irrigation est nécessaire, le contrôleur enclenche le relais et la pompe est alimentée.

³ PyPubSub v3.3.0 <https://github.com/schollii/pypubsub>

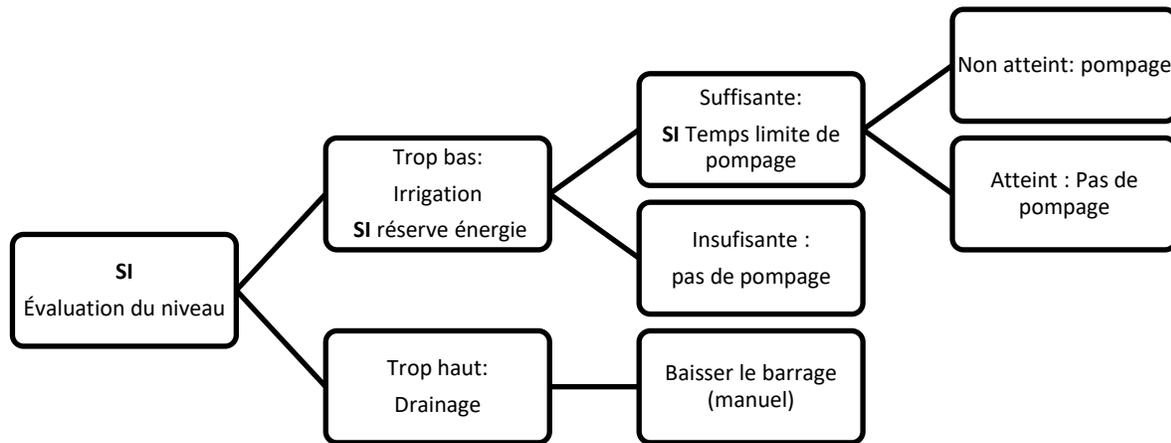


Figure 17 Logique simplifiée d'opération du système de gestion de l'eau.

4.4.3 Opérations du programme

L'initialisation est la première étape du programme. C'est à cette étape que les variables contenues dans les fichiers de configurations sont lues. Chacune des classes est initialisée à partir des variables du fichier de configuration. L'initialisation démarre le "threading"⁴ qui permet l'opération en parallèle de la boucle principale et de la fonction qui reçoit les communications radio. Après les étapes d'initialisation, la boucle principale de contrôle est démarrée.

Lors du démarrage de l'ordinateur, le programme principal est démarré, la fonction "Upstart"⁵ démarre le programme principal de contrôle. La fonction "Upstart" permet aussi de redémarrer le programme principal si celui-ci est arrêté à cause d'une erreur. Lors de l'initialisation du programme principal, toutes les sorties du PS12DC contrôlant des relais du système de pompage sont désactivées pour s'assurer que les pompes ne demeurent pas activées suite à un redémarrage de l'ordinateur.

La communication entre les équipements sur le site se fait à l'aide de modules sans-fil Xbee (Xbee et Xbee Pro 2.4GHz, series 2 de Digi). L'interface entre le Xbee et l'ordinateur central ce fait par un port USB. Ce port est géré par une entrée de communication série virtuelle. Une librairie est disponible en Python permettant

⁴ <https://docs.python.org/2/library/threading.html>

⁵ (<http://upstart.ubuntu.com/>)

l'intégration rapide de la communication XBee avec le système. Cette librairie décode l'information en hexadécimale du XBee en caractères lisible (ASCII). La programmation reçoit ou envoie les informations sous la forme, "adresse unique du XBee : message et information".

La sauvegarde des données est simple; elle se limite à additionner une ligne dans un fichier texte à chaque pas de temps. Par exemple, le dictionnaire contenant les données de hauteur d'eau ajustées est sauvegardé dans un fichier texte avec l'heure. La sauvegarde des données n'est pas essentielle au fonctionnement, mais permet de vérifier si le système fonctionne correctement, de déterminer les causes d'un mal fonctionnement. Ces données sont exportables dans le logiciel Excel et peuvent être lues par un humain.

4.4.4 Présentation de la structure de programmation

Le programme est constitué de trois types de fichiers différents. Les premiers sont les fichiers principaux de programmation et ils contiennent des classes et des fonctions. Ensuite, il y a les fichiers de configuration contenant les paramètres susceptibles d'être modifiés par l'utilisateur. Finalement, les fichiers externes et librairies développés par d'autres, sont des programmes utilisés pour simplifier la programmation tels que LabJack Python⁶ et XBee 2.2.3⁷

La hiérarchie de la programmation est présentée à la figure 18. Le programme principal est constitué de plusieurs fichiers représenté par la deuxième colonne de la figure 18. Le fichier de configuration comprend toutes les informations susceptibles d'être modifiées, telles que les hauteurs de références des capteurs, les limites de temps de pompage et les consignes. Le cycle principal regroupe toutes les opérations qui sont exécutées à chaque cycle (tableau 5). Les fonctions simultanées sont les fonctions qui ne sont pas démarrées directement par le cycle principal. Par exemple, la réception des données radio se fait en continu. L'étape d'initialisation attribue les variables et les fonctions. Le gestionnaire de message permet d'établir les liens entre les fonctions. Le cycle principal contient l'ensemble des opérations nécessaires au contrôle du système.

⁶ <https://labjack.com/support/software/examples/ud/labjackpython>

⁷ <https://pypi.python.org/pypi/XBee>

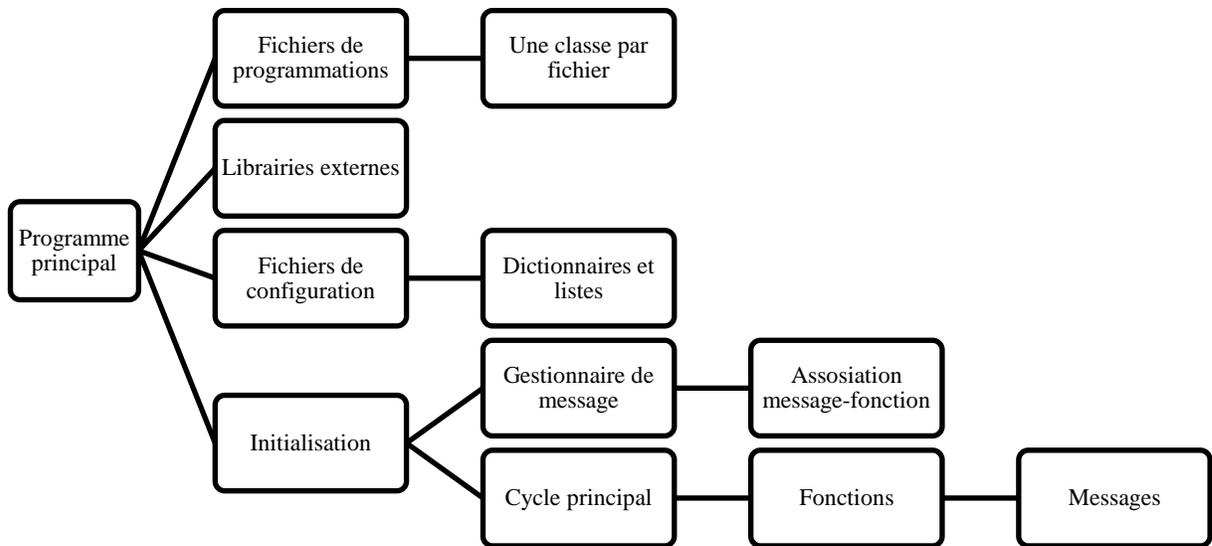


Figure 18 Hiérarchie de la programmation

4.4.5 Principales étapes du programme principal

Le tableau 5 présente les principales étapes et opérations réalisées par le programme principal. Les classes sont numérotées de 1 à 10 et une classe est réalisée en simultané pour la réception de l'information. Un message est envoyé à la fin de chaque fonction pour faire débiter la fonction suivante.

Un exemple de classe est présenté à la figure 19. La première section encadrée de pointillés est l'initialisation de la classe. Le dictionnaire "*Descr_sondes*", contenu dans le fichier de configuration, est rendu disponible pour la fonction pompage. La fonction pompage est encadrée de tirets, c'est dans cette fonction que les tâches sont définies.

Cette fonction est exécutée quand le message ("start","action")est reçu. À la fin de la fonction, le message ("start","sauve donnees") est envoyé pour demander la sauvegarde des données (tableau 5). Le dictionnaire "compteur_temps" est modifié par la commande (*update*). Les modifications sont accessibles pour les autres fonctions du programme. La classe "*sauvegarde temps*" pourra inscrire le temps dans les fichiers de sauvegardes. Le *d.setFIOState* est un exemple d'appel d'une librairie, *LabjackPython* pour cet exemple. Le dictionnaire *sortie[selecteur]* fait appel au numéro de la sortie pour une pompe contenu dans le fichier de configuration.

Tableau 5 Liste des principales opérations.

| # | Classe | Description |
|----|--------------------|---|
| 1 | Horloge | Démarre chaque cycle à un intervalle déterminé |
| 2 | Lecture analogique | Évaluation de la tension des batteries principales |
| 3 | Gen_msg | Prépare les messages manuels contenus dans un fichier texte modifiable par l'utilisateur Envoyer les messages à la classe Xbee |
| 4 | MSG-cycle | Messages pour les mesures de la tension et du niveau de chaque barrage |
| 5 | Calculs | Ajustement des données brutes aux valeurs comparables avec les consignes |
| 6 | Analyse_hauteur | Vérification si les consignes de hauteur sont respectées |
| 7 | Analyse_temps | Vérification si les consignes du temps sont respectées |
| 8 | Décision | Analyse des conditions d'irrigation Définir si nouvelles conditions Analyser si besoin de charger les barrages |
| 9 | Actions | Contrôler les sorties du contrôleur USB |
| 10 | Données | Sauvegarde des différentes données dans des fichiers texte |
| | Xbee | Lire les données qui arrivent du XBee Envoyer les données au XBee sélectionnés |

```

#Version 2
# importation des librairies necessaires"""
from pubsub import pub
import time

class Actions(object) :
    "effectue les actions"
    #initialisation des variables du fichier de configuration
    def __init__(self,d,sorties,compteur_temps,ordre) :
        """
        self.d=d # appel pour les fonctions de la librairie LabJack python
        self.sorties=sorties# sortie du labjack
        self.compteur_temps=compteur_temps# Dict. contenant les temps de pompage
        self.ordre=ordre# Dict. contenant les ordres de pompages
        pub.subscribe(self.pompage, ('start', 'actions'))# Fonction demarre avec msg 'start','actions'
        #fonction du pompage

    def pompage(self) :
        #si le dictionnaire est vide on passe
        if not self.ordre:
            pub.sendMessage(('start', 'sauve donnees')) # msg. de demarre la sauvegarde
        #si le dict. n'est pas vide on fait les actions
        else:
            for selecteur in self.ordre: #selecteur = 1.1 a 2.3 dans self.ordre
                bassin=self.compteur_temps[selecteur]# dict. { '1.1':{'start':0,'stop':0,'total_bassin':0}
                tnow=time.time()# tnow valeur en seconde...
                #si ordre est 1
                if self.ordre[selecteur]==1: #demarre les pompes
                    self.d.setFIOState (self.sorties[selecteur],1)#mettre le relais a ON"""
                    bassin.update({'start':tnow}) # actualise le temps de depart
                    print selecteur, 'start',self.compteur_temps[selecteur]['start']#print pour suivre a l'ecran

                else:#si ordre ==0
                    self.d.setFIOState (self.sorties[selecteur],0) #mettre le relais a OFF"""
                    bassin.update({'stop':tnow})# actualise le temps d'arret
                    print selecteur, 'stop', tnow
            pub.sendMessage(('start', 'sauve donnees')) # msg. de demarre la sauvegarde

```

Figure 19 Exemple d'une classe du programme principale.

4.6 Principales difficultés

Le contrôle du pompage en fonction du niveau d'eau nécessite plusieurs vérifications et créations d'étapes intermédiaires. Par exemple, si le niveau atteint la consigne, le système démarrera la pompe, le cycle suivant l'éteindra puisque le niveau de consigne sera probablement dépassé. Une fonction intermédiaire a été créée pour incorporer deux consignes, la consigne de départ et une consigne d'arrêt.

4.5 Mesure du niveau de l'eau

4.5.1 Objectifs et contraintes

L'appareil doit pouvoir effectuer la mesure du niveau de la nappe phréatique à l'intérieur d'un puits de faible diamètre. Les puits doivent pouvoir être installés manuellement avec une terrière, le diamètre des puits est donc limité à 75 mm maximum. L'appareil doit aussi être en mesure d'effectuer des lectures de niveau d'eau dans les fossés. Les appareils doivent pouvoir s'installer aux endroits les plus pertinents, c'est-à-dire aux conditions limites de modélisation, telles que la structure de drainage (fossé) et le milieu du bassin ou à mi-chemin de deux drains souterrains. Une lecture supplémentaire au quart de l'écartement améliorerait la précision de l'analyse. Le capteur de l'appareil doit être en mesure d'effectuer des mesures de la profondeur de la nappe entre 0 et 50 cm. Les mesures doivent être significatives à 5 mm. La précision des capteurs doit être analysée.

La communication en temps réel est nécessaire pour que le contrôle central puisse contrôler le système. La communication entre le capteur et le contrôle central doit s'effectuer sans perte de précision. De plus, la structure de communication doit s'intégrer facilement au contrôle central. C'est principalement la communication qui force le développement d'un appareil, puisque les appareils de mesure de niveau d'eau généralement disponibles ne peuvent communiquer en temps réel et les appareils pouvant communiquer sont mal adaptés aux mesures 0 à 50 cm de profondeur et ne peuvent être intégrés facilement.

Comme les appareils sont installés entre 100 et 300 m du système énergétique central, la consommation électrique est un critère important. Les appareils doivent pouvoir opérer sans être reliés directement au système énergétique. Les appareils doivent avoir plusieurs semaines d'autonomie. Plus la consommation sera limitée, moins le système d'alimentation sera coûteux.

L'appareil doit aussi être échangeable par un de remplacement sans nécessité de connaissances particulières en électronique. L'appareil doit pouvoir conserver une copie de l'information, au cas où la communication radio n'ait pas fonctionné.

Le coût est aussi un critère important. L'objectif est d'installer un plus grand nombre de capteurs possibles, ce qui aidera la précision de l'analyse. Le nombre minimal de capteurs est de 12 ce qui représente une lecture au niveau du barrage dans les fossés et une au centre de l'écartement dans chaque bassin. L'ajout de 6 autres capteurs permettrait d'augmenter la précision de l'évaluation. La figure 20 présente de façon schématisée les exigences et les fonctionnalités de l'appareil de mesure du niveau d'eau.

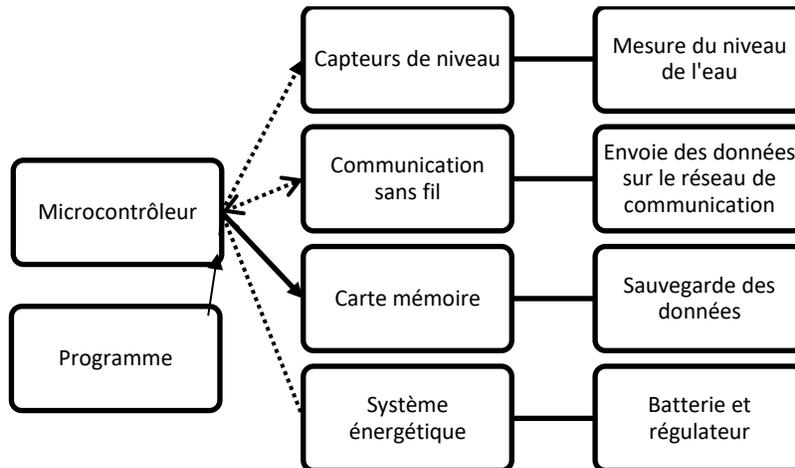


Figure 20 Schéma d'un appareil de lecture de niveau d'eau.

4.5.2 Recherche de solutions

- Stratégie de développement

Le type de capteur retenu est le sonar pour la simplicité d'opération et la faible consommation électrique. Le capteur retenu est le MB7389 (MaxBotix, USA). Ce capteur s'interface facilement avec des microcontrôleurs et peut être alimenté directement par un microcontrôleur. Le microcontrôleur utilisé pour le développement est du type Arduino. Le module de communication radio est du type XBee. Plusieurs exemples de la combinaison microcontrôleur (MCL) Arduino et module XBee ont été répertoriés. Des composants permettant l'intégration entre Arduino et XBee sont disponibles (Charles Bell, 2013 et Gislason 2008).

Les modules XBee utilisent le protocole de communication ZigBee. Ce protocole permet d'acheminer les données dans un *Self healing network* (Gislason 2008). Les modules ZigBee se regroupent en trois rôles. Le coordonnateur, les routeurs, et les *end devices* (figure 21). Les *end devices* peuvent utiliser le mode veille et consommer très peu d'électricité. Ces modules sont peu dispendieux et largement disponibles. Plusieurs interfaces physiques permettent de connecter ces modules à des microcontrôleurs et aux ordinateurs. Un logiciel est disponible gratuitement pour la programmation des modules et du réseau. Une librairie en Python (Xbee 2.2.3⁸) est disponible pour extraire l'information de la communication radio.

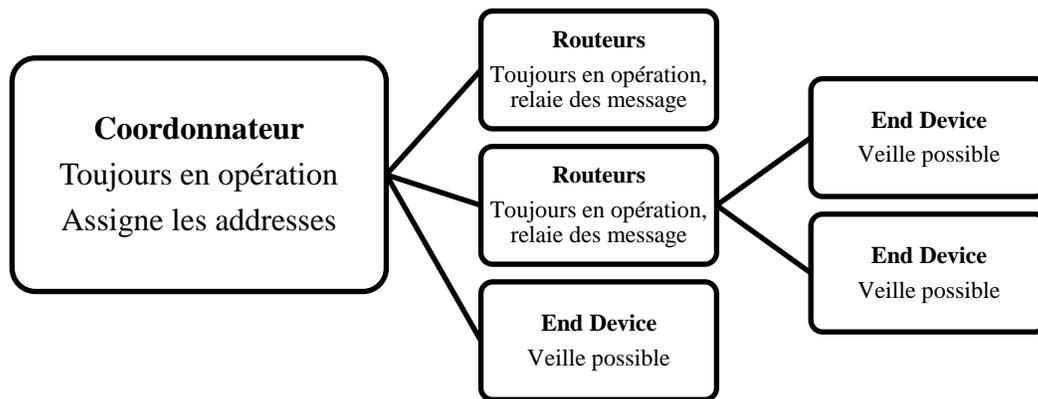


Figure 21 Organisation du réseau sans fil ZigBee.

Développement de prototypes

Avant le développement des prototypes, le fonctionnement sommaire de l'appareil a été défini. Le principe de fonctionnement des prototypes est présenté à la figure 22. Les principales tâches sont répétées à chaque cycle. L'étape la plus importante est la mise en veille des équipements et du microcontrôleur (MCL) pour minimiser la consommation électrique. Durant la veille, la consommation n'est que de quelques micro-Ampères.

⁸ <https://pypi.python.org/pypi/XBee>

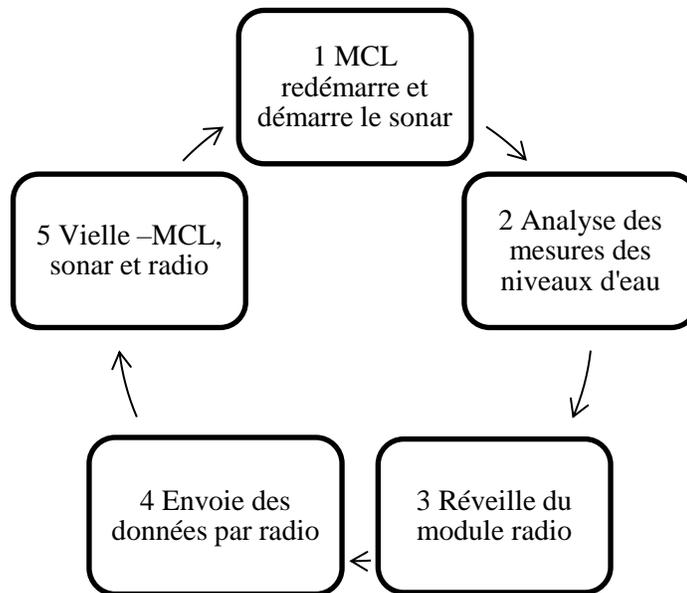


Figure 22 Principales étapes du fonctionnement de l'appareil de mesure du niveau d'eau.

Deux prototypes ont été assemblés et testés pour sélectionner la meilleure conception selon le schéma de la figure 20. Les essais ont permis d'identifier les avantages et lacunes de ces deux solutions. La première solution est avec un microcontrôleur de type ATTiny⁹ (Atmel, USA) relié à plusieurs composants avec des câbles. La deuxième utilise un circuit Stalker V3¹⁰ (Seeedstudio, China) qui est semblable au Arduino Uno¹¹. Un chargeur solaire, un port XBee et un lecteur de carte SD sont intégrés au Stalker V3. Ces prototypes sont présentés à la figure 23. Le tableau 6 présente les principales caractéristiques et observations des configurations réalisées.

Le sonar est alimenté par une sortie du microcontrôleur et la communication est de type série (serial) avec seulement un fil de communication sortie (TX). Le XBee est alimenté en 3,3 V. Une entrée du XBee est dédiée au contrôle de la veille; quand le module est en veille, la consommation électrique est de l'ordre de quelques μ A. Une connexion série entre le XBee et le microcontrôleur est requise. Finalement, un régulateur de tension assure l'alimentation électrique des composants.

⁹ <http://www.atmel.com/products/microcontrollers/avr/tinyavr.aspx>

¹⁰ <https://www.seeedstudio.com/Seeedduino-Stalker-v3-p-1882.html>

¹¹ <https://www.arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno>

La solution avec le ATtiny est moins dispendieuse, mais présente deux lacunes importantes : le remplacement régulier des batteries et l'absence d'horloge. L'horloge permet de mesure et transmettre le temps de la prise de donnée. La solution avec le Stalker est donc retenue.

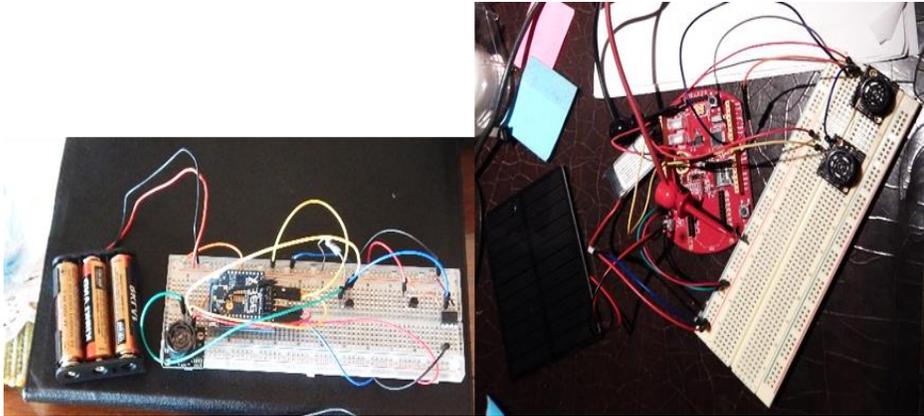


Figure 23 Droite: prototype avec ATtiny et Gauche; Stalker.

Tableau 6 Description des prototypes.

| Caractéristiques | Système ATtiny | Circuit complet Stalker |
|-------------------------|--------------------------------------|--|
| Microcontrôleur | ATtiny 85 | Atmega328 |
| Logiciel | Arduino | Arduino |
| Contrôle du temps | Compteur relatif | Horloge, date et heure |
| Calculs et analyse | Limitées | Importante |
| Module radio | Connexion externe | Connecteurs intégré |
| Alimentation électrique | Externe avec régulateur de tension | Solaire et rechargeable, composantes intégrées |
| Consommation énergie | Faible (plusieurs semaines par 4 AA) | Faible et autonome avec panneau solaire |
| Sauvegarde des données | Très complexe | Carte SD intégré |
| Assemblage | Circuit imprimé sur mesure | Composantes intégrées sur un circuit |
| Nombre max. de sonar | 1 | >3 |
| Coût | Faible | Moyen |
| Complexité intégration | Élevée | Faible |

4.5.3 Description du design

L'intégration physique est présentée à la figure 24. L'ensemble des composantes est déposé dans un boîtier de connexion électrique de 100 mm disponible dans les quincailleries. Les deuxièmes sonars sont installés dans des boîtiers identiques et reliés par un câble de 8 m. Le regroupement de deux sonars par microcontrôleur est principalement par souci d'économie.

Détails de l'appareil

Le microcontrôleur possède un contrôleur de charge et un régulateur de tension intégré. Ces équipements permettent le raccordement d'un petit panneau solaire et d'une batterie au lithium. Le système permet d'être

4.5.4 Installation et mise en fonction

Les puits sont installés à la main à une profondeur de 90 cm avec une section d'environ 35-40 cm au-dessus de la tourbe, car les sonars évaluent les distances à partir de 30 cm. L'emplacement des puits doit être évalué par rapport à une référence, les niveaux doivent être comparés selon le même plan de référence. Chaque microcontrôleur est relié à deux sonars, le sonar interne est celui dans le même boîtier que le microcontrôleur et l'externe est celui dans le deuxième boîtier. Pour identifier les bassins, l'adresse MAC unique du module de communication Xbee doit être notée et inscrite au fichier de configuration du programme principal.

4.6 Barrage à hauteur variable

4.6.1 Objectifs et contraintes

L'objectif principal des barrages à hauteur variable est de contrôler le niveau de l'eau dans les fossés. La hauteur de contrôle doit avoir une amplitude minimale de 20 cm. L'équipement doit s'adapter aux barrages en bois et d'acier installés lors de l'aménagement du site au printemps 2014. La précision de l'ajustement du niveau doit être de l'ordre d'un centimètre. Le système doit pouvoir recevoir des commandes du contrôle central, les exécuter et renvoyer les informations demandées. Ces barrages doivent consommer peu d'électricité puisqu'ils sont installés entre 100 et 300 mètres du système énergétique principale. De plus, les barrages doivent transmettre la hauteur du point de déversement et la mesure du niveau de l'eau dans la structure de contrôle en temps réel. L'opération doit se faire de façon sécuritaire. Par exemple, en cas de mauvais fonctionnement, les bassins ne doivent pas être inondés ou drainés complètement.

Peu de structure de contrôle de l'eau a été identifié sur le marché. Plusieurs structures de contrôle pour l'irrigation agricole contrôlent seulement en position complètement ouverte ou complètement fermée. Pour d'autres barrages, le contrôleur n'est pas compatible avec le système de contrôle central. Les valves d'irrigation souterraine avec flotteur ne sont pas automatisées. La conception et le développement de la structure de

contrôle s'avèrent donc être la solution la plus adaptée. La figure 25 présente le schéma des composantes principales d'un système de contrôle de niveau de l'eau avec un barrage à hauteur variable.

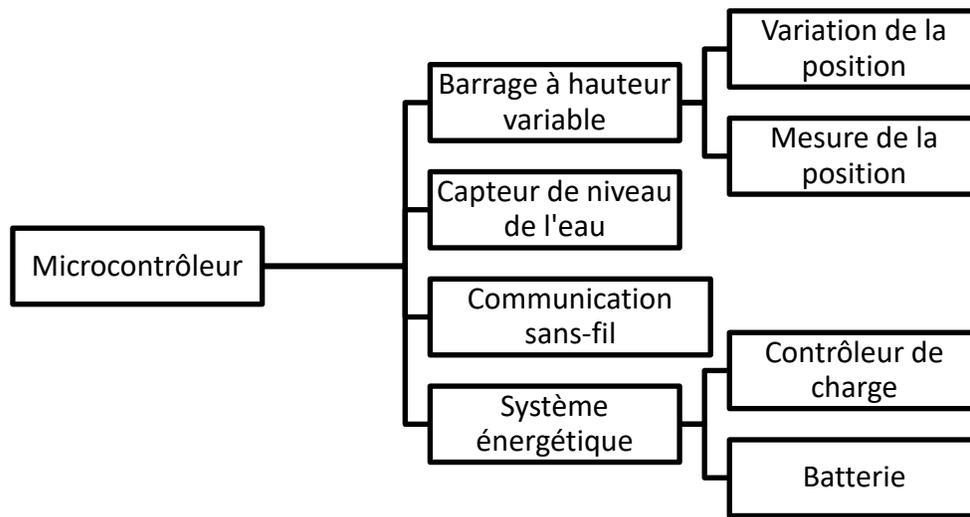


Figure 25 Schéma des composantes d'un barrage à hauteur variable.

4.6.2 Recherche de solutions

Plusieurs approches ont été étudiées pour le contrôle du système à hauteur variable. La solution retenue pour les premiers essais est une valve contrôlée par un flotteur de type contrôle de drainage avec niveau ajustable (figure 26).

Le prototype a été construit à partir d'un clapet antiretour de 100 mm pour eaux usées acheté en quincaillerie. Le clapet est utilisé dans la direction opposée de sorte que l'eau contenue dans le bassin pousse sur le clapet. Un bras de levier et un flotteur permettent de contrer la force exercée par l'eau sur le clapet. Lorsque le niveau de l'eau augmente, une plus grande partie du flotteur s'enfonce dans l'eau en augmentant la poussée d'Archimède qui force le clapet à ouvrir, (figure 27). Des essais, réalisés en février 2015, ont permis de vérifier le concept d'adaptation d'un clapet antiretour comme barrage à hauteur variable.

Les principales observations de l'essai préliminaire montrent que la valve s'ouvre quand le niveau d'eau augmente. Le niveau entre l'ouverture et la fermeture de la valve est important. L'oscillation entre la position fermée et ouverte est problématique. La force sur clapet pourrait doubler en utilisant une poulie sur le clapet si l'autre brin est attaché à un actuateur. La longueur du bras de levier est importante. Un meilleur prototype et un banc d'essai sont nécessaires pour réaliser des essais pour limiter l'oscillation.

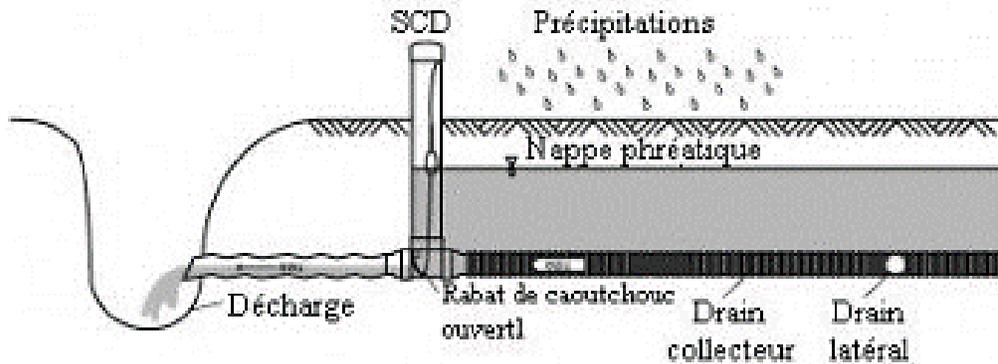


Figure 26 Concept d'une valve contrôlée par flotteur (Innotag, système de contrôle de drainage).

Essais de contrôle avec un microcontrôleur Arduino

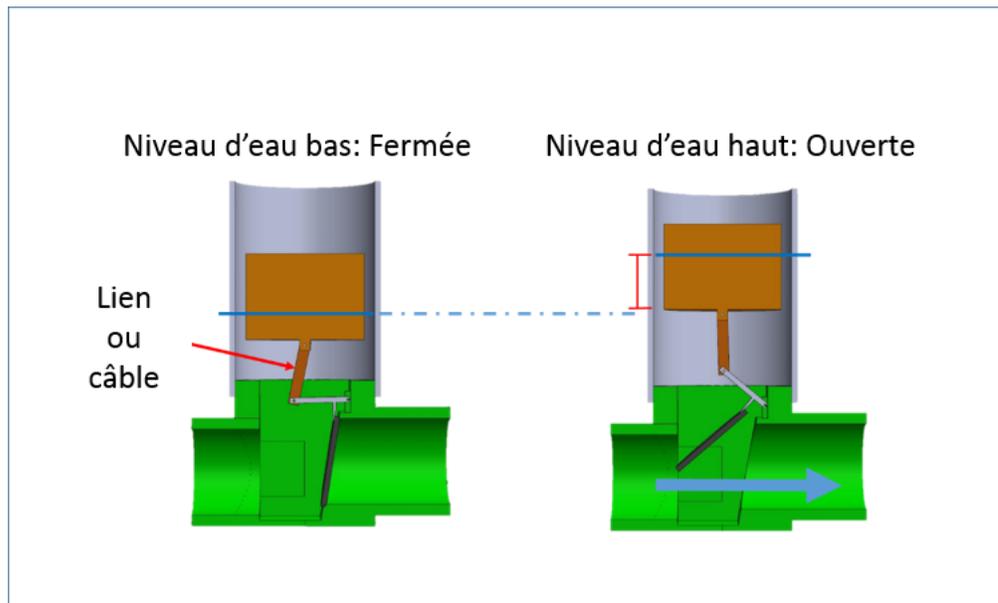


Figure 27 Fonctionnement d'un clapet, le câble est représenté par une barre sur l'image.

Durant les essais préliminaires des prototypes d'électronique, deux vérifications ont été accomplies. La première est la réception des commandes avec le microcontrôleur par un module de communication XBee. La deuxième est le contrôle d'un actuateur linéaire avec le microcontrôleur. Ces essais ont permis de vérifier et de quantifier le travail nécessaire à l'élaboration d'un prototype complet. Ces vérifications ont permis de continuer le développement en connaissance du travail nécessaire.

4.6.3 Banc d'essai

Les objectifs du banc d'essai sont de simuler l'écoulement des bassins en situation contrôlée, près des ressources et des outils. Le banc d'essai permet de valider et d'optimiser les éléments mécaniques, électroniques et la programmation. La réduction des oscillations observées lors des essais préliminaires est la contrainte principale de développement.

- Réduire les oscillations

Les oscillations entre la position fermée et ouverte sont à éviter. Ces oscillations, d'une période de une à deux secondes, causeraient des dommages aux équipements à long terme. Plusieurs hypothèses sont à vérifier à l'aide du banc d'essai. Premièrement, les oscillations seraient diminuées avec un réservoir plus important, car les variations du niveau d'eau seraient plus lentes. Le bras de levier sur le clapet pourrait être la cause des oscillations. Un bras dont le couple appliqué varie avec l'angle pourrait aussi aider à diminuer les oscillations. L'utilisation d'une poulie permet de diminuer l'effort sur le flotteur par deux, ce qui pourrait diminuer les oscillations (figure 28). Un clapet souple pourrait remplacer le clapet rigide, ce clapet pourrait ouvrir graduellement en évitant les grands écarts.



Figure 28 Composantes internes d'un barrage à hauteur variable.

Flotteur en haut, la corde est accrochée au flotteur, contourne la poulie puis passe par un trou dans le flotteur pour être attaché à l'actuateur linéaire.

- Description du banc d'essai

Le banc d'essai est constitué d'un boîtier en bois avec une connexion pour la valve. Ce boîtier est de 60 cm de largeur, 90 cm longueur et 60 cm de hauteur et permet 5,5 litres par cm de variation du niveau d'eau (lors des essais préliminaires, le volume était seulement de 0,1L/cm). Puisque le volume d'eau est plus grand pour la

variation de niveau, la possibilité que l'oscillation soit causée par la variation rapide du niveau diminue. Le barrage, l'actuateur et le flotteur sont installés pour imiter l'aménagement possible sur le site (figure 29).



Figure 29 Banc d'essai et le clapet à angle et bras de levier ajustable.

L'alimentation en eau pour le banc d'essai provient d'un canal de drainage agricole. L'eau est pompée dans le banc d'essai puis retournée dans le canal. Une pompe électrique fournit 55 L/min et un siphon 8 L/min.

- Déroulement de l'intégration

L'intégration des éléments du barrage à hauteur variable sur le banc d'essai s'est effectuée élément par élément. Voici les principales étapes :

1. Contrôle manuel sans actuateur électrique,
 - Tester différentes configurations de clapets et bras de levier,
2. Ajout d'un actuateur linéaire électrique avec contrôle manuel,
3. Ajout du microcontrôleur et du module radio,
 - Commandes à distance,
 - Variation de la position à partir d'un ordinateur,
4. Ajout du capteur sonar,

- Lecture du niveau de l'eau dans le banc d'essai pour contrôler le niveau d'eau,
5. Programme en Python pour envoyer les instructions au barrage,
- Contrôle automatique du niveau de l'eau dans le banc d'essai à partir d'un programme automatique.

4.6.4 Développement

Au terme des essais, un clapet flexible en caoutchouc a permis d'éliminer les oscillations. Le clapet est taillé à partir d'une courroie de convoyeur en caoutchouc d'environ 8 mm d'épaisseur. Ce clapet flexible permet une ouverture graduelle. La programmation du microcontrôleur est basée sur la réception de commande provenant du contrôle central. Une boucle principale analyse les caractères reçus par le port série provenant du module XBee. Les commandes sont constituées d'un caractère de départ 'L', puis d'une fonction "switch" qui compare le caractère suivant avec les possibilités. Par exemple, LM200, L est le caractère de départ, M est pour la fonction 'move' et 200 la longueur désirée de l'actuateur. Le détail des fonctions est présenté au tableau 8 et le programme est à l'annexe D.

Tableau 8 Liste des commandes pour les barrages à hauteur variable.

| Nom | Code | Objectifs | Retour |
|-------------|---------|--------------------------------------|----------------|
| Voltage | LV | Lecture de la tension de la batterie | V :12.6 |
| Sonar | LR* | Lecture du sonar *nombre de lecture | 1111.1 |
| Bouger | LM*** | Déplacer actuateur linéaire à *** | Position en mm |
| | LZC | Calibration position courte | Bit moyen de 5 |
| Calibration | LZC | Calibration position longue | Bit moyen de 5 |
| | LZV**.* | Calibration du diviseur de tension | V :**.* |

Les calibrations permettent de saisir les valeurs de calibration sans être connecté directement au microcontrôleur ou recompiler tout le programme. Ces fonctions actualisent une section de la mémoire permanente (EEPROM) du microcontrôleur qui n'est pas effacé lors de la mise hors tension. À chaque boucle du programme, un compteur est remis à zéro. Si la mise à zéro n'est pas effectuée, soit environ 10 secondes, le microcontrôleur redémarrera automatiquement. Cette routine permet d'éviter un redémarrage manuel et les délais en cas d'arrêt ou d'erreur d'exécution.

Composantes

La figure 30 et le tableau 9 présentent les composantes et l'intégration des composantes et le circuit imprimé. Les principales composantes sont : un microcontrôleur Arduino, un Shield pour moteur, un Shield de communication XBee et un circuit imprimé pour accueillir les connecteurs et régulateur de tension.

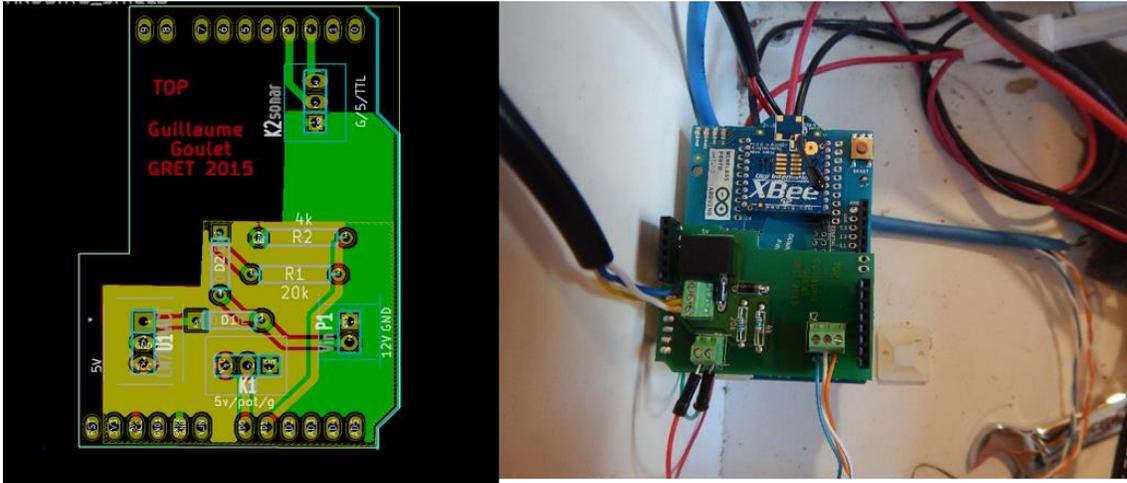


Figure 30 Composantes électroniques: gauche, circuit imprimé, droite assemblage des composantes

- Installation sur le site

La solution est d'installer des petites batteries près des barrages, pouvant alimenter le système pour environ 48 heures. Ces batteries sont chargées par le système central, le système de chargement est déconnecté avant l'activation de l'actuateur. Ainsi lorsque la demande électrique est importante, le barrage est isolé du réseau principal. La distance maximale entre le barrage et la batterie secondaire est d'environ 40m. La figure 31 présente l'installation du barrage à hauteur variable pour le bassin périphérique 20 cm pour cet situation, le niveau d'eau dans le canal était supérieur au niveau demander, le barrage laisse écouler l'eau Au printemps 2016, des panneaux solaires ont remplacés le chargement par le système central.

Tableau 9 Composantes électroniques des barrages à hauteur variable.

| Composantes | Taches | Identification | Fabriquant |
|-------------------------|---|--------------------|----------------------------|
| Microcontrôleur | Analyser, exécuter et communication | Arduino pro 328 5V | Sparkfun (USA) |
| Contrôleur de puissance | Interface entre MCL et la puissance | SHIELD-2AMOTOR | Cytron (Malaisie) |
| Communication | Communication entre MCL et XBee conversion de voltage | XBee shield | Arduino (Italy) |
| Connexion électrique | Diodes, régulateur de tension et connexions | Circuit sur mesure | Guillaume Goulet |
| Sonar | Mesure du niveau de l'eau | MB7389 | Maxbotix (USA) |
| Actuateur linéaire | 30cm 12 V, position analogique | FA-PO-150-12-12 | Firgelli Automations (USA) |
| Alimentation électrique | Chargeur et batteries | SG-4 et 7A-h 12 V | Morningstar (USA) |



Figure 31 Installation d'un barrage à hauteur variable.

Chapitre 5 Fonctionnement du système

L'objectif de cette section est de présenter le fonctionnement des principaux éléments du système. Le fonctionnement du système énergétique, le contrôle central, la mesure du niveau de l'eau et les barrages à hauteur variable seront présentés. La puissance produite par les panneaux solaire et la consommation réelle du pompage seront détaillées. Le fonctionnement des composantes physiques et des programmes du contrôle central seront présentés. Une évaluation de l'effet de la température sur l'erreur de mesure du niveau de l'eau est présentée ainsi que les méthodes pour la minimiser. La dernière partie porte sur un exemple d'un cycle d'irrigation avec un barrage à hauteur variable.

5.1 Système énergétique et pompage

5.1.1 Puissance mesurée

La puissance générée est inférieure à la puissance nominale du système de 750 W, principalement car l'angle des panneaux est fixe et ne peut varier. L'angle n'est donc pas optimal. La puissance mesurée est entre 300 et 500 W (6.15A@92.9V) lors des journées ensoleillées, données du 29 juin 2014.

5.1.2 Consommation énergétique des pompes

Les pompes ont un débit moyen de 35,5 litres par minute. Ce débit correspond à une perte de charge totale moyenne de 45 kPa selon la courbe de performance du fabricant. Le débit maximum (0 kPa de perte de charge) est de 110 litres par minute et le débit n'est que de 10 litres par minutes à 55 kPa. Le débit varie puisque la charge hydraulique est liée à la longueur de la conduite. Les bassins avec fossés périphériques sont les plus loin des pompes. Les pompes consomment entre 80 et 100 W chacune. La quantité d'énergie est donc de 0,035 kW*h/m³ (tableau 10).

Le débit de pompage est suffisant. Le bassin périphérique nécessite plusieurs heures de pompage, car la surface des fossés est importante. Dans une optique de contrôle avec barrage à hauteur variable, cela peut présenter un problème. Les fossés ont environ 1 m de largeur sur 140 m de périmètre, cela représente 14 m³ d'eau pour une variation de 10 cm. L'autorisation de pompage est de 50 m³ par jour. Les calculs initiaux prennent en compte uniquement les bassins, mais une partie de l'eau peut s'échapper à l'extérieur des bassins ce qui augmenterait le volume nécessaire.

Tableau 10 Données observées concernant l'énergie nécessaire au pompage 29 juin 2014.

| | Courant (A) | Voltage (V) | Puissance (W) | Débit (l/min) | Puissance volumique |
|---------|-------------|-------------|---------------|---------------|-----------------------|
| Minium | 3 | 24 | 72 | 26,0 | 166 kJ/m ³ |
| Maximum | 3.4 | 29 | 102 | 45,0 | 136 kJ/m ³ |
| Moyenne | 3.2 | 26.5 | 87 | 35.5 | 151 kJ/m |

5.2 Contrôle central

Le développement sur un ordinateur portable ayant le même système d'exploitation que l'ordinateur à carte unique a permis un développement rapide et efficace. Les analyses par élément fini n'ont pas été testées dans le BBB, mais des bibliothèques sont disponibles et ont été testées en Python sur un ordinateur portable.

La connexion internet permet de faire le suivi, le téléchargement des données et la modification des programmes de contrôle à distance avec suffisamment de fluidité. Plusieurs problèmes de fiabilité de la connexion internet sont survenus durant la saison 2015. Ces problèmes sont probablement au niveau de l'équipement fourni par le fournisseur de service internet.

La communication interne du site, le réseau de communication radio a fonctionné correctement, mais des optimisations sont nécessaires dans la programmation des équipements afin d'augmenter la robustesse du réseau. La réception des données radio n'a pas fonctionné correctement. Lorsqu'un message radio est corrompu, la bibliothèque du XBee arrête de fonctionner

La structure du logiciel a atteint les objectifs. L'ajustement des barrages et des consignes n'est pas complètement automatisé, ces étapes pourraient être intégrées lors de l'ajout de la modélisation et du contrôle prédictif. En Python, la gestion des exceptions est simple. Une solution est proposée dans le programme, mais n'a pas été testée.

Aucun mauvais fonctionnement dû l'ordinateur à carte unique n'a été observé durant la période de fonctionnement soit 3 mois en 2014, 1 mois à l'automne 2014, 3 mois lors du développement 2015 et 5 mois durant l'été 2015. L'ordinateur BBB est suffisamment fiable pour assurer le contrôle d'un système d'irrigation.

5.3 Mesure du niveau de l'eau

5.3.1 Effets de la température sur la précision des capteurs

Un sonar utilise le temps de parcours des ondes acoustique entre le capteur et la surface à mesurer. Or, la vitesse du son dans l'air varie en fonction de la température. Le sonar MB7389 de MaxBotix possède un capteur de température permettant d'effectuer cet ajustement lors des calculs. Ce capteur de température est à l'intérieur

du boîtier du sonar, il mesure donc la température du boîtier du sonar. Au laboratoire, à température stable, la précision était de l'ordre du 1 à 2 mm. Lors des premiers essais extérieurs, le capteur a montré des variations de plus de 20 mm durant une journée. La vitesse du son dans l'air en fonction de la température et son approximation est présentée à l'équation 7. L'hypothèse soulevée est que la température mesurée par le capteur ne correspond pas à la température réelle de l'air causant ainsi les variations observées.

$$C_{air} = 331.3 \text{ m/s} \sqrt{1 + \frac{\vartheta(^{\circ}\text{C})}{273.15}} \approx 331.3 + 0.606\vartheta(^{\circ}\text{C}) \text{ m/s} \quad (7)$$

Où $\vartheta(^{\circ}\text{C})$ = température en Celsius

Pour une gamme entre 10 et 25°C, l'équation 8 présente le ratio de la vitesse du son pour deux températures. Ce ratio peut être utilisé comme coefficient de correction à appliquer à la lecture d'un sonar.

$$Ratio = \frac{331.3 \text{ m/s} + 0.606 * Tr}{331.3 \text{ m/s} + 0.606 * Tm} \approx 1 + 0,002\Delta t \quad (8)$$

Où

Tr = température réelle

Tm = température mesurée

$\Delta T = Tr - Tm$

$$Distance \text{ réel} \approx Dm \times ratio \approx Dm \times (1 + 0.002(Tr - Tm)) \quad (9)$$

Ainsi si le boîtier est à 25°C et l'air à 15°C, la différence sera de 1.7% soit 9 mm pour 500 mm et 18 mm pour 1000 mm.

Validation de l'hypothèse

Afin de valider l'hypothèse que les variations de température entre l'air et le boîtier influencent les mesures du sonar MaxBotix, un essai a été aménagé durant l'automne 2014. Le sonar mesure la distance dans un tube

transparent de 75 mm de diamètre et 1125 mm de longueur disposé verticalement. La température est mesurée à l'extrémité supérieure au même niveau que le sonar. Le tube est fermé, la température peut donc varier rapidement avec le soleil alors que la distance réelle ne peut varier. Les résultats sont représentés à la figure 32. L'erreur de mesure est exprimée selon l'écart avec la mesure réel. Les courbes de température et d'erreur se suivent. Lorsque la température se stabilise, durant la nuit, l'écart est de quelques millimètres. Plus la variation de la température est grande plus l'écart est important. L'hypothèse que les variations ou la différence de température dans le profil influencent les lectures est vérifiée.

Des variations de 40 mm ont été observées dans un banc d'essai à l'automne 2014 ou la température pouvait fortement varier (figure 32).

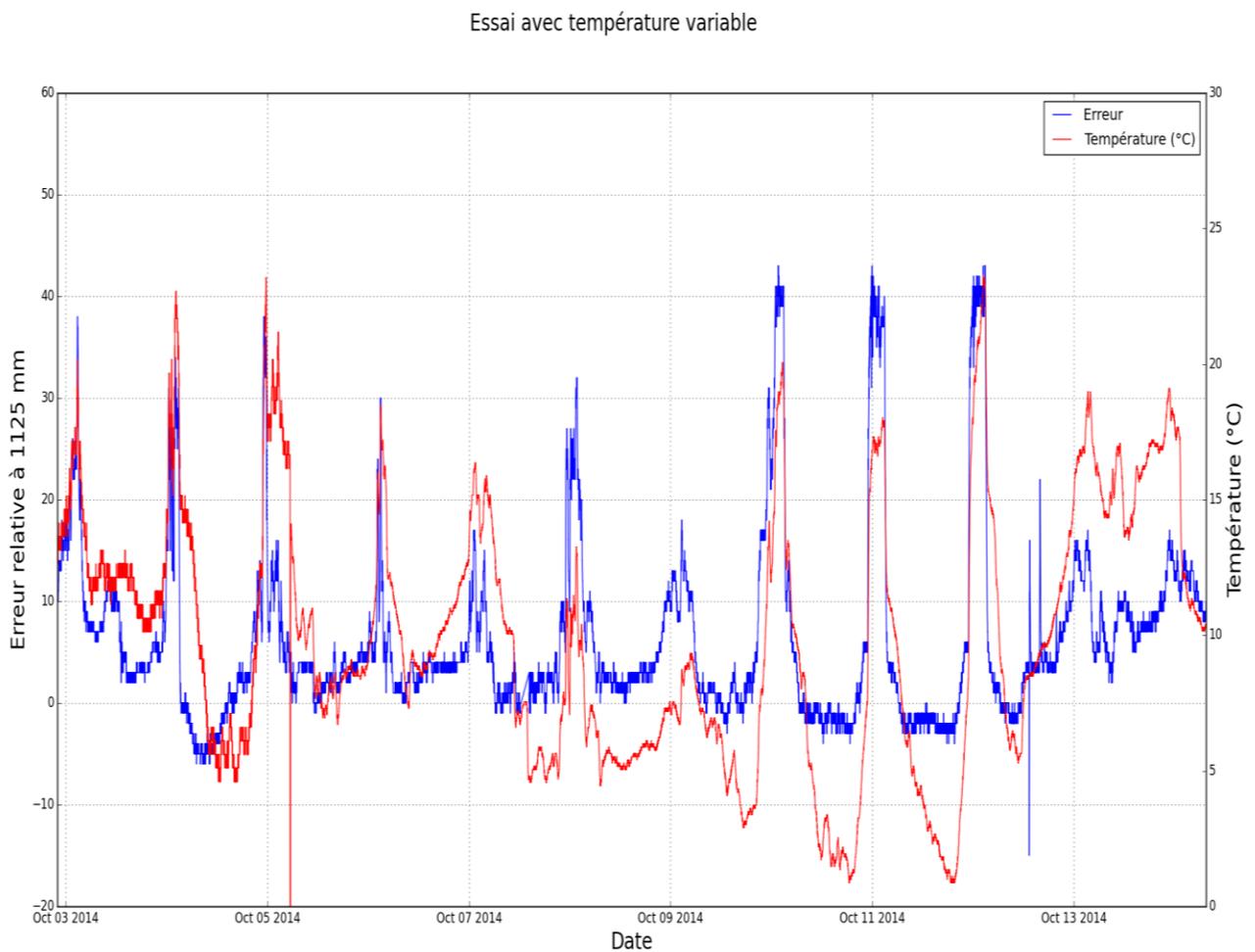


Figure 32 Essai avec température variable.

Pistes de solutions

Suite aux observations de l'automne 2014, quelques pistes de solutions ont été identifiées. Premièrement, l'écart de température entre le sonar et l'air ambiant doit être diminué. Deuxièmement, une correction serait possible avec une mesure de référence et un algorithme. L'écart de température peut être diminué si le boîtier reste à la température ambiante ou si un capteur de température extérieur est utilisé (HR-MAXTEMP, MaxBotix, USA). La distance entre le sonar et l'eau doit être minimisée puisque l'erreur est proportionnelle au temps de parcours de l'onde qui est liée à la distance entre le sonar et l'eau.

5.3.2 Essais avec température variable et distance avec plusieurs capteurs

Afin de tester ces différentes avenues, un banc d'essai a été assemblé en janvier 2015. Le banc d'essai comprend 6 sonars supportés par une structure en bois. Le banc d'essai est installé dans une serre chauffée afin de se rapprocher le plus possible des conditions réelles extérieures, (annexe E). Le banc d'essai permet de tester trois configurations simultanément. Ainsi deux sonars sont équipés de sondes à température externes, deux autres sont recouverts d'une tôle d'aluminium pour les protéger du rayonnement solaire direct. Finalement, une paire est installée sans méthode de correction. Pour tester la variation des valeurs des hauteurs, trois différentes hauteurs ont été mesurées simultanément (annexe E).

Protection contre les écarts de température

Les données prises sont du 28 février au 03 mars 2015 : essais avec 3 différents types de protection contre les écarts de température. Les résultats de l'expérience sont présentés au tableau 11. La distance à évaluer est mesurée au ruban à mesurer. La précision de la mesure au ruban est de 5 mm. La mesure moyenne est la moyenne des valeurs obtenue pour un capteur pour la durée de l'essai. L'écart à la moyenne l'écart absolu entre les mesures et la moyenne. Avec les capteurs de température externes, la précision est de l'ordre de 2,8 mm pour des distances de 1360 mm.

Effet de la distance sur l'erreur

Dans le même environnement que pour l'essai des écarts de température, un essai avec trois différentes distances a été mené, voir annexe E. Les résultats sont présentés au tableau 12. Conformément à l'équation 7, plus la distance est grande plus l'erreur est grande. La distance à mesurer sur le terrain doit donc demeurer la plus petite possible.

Tableau 11 Résultats selon les méthodes de correction (hiver 2015).

| Type de correction | Numéro du sonar | Distance réelle (+/- 5mm) | Mesure moyenne du sonar (mm) | Écart (distance-sonar) (mm) |
|--------------------|-----------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Aucune | 1.1 | 1368 | 1364.8 | 5.3 |
| Aucune | 2.1 | 1360 | 1363.9 | 4.4 |
| Ombre | 1.3 | 1368 | 1369.4 | 4.0 |
| Ombre | 2.3 | 1375 | 1373.1 | 4.0 |
| Capteur externe | 1.2 | 1363 | 1363.4 | 2.8 |
| Capteur externe | 2.2 | 1363 | 1361.5 | 2.8 |

Tableau 12 Résultats des essais avec trois différentes distances.

| Type de correction | Sonar | Distance réelle (+/- 5mm) | Mesure moyenne du sonar (mm) | Écart (distance-sonar) (mm) |
|--------------------|-------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Aucune | 1.3 | 350 | 348.7 | 1.4 |
| Aucune | 2.3 | 357 ¹² | 349.7 | 1.5 |
| Aucune | 1.1 | 606 | 601.5 | 2.3 |
| Aucune | 2.1 | 602 | 601.3 | 2.4 |
| Aucune | 1.2 | 860 | 860.3 | 3.5 |
| Aucune | 2.2 | 860 | 859.1 | 3.5 |

Les constatations des essais réalisés à l'hiver 2015 dans une serre

- L'ombre sur les boîtiers moins efficace que le capteur de température externe (tableau 11) ;
- Le capteur de température externe est le plus efficace (tableau 11);
- Il faut minimiser la distance à évaluer pour minimiser l'erreur

Suite aux résultats, les sonars installés durant l'été 2015 sont équipés d'une sonde de température externe qui permet de réduire l'écart de mesure de la température. Les puits de 50 mm de diamètre sont doublés d'un tuyau blanc de 100 mm pour éviter que le soleil réchauffe le puits.

5.3.3 Amélioration des appareils de mesure du niveau de l'eau

Quelques améliorations sont possibles pour augmenter la fiabilité des équipements. Premièrement, l'utilisation d'un circuit imprimé permettrait de réduire le nombre de connexions électriques et serait plus robuste aux chocs

¹² Probablement une donnée aberrante

lors des manipulations. Une personne moins familière avec l'électronique serait en mesure de remplacer les composantes. L'ajout d'un sachet de déshydratant aiderait à réduire la condensation dans les boîtiers.

Deuxièmement, les puits installés dans les bassins ne sont pas stables : car les tuyaux ont tendance à s'incliner. L'angle des tuyaux peut causer des lectures non valides car la surface de réflexion de l'onde sonar n'est plus perpendiculaire au tuyau. Plusieurs tuyaux se sont inclinés durant la saison.

La programmation du microcontrôleur doit être revue pour assurer que le module radio a suffisamment de temps pour rejoindre le réseau avant d'être remis en vielle.

5.4 Barrage à hauteur variable

5.4.1 Fonctionnement des barrages

Un exemple de fonctionnement des barrages à hauteur variable est présenté à la figure 33. Le 17 septembre 2015, les niveaux de la nappe phréatique observés dans le bassin était trop bas (courbes $\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{2}$ de l'écartement de la figure 33). Une commande de relever le niveau d'eau derrière le barrage à 2 cm sous le niveau moyen de la surface du bassin et de changer la consigne d'irrigation à 4 cm sous le niveau moyen de la surface du bassin ont été envoyés au contrôle central par la connexion internet. À partir de la réception des commandes, le niveau au niveau d'eau du fossé a augmenté pour atteindre le niveau de la consigne. Dans les trois jours suivants, le niveau dans le bassin a augmenté près de la valeur désirée de -10 cm. Les points verts représentent le pompage.

Le système de contrôle et les barrages ont bien fonctionné. Le système de communication au niveau du contrôle central a eu quelques ratés au niveau de la programmation. L'objectif d'aménager l'ensemble des 6 barrages pour environ 3000\$ a été respecté.

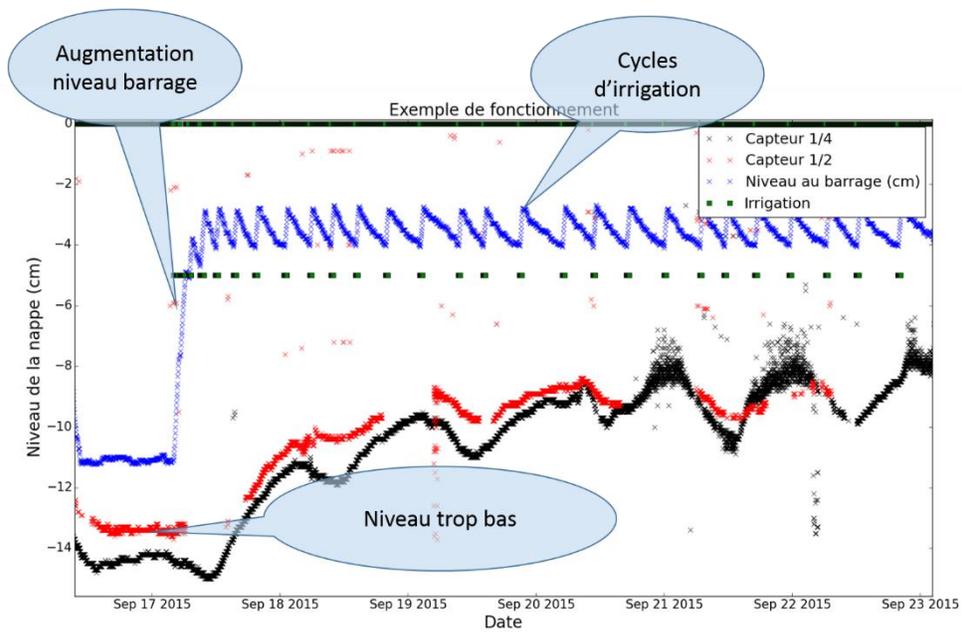


Figure 33 Exemple de fonctionnement d'un barrage à hauteur variable. courbe noire : niveau de la nappe au $\frac{1}{4}$ de l'écartement, courbe rouge : niveau de la nappe au $\frac{1}{2}$ de l'écartement, courbe bleu : niveau d'eau dans le canal et les irrigations en vert.

Conclusion

Le présent mémoire concerne le site de culture de sphaigne aménagé au printemps 2014 à Shippagan au Nouveau-Brunswick. Plusieurs expériences concernant la croissance de la sphaignes sont installées sur le site dans des bassins. L'objectif principal de ce mémoire était de mettre en fonction un système de gestion de l'eau pour les six bassins du site. L'analyse des connaissances de la sphaigne et de l'hydrologie a permis de définir une approche théorique d'un système de gestion de l'eau pour les bassins. L'adaptation de l'approche théorique aux contraintes spécifiques du site de Shippagan a permis de définir une stratégie de développement. Les équipements nécessaires au fonctionnement du système de gestion de l'eau ont été développés, fabriqués, installés sur le site et testés. Le développement a suivi une approche chronologique permettant l'intégration des éléments au fur et à mesure qu'ils sont développés.

Le système énergétique (panneaux solaires, contrôleur de charge, batteries) et de pompage est autonome et correspond aux besoins. Le contrôle central comprend un ordinateur à carte unique qui permet la connexion à distance et la transmission des données entre les appareils. La combinaison de l'ordinateur et du contrôleur USB LabJack a fonctionné sans problèmes durant le projet. La structure de programmation représente une partie importante des travaux effectués. Le programme développé permet d'exécuter les opérations nécessaires. La structure de programmation et le contrôle central pourront supporter des analyses numériques permettant d'intégrer les modèles d'écoulement et le contrôle prédictif. Les appareils de mesure du niveau d'eau la transmettent en temps réel les niveaux d'eau des fossés et de la nappe phréatique dans les puits d'observation dans les bassins. Chaque appareil est constitué de capteurs sonar, d'un microcontrôleur et d'un module de communication radio XBee. Les barrages à hauteur variable sont divisés en une composante mécanique et une composante électronique. La composante mécanique comprend le barrage et l'actuateur linéaire électrique et la composante électronique comprend un microcontrôleur et un module de communication radio. L'intégration des éléments a été terminée en septembre 2015. La position des barrages et les consignes de démarrage des pompes doivent être saisies manuellement dans des fichiers de configuration.

Le contrôle prédictif est la prochaine étape du projet. Il permettra d'optimiser le contrôle du système à l'aide de modèle d'écoulement et des méthodes d'analyse numérique. Il sera alors possible d'optimiser le niveau de l'eau en fonction des prévisions météorologiques. Meilleure sera la prédiction de l'écoulement, plus l'écartement entre les structures de contrôle pourra être grand. L'écartement entre les structures de contrôle sera un facteur déterminant lors de la décision économique d'investir ou non dans des bassins de culture de sphaigne à l'échelle commerciale.

Bibliographie

Ballard C.E., McIntyre, N., Wheeler, H.S., Holden, J., Wallage, Z.E., 2011. Hydrological modelling of drained blanket peatland *Journal of Hydrology*, , Volume 407, Issues 1–4: 81-93

Bell, C, 2013 *Beginning Sensor Networks with Arduino and Raspberry*, Apress Pi 407 pages ISBN 978-1-4302-5824-7

Clymo RS. 1973. The growth of *Sphagnum*: some effects of environment. *Journal of Ecology* 61: 849–869.

Guyon, G. 1972. Les formules de l'hydraulique des nappes rabattues par tranchées drainantes. *Bulletin technique d'information*. Ministère de l'agriculture, France. No 271--172: 859--865.

Gislason, D, 2008, *Zigbee Wireless Networking*, 1st Edition, Elsevier , 448 pages, ISBN 9780750685979

Graf, M.D., Bérubé, V., Rochefort, L., 2012. Restoration of peatlands after peat extraction: impacts, restoration goals, and techniques. In: Vitt, D.H., Bhatti, J.S. (Eds.), *Restoration and Reclamation of Boreal Ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, United-Kingdom, pp. 259–280.

Hayward PM, Clymo RS. 1982. Profiles of water content and pore size in *Sphagnum* and peat, and their relation to peat bog ecology. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 215: 299–325.

Haber, R., Bars, R. and Schmitz, U. 2011 *Front Matter*, in *Predictive Control in Process Engineering: From the Basics to the Applications*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany.

Hahni, M., 2013, *Culture de sphaigne –guide des opérations* APTHQ 30 pages

Jobin, P., Caron, J., & Rochefort, L. 2014. Developing new potting mixes with *Sphagnum* fibers. *Canadian Journal of Soil Science*, 94(5), 585-593.3

Kennedy GW, Price JS. 2004. Simulating soil water dynamics in a cutover bog. *Water Resources Research* DOI: 10.1029/2004WR003099.

Ketcheson, S. J., Price, J. S. 2014. Characterization of the fluxes and stores of water within newly formed *Sphagnum* moss cushions and their environment. *Ecohydrology* 7(2): 771-782, doi:10.1002/eco.1399.

Lagacé, R. 2015 , *Irrigation souterraine*, chapitre 9 du cours de Drainage GAE-3001, page consulté le 10 avril 2016 http://www.grr.ulaval.ca/gae_3001/index.html

Natural Resources Canada. 2014. Mineral production of Canada, by province and territory. Page visitée le 03-12-2014. <http://sead.nrcan.gc.ca/prod-prod/PDF/2013P%20Mineral%20Production.pdf>

New-Brunswick Minerals and Petroleum 2014. Peatland history: Page visitée le 10-12/2014. https://www.gnb.ca/0078/minerals/Peat_History-e.aspx

Negenborn, R. P.-J. van Overloop, T. Keviczky, and B. De Schutter 2009, "Distributed model predictive control of irrigation canals," *Networks and Heterogeneous Media*, vol. 4, no. 2, pp. 359–380,

Park, Y., Shamma, J. S., & Harmon, T. C. 2009. A Receding Horizon Control algorithm for adaptive management of soil moisture and chemical levels during irrigation. *Environmental Modelling & Software*, 24(9), 1112-1121.

Park, Y. and T.C. Harmon 2011. Autonomous real-time adaptive management of soil salinity using a receding horizon control algorithm: A pilot-scale demonstration *Journal of Environmental Management* 92, 2619-2627.

Payette, S., Rochefort, L. 2001. *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Les Presses de l'Université Laval, Ste-Foy, Québec

Pouliot, R., Hugron, S., Rochefort, L., 2015. Sphagnum farming: A long-term study on producing peat moss biomass Sustainably . *Ecological Engineering*

Price JS, Whittington PN, Elrick DE, Strack M, Brunet N, Faux E. 2008. A method to determine unsaturated hydraulic conductivity in living and undecomposed Sphagnum moss. *Soil Science of America Journal* 72: 487–491.

Priestley CHB, Taylor RJ. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2): 81–92.

Robert, É.C., Rochefort, L. & Garneau, M. 1999. Natural revegetation of two block-cut mined peatlands in eastern Canada. *Canadian Journal of Botany* 77 : 447–459.

Rochefort, L. et Bastien, D, 1998 Réintroduction de sphaignes dans une tourbière exploitée et abandonnée : évaluation de divers moyens de protection contre la dessiccation. *Écoscience*, 5 :117-127

Rochefort, L. 2001. Restauration écologique. P. 449-504 dans *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. S. Payette & L. Rochefort (éd.). Presses de l'Université Laval, Québec, Québec.

Quinty, F. et L. Rochefort, 2003. Guide de restauration des tourbières, deuxième édition. Association canadienne de mousse de sphaigne et Ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick. Québec, Québec.

Schlotzhauer, S. M., Price, J. S. 1999. Soil water flow dynamics in a managed cutover peat field, Quebec: 1. Field and laboratory investigations. *Water Resources Research*, 35: 3675-3684.

Schmilewski, G. 2009. Growing medium constituents used in the EU. International Symposium on Growing Media 2007.

Skaggs, R.W.; 1979. Watermovement factors important to design and opération of subirrigation systems, ASAE Paper 79--2543.

SurrIDGE, B.W.J., Baird, A.J. and Heathwaite, A.L. (2005). Evaluating the Quality of Hydraulic Conductivity Estimates from Piezometer Slug Tests in Peat. *Hydrological Processes*. 19, 1227-1244.

Thompson, D. K., Waddington, J. M. 2008. Sphagnum under pressure: towards an ecohydrological approach to examining Sphagnum productivity. *Ecohydrology*, 1: 299-308.

Tuittila ES, Vasander H, Laine J. 2004. Sensitivity of C sequestration in reintroduced Sphagnum to water-level variation in a cutaway peatland. *Restoration Ecology* 12: 483–493

Van Seters, T. E. and Price, J. S. 2001, The impact of peat harvesting and natural regeneration on the water balance of an abandoned cutover bog, Quebec. *Hydrol. Process.*, 15: 233–248. doi: 10.1002/hyp.145

Annexe A Installation des bassins



Figure 34 Installation des bassins. en blanc : tuyaux d'alimentation en eau, en bleu : canaux d'alimentation et de drainage, en vert : barrage à hauteur variable, en jaune : station de pompage et en gris : conteneur

Annexe B Installation du système énergétique et de pompage



Figure 35 Installation du système énergétique à l'intérieur du conteneur. de gauche vers la droite, modem internet, panneau système central, panneau contrôle de la puissance et contrôleur de charge.



Figure 36 Station de pompage.

Annexe C Plan du système de puissance et de pompage

Chaque pompe a son circuit d'alimentation propre, ce qui permet d'utiliser plusieurs pompes simultanément (figure 38). Les bobines des relais sont reliées à un commutateur trois positions, manuel, arrêt et automatique. Le pôle automatique est relié au contrôleur LabJack. Le pôle manuel est relié au 24 V ce qui permet le fonctionnement manuel. Un témoin lumineux est installé en parallèle à l'alimentation de la pompe permettant de voir lorsque la pompe est en fonction.

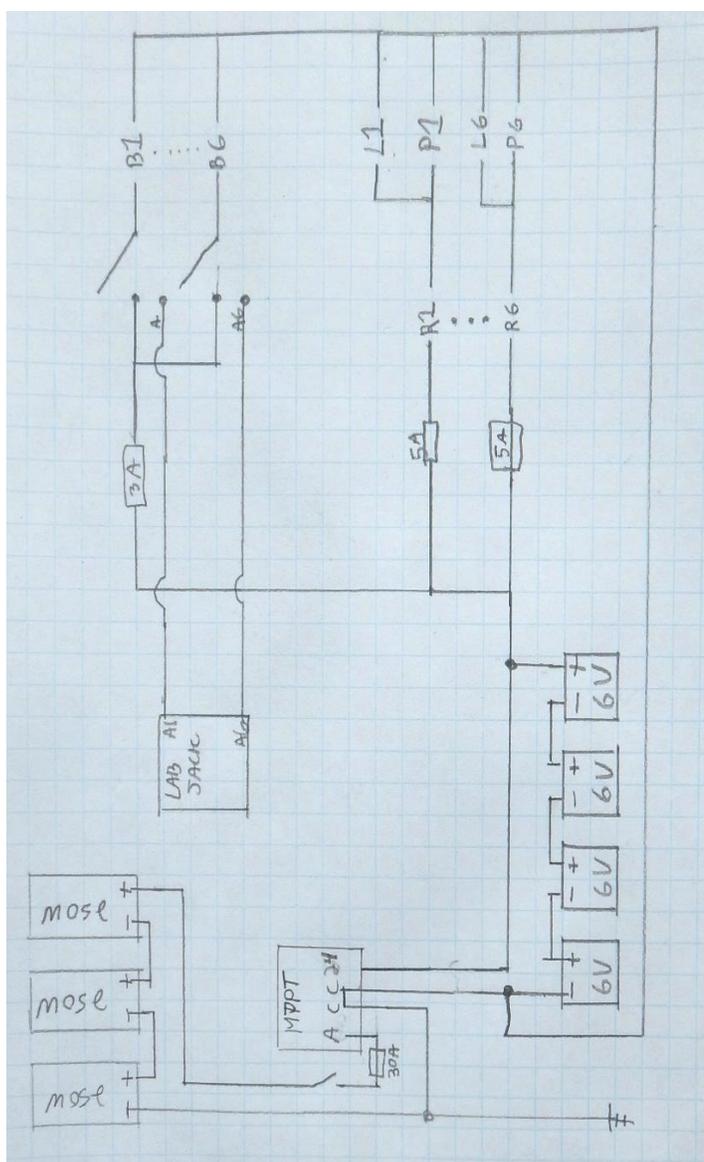


Figure 37 Schéma électrique du circuit de puissance.

Annexe D Programmation des barrages à hauteur variable

Le programme utilisé pour les microcontrôleurs des barrages à hauteur variable a été réalisé dans le IDE d'Arduino.

```
1.  /*
2.  Base for barrage control
3.  */
4.
5.
6.  //-----inported library-----//
7.  #include <SoftwareSerial.h>
8.  #include <avr/wdt.h>
9.  #include <EEPROM.h>
10. //-----variabledefinition-----//
11. int char_ord;
12. float vbat;
13. float vmin=11;
14. float vstop=11.75;
15. String msg;
16.
17.
18. //-----pin definition do not change-----//
19. SoftwareSerial Serial_son(2, 12); // RX, TX
20. const int pwr_son= 3; //sonar On off
21. const int DIR2 = 4; //4 actuator dirrection 0=A high 1= B high
22. const int EN2 = 5; //5 PWM relay should use AnalogWrite!
23. const int EN1 = 6; // 6 PWM relay should use 0-1 digitalWrite!
24. const int DIR1 = 7; // 7relay dirrection 0=A high 1= B high
25. const int POT = A0; // analog input of actuator
26. const int VBat = A1; // analog input for the voltage battery
27. //-----constant of calibration-----//
28. float divi = 0.49;
29. float slope=0.6173;
30. float c=450;
31. float e=750;
32. float off_set= -450;
33.
34.
35.
36. void setup() {
37. // initialize serial communication:
38. Serial.begin(9600);
39. Serial_son.begin(9600);
40. Serial.println("booting");
41. //initialize whatchdog
42. watchdogSetup();
43. //initialize pin behavior
44. pinMode(pwr_son, OUTPUT); //sonar On off
45. pinMode(DIR1, OUTPUT); // actuator dirrection 0=A high 1= B high
```

```

46. pinMode(EN1, OUTPUT); //PWM relay should use AnalogWrite!
47. pinMode(EN2, OUTPUT); // PWM relay should use 0-1 digitalWrite!
48. pinMode(DIR2, OUTPUT); // relay dirrection 0=A high 1= B high
49. pinMode(POT, INPUT); // analog input of actuator
50. pinMode(VBat, INPUT); // analog input for the voltage battery
51.
52. // initialize the LED pins testing:
53. pinMode (13, OUTPUT);
54.
55. //safety check at startup
56. digitalWrite(DIR2,1);// to charge the battery
57. digitalWrite(EN2,1); // to charge the battery
58. delay(100);
59. EEPROM.get( 0, divi);
60. EEPROM.get( 10, c);
61. EEPROM.get( 20, e);
62. //Serial.println(c,5);
63. //Serial.println(e,4);
64. slope=300/(e-c);
65. off_set=-(slope*c)+0.001;
66. //Serial.println(slope,5);
67. //Serial.println(off_set,4);
68.
69.
70. }
71.
72.
73. void loop() {
74. //---- if battery empty and no charging order receive----//
75.
76. if (read_bat()<vmin){
77.
78.   Serial.println("R:R,E:1");
79.   while (read_bat()<vstop){
80.     charge(1);
81.
82.     wdt_reset();
83.     delay(5000);
84.   }
85.   charge(0);
86.   //wdt_reset();
87. }
88.
89. // -----loop that receive serial command-----//
90. msg=String("R:R");
91. delay(1000);
92. //charge(0);
93. wdt_reset();
94. if (Serial.available() > 0) {
95.   delay(10);
96.
97.   while(Serial.peek() == 'L') { //L' is the first letter on every command
98.     Serial.read();
99.     msg+=String(",");
100.    delay(100); // delay to complete the reception of the serial command
101.    int inByte = Serial.read(); //read the second letter of the command

```

```

102.
103.     switch (inByte) {
104.
105.         // -----useful function-----//
106.     case 'V':
107.
108.         //Serial.println(read_bat(),3);
109.         vbat=read_bat();
110.         //   Serial.print("V' function working,");
111.         //   Serial.println (vbat,5);
112.         msg+=String("V:");
113.         msg+=String((vbat),1);
114.         // msg+=String(",");
115.         //Serial.println(msg);
116.
117.         wdt_reset();
118.
119.         break;
120.     case 'C':
121.         char_ord = Serial.parseInt();
122.         msg+=String("C:");
123.         msg+=String((charge(char_ord)));
124.         // msg+=String(",");
125.         // Serial.println(charge(char_ord));
126.
127.         wdt_reset();
128.         break;
129.     case 'R':
130.         int number;
131.         number = Serial.parseInt();
132.         //Serial.print("R' function working,");
133.         msg+=String("R:");
134.         msg+=String(mean(number),1);
135.
136.
137.         wdt_reset();
138.         break;
139.
140.     case 'M':
141.         float mm;
142.         mm = Serial.parseFloat();
143.         msg+=String("M:");
144.         msg+=String((moveTo(mm)),2);
145.
146.         wdt_reset();
147.         break;
148.
149.     case 'P':
150.
151.
152.         msg+=String("P:");
153.         msg+=String(get_position(),2);
154.
155.         wdt_reset();
156.         break;
157.

```

```

158. case 'Z':
159.     char let = Serial.read();
160.     switch (let) {
161.     case 'C':
162.         msg+=String("Zc:");
163.         float court;
164.         court=get_bit();
165.         EEPROM.put( 10, court );
166.         msg+=String((court), 2);
167.         break;
168.
169.     case 'E':
170.         msg+=String("ZE:");
171.         float extend;
172.         extend=get_bit();
173.         EEPROM.put( 20, extend );
174.         msg+=String((extend), 2);
175.         break;
176.
177.     case 'V':
178.         float volt_cal = Serial.parseFloat();
179.         msg+=String("ZV:");
180.         msg+=String((cal_volt(volt_cal)),4);
181.         break;
182.         wdt_reset();
183.
184.         break;
185.     }
186.
187.     wdt_reset();
188.     break;
189.
190.
191.     //default:
192.
193.     break;
194.
195.     }
196. }
197.
198. while (Serial.available() > 0){ //Discard everything that we didn't expect
199.     Serial.read();
200.
201. }
202. Serial.println(msg);
203. }
204. }
205. //functions
206.
207. //-----Calibration-----//
208.
209. // voltage calibration//
210. float cal_volt(float volt_cal)
211. {
212.
213. //float bit_cal = analogRead(VBat);

```

```

214.
215. int nombre=5;
216. int nb=0;
217. int result=0;
218. int somme=0;
219. while (nb<nombre){
220.   result=analogRead(VBat);
221.   somme+=result;
222.   nb+=1;
223. }
224. float bit_cal=somme/nombre;
225. Serial.println(bit_cal);
226. float divi_cal=(volt_cal/bit_cal);
227. Serial.println(divi_cal);
228. EEPROM.put( 0, divi_cal );
229. return divi_cal;
230.}
231.
232.// calibration of the actuator//
233.float get_bit(){
234. int i=0;
235. int som=0;
236. while (i<5){
237.   i+=1;
238.   som+=analogRead(POT);
239. }
240. int value_bit = som/5;
241. return value_bit;
242.}
243.
244.
245.//-----voltage and charge-----//
246.float read_bat()//lire le voltage de la batterie
247.{
248.
249. //int V_raw=analogRead(VBat);
250. int nombre=5;
251. int nb=0;
252. int result=0;
253. int somme=0;
254. while (nb<nombre){
255.   result=analogRead(VBat);
256.   somme+=result;
257.   nb+=1;
258. }
259. float V_raw = (somme) /(nb);
260.
261. float volt =V_raw*divi;
262. //Serial.println(volt,3);
263. return volt;
264.}
265.
266.int charge(int state) // changer le state de la batterie
267.{
268. digitalWrite(DIR2,1);
269. digitalWrite(13,state);

```

```

270. digitalWrite(EN2,state);
271. //Serial.print("charge function working,");
272. //Serial.println(state);
273. return state;
274. }
275.
276.//-----sonar reading-----//
277.
278.// function return the mean of x reading
279.
280.float mean(int nombre ){
281. //wdt_reset();
282. int nb=0;
283. int result=0;
284. int somme=0;
285. float Mean=0;
286. digitalWrite(pwr_son,1);
287. //digitalWrite(13,1);//visual sign
288. delay(3000);
289. while (nb<nombre){
290. result=read();
291. if (result==0){
292. result=-5000;
293. }
294. somme+=result;
295. nb+=1;
296. }
297. Mean= (somme) /(nb);
298. nb=0;
299. somme=0;
300. digitalWrite(pwr_son,0);
301. // digitalWrite(13,0);//visual sign
302. delay(250);
303. return Mean;
304. }
305.
306.// function who read the serial value
307.int read() {
308.
309. String data="";
310. int ii=0;
311. Serial_son.begin(9600);
312. delay(150);
313. int value=0;
314. while (Serial_son.available() >=0) {
315. (Serial_son.readStringUntil('\R'));
316. while ((ii<200)){
317. // read the incoming byte:
318. ii+=1;
319. delay(10);
320. //Serial.println(ii,DEC);
321. if (Serial_son.read()=='\R'){
322. ii=5000;
323. delay(100);
324. data = Serial_son.readStringUntil('\R');
325. // Serial.println(data);

```

```

326.   value=data.toInt();
327.   }
328. }
329. Serial_son.end();
330. return value;
331. }
332.}
333.
334.///-----//
335.
336.///#####Function for the actuator#####//
337.
338.//-----getPosition-----//
339.
340.float get_position(){
341. int i=0;
342. int som=0;
343. while (i<5){
344. i+=1;
345. som+=analogRead(POT);
346. }
347. int value_raw = som/5;
348. float value= slope*value_raw+off_set;
349. //Serial.print("position");
350. //Serial.println(value_raw);
351. return value;
352.}
353.//-----move to-----//
354.
355.float moveTo(float mm){
356. int i=0;
357. //---->debug line
358. //Serial.print("difference_initial:");
359. //----<
360. float diff=(get_position()-mm); // difference between mm (goal) and mesured distance
361. //---> debug line
362. //Serial.println(diff,2);
363. ///----<
364. // need to move?//
365. while ((diff>1.0 || diff<-1.0) && i<400){ // if more than +-1mm and no more than 500
    cycle
366.
367.   //// extrac loop////
368.   if (diff>=0.8){
369.     if (diff>10){ // if more than 1 cm faster
370.       digitalWrite(DIR1,1);
371.       //digitalWrite(DIR2,1);
372.       analogWrite(EN1,255);
373.     }
374.     else if (diff<=10){ // if less than 1 cm half speed
375.       digitalWrite(DIR1,1);
376.       //digitalWrite(DIR2,1);
377.       analogWrite(EN1,175);
378.     }
379.   }
380.   //// retrac loop////

```

```

381. else if (diff<=-0.8){
382.     if (diff<-10){// if more than 1 cm faster
383.         digitalWrite(DIR1,0);
384.         //digitalWrite(DIR2,0);
385.         analogWrite(EN1,255);
386.     }
387.     else if (diff>=-10){// if less than 1 cm half speed
388.         digitalWrite(DIR1,0);
389.         //digitalWrite(DIR2,0);
390.         analogWrite(EN1,175);
391.     }
392. }
393.
394. // after extrac or retrac,
395. delay(15);
396. i+=1;
397. diff=(get_position()-mm);// get current diff befor while
398. }
399.
400. analogWrite(EN1,0); // stop the pwm output
401. return(get_position()); // return last position
402.}
403.
404.//*****
    **//
405.void watchdogSetup(void)
406.{
407. cli();//disable interup
408. wdt_reset();//rest wdt
409.
410. WDTCSR |=(1<<WDCE) |(1<<WDE);
411. WDTCSR =(1<<WDIE) |(1<<WDE)|(1<<WDP3)|(0<<WDP2)|(0<<WDP1)|(1<<WDP0);
412. sei();
413.}
414.
415.
416.
417.

```

Annexe E Installation des capteurs pour les essais de précision en serre



Figure 38 Installation du banc d'essais des sonars.