

Faisabilité et efficacité de l'aération des étangs d'irrigation comme méthode d'assainissement de l'eau



Projet no. 5478

Conseil québécois de l'horticulture

Rapport final

1^{er} avril 2008 au 31 mars 2009

Rédigé par Caroline Côté

31 mars 2009

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Caroline Côté	Chercheure (responsable scientifique) Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) 3300 rue Sicotte Saint-Hyacinthe (Québec) J2S 7B8
Claude Laniel	Conseil québécois de l'horticulture (requérant)
Mylène Généreux	Professionnelle de recherche, IRDA
François Chrétien	Agronome, Agriculture et agroalimentaire Canada (AAC)
Serena McIver	Ingénieure, AAC
Steve Murrell	Technicien agricole, AAC
Stéphane Godbout	Chercheur, IRDA
Carl Boivin	Chercheur, IRDA
Frédéric Pelletier	Professionnel de recherche, IRDA
Lucie Caron	Agronome, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)
Daniel Bergeron	Agronome, MAPAQ
Christine Villeneuve	Agronome, MAPAQ
Patrice Thibault	Agronome, Réseau de lutte intégrée Orléans (RLIO)
Denis Langlois	Agronome, RLIO
Stefano Campagnaro	Chargé de projet, Centre de recherche agroalimentaire de Mirabel (CRAM)
Djamila Rekika	Chargée de projet, Coopérative des producteurs Multi-veg
Michèle Grenier	Statisticienne, IRDA
Robert Boivin	Ouvrier agricole, IRDA
Yannick Papineau	Ouvrier agricole, IRDA
Marie-Michèle Gagné	Étudiante, Université de Sherbrooke
Majyrel Charron-Therrien	Étudiante, Université de Sherbrooke
Pascal Cyr	Étudiant, Université Laval

TABLE DES MATIÈRES

1. CONTEXTE	4
2. DESCRIPTION DU PROJET	5
2. 1. Objectif général	5
2. 2. Objectifs spécifiques	5
2. 3. Étapes et échéances	5
2. 4. Matériel et méthode	7
2. 4. 1. Description des sites	7
2. 4. 1. 1. Île le d'Orléans	7
2. 4. 1. 2. Mirabel	8
2. 4. 1. 3. Sherrington	10
2. 4. 2. Équipements	10
2. 4. 3. Échantillonnage	13
2. 4. 4. Analyses microbiologiques	14
2. 4. 5. Mesure de la température et de l'oxygène dissous	14
3. RÉSULTATS ET ANALYSE	15
3. 1. Site de l'Île d'Orléans	15
3. 2. Site de Mirabel	19
3. 3. Site de Sherrington	24
3. 4. Taux de décroissance des populations d' <i>Escherichia coli</i>	27
4. ANALYSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE	29
5. CONCLUSION	31
6. DIFFUSION DES RÉSULTATS	32

1. CONTEXTE

Les producteurs agricoles sont de plus en plus confrontés à des exigences du marché en ce qui a trait à la salubrité des fruits et légumes. L'irrigation fait partie des opérations faisant l'objet de préoccupations grandissantes. Deux voies d'action peuvent être envisagées pour réduire le risque de contamination des fruits et légumes : la réduction du niveau de contamination de l'eau à la source et l'adoption de modes de gestion de l'eau réduisant le risque de contamination des produits. Actuellement, les exigences du marché concernent principalement le contenu de l'eau. Par exemple, depuis l'épisode des épinards contaminés de 2006, les producteurs de légumes feuillus exportant aux États-Unis peuvent être soumis au "Leafy green marketing agreement". Celui-ci stipule que la moyenne géométrique de 5 échantillons d'eau d'irrigation en contact avec le feuillage devrait être inférieure à 126 NPP/100 ml et qu'aucun échantillon ne devrait dépasser 235 NPP/100ml. Le Conseil canadien des ministres de l'Environnement (CCME) recommande quant à lui une concentration maximale de 100 UFC de coliformes fécaux par 100 ml d'eau d'irrigation. Il est reconnu que l'eau utilisée pour l'irrigation peut dépasser ces standards. Il est donc nécessaire, à court terme, d'adopter des méthodes visant l'assainissement de l'eau pour répondre aux exigences du marché.

Il est reconnu que l'aération de l'eau peut contribuer à réduire les populations de microorganismes potentiellement pathogènes pour l'humain. Des essais d'aération d'étangs ont été menés avec succès en Saskatchewan par une collaboration entre l'université de Regina et l'équipe de la qualité des eaux de la Direction générale des services agroenvironnementaux d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). Deux constats ont été tirés de ces travaux. D'abord, elle permet de contrôler les populations d'algues incluant les cyanobactéries. De plus, l'aération accélère le processus de décroissance des populations d'*E. coli*. Cependant, les essais relatifs aux populations d'*E. coli* ont été réalisés dans des étangs abreuvoirs de petite dimension (80 m³), comparativement à ceux couramment utilisés par les producteurs horticoles du Québec dont le volume peut atteindre 10 000 m³. De plus, les conditions climatiques et de production sont différentes en Saskatchewan et au Québec. Il était donc nécessaire de préciser la faisabilité et l'efficacité de cette approche dans le contexte horticole québécois.

2. DESCRIPTION DU PROJET

2. 1. Objectif général

L'objectif principal de ce projet était d'évaluer la faisabilité et l'efficacité de l'aération des étangs comme méthode d'assainissement de l'eau d'irrigation.

2. 2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques étaient de :

- 1- Préciser la faisabilité technique de l'aération des étangs d'irrigation
- 2- Déterminer l'impact de l'aération de 3 étangs d'irrigation sur les populations d'*E. coli* dans l'eau
- 3- Recenser les avantages et désavantages associés à l'aération des étangs d'irrigation dans le contexte québécois

2. 3. Étapes et échéances

Le tableau 1 suivant présente le calendrier des activités prévues et réalisées dans le cadre du projet. Aucun changement majeur n'a été fait comparativement au calendrier prévu initialement.

Tableau 1. Calendrier des activités réalisées dans le cadre du projet.

Activités	Date prévue	Date réelle	Finalités	Notes
Réunion de démarrage	Juin 2008	Conférence téléphonique le 13 juin 2008 et réunion le 25 juin 2008	<ul style="list-style-type: none"> • Détermination des paramètres à considérer dans le choix des sites à l'étude • Précisions sur les équipements requis pour les étangs à l'étude (Collaboration, AAC) 	Visite de Serena McIver et Steve Murrel (ACC, Saskatchewan) du 25 au 27 juin 2008
Installation des systèmes d'aération	Juin 2008	Juin – juillet 2008	<ul style="list-style-type: none"> • Installation complétée pour les 3 sites en juillet 2008 	
Démarrage de l'aération, échantillonnage et analyse	Juillet – octobre 2008	Juillet- octobre 2008	<ul style="list-style-type: none"> • Activités réalisées 	L'abattement rapide des populations d' <i>E. coli</i> nous a permis de mener deux essais
Réunion de suivi	Août 2008	23 septembre 2008	<ul style="list-style-type: none"> • Présentation des résultats aux partenaires 	
Compilation des résultats	Juillet – octobre 2008	Juillet – octobre 2008	<ul style="list-style-type: none"> • Résultats compilés 	
Rédaction du rapport	Novembre 2008 – mars 2009	Novembre 2008 – avril 2009	<ul style="list-style-type: none"> • Rapport remis au CDAQ le 16 avril 2009 	
Réunion finale	Janvier 2009	Janvier – avril 2009 (courriels et conversations téléphoniques)	<ul style="list-style-type: none"> • Rapport final 	

2. 4. Matériel et méthode

2. 4. 1. Description des sites

L'étude a été menée dans trois étangs situés à l'Île d'Orléans, Mirabel et Sherrington. Les dimensions de ceux-ci correspondaient à celles qu'il est possible d'observer sur les fermes horticoles du Québec.

Les étangs ont d'abord été vidés jusqu'à la profondeur accessible par le réseau de pompage du producteur, soit environ le quart de la hauteur totale de l'étang. Ils ont ensuite été remplis avec de l'eau d'un cours d'eau avoisinant. L'essai a été mené deux fois pour chaque étang, avec un remplissage en juillet et un autre en septembre.

2. 4. 1. 1. Île d'Orléans

L'étang situé à l'Île d'Orléans était de forme triangulaire avec les côtés d'une longueur de 60 x 27 x 70 m. La forme de l'étang rend difficile l'estimation de son volume total, mais il pourrait être de près de 2,92 millions de litres. La profondeur maximale mesurée était de 2,1 m. Des lentilles d'eau, dont l'emplacement variait selon la direction des vents, ont été observées à la surface de l'étang (figure 1).

Pour le premier essai, la vidange de cet étang a été faite le 18 juillet et le remplissage s'est déroulé du 21 au 22 juillet à partir de la rivière du Bras Sud, un affluent de la rivière Maheu (figure 2). L'aération a été amorcée le 22 juillet. Lors du second essai, la vidange et le remplissage ont été faits le 19 septembre. L'aération a démarré le 22 septembre.



Figure 1. Étang de l'Île d'Orléans.



Figure 2. Rivière du Bras Sud

2. 4. 1. 2. Mirabel

L'étang de Mirabel, illustré à la figure 3, était en forme de rectangle d'une longueur et d'une largeur de 46 et 15 m respectivement. La profondeur maximale mesurée était de 1,8 m, pour un volume total approximatif de 0,93 million de litres.

La vidange du premier essai a été effectuée le 15 juillet et le remplissage du 15 au 16 juillet. L'aération a été amorcée le 16 juillet. La rivière du Chêne a servi de source d'eau pour les deux essais.

Lors de la vidange, la présence d'une plante aquatique a été observée au fond de l'étang (figure 4). L'identification formelle de cette plante n'a pas été faite, mais elle pourrait appartenir au genre *Chara*.



Figure 3. Étang de Mirabel



Figure 4. Plantes aquatiques présentes au fond de l'étang de Mirabel.

2. 4. 1. 3. Sherrington

L'étang de Sherrington, de forme ovale, était d'une longueur de 76 m et d'une largeur de 12 m (figure 5). La profondeur maximale était d'environ 3,7 m, pour un volume total estimé à 1,67 million de litres.

Pour initier le premier essai, l'étang a été vidé le 21 juillet et rempli du 22 au 24 juillet. L'aération a débuté le 24 juillet. L'étang a été alimenté par la rivière l'Acadie et le ruisseau Mouchel en proportions approximatives de $\frac{1}{4}$ et $\frac{3}{4}$ respectivement. Pour le second essai, la vidange a eu lieu le 19 septembre et le remplissage le 22 septembre. La source d'eau utilisée pour cet essai était le ruisseau Mouchel. L'aération a démarré le 22 septembre.



Figure 5. Étang de Sherrington.

2. 4. 2. Équipements

Le choix des équipements utilisés pour l'aération a été basé sur les recommandations de l'équipe de la qualité des eaux de la Direction générale des services agroenvironnementaux d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. L'aération a été faite grâce à un diffuseur d'air à membrane illustré à la figure 6. Ce dernier a été placé dans la partie la plus profonde de l'étang, tel que recommandé. Le choix du compresseur (figure 7), d'une force de $0,5 \text{ pi}^3/\text{min}$, était basé sur la profondeur et le volume des étangs à l'étude. Le système a été alimenté par deux panneaux solaires de 130 watts chacun, ainsi que 4 batteries de 6V. Enfin, le système était doté d'un panneau de contrôle de 30 ampères. La figure 8 présente les composantes du système.

On pourra calculer le nombre de panneaux solaires et le nombre d'accumulateurs nécessaires en utilisant la formule ci-après :

VOLTS × AMPÈRES × HEURES DE FONCTIONNEMENT × FACTEUR D'EFFICACITÉ DES ACCUMULATEURS = WATTS-HEURES NÉCESSAIRES

Une journée d'été comprendra, en moyenne, de 6,0 à 6,5 heures de temps de charge des accumulateurs, ce qui correspond à une consommation horaire nominale de 3,8 ampères (45,6 W) pour un compresseur de 12 volts. On calcule le nombre de panneaux nécessaires à l'aide de la formule précédente :

$$12 \text{ V} \times 3,8 \text{ A} \times 24 \text{ h} \times 1,1 = 1204 \text{ Wh}$$

On utilise des panneaux solaires de 130 W, on produira, par panneau, $130 \text{ W} \times 6 \text{ h}$, soit 780 Wh par jour. Il faudra donc $(1204 \div 780) = 1,54$ panneau. On arrondit à 2.

Pour déterminer le nombre d'accumulateurs nécessaires, AAC recommande une capacité de stockage de trois à cinq jours. AAC recommande aussi d'utiliser des accumulateurs de 6 volts, car c'est ce type d'accumulateur qui assure la meilleure capacité stockage. Pour ce projet, on a voulu une capacité de stockage de quatre jours et on utilise des accumulateurs de 6 V et 220 Ah, donc :

CAPACITÉ DE STOCKAGE = PUISSANCE × (% D'UTILISATION) × DURÉE DE FONCTIONNEMENT PRÉVUE

Puissance : produit volts × ampères (watts)

% d'utilisation : % du temps utilisé

Durée de fonctionnement prévu: période pendant laquelle il faudra utiliser les accumulateurs

$$\text{Capacité de stockage} = (12\text{V} \times 3,8\text{A}) \times 1,0 \times (4 \text{ J} \times 24 \text{ h/J}) = 45,6 \text{ W} \times 1,0 \times 96 \text{ h} = 4377,6 \text{ Wh}$$

Chaque accumulateur produit : $6\text{V} \times 220 \text{ Ah} = 1320 \text{ Wh}$

Il faut donc $4377,6 \div 1320 = 3,32$ accumulateurs. On arrondit à 4.



Figure 6. Diffuseur d'air à membrane (à gauche) et mouvement de l'eau créé lors de l'aération.



Figure 7. Compresseur utilisé pour l'aération des étangs.

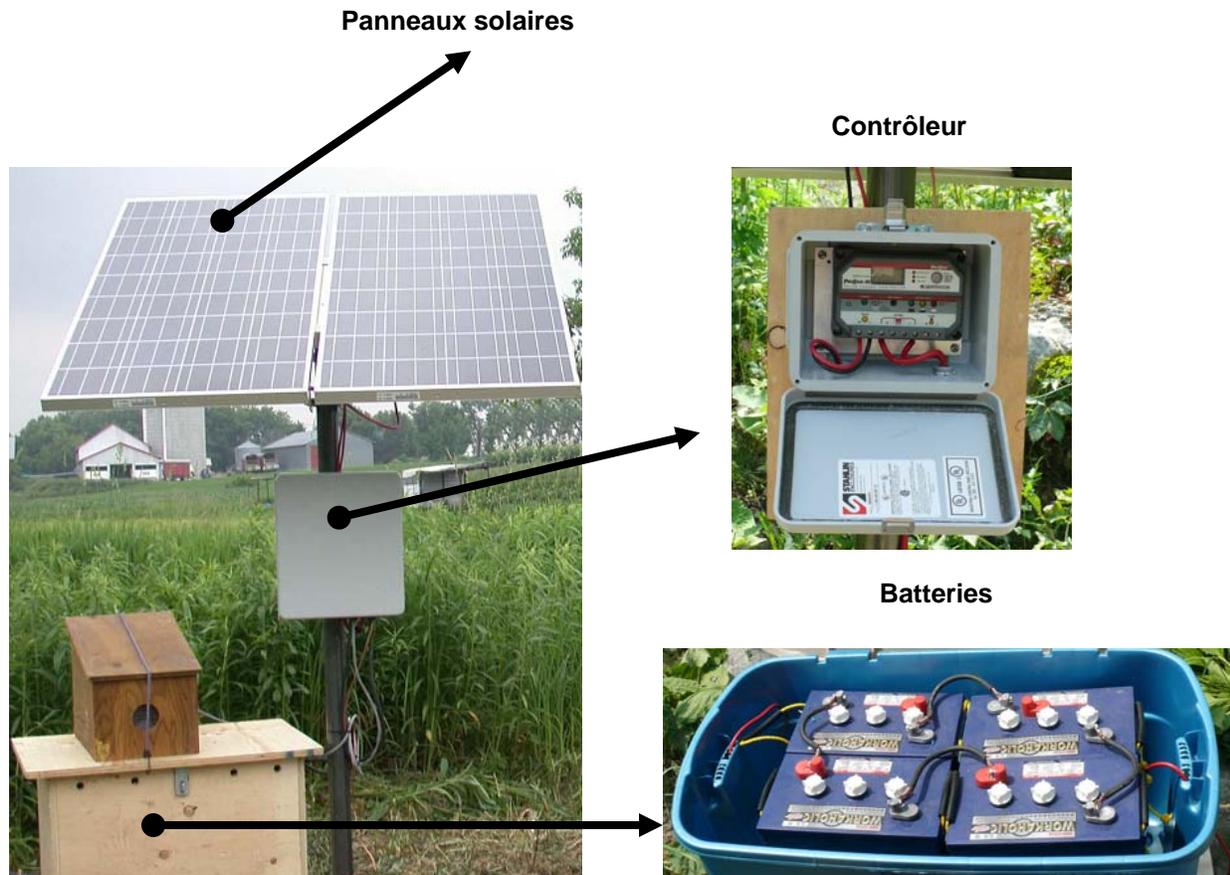


Figure 8. Équipements utilisés pour l'aération des étangs à l'étude.

2. 4. 3. Échantillonnage

Après le remplissage des étangs, des échantillons d'eau ont été prélevés quelques heures avant et après le démarrage de l'aération ainsi qu'à plusieurs reprises après le démarrage de l'aération. L'échantillonnage a été fait en utilisant un échantillonneur à clapet de type alpha permettant de cibler la profondeur désirée.

Les prélèvements ont été faits à trois points d'échantillonnage situés au centre de l'étang ainsi qu'à mi-chemin entre le centre et le bord de l'étang. À chaque point d'échantillonnage, les prélèvements ont été faits à trois profondeurs : au centre de l'étang, à mi-chemin entre la surface et le centre et enfin à mi-chemin entre le centre et le fond de l'étang. Ces profondeurs seront appelées respectivement centre, surface et profondeur pour la présentation des résultats dans ce rapport. Chaque campagne comportait donc neuf échantillons par étang, dont l'analyse a été faite pour la détermination des populations d'*E. coli*. Les échantillons d'eau ont été prélevés quelques heures avant et après le démarrage de l'aération ainsi qu'environ 1, 2, 3, 5, 7, 14 et 28 jours après le début de l'aération. Ils ont été conservés entre 2 et 8°C jusqu'à leur analyse en laboratoire, qui a été effectuée en moins de 48 heures après le prélèvement.

2. 4. 4. Analyses microbiologiques

Le dénombrement des populations d'*E. coli* dans l'eau a été fait selon la méthode M.A. 700-Ec-mTec 1.0 du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ), intitulée « Recherche et dénombrement d'*Escherichia coli* thermotolérant : méthode par filtration sur membrane utilisant le milieu de culture mTEC modifié ».

Brièvement, cette méthode consiste à filtrer, à travers une membrane d'une porosité de 0.45 µm, trois volumes déterminés de l'échantillon. Ces membranes sont ensuite placées sur le milieu mTEC modifié. Suite à une première incubation de 2 heures à 35 °C, les géloses sont incubées à 44,5 °C pendant 24 heures. Les bactéries *E. coli* forment sur ce milieu des colonies allant du rouge au magenta.

2. 4. 5. Mesure de la température et de l'oxygène dissous

La mesure de la température et de l'oxygène dissous a été faite à l'aide de l'appareil DO200 de la compagnie EcoSense. La mesure de ces deux variables a été faite en plongeant la sonde submersible de l'appareil directement dans l'étang, et ce, aux mêmes points d'échantillonnage de l'eau décrits auparavant. L'oxygène dissous a été exprimé en pourcentage.

3. RÉSULTATS ET ANALYSE

3. 1. Site de l'île d'Orléans

Lors de l'essai 1, avant le démarrage de l'aération, les populations d'*E. coli* dans l'étang étaient de 2152 UFC/100 mL en surface, 2300 UFC/100 mL au centre et 1739 UFC/100 mL en profondeur (moyenne des trois prélèvements). Après le démarrage de l'aération, une décroissance exponentielle des populations bactériennes a été observée (figure 9). Deux jours après le démarrage de l'aération, le 24 juillet, la moyenne des neuf prélèvements (tous points d'échantillonnage confondus) était de 63 UFC/100 mL. Tous les échantillons avaient un contenu en *E. coli* inférieur à la limite actuelle de 100 UFC/100 mL pour les coliformes fécaux recommandée par le Conseil canadien des ministres de l'Environnement (CCME) pour l'eau d'irrigation. Au cours des campagnes d'échantillonnage subséquentes, menées entre le 25 juillet et le 19 août, les populations bactériennes sont demeurées en dessous de 100 UFC/100mL. Une légère diminution des populations a été observée au cours de cette période, pour atteindre un contenu moyen de 18 UFC/100 mL le 19 août.

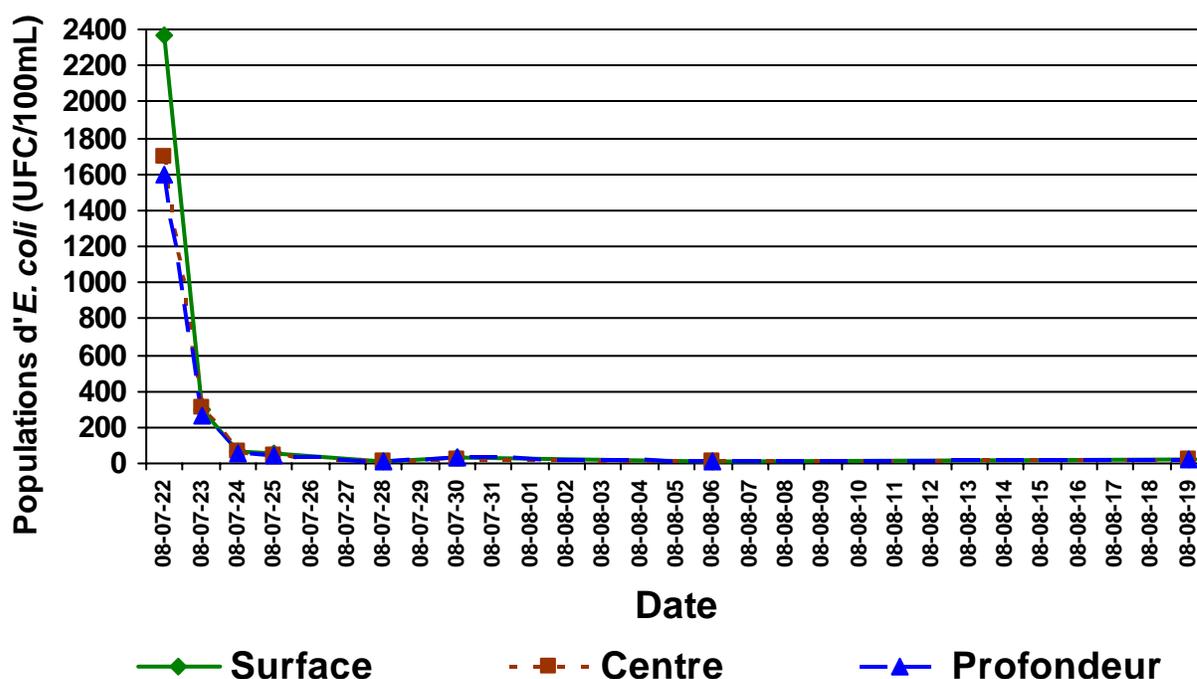


Figure 9. Populations d'*E. coli* observées dans l'étang de l'île d'Orléans lors de l'essai 1.

Au cours du second essai, les populations initiales d'*E. coli* étaient faibles, soit 75 UFC/100mL en surface, 63 UFC/100 mL au centre et 211 UFC/100 mL en profondeur. Une diminution des populations a été observée au cours de la période d'échantillonnage, qui s'échelonnait entre le 22 septembre et le 15 octobre (figure 10). Toutefois, la décroissance n'était pas typiquement exponentielle. Une légère hausse des populations d'*E. coli* a été observée le 2 octobre 2008, qui pourrait être attribuable au ruissellement résultant des fortes pluies observées au cours de

cette période (annexe 1) À la fin de l'essai, près d'un mois suivant le démarrage de l'aération, le contenu moyen de l'eau était de 12 UFC/100 mL (moyenne de tous les prélèvements).

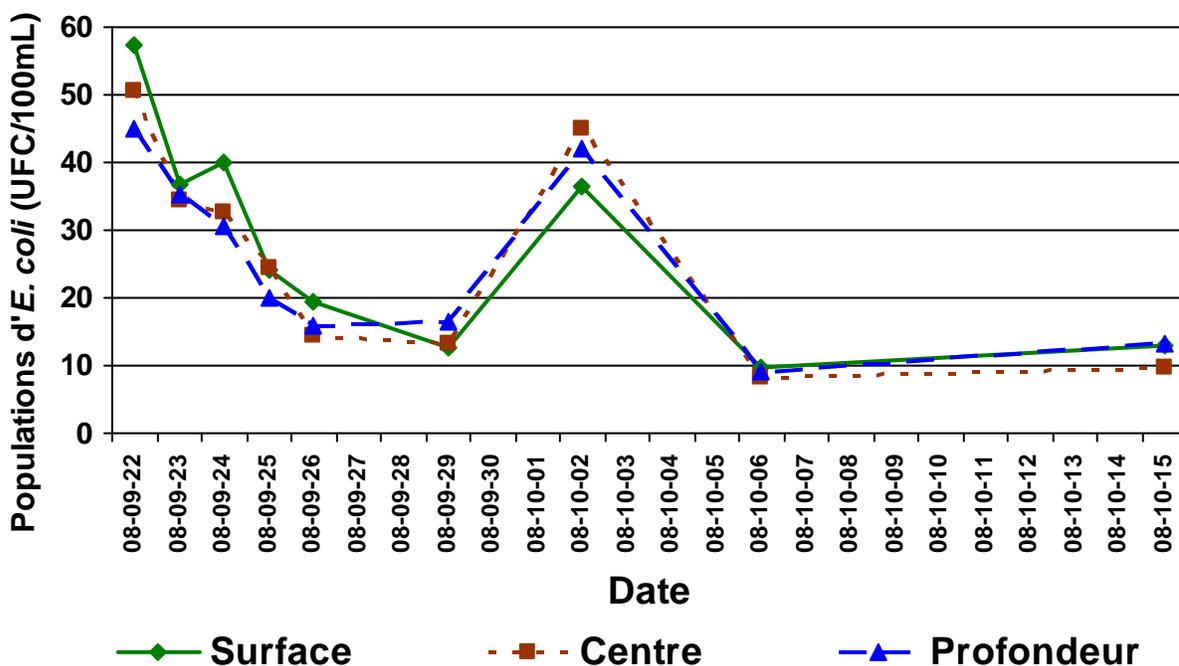


Figure 10. Populations d'*E. coli* observées dans l'étang de l'île d'Orléans lors de l'essai 2.

Le suivi de l'oxygène dissous et de la température avait pour objectif de valider l'efficacité du système d'aération et de mieux comprendre la dynamique des populations d'*E. coli*.

Le suivi de l'oxygène dissous permet de mesurer directement l'efficacité du système d'aération. Il est important de mentionner que l'oxygénation de l'eau ne se fait pas directement via la diffusion d'air du système, mais plutôt via le brassage de l'eau. Le taux d'oxygène dissous est également lié à différents phénomènes biochimiques, dont la dégradation de la matière organique. De plus, l'oxygène dissous influence le taux de survie des microorganismes aquatiques. La littérature démontre qu'*E. coli* peut survivre en conditions aérobies et anaérobies de par ses facultés d'anaérobie facultative. Il est toutefois démontré que le taux de survie de ce microorganisme est plus élevé en conditions anaérobies (Phue et Shiloach, 2005 dans Jamieson, 2007)

Les systèmes d'aération permettent de briser le gradient thermique qui se crée dans un étang lorsque l'eau de l'épilimnion se réchauffe. Comme l'eau froide est plus dense que l'eau chaude, ce gradient thermique empêche un mélange complet de la colonne d'eau et une stratification du plan d'eau se forme. Le suivi de la température permet donc de valider l'efficacité de brassage du système d'aération. La température de l'eau est également liée aux processus métaboliques. De façon générale, une température plus élevée accélère ces processus tandis qu'ils sont ralentis à des températures plus froides (Ratkowsky et al., 1982; Price and Sowers, 2004 dans Jamieson, 2007).

Des variations importantes de l'oxygène dissous ont été observées au cours de l'essai 1. Avant le démarrage de l'aération, une stratification de l'oxygène dissous a été observée, pour une moyenne de 35% en surface, 14% au centre et 6% en profondeur. Après le démarrage de l'aération, une augmentation du taux d'oxygène dissous a été observée pour la période du 22 au 28 juillet, tel qu'illustré à la figure 11. Toutefois, le taux était supérieur dans les couches de surface comparativement aux couches inférieures. Une baisse drastique a été observée lors des échantillonnages du 30 juillet et du 6 août. Une telle consommation d'oxygène dans l'eau est généralement associée à une décomposition de matière organique. Il est possible que l'aération ait favorisé la décomposition de dépôts organiques présents au fond de l'étang, causant une consommation d'oxygène. Suite à cette baisse initiale d'oxygène dissous, probablement associée à la décomposition de matière organique, une augmentation de l'oxygène dissous a été observée. Il est passé d'environ 5 à 15 % lors des échantillonnages du 6 et du 19 août. De plus, une atténuation importante de la stratification de l'oxygène dissous dans la colonne d'eau a été notée. Au cours de l'essai 2, les niveaux d'oxygène dissous ont été maintenus entre environ 40 et 85 % et la stratification de l'oxygène dissous était faible (figure 12).

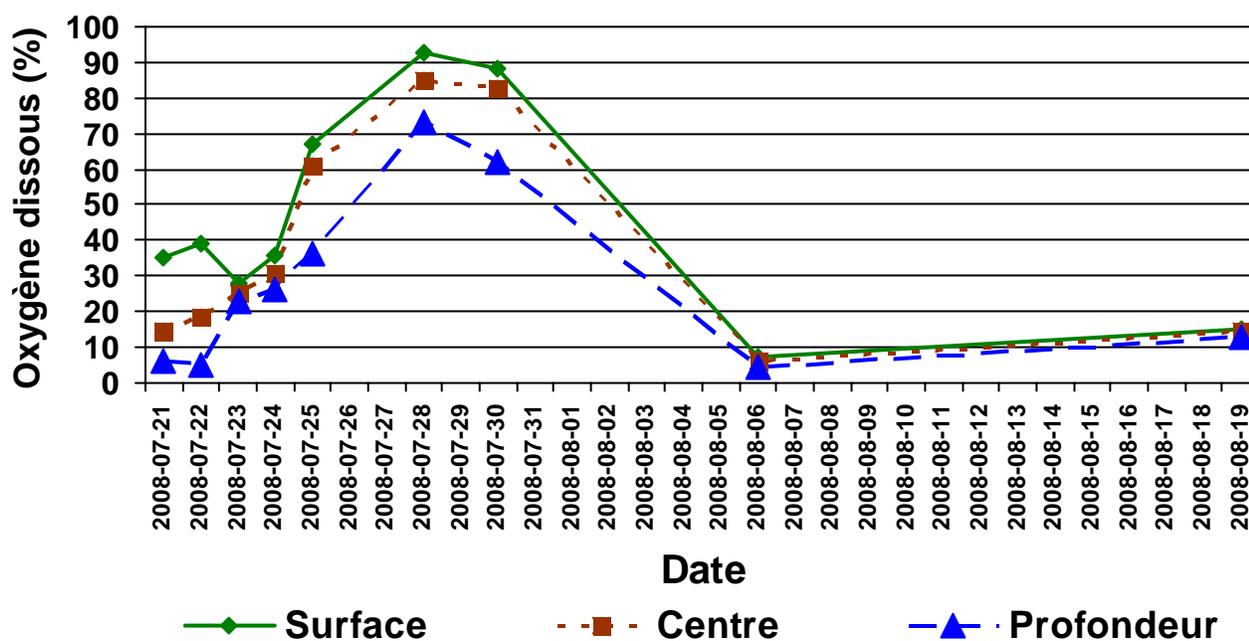


Figure 11. Oxygène dissous dans l'étang de l'Île d'Orléans lors de l'essai 1.

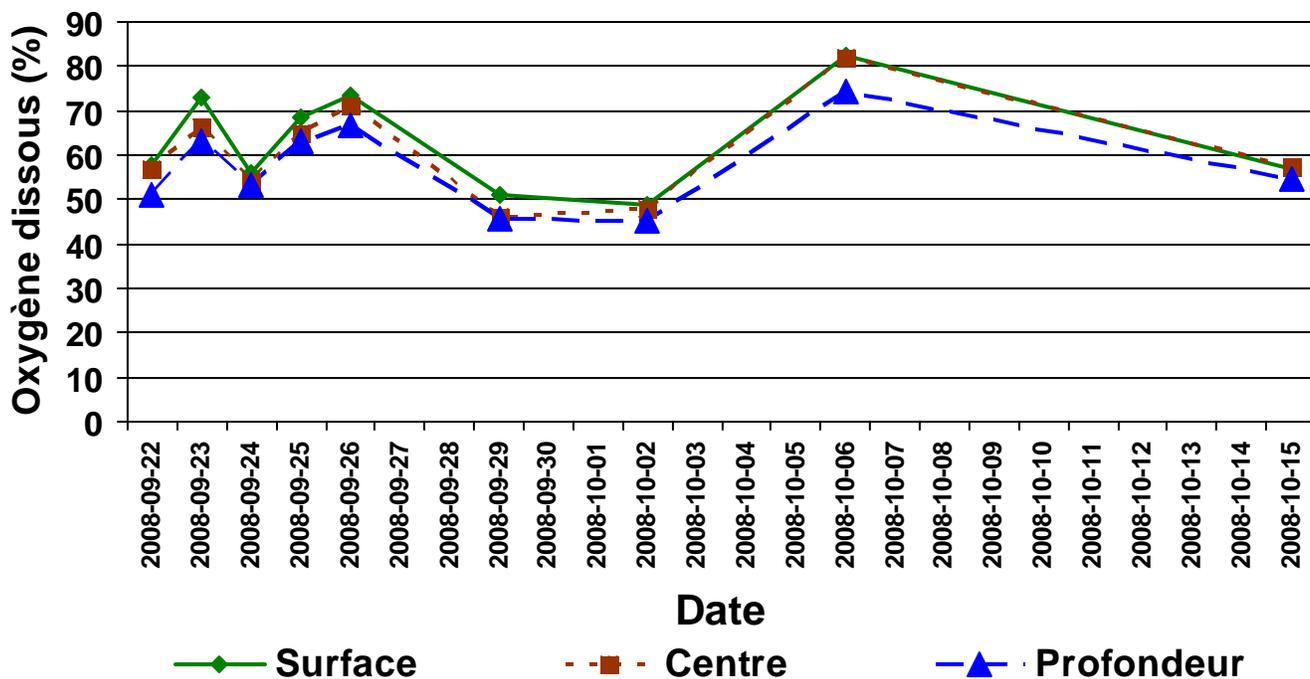


Figure 12. Oxygène dissous dans l'étang de l'Île d'Orléans lors de l'essai 2.

La température de l'eau a varié entre 18,4 et 22,7 °C lors de l'essai 1, alors qu'elle a varié entre 11 et 15,3 °C au cours de l'essai 2 (figure 13). Une légère différence de température (environ 0,5 °C) a été observée selon la profondeur d'échantillonnage pour la période du 22 au 30 juillet, mais cette différence était nulle ou négligeable lors des échantillonnages du 6 et du 19 août (figure 13) ainsi que lors de l'essai 2 (figure 14).

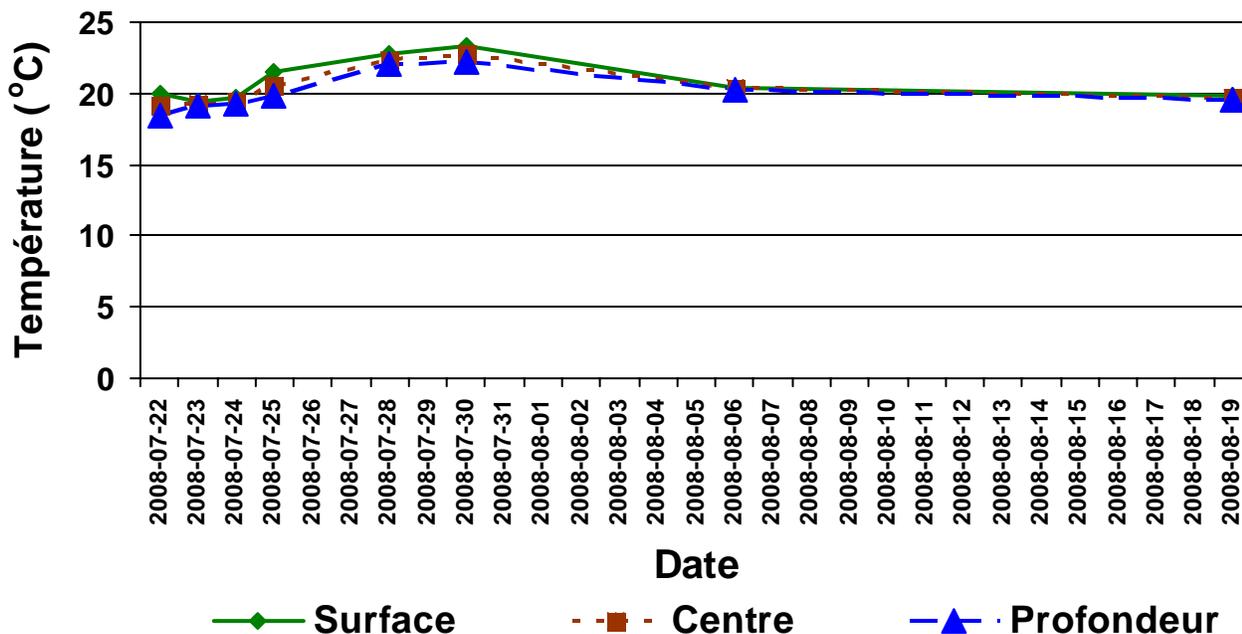


Figure 13. Température de l'eau dans l'étang de l'île d'Orléans lors de l'essai 1.

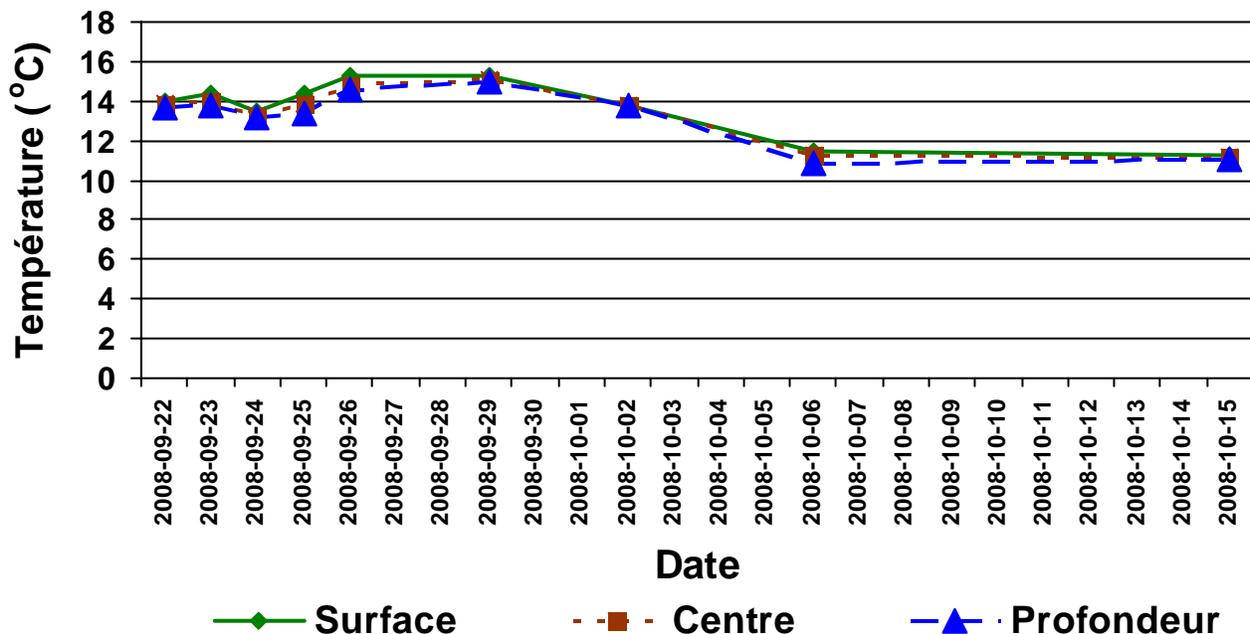


Figure 14. Température de l'eau dans l'étang de l'île d'Orléans lors de l'essai 2.

3. 2. Site de Mirabel

Les populations d'*E. coli* pour l'essai 1 avant le démarrage de l'aération au site de Mirabel étaient de 273, 261 et 210 UFC/100mL en surface, au centre et en profondeur respectivement. Une heure après le démarrage de l'aération, celles-ci étaient de 195 UFC/100 mL (surface), 219 (centre) et 228 UFC/100 mL en profondeur. Dès le lendemain, les populations bactériennes ont diminué pour atteindre un contenu moyen de 84 UFC/100 mL (moyenne des neuf prélèvements) tel qu'illustré à la figure 15. Par contre, une hausse ponctuelle a été observée le 18 juillet, mais les résultats étaient variables selon le site de prélèvement. Le tableau 2 présente les résultats obtenus pour chaque prélèvement. Deux hypothèses pourraient expliquer une telle hausse des populations bactériennes. D'abord, une marmotte morte a été observée dans l'étang au cours de cette période, ce qui peut représenter une source d'*E. coli*. De plus, des pluies importantes, atteignant plus de 25 mm, ont été notées à la même date (annexe 2).

Suite à la hausse notée le 18 juillet, les populations bactériennes ont chuté à moins de 40 UFC/100 mL dès le lendemain (figure 15). Une légère diminution a ensuite été observée lors des échantillonnages subséquents, pour atteindre un niveau moyen (tous prélèvements confondus) de 12 UFC/100 mL le 13 août (figure 15).

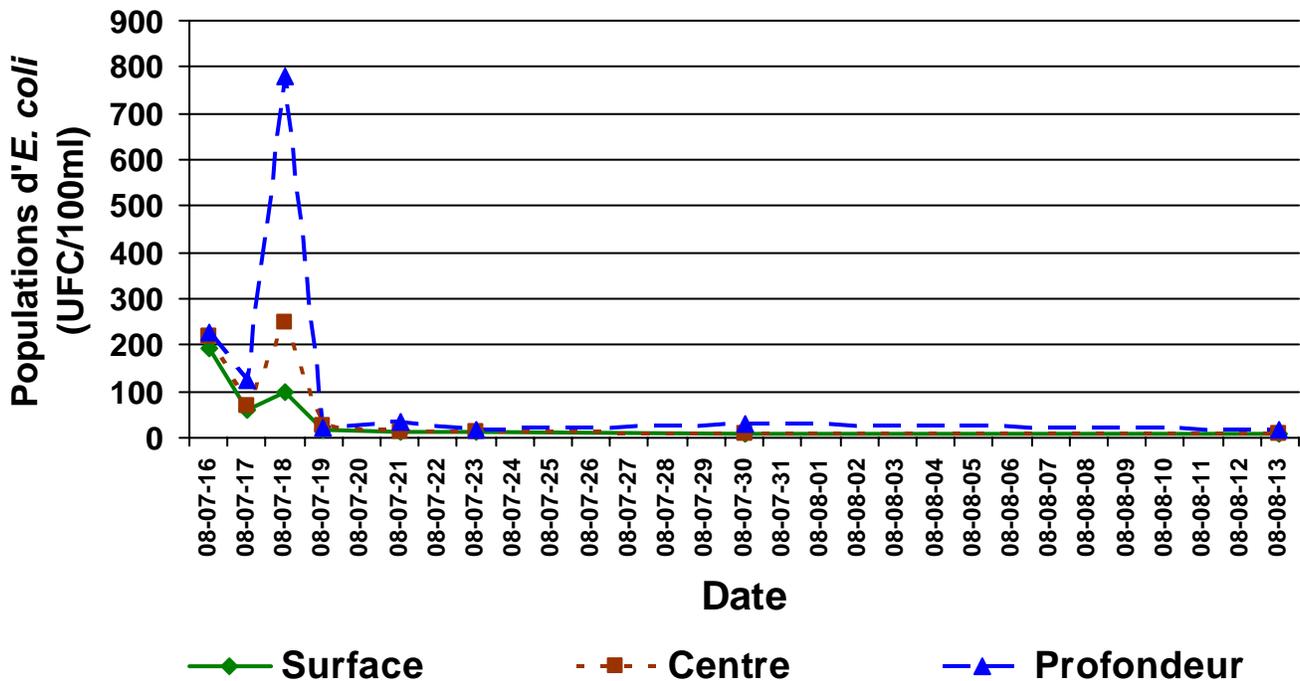


Figure 15. Populations d'E. coli observées dans l'étang de Mirabel lors de l'essai 1.

Tableau 2. Populations d'E. coli observées dans l'étang de Mirabel le 18 juillet 2008, selon le site de prélèvement.

Populations d'E. coli (UFC/100 mL)			
Site	Surface	Centre	Profondeur
A	15	143	1200
B	243	550	1050
C	32	58	84

La concentration initiale d'E. coli avant le démarrage de l'aération dans l'étang de Mirabel pour l'essai 2 était faible, soit 19 UFC/100 mL en surface, 11 UFC/100 mL au centre et 15 UFC/100 mL en profondeur. La figure 16 présente les résultats à partir du 29 septembre, date de démarrage de l'aération. Au cours de la période du 29 septembre au 21 octobre, une réduction des populations bactériennes a été observée. Lors de l'échantillonnage du 14 octobre, les neuf prélèvements se situaient sous la limite de détection. Le 21 octobre, la bactérie n'a pas été détectée dans 7 échantillons sur 9.

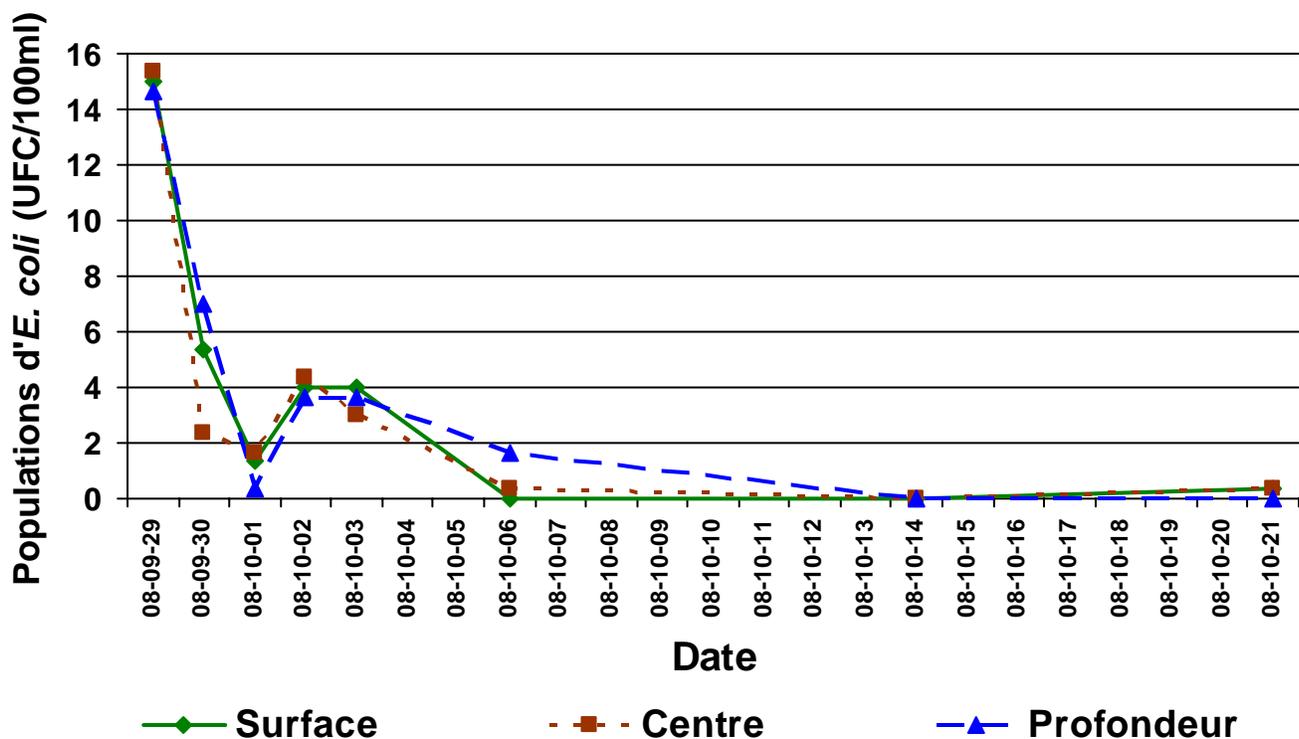


Figure 16. Populations d’*E. coli* observées dans l’étang de Mirabel lors de l’essai 2.

Le niveau d’oxygène dissous dans l’étang diminuait avec une augmentation de la profondeur lors de l’essai 1 (figure 17). Avant l’aération, il était de 125, 97 et 56 % en surface, au centre et en profondeur respectivement. Cette stratification de l’oxygène dissous est demeurée, et ce, même après le démarrage du diffuseur. Par contre, la stratification était faible pour l’essai 2 (figure 18).

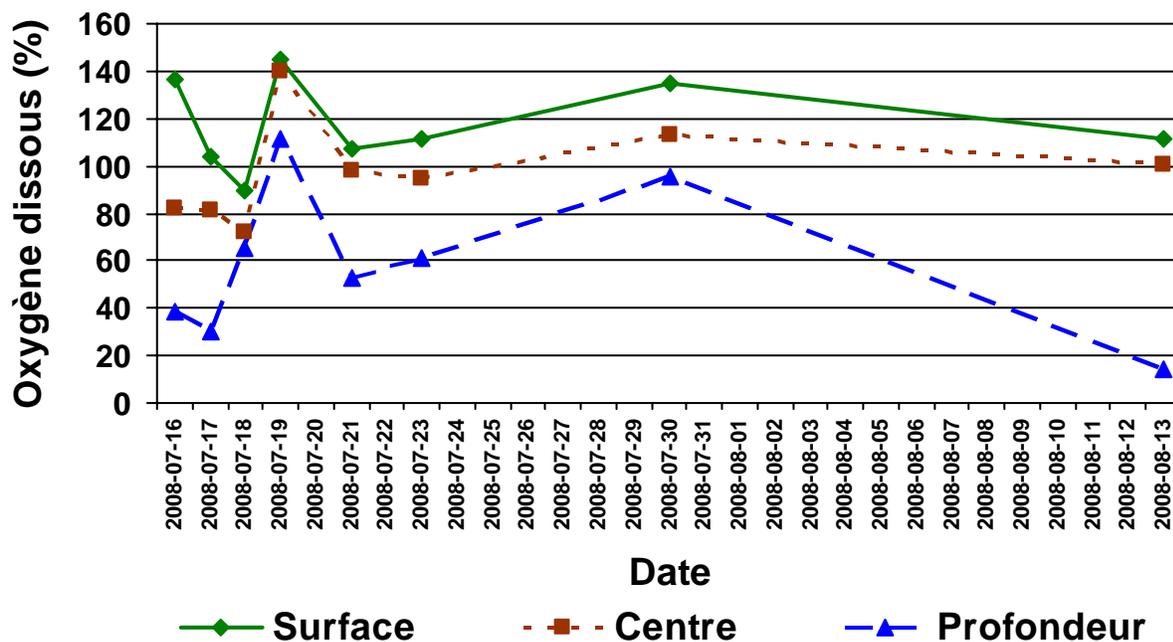


Figure 17. Oxygène dissous dans l’étang de Mirabel lors de l’essai 1.

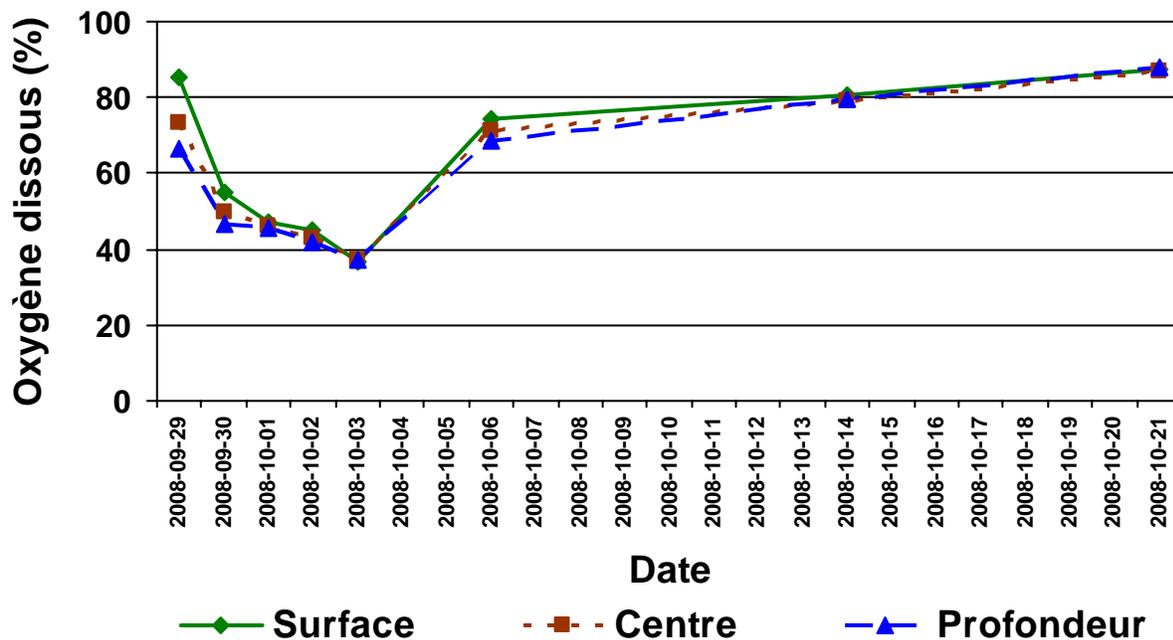


Figure 18. Oxygène dissous dans l'étang de Mirabel lors de l'essai 2.

Un gradient de température a aussi été observé pour l'essai estival selon la profondeur de mesure dans l'étang, avec des différences entre la surface et la profondeur pouvant atteindre près de 5° c à certaines dates (figure 19). La présence d'un gradient d'oxygène dissous couplé à un gradient de température pourrait signifier un brassage imparfait de l'étang. Celui-ci pourrait résulter notamment de la présence des plantes aquatiques au fond de l'étang. Par contre, la stratification de l'oxygène dissous et de la température n'a pas été observée lors de l'essai 2 (figures 18 et 20), alors que les plantes aquatiques étaient toujours présentes. Cependant, en été, la stratification de la température est naturellement plus grande qu'en automne en raison du rayonnement solaire. Il est donc possible que le système ait permis de maintenir une température uniforme dans l'étang malgré un brassage imparfait, ce qui est plus difficile en conditions estivales. Des données supplémentaires seraient nécessaires pour documenter le sujet.

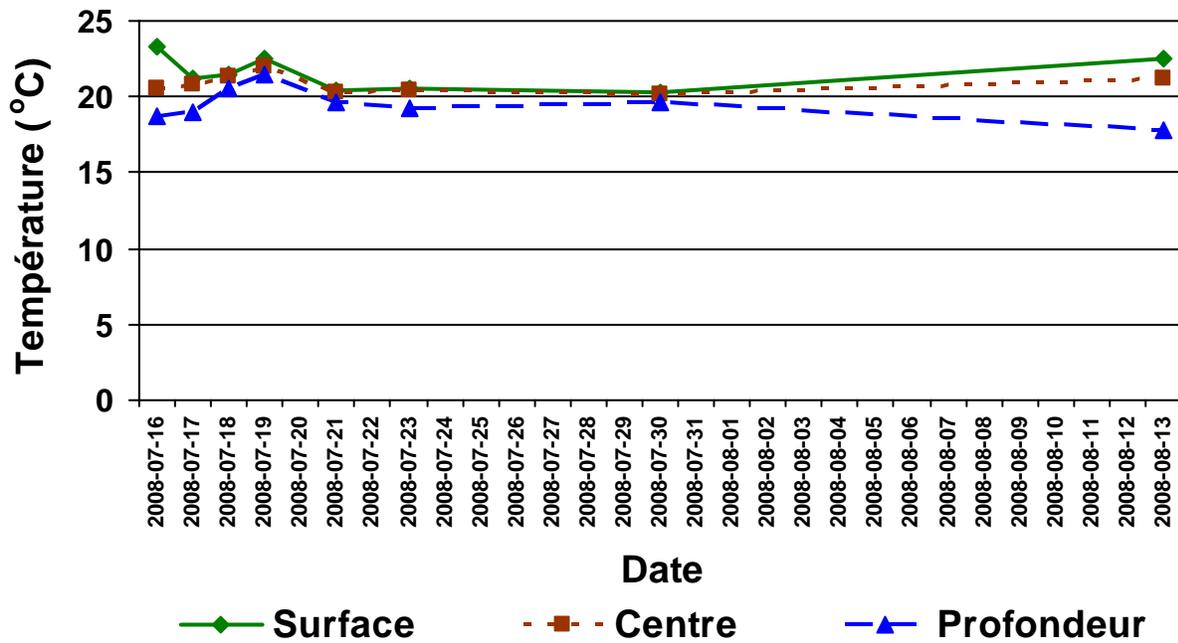


Figure 19. Température de l'eau dans l'étang de Mirabel lors de l'essai 1.

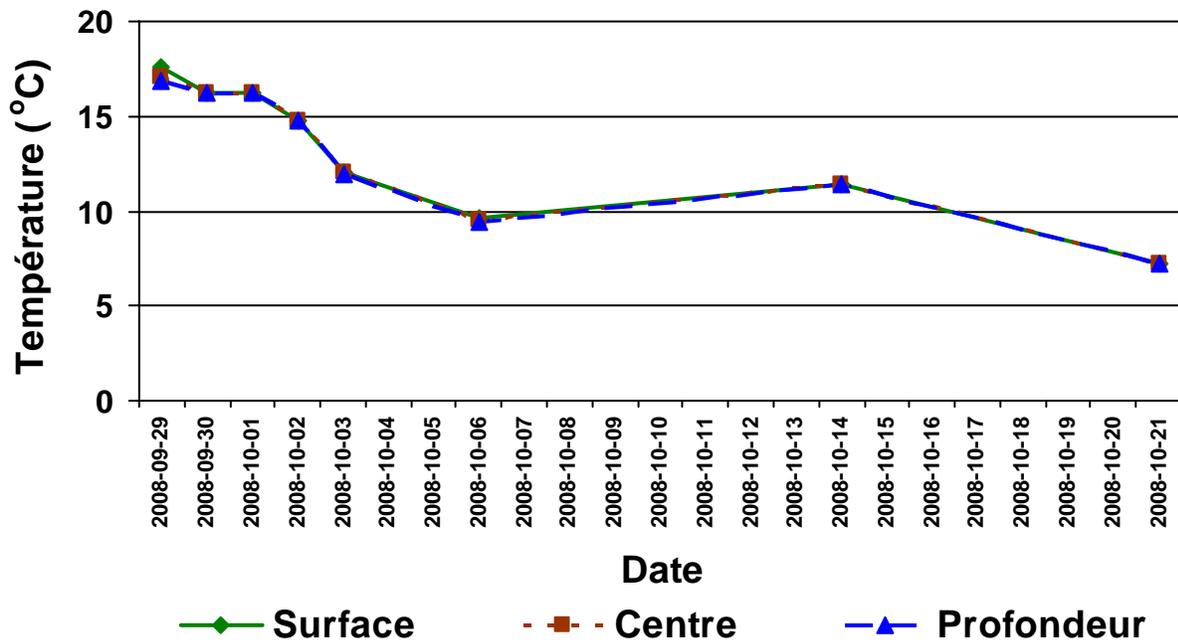


Figure 20. Température de l'eau dans l'étang de Mirabel lors de l'essai 2.

3. 3. Site de Sherrington

Avant le démarrage de l'aération, dans l'essai 1, le contenu de l'eau en *E. coli* était de 513 UFC/100 mL en surface, 510 au centre et 523 en profondeur (moyenne des 3 prélèvements pour chaque profondeur) (figure 21). Le contenu initial de l'eau était beaucoup plus faible pour l'essai 2, soit 221 UFC/100 mL en surface, 229 au centre et 293 UFC/100 mL en profondeur (figure 22). Dans les deux cas, une décroissance exponentielle des populations a été observée et le seuil de 100 UFC/100 mL ou moins a été atteint dans tous les prélèvements effectués deux jours après le démarrage de l'aération.

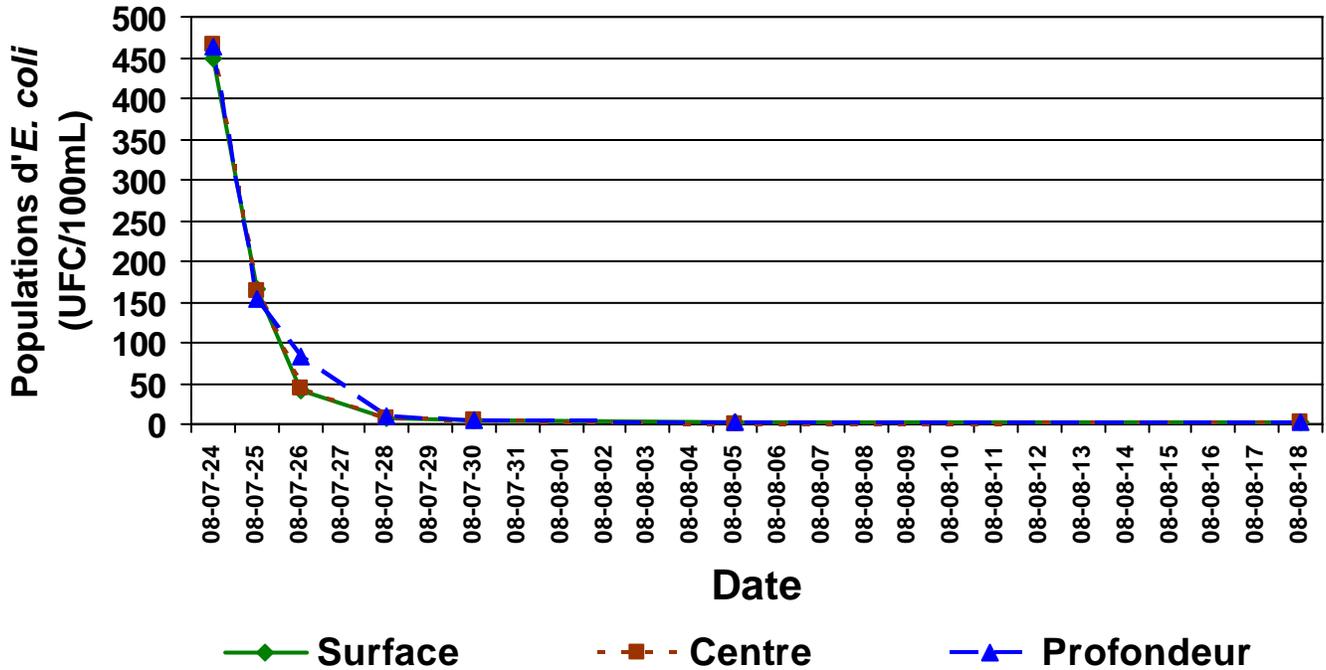


Figure 21. Populations d'*E. coli* observées dans l'étang de Sherrington lors de l'essai 1.

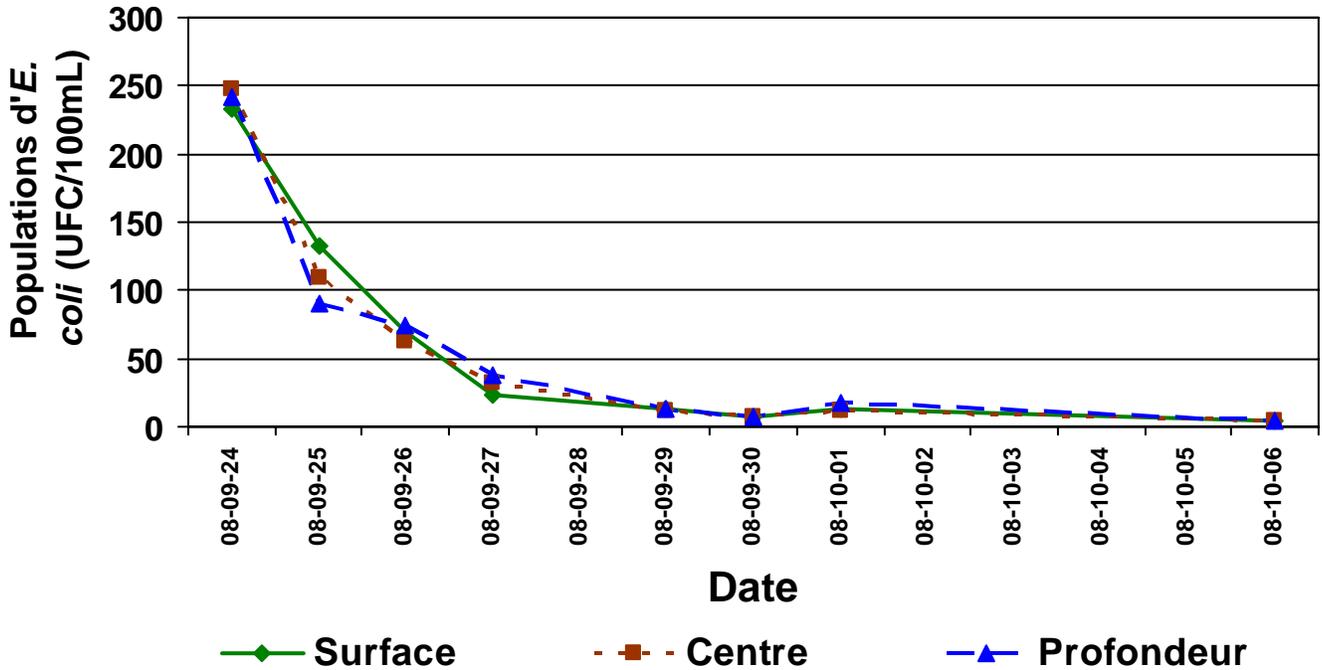


Figure 22. Populations d'E. coli observées dans l'étang de Sherrington lors de l'essai 2.

Un léger gradient d'oxygène dissous a été observé selon la profondeur de mesure (figures 23 et 24). La différence entre chaque profondeur d'échantillonnage était d'environ 5 %. Cependant, la température était plutôt uniforme. En été, elle a fluctué entre 20 et 24 °C, alors qu'elle a varié entre près de 13 °C et 16,4 °C en automne (figures 25 et 26).

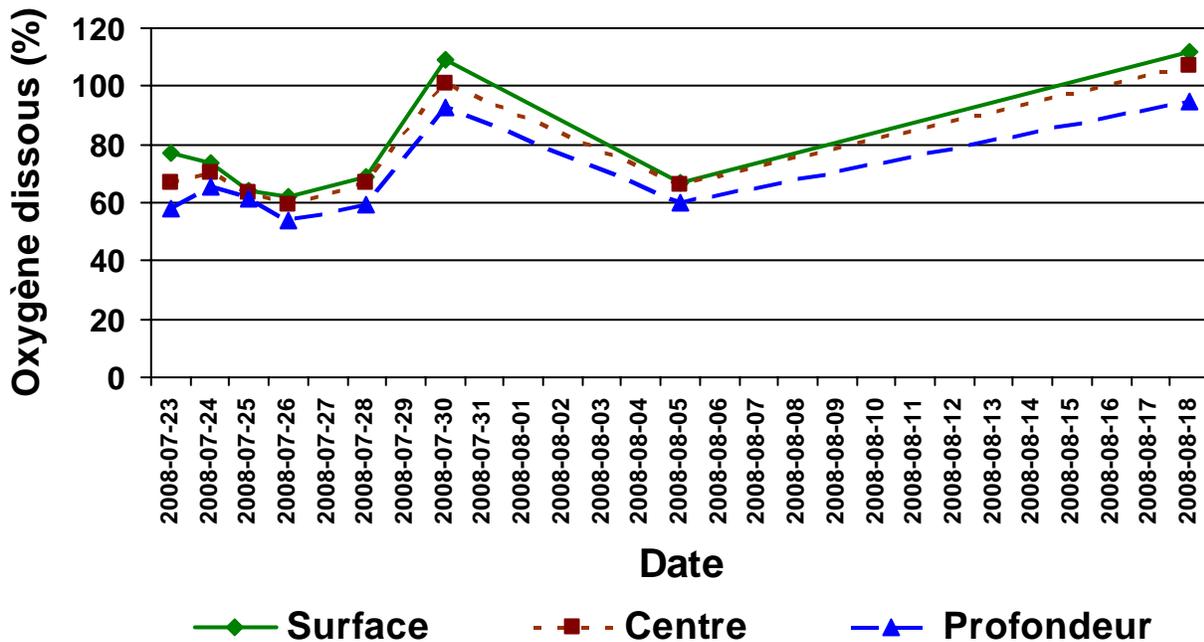


Figure 23. Oxygène dissous dans l'étang de Sherrington lors de l'essai 1.

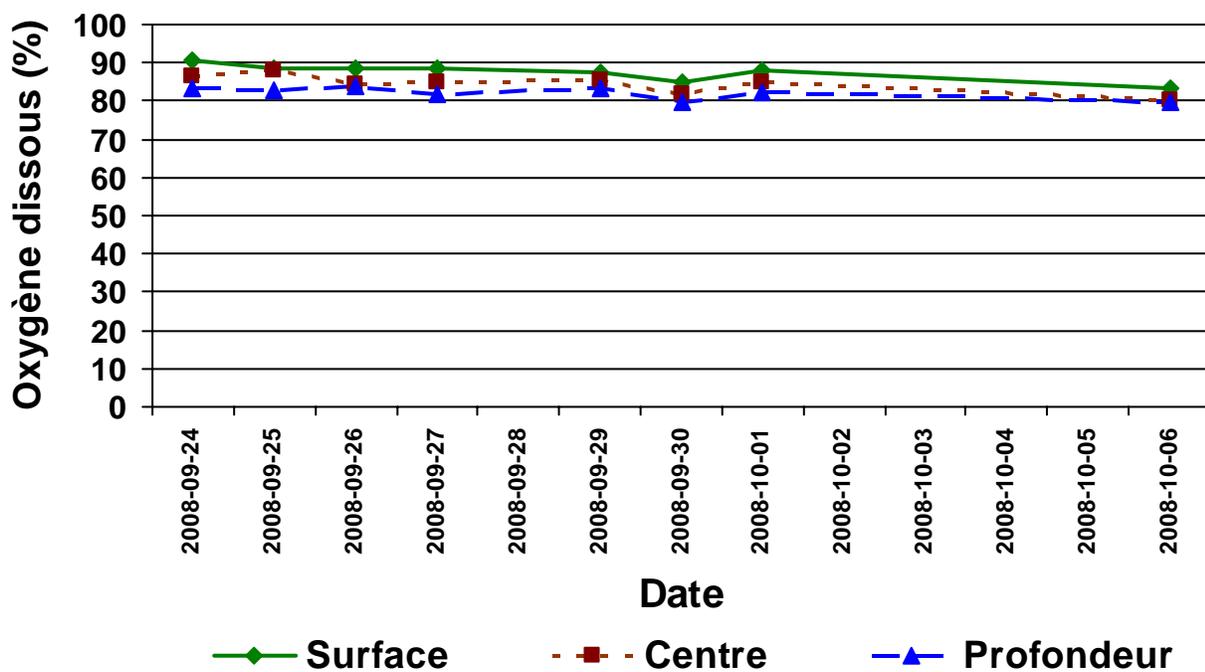


Figure 24. Oxygène dissous dans l'étang de Sherrington lors de l'essai 2.

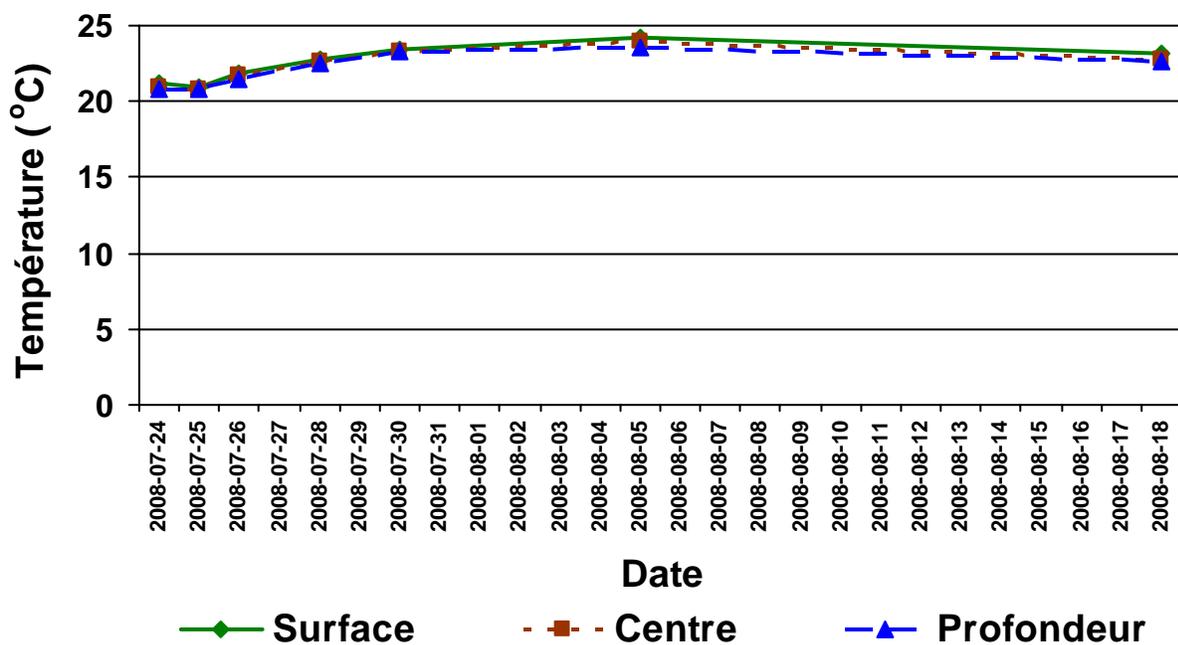


Figure 25. Température de l'eau dans l'étang de Sherrington lors de l'essai 1.

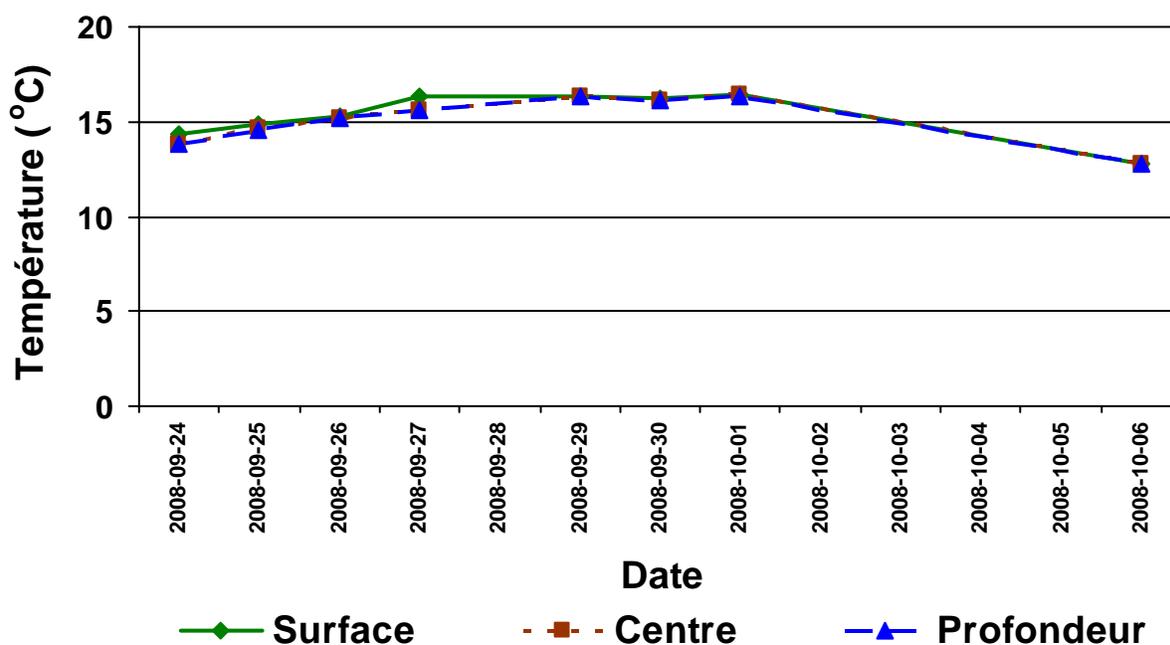


Figure 26. Température de l'eau dans l'étang de Sherrington lors de l'essai 2.

3. 4. Taux de décroissance des populations d'*Escherichia coli*

La diminution des populations d'*E.coli* suit une décroissance exponentielle qui peut être définie comme suit :

$$C_t = C_0 \times 10^{-kt}$$

Où

C_t = populations d'*E. coli* au temps t (UFC/100 ml)

C_0 = populations d'*E. coli* au temps t=0

k = taux de décroissance exponentielle

t = temps écoulé (jours)

La procédure NLIN de SAS® a été utilisée pour ajuster le modèle de décroissance exponentielle aux jeux de données afin de déterminer le taux de décroissance des populations d'*E. coli*. Il a été observé que la variance des observations n'était pas homogène, étant supérieure pour les valeurs plus élevées. L'énoncé `_WEIGHT_` a permis de corriger cette situation en donnant un poids moins élevé aux observations qui ont une plus grande variance et un poids plus élevé aux observations qui ont une plus petite variance. Le tableau 3 résume les résultats obtenus.

Tableau 3. Constantes des fonctions de décroissance exponentielle des populations d'*E. coli*.

Site	Essai	C ₀	k	R ²	% / jour
Île d'Oléans	1	1797	0,75	0,92	83
Mirabel	1	nd	nd	nd	nd
Sherrington	1	456	0,47	0,96	66
Île d'Oléans	2	32	0,03	0,38	7
Mirabel	2	3	0,06	0,12	13
Sherrington	2	217	0,27	0,90	47

Où :

R² = coefficient de détermination

% / jour = pourcentage de diminution des populations d'*E. coli* par jour

n.d. = non disponible (ne répond pas à la fonction de décroissance exponentielle en raison d'une contamination externe)

Les coefficients de détermination (R²) présentés au tableau 3 indiquent que la fonction de décroissance exponentielle décrit bien le phénomène observé lorsque les populations d'*E. coli* sont élevées, i.e. supérieures à environ 100 UFC/100 mL. Cela signifie que plus les populations d'*E. coli* sont élevées, plus le taux de décroissance de celles-ci est grand. Pratiquement, cela implique que la concentration initiale d'*E. coli* influencera peu le temps requis pour atteindre le niveau de 100 UFC/100 mL visé. Par exemple, le temps requis estimé pour atteindre 100 UFC/100 mL a été estimé à 1,67, 1,40 et 1,25 jour, et ce, pour des concentrations initiales d'*E. coli* respectives de 1797, 456 et 217 UFC/100 mL.

4. ANALYSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE

Le coût des équipements requis pour l'aération dépend de la profondeur et du volume de l'étang. Il est aussi grandement influencé par la source d'énergie. Si une source de courant conventionnel 110 volts n'est pas accessible, les panneaux solaires peuvent être utilisés, tel que réalisé dans cette étude.

Pour un volume d'étang inférieur à 2,4 millions de litres et une profondeur inférieure à 15 pieds, ils sont estimés à \$ 4 000,00 ou moins pour un achat fait au Québec avec panneaux solaires. Ces dimensions correspondent à la majorité des étangs qui peuvent être retrouvés chez les producteurs horticoles québécois. Il est toutefois possible de se procurer le même ensemble chez un distributeur de la Saskatchewan à environ la moitié du prix. Cette différence résulte d'une demande accrue en Saskatchewan, où une grande partie des étangs de ferme sont maintenant aérés. L'annexe 4 présente une description détaillée du coût relié à chaque composante pour un achat au Québec, ainsi que le coût total pour un achat fait en Saskatchewan et ce, selon le volume et la profondeur de l'étang. La durée de vie du compresseur peut être estimée à 5 ans, mais cette composante ne représente pas une part importante du coût total de l'achat (Murrell et McIver, communication personnelle). Quant aux panneaux solaires, leur durée de vie peut aller jusqu'à environ 20 ans. Les panneaux solaires représentent une partie importante des coûts du système, qui chute de plus de 3 700,00 \$ à près de 900,00 \$ pour une alimentation conventionnelle 110 volts au Québec.

L'aération possède certains avantages comparativement à d'autres technologies d'assainissement de l'eau d'irrigation qui pourraient être envisagées au Québec telles que la chloration, l'ozonation et le traitement UV. Le tableau 4 présente un résumé des avantages et désavantages de ces procédés.

Tableau 4. Avantages et désavantages reliés à différentes méthodes d'assainissement de l'eau d'irrigation.

Méthode de traitement	Avantages	Désavantages
Aération	<ul style="list-style-type: none"> ● Pas de sous-produits toxiques connus ● Aucun intrant chimique ● Pas d'interférence avec matières en suspension 	<ul style="list-style-type: none"> ● Installation d'une demi-journée ● Applicable en étang seulement ● Effet non instantané
Chloration	<ul style="list-style-type: none"> ● Peu coûteux ● Intrans chimique 	<ul style="list-style-type: none"> ● Formation possible de sous-produits toxiques ● Efficacité réduite en présence de matière organique en suspension ● Phytotoxicité possible à haute concentration ● Corrosif en concentration élevée
Ozonation	<ul style="list-style-type: none"> ● Pas de sous-produits toxiques 	<ul style="list-style-type: none"> ● Coûts initiaux élevés ● Efficacité réduite en présence de matière organique en suspension ● Applicabilité à la ferme discutable ● Brassage de l'eau nécessaire après l'injection
Traitement UV	<ul style="list-style-type: none"> ● Aucun intrant chimique ● Pas de sous-produits toxiques 	<ul style="list-style-type: none"> ● Coûts initiaux élevés ● Applicabilité à la ferme discutable ● Entretien périodique nécessaire ● Efficacité varie selon la turbidité de l'eau

Source : Schutzman, 2008; Grabow, 2009.

5. CONCLUSION

Les résultats issus de cette étude indiquent que l'aération est une technique applicable dans le contexte horticole québécois. De plus, les données préliminaires indiquent qu'elle est efficace pour abattre rapidement les populations d'*E. coli* dans l'eau des étangs d'irrigation. Plus d'essais devraient être réalisés avant de déterminer une durée minimale d'entreposage de l'eau d'irrigation en condition d'aération. Jamieson (2007) recommande une durée minimale d'entreposage de deux semaines dans des réservoirs non stratifiés et exempts de contamination subséquente. Les résultats préliminaires de la présente étude suggèrent toutefois que les seuils établis par le Conseil canadien des ministres de l'environnement¹ ou celui dicté par le « Leafy green marketing agreement »² pourraient être atteints en une période plus courte.

Il sera également intéressant de préciser l'efficacité des systèmes d'aération sous des conditions de pompages fréquents qu'il est possible d'observer chez les producteurs agricoles québécois. Par ailleurs, des études futures permettront de préciser l'impact de l'aération sur d'autres paramètres tels que la dégradation des pesticides ainsi que la dynamique du phosphore à l'interface eau sédiments et par conséquent le contrôle des populations d'algues bleu-vert et leurs toxines.

Finalement, puisqu'une grande partie des populations d'*E. coli* est associée aux sédiments et particulièrement aux particules de moins de 5 µm, un suivi de l'impact de l'aération sur la turbulence de l'eau et le taux de sédimentation permettrait de mieux comprendre les processus de décroissance d'*E. coli*.

¹ L'eau utilisée à des fins d'irrigation devrait contenir moins de 100 UFC/100 ml d'*E. coli*.

² La moyenne géométrique de 5 échantillons d'eau d'irrigation en contact avec le feuillage devrait être inférieure à 126 NPP/100 ml et aucun échantillon ne devrait dépasser 235 NPP/100ml

6. DIFFUSION DES RÉSULTATS

Plusieurs activités de communication ont été réalisées au cours du projet. Elles sont présentées au tableau 5.

Tableau 5. Activités de communication réalisées au cours du projet.

<i>Activités prévues</i>	<i>Activités réalisées</i>	<i>Description</i>	<i>Date de réalisation</i>	<i>Nombre de personnes rejointes</i>	<i>Visibilité accordée au CDAQ et à AAC (logo, mention)</i>
Conférence	Conférence	Réseau environnement	29 octobre 2008	40	Mention
Article de vulgarisation	Article de vulgarisation	Revue primeurs	Septembre 2008	Non déterminé	Mention
Conférence	Conférence	Journées horticoles des Laurentides (St-Eustache)	20 janvier 2009	20	Mention
Conférence	Conférence	Journées agricoles et agroalimentaires Montréal-Laval-Lanaudière (Joliette)	28 janvier 2009	50	Mention
Forum	Forum	Forum sur l'irrigation et la salubrité de fruits et légumes (Saint-Hyacinthe)	18 février 2009	60	Mention
Conférence	Conférence	AGA de la FPMQ	13 mars 2009	40	Mention
Article de vulgarisation	Article de vulgarisation	Journal GTA	Pour le 31 mars 2009	Non déterminé	Mention

Références

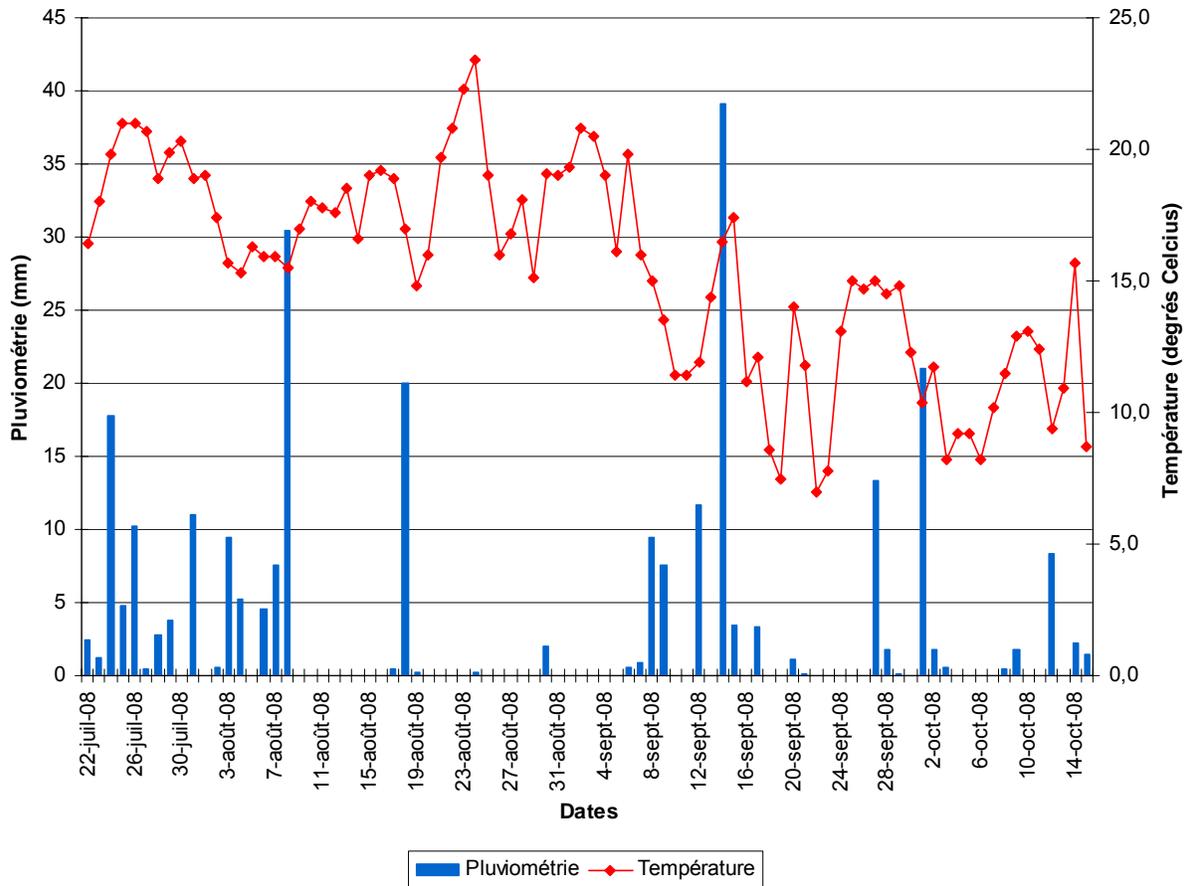
Jamieson, R. 2007. Managing pathogen levels in irrigation water supply reservoirs. Rapport final.

Grabow, G. 2009. Food safety and irrigation – issues and developments in the United States. Conférence donnée dans le cadre du forum sur l'irrigation et la salubrité des fruits et légumes. Saint-Hyacinthe, 18 février 2009.

Schutzman, B. 2008. La qualité de l'eau et la production horticole : l'expérience de l'ARAP. Conférence donnée dans le cadre de la semaine horticole. Saint-Hyacinthe, 12 février 2008.

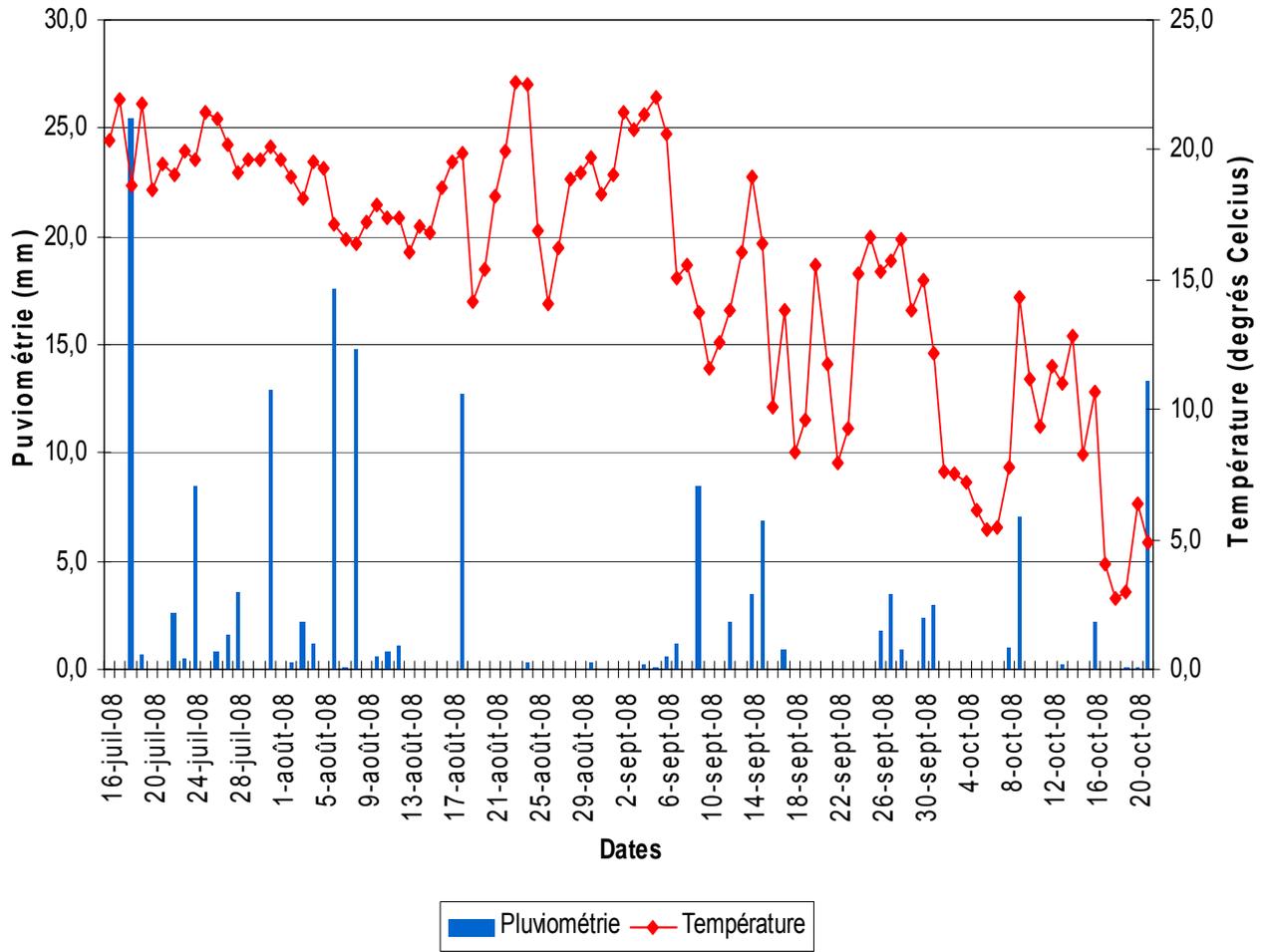
ANNEXE 1

Données météorologiques observées en 2008 à l'île d'Orléans à la station Saint-Laurent (22 juillet au 29 août), Sainte-Famille (30 août au 1^{er} octobre, réseau pommier) et Saint-François (2 au 15 octobre, Agrométéo).



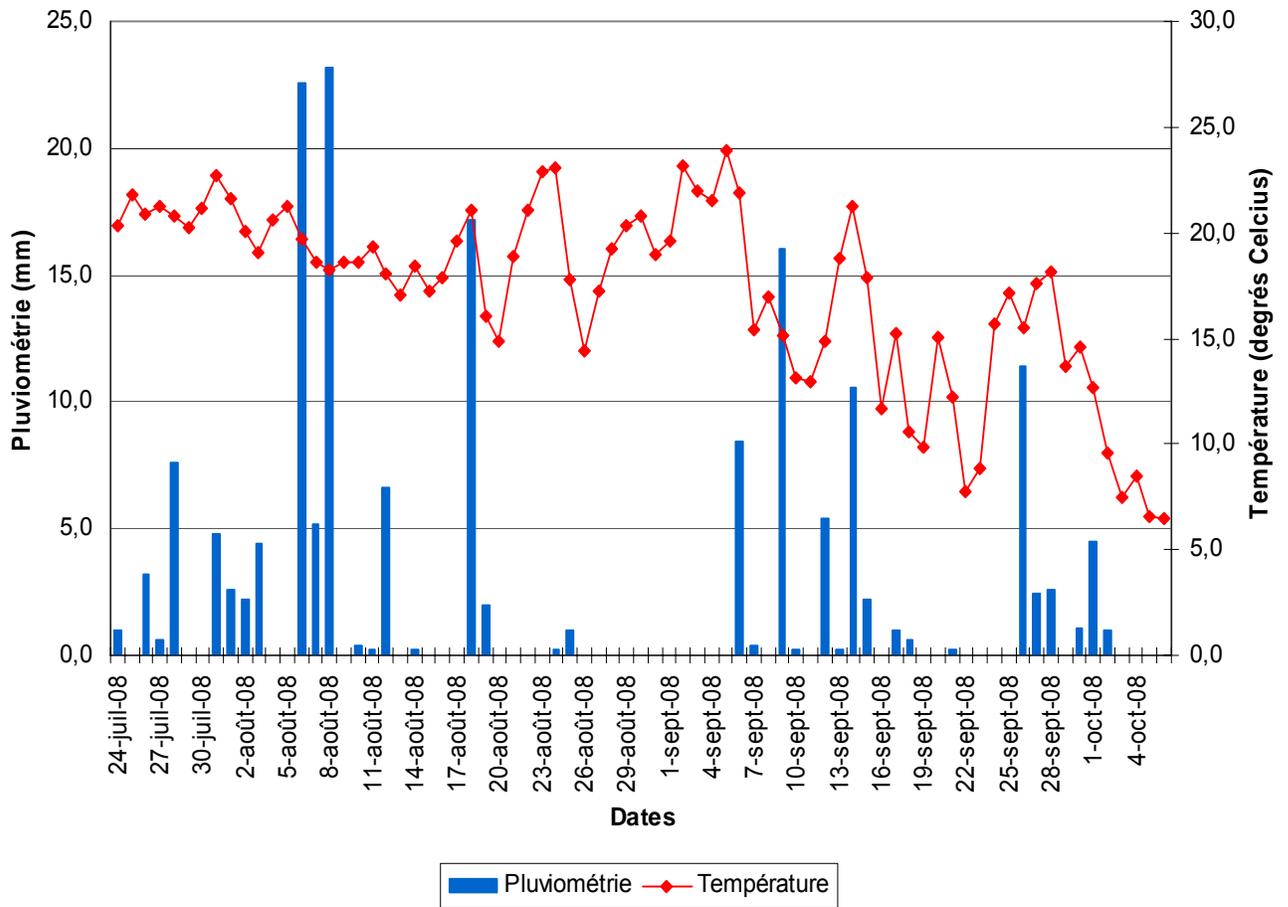
ANNEXE 2

Données météorologiques observées en 2008 à la station de Saint-Joseph-du-Lac du réseau pommier.



ANNEXE 3

Données météorologiques observées en 2008 à la station de Sherrington (24 juillet au 29 septembre) et de Sainte-Clothilde (30 septembre au 6 octobre, Agrométéo).



ANNEXE 4

Fiche technique sur les coûts d'achat d'équipements d'aération pour les étangs.

Aérer un étang d'irrigation, combien ça coûte ?








 Institut de recherche et de développement en agroenvironnement


 Réseau de lutte intégrée Orléans inc.


 CENTRE DE RECHERCHE AGROALIMENTAIRE DE MIRABEL



Matériel	Coûts & (Quantité)			
	Volume d'étang ≤ 2.4M litres		Volume d'étang de 4.8 à 8M litres	
	Énergie solaire 12V	110V	Énergie solaire 12 V	110V
Compresseur 0,5 pi ³ / min	300 \$ (1)	150 \$ (1)		
Compresseur 2.9 pi ³ / min			900 \$ (1)	300 \$ (1)
Diffuseur d'air à membrane (disque simple 12" sur base)	280 \$ (1)	280 \$ (1)	280 \$ (1)	280 \$ (1)
Tuyau lesté auto-calant 5/8"	380 \$ (100')	380 \$ (100')	380 \$ (100')	380 \$ (100')
Panneaux solaires 130 Watt	1 400 \$ (2)		4 200\$ (6)	
Monture pour panneaux solaires	275 \$ (1)		275 \$ (1)	
Poteau en acier inoxydable 2 3/8"	50 \$ (1)		50 \$ (1)	
Batteries 6V à charge profonde 220 AH	500 \$ (4)		750 \$ (6)	
Bacs fermés (batteries & compresseur)	40 \$ (2)		60 \$ (3)	
Panneau de contrôle avec régulateur 30 A	250 \$ (1)			
Panneau de contrôle avec régulateur 50 A			550 \$ (1)	
Boîte électrique en fibre pour panneau de contrôle	175 \$ (1)		175 \$ (1)	
Contre-plaqué 1/2"	15 \$ (4' X 8')		15 \$ (4' X 8')	
Fils et câbles divers	60 \$	60 \$	60 \$	60 \$
Fusible HRC classe II avec boîte d'installation	40 \$ (1)		40 \$ (1)	
TOTAL	3 765 \$	870 \$	7 735 \$	1 020 \$
achat au Québec				
Achat possible en Saskatchewan (ensembles complets)	1 500 \$	700 \$	3 000 \$	1 000 \$

Kellin Solar
 50 rue James C.P. 94, Lumsden (SK) S0G 3C0 Tél: (888) 731 8882 ; Fax: (306) 731 2774 www.kellinsolar.com

POUR PLUS D'INFORMATION: Mylène Généreux 450-778-6522 poste 257 mylene.generoux@irda.qc.ca & Caroline Côté 450-778-6522 poste 246 caroline.cote@irda.qc.ca

Coûts d'électricité & de transport non inclus