

PCAA

Programme canadien d'adaptation agricole

Rapport final

Solutions optimales pour une gestion durable des eaux de lavage de légumes à l'échelle de la ferme : projets pilotes

Projet # 6711

Association des producteurs maraîchers du Québec (APMQ)

Juin 2012 à janvier 2014

Rédigé par
Patrick Brassard, IRDA
Mylène Généreux, IRDA
Caroline Côté, IRDA
Stéphane Godbout, IRDA
Luc Belzile, IRDA

31 janvier 2014

Équipe de réalisation

Répondants et responsables scientifiques

Caroline Côté, agr., Ph.D., IRDA

Stéphane Godbout, ing. P. Eng., Ph.D., agr., IRDA

Chargés de projet

Patrick Brassard, ing. jr., M.Sc., IRDA

Sébastien Brossard, agro-économiste, CQH

Mylène Généreux, M.Sc., IRDA

Frédéric Pelletier, ing., M.Sc., IRDA

Collaborateurs

Luc Belzile, agronome et économiste, M.Sc., IRDA

David Bilodeau, biologiste, IRDA

Élisabeth Fortier, agr., M.Sc., APMQ

Annie Fortin, biologiste, IRDA

Sylvie Karasira, agr., M.Sc., APMQ

Producteurs maraîchers, APMQ

Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) s'est engagé à travailler avec des partenaires de l'industrie. Les opinions exprimées dans le présent document sont celles du demandeur et ne sont pas nécessairement partagées par AAC et le CDAQ.

Table des matières

Équipe de réalisation	2
Liste des figures	4
Liste des tableaux.....	6
1. Description du projet	7
1.1. Objectif général.....	7
1.2. Objectifs spécifiques	7
1.3. Déroulement du projet	8
2. Outil décisionnel.....	9
3. Essais de réduction de la quantité d'eau potable utilisée	10
3.1. Méthodologie.....	10
3.2. Résultats et discussion	12
3.3. Traitement des eaux de lavage	15
3.3.1. Méthodologie.....	15
3.3.2. Résultats et discussion	17
4. Essais de centrifugation	18
5. Projet pilote – Site 1.....	21
5.1. Caractérisation initiale	21
5.2. Système de traitement de l'eau et échantillonnages	24
5.3. Résultats et discussion	26
5.3.1. Analyse physico-chimique.....	26
5.3.2. Analyse de la couleur	27
5.4. Option de traitement.....	29
6. Projet pilote - Site 2	32
6.1. Caractérisation initiale du site	32
6.2. Système de traitement de l'eau et échantillonnages	34
6.3. Résultats et discussion	36
6.4. Option de traitement	39
7. Projet pilote - Site 3	43
7.1. Caractérisation initiale du site	43
7.2. Système de traitement de l'eau et échantillonnages	45
7.3. Résultats et discussion	46
7.4. Option de traitement.....	49
8. Analyse des coûts d'abattement.....	51
8.1. Mise en contexte.....	51
8.2. Méthode et résultats	52
9. Diffusion des résultats	54
10. Conclusions	56
11. Sommaire des accomplissements du projet	57
12. Plan de financement et conciliation des dépenses	58
Références.....	59

Annexe 1 : Calculs de l'efficacité de bassin de traitement par boues activées et de besoins en O₂.

Annexe 2 : Documents de diffusion des résultats.

Liste des figures

Figure 1. Chaîne de lavage expérimentale.	11
Figure 2. Pourcentage de particules de sol résiduelles sur les navets lavés en fonction du ratio d'eau potable: effet du pré-trempage.	14
Figure 3. Pourcentage de particules de sol résiduelles sur les navets lavés en fonction du ratio d'eau potable: effet du resalissage.	14
Figure 4. Chaîne de traitement des eaux de lavage.	16
Figure 5. Système d'aération avec débitmètres utilisé pour tous les essais.	16
Figure 6. Échantillons d'eau à l'entrée de la chaîne (a), après la décantation (b), après l'aération (c) et à la sortie de la chaîne (d).	17
Figure 7. Centrifugeuse utilisée pour les essais dans l'eau de lavage de carottes cultivées en sol organique.	19
Figure 8. Laveuse de type baril rotatif en opération au site 1.	22
Figure 9. Trémie d'alimentation et dessableur en opération au site 1.	22
Figure 10. Unités de récupération des matières solides sous la trémie d'alimentation, le dessableur et le convoyeur au site 1.	23
Figure 11. Lagune en opération au site 1.	23
Figure 12. Unités de sédimentation et système d'aération installé au site 1.	24
Figure 13. Dispositif de pompage installé à l'entrée de la lagune au site 1.	25
Figure 14. Couleur dans les cinq unités de sédimentation après 9 h de pompage d'eau de lavage de betterave rouge au site 1.	27
Figure 15. Couleur dans les cinq unités de sédimentation après 2 jours de lavage de betterave et 3 jours de lavage de carotte au site 1.	28
Figure 16. Couleur dans les cinq unités de sédimentation après 1 jour de lavage de betterave, de carotte et de panais au site 1.	29
Figure 17. Schéma des installations de lavage actuelles au site 1 ainsi que l'option de traitement.	30
Figure 18. Bassin de pré-trempage en opération au site 2.	32
Figure 19. Installations de lavage en opération au site 2.	33
Figure 20. Premier bassin de sédimentation au site 2.	33
Figure 21. Deuxième bassin de sédimentation au site 2.	34
Figure 22. Bassins de sédimentation installés en série au site 2.	34
Figure 23. Bac troué contenant la pompe submersible installée au site 2.	35

Figure 24. Système d'aération installé au site 2.....	35
Figure 25. Échantillons prélevés dans le bac non aéré et le bac aéré trois jours après l'entrée de nouvelle eau dans le système.....	37
Figure 26. Schéma des installations de lavage actuelles au site 2 ainsi que l'option de traitement.	40
Figure 27. Chaîne de lavage au site 3, incluant la trémie d'alimentation (a), le bassin dépierreur (b), et la polisseuse (c).....	44
Figure 28. Système de dessablage au site 3, incluant le convoyeur (a), le dessableur (b) et le bassin dépierreur (c).	44
Figure 29. Réservoir surmonté d'une plaque perforée sous la polisseuse au site 3.	45
Figure 30. Chaîne de traitement des eaux de lavage au site 3.	46
Figure 31. Schéma des installations de lavage actuelles au site 3 ainsi que l'option de traitement.	50
Figure 32. Bénéfices et coûts d'abattement marginaux de la pollution.....	51

Liste des tableaux

Tableau 1. Variables mesurées et méthodes d'analyse.	8
Tableau 2. Résultats des essais de réduction d'utilisation d'eau potable.....	13
Tableau 3. Résultats des essais de traitement des eaux de lavage.....	18
Tableau 4. Contenu physico-chimique de l'eau de lavage de carottes cultivées en sol organique à l'entrée et à la sortie de la centrifugeuse et taux d'abattement.....	20
Tableau 5. Contenu physico-chimique du sol prélevé sous la chaîne de lavage au site 1.	21
Tableau 6. Calendrier des opérations réalisées au site 1	25
Tableau 7. Résultats des essais de traitement des eaux de lavage au site 1.	26
Tableau 8. Taux d'abattement lors des essais de traitement de l'eau de lavage au site 1.....	26
Tableau 9. Efficacité estimée du système de la solution de traitement proposée au site 1.....	31
Tableau 10. Essai d'aération effectué dans les bassins lors de l'essai 1 au site 2.....	36
Tableau 11. Contenu des bassins lors de l'essai 2 effectué au site 2.....	37
Tableau 12. Contenu des bassins lors de l'essai 3 effectué au site 2.....	38
Tableau 13. Taux d'abattement (%) des différents paramètres lors de l'essai 1 au site 2.....	38
Tableau 14. Taux d'abattement (%) des différents paramètres selon le bac au site 2.	39
Tableau 15. Efficacité estimée du système de la solution de traitement proposée au site 2.	41
Tableau 16. Efficacité estimée du système de la solution de traitement proposée au site 2 (avec dessableur).....	42
Tableau 17. Contenu physico-chimique des échantillons de sol prélevés sous le dessableur au site 3. ...	43
Tableau 18. Résultats d'analyses de l'essai 1 au site 3.....	47
Tableau 19. Taux d'abattement dans chaque bac lors de l'essai 1 au site 3.....	47
Tableau 20. Résultats d'analyses de l'essai de sédimentation et d'aération au site 3.	48
Tableau 21. Taux d'abattement de chaque bac lors du 2 ^e essai au site 3.....	48
Tableau 22. Efficacité estimée du système de la solution de traitement proposée au site 3.....	51
Tableau 23. Abattement annuel du phosphore par site et par étape de conditionnement des légumes. 53	
Tableau 24. Coût d'acquisition optimal d'un dessableur sur la base de l'efficacité d'abattement.	54

1. Description du projet

La qualité des cours d'eau en milieu agricole reste un sujet prioritaire pour les instances gouvernementales provinciales, les amenant ainsi à être de plus en plus vigilantes quant aux différents rejets agricoles dans les cours d'eau. Conséquemment, en 2008, près d'une vingtaine de producteurs québécois ont reçu des avis de non conformité de la part du Ministère du développement durable, de l'environnement, de la faune et des parcs (MDDEFP) en raison du rejet dans l'environnement d'eau issue du lavage de légumes sans certificat d'autorisation.

Selon la réglementation actuelle, les producteurs doivent obtenir un certificat d'autorisation pour poursuivre leurs opérations de lavage et de conditionnement des légumes sans quoi ils devront cesser leurs activités de lavage. Cette mesure législative du MDDEFP entraîne des conséquences économiques majeures pour les producteurs en infraction et pour l'ensemble des producteurs maraîchers qui craignent de se retrouver en situation de non-conformité et de se voir obligés de modifier leurs pratiques.

Depuis 2009, une équipe regroupant la Fédération des producteurs maraîchers du Québec (FPMQ), l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), le Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ) et le MDDEFP travaille sur le développement de pratiques durables de gestion des eaux issues du lavage des légumes racines. Suite à une campagne de caractérisation, une revue de littérature, une consultation d'experts, des essais de traitement de l'eau à petite échelle, ainsi que des bilans massiques dans quatre entreprises, ce projet a permis d'intégrer cinq principes directeurs, soit :

1. Optimiser l'enlèvement de la terre à sec, avant le passage dans la laveuse à l'aide de dessableurs;
2. Optimiser le dimensionnement et l'entretien des bassins de sédimentation;
3. Proposer des alternatives aux bassins de sédimentation en terre noire si requis;
4. Préciser l'impact de l'aération sur la dégradation du pigment issu du lavage de la betterave;
5. Favoriser un usage judicieux de l'eau en optimisant les volumes d'eau utilisés.

L'intégration de cette approche pourra mener au développement d'un outil d'aide à la décision, de façon à déterminer les interventions qui pourront être choisies en fonction des contraintes et particularités de chaque entreprise.

1.1. Objectif général

Le projet visait à évaluer des interventions techniquement et économiquement viables pour le producteur agricole permettant d'améliorer la qualité de l'eau issue du lavage des légumes racines et tenant compte des contraintes réglementaires actuelles.

1.2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques étaient de :

1. Documenter l'impact de différentes interventions sur la qualité de l'eau issue du lavage des légumes dans trois entreprises agricoles;

2. Développer un outil de type arbre de décision permettant de guider le producteur agricole dans le choix des interventions et tenant compte des contraintes et particularités de l'entreprise;
3. Valider l'outil d'aide à la décision en projets pilotes;
4. Réaliser une analyse des coûts d'abattement;
5. Diffuser les résultats du projet auprès des producteurs maraîchers et intervenants du secteur.

1.3. Déroulement du projet

Afin d'évaluer plusieurs approches de gestion de l'eau de lavage des légumes racines, différentes expérimentations ont été réalisées, soit :

1. une chaîne de lavage mise en place à la ferme expérimentale de l'IRDA à Deschambault;
2. des essais de centrifugation d'eau de lavage de carottes cultivées en sol organique à la ferme expérimentale de l'IRDA à St-Lambert-de-Lauzon;
3. Des projets pilotes dans trois entreprises agricoles dont les produits et types de sol étaient variés;

Les paramètres suivants, ainsi que les méthodes d'analyse approuvées par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ) sont présentés au tableau 1. Les variables mesurées ont été choisies selon les normes environnementales en vigueur.

Tableau 1. Variables mesurées et méthodes d'analyse.

Variables	Méthodes d'analyse
Matières en suspension (MES)	MA. 104-SS 2.0
Solides totaux en suspension (STS)	MA. 115-SS 1.2
Matières volatiles en suspension (MVES)	MA. 115-SS 1.2
Demande biochimique en oxygène (DBO ₅)	MA. 315-DBO 1.1
Phosphore total (P _{total})	MA. 315-P 2.0
pH	MA. 100-pH 1.1
Azote total (N _{total})	MA. 300-NTPT 2.0
Azote ammoniacal (N-NH ₄)	MA. 300-N 2.0
Nitrates et nitrites (N-NO ₃ + NO ₂)	MA. 300-NO3 2.0
Couleur vraie	MA. 103-col 2.0
Couleur	Mesure de l'absorbance (balayage de longueurs d'ondes)

Afin de simplifier l'interprétation des résultats, les données correspondant aux normes de rejet les moins contraignantes du MDDEFP (indépendamment des objectifs environnementaux de rejet), ont été mises en valeur. Ainsi, les critères visés étaient de 55 mg/ L en DBO₅, 70 mg/ L en MES et 2,6 mg/ L en P_{total}.

2. Outil décisionnel

Les travaux antérieurs réalisés par l'équipe ont permis de bâtir une réflexion qui permettrait de régir les interventions éventuelles à apporter aux installations de lavage. Les bases de cette réflexion peuvent être résumées comme suit.

A. Faire le bilan de l'entreprise

- a. Mesurer les volumes et débit d'eau potable utilisés
- b. Mesurer les concentrations de MES, DBO₅ et P_{total} dans les effluents de la laveuse

Le bilan permet de quantifier l'abattement et les efforts nécessaires à fournir pour atteindre les normes de rejet dans l'environnement.

B. Installer un dessableur

Les sections précédant la laveuse permettaient un abattement des particules de sol s'élevant à 88 % en sol minéral (Généreux et al., 2013).

C. Réduire les volumes d'eau potable

Afin de réduire les dimensions des étapes subséquentes au traitement des eaux de lavage, il est possible et avantageux de réduire les volumes d'eau utilisés pour le lavage des légumes et ce, sans affecter la qualité de ceux-ci. La section 3 présente ces données.

D. Refaire un bilan incluant le dessablage pour connaître les nouvelles caractéristiques des eaux de lavage

E. Bassins de sédimentation hors sol

L'installation de ces bassins permettrait un enlèvement important et une gestion plus facile des solides avant leur entrée dans les lagunes, réduisant ainsi les dimensions de celles-ci et par le fait même les coûts d'entretien qui y sont associés. Les trois projets pilotes présentent des exemples de traitement incluant ces bassins.

F. Centrifugation

Les entreprises dont l'espace pour installer des bassins et/ou des lagunes serait réduit, cette option pourrait être envisagée, quoique dispendieuse. La section 4 présente les essais réalisés pour de l'eau de lavage de carottes cultivées en sol organique.

G. Lagunes

- a. Avec aération pour les entreprises lavant de la betterave rouge ou cultivant en sol organique. Les sections 5.4 et 6.4 présentent des exemples de traitement pour ces deux types d'entreprises, respectivement.
- b. Sans aération pour les entreprises cultivant des légumes racines en sol minéral (sans betterave rouge). Se référer à la section 7.4 pour un exemple de traitement.

3. Essais de réduction de la quantité d'eau potable utilisée

Lors d'une étude de caractérisation des eaux de lavage des légumes racines réalisée en 2009 par la FPMQ et l'IRDA (Hamel et al., 2010), la quantité d'eau utilisée chez 19 producteurs a été évaluée. Les résultats ont démontré qu'une station de lavage utilisait en moyenne de 30 à 40 m³ d'eau par jour et au moins 3,6 litres d'eau potable pour 1 kg de légumes (Pelletier et al., 2013). Ainsi, l'une des options afin de réduire les coûts de traitement de l'eau de lavage de légumes pourrait être de diminuer la quantité d'eau potable utilisée, réduisant ainsi la quantité d'eau à traiter à la sortie de la station de lavage. Une étude de Moss et al. (2012) a démontré qu'il peut être possible de laver des légumes à l'échelle expérimentale avec un ratio «eau potable / masse de légumes sales» s'approchant de 1. Ainsi, l'objectif des essais réalisés et décrits ci-dessous était d'étudier la possibilité de réduire la quantité d'eau potable utilisée en obtenant des légumes aussi propres.

3.1. Méthodologie

Une chaîne de lavage de légumes ainsi que de traitement des eaux ont été installées au Laboratoire sur les énergies en agriculture durable (LEAD) situé à Deschambault. La chaîne de lavage comprenait une trémie d'alimentation, un dessableur, un bassin de pré-trempage et une laveuse à baril rotatif d'une longueur de 2,75 m (figure 1). Lors d'un essai, des bacs de légumes étaient d'abord vidés dans la trémie d'alimentation, consistant en un convoyeur oblique qui acheminait les légumes vers le dessableur. Les légumes tombaient ensuite dans le bassin de pré-trempage (un bac de 1 m x 2,26 m x 0,25 m) et étaient poussés manuellement vers l'entrée de la laveuse, puis ressortaient à l'autre bout dans un bac de 1 m³.

La distribution de l'eau dans la laveuse à baril rotatif se faisait à l'aide d'un tuyau perforé séparé en deux au centre de la laveuse. De l'eau potable était dirigée du côté de la sortie de la laveuse, et de l'eau de lavage était dirigée du côté de l'entrée de la laveuse (recirculation). L'eau de lavage était pompée à partir d'un bac sous la laveuse qui recueillait l'eau la plus propre du côté de la sortie. Le surplus de ce bac se déversait dans le second bac (situé sous la première partie de la laveuse). Cette eau était pompée vers la chaîne de traitement expérimentale décrite à la section suivante. Des compteurs d'eau étaient installés afin de déterminer les quantités d'eau potable et d'eau de recirculation utilisées. Des valves étaient utilisées pour contrôler les débits d'eau.



Figure 1. Chaîne de lavage expérimentale.

Des essais de lavage ont été réalisés avec des navets et des carottes afin d'évaluer la possibilité de réduire la quantité d'eau utilisée. L'objectif principal était d'évaluer la quantité d'eau nécessaire pour laver les légumes tout en faisant varier les paramètres de lavage tels que le débit d'eau, la durée de lavage, la vitesse de rotation de la laveuse et l'utilisation ou non du bassin de pré-trempage. Afin d'alléger le texte, le ratio « eau potable / masse de légumes sales » sera nommé ratio d'eau potable, et le ratio « terre recueillie / masse de légumes lavés secs » sera nommé ratio de terre recueillie.

Chaque essai consistait à laver environ 400 kg de légumes en une durée de 20 à 30 minutes. Les essais ont été réalisés avec des ratios d'eau potable variant entre 0,67 et 2,98. Ce ratio représente la quantité d'eau potable utilisée par rapport à la quantité de légumes sales à l'entrée de la chaîne de lavage. Par exemple, un ratio de 2 signifie que 2 litres d'eau potable étaient utilisés pour laver 1 kg de légumes sales. Le débit d'eau potable utilisé a varié entre 10 et 60 L/ min (tableau 2). Il n'était pas toujours possible de fournir un débit de recirculation égal au débit d'eau potable, surtout pour les essais utilisant des débits de plus de 40 L/ min.

Quatorze essais ont été réalisés du 5 au 15 août 2013 avec des navets récoltés dans un sol loameux (tableau 2). Seulement deux de ces essais ont été réalisés avec des navets sales d'origine alors que pour les autres essais, les navets ont été resalis avec les solides recueillis sous le dessableur. Deux essais de lavage de carottes ayant été récoltées en sol sableux ont été réalisés le 4 septembre 2013 avec des débits d'eau semblables. Un des essais incluait une étape de pré-trempage des carottes, ce qui a permis d'en évaluer l'efficacité en sol sableux. Les carottes n'ont pas été resalées pour réaliser d'autres essais, car la quantité de sol d'origine obtenue par le dessablage n'était pas suffisante.

Après chaque essai, un échantillon de légumes lavés a été conservé en chambre froide. Lorsque les essais étaient terminés, la propreté des légumes a été évaluée. Les légumes ont d'abord été séchés à l'étuve à 60°C pendant une heure. Une évaluation qualitative de la propreté a été faite en attribuant une note sur 10 selon la propreté des échantillons de légumes, la note de 10 étant attribuée pour des légumes complètement propres. Afin d'évaluer la propreté sur une base quantitative, les légumes ont été brossés pour recueillir toute la terre restante, qui a ensuite été pesée. Le pourcentage de terre recueillie après que les légumes lavés aient été séchés à l'étuve et brossés, par rapport à la masse de légumes lavés et séchés, a été calculé.

3.2. Résultats et discussion

Les résultats des essais de lavage sont présentés au tableau 2. Les figures 2 et 3 illustrent ces résultats en fonction du ratio d'eau potable.

Quatre des cinq essais de lavage de navets ayant donné les moins bons résultats ont été réalisés avec des ratios d'eau potable de moins de 1,5. Les ratios de terre recueillie variaient entre 0,035 % et 0,087 %. De plus, des particules de sol ont été remarquées sur ces navets. Huit des neuf essais réalisés avec des ratios d'eau potable entre 1,6 et 3 étaient plus propres, avec des ratios de terre recueillie variant entre 0,012 % et 0,025 %. Ainsi, le seuil de propreté acceptable des navets a été fixé au ratio de terre recueillie de 0,025 %. Lorsque ce ratio est plus élevé, les navets n'étaient pas complètement propres. Ainsi, pour les ratios d'eau potable variant entre 1,5 et 3, il ne semble pas y avoir de différence en ce qui concerne la propreté des navets dans les conditions de l'étude.

Certains essais ont été réalisés avec une étape de pré-trempage et d'autres non. Comme il a été impossible de maintenir un débit d'eau constant entre les essais, il est difficile d'évaluer l'effet du pré-trempage selon les résultats obtenus. Cependant, il était facile de constater que beaucoup de particules de sol étaient enlevées des navets grâce au pré-trempage. De plus, les deux essais (essais 2.2 et 7) qui ont résulté aux navets les plus propres ont été réalisés avec l'étape du pré-trempage, même si les ratios d'eau potable étaient relativement faibles dans les deux cas, soit 1,6 et 1,95, respectivement (figure 2).

Les navets de l'essai 8, qui a été réalisé avec les navets sales d'origine, sont demeurés les moins propres après le lavage, avec un ratio d'eau potable de 1,5 (figure 3). Cependant, les navets de l'essai 2, qui a été aussi réalisé avec les navets sales d'origine et un ratio d'eau potable de 2,2, sont aussi propres que les navets resalis et lavés avec un ratio d'eau potable semblable. Ainsi, il faut être prudent avec l'interprétation des résultats obtenus avec les navets resalis. De plus, il peut y avoir des différences entre les navets resalis entre chaque essai. Les essais réalisés avec les navets permettent tout de même d'affirmer qu'il est possible d'obtenir des navets propres avec un ratio d'eau potable variant entre 1,5 et 3.

Les résultats obtenus ont démontré que les carottes ayant subi un pré-trempage étaient généralement plus propres pour un même ratio d'eau utilisée. Aucune différence qualitative n'était visible entre les deux échantillons de carottes lavées. Leur niveau de propreté se rapprochait des carottes vendues au marché. Ainsi, comme pour les essais avec les navets, ces essais ont permis de démontrer que les carottes en sol sableux peuvent être lavées avec un débit d'eau potable réduit, particulièrement avec l'étape du pré-trempage. Des essais supplémentaires réalisés avec des carottes récoltées dans d'autres types de sol permettraient de confirmer cet énoncé. De plus, des essais avec d'autres légumes racines (panais, betterave) seraient aussi intéressants pour confirmer que la quantité d'eau potable utilisée peut être diminuée lors du lavage de légumes racines.

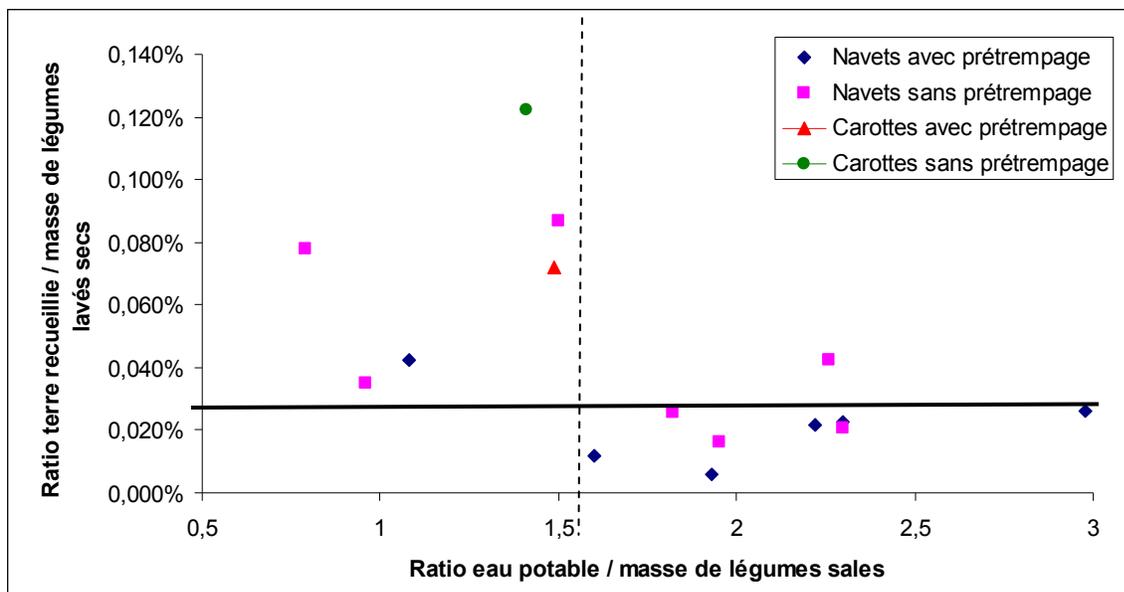
Tableau 2. Résultats des essais de réduction d'utilisation d'eau potable.

Essai #	Date (2013)	Légume	Pré-trempage	Débit d'eau potable (L/ min)	Débit d'eau Recirculation (L/ min)	Ratio d'eau potable ¹	Ratio de terre recueillie ²	Propreté (/10) ³	Remarques
5c	4 sept.	Carottes	Oui	36,1	43,9	1,49	0,07 %	7,5	Propres
11c	4 sept.	Carottes	Non	33,2	43,7	1,41	0,12 %	8	Propres
3	6 août	Navets	Oui	9,3	9,7	0,67	---	---	---
	14	Navets	Oui						
5	août			38,5	36	1,93	0,01 %	9	Propres
	15	Navets	Oui						
2.2	août			28,3	28,7	1,6	0,01 %	9	Propres
	13	Navets	Non						
7	août			40	27	1,95	0,02 %	9	Propres
	15	Navets	Non						
10	août			55,9	36,5	2,3	0,02 %	8	Propres
2	6 août	Navets	Oui	30,6	17,8	2,22	0,02 %	8	1er lavage
	14	Navets	Oui						
4	août			52,8	37,2	2,3	0,02 %	8	Propres
	15	Navets	Non						
8.2	août			26,3	28,2	1,82	0,03 %	9	Propres
	14	Navets	Oui						
1	août			40	26,5	2,98	0,03 %	8	Propres
12	7 août	Navets	Non	19	25,2	0,96	0,04 %	7,5	Terre visible
6	6 août	Navets	Oui	22	19,5	1,08	0,04 %	7,5	Terre visible
	13	Navets	Non						
11	août			41,8	23,2	2,26	0,04 %	8	Propres
9	7 août	Navets	Non	10,7	9,3	0,79	0,08 %	5	Terre visible
8	5 août	Navets	Non	22	10,7	1,5	0,09 %	7	1er lavage

¹ Le ratio d'eau potable représente la quantité d'eau potable utilisée par rapport à la quantité de légumes sales à l'entrée de la chaîne de lavage

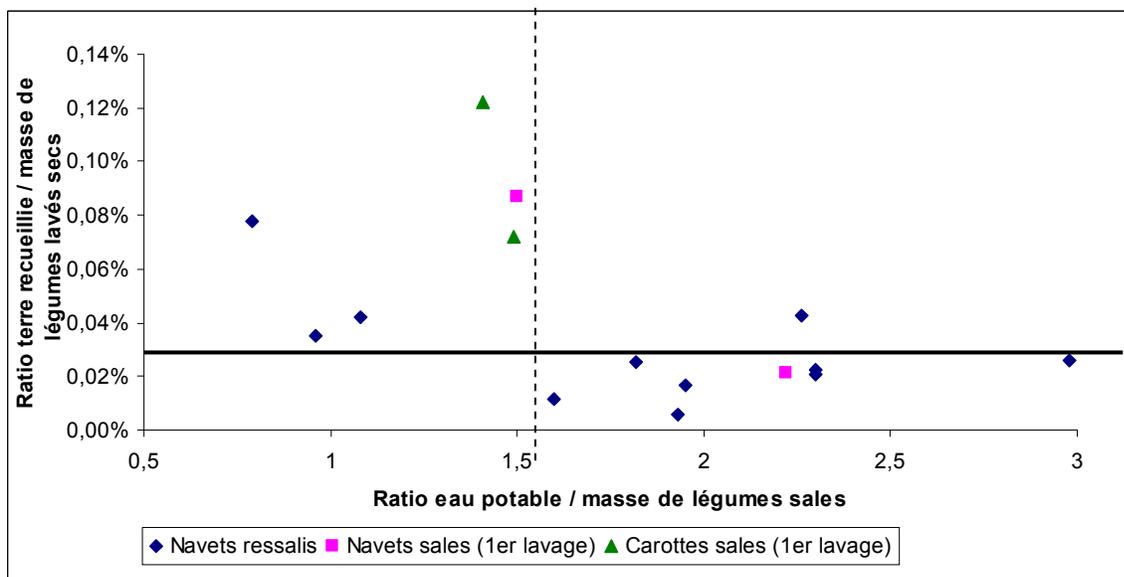
² Le ratio de terre recueillie représente la masse de terre recueillie après que les légumes lavés et séchés à l'étuve aient été brossés, par rapport à la masse de légumes lavés et séchés.

³ La propreté est une analyse visuelle qualitative, une note de 10 représente un légume complètement propre.



Notes. La ligne horizontale représente le niveau de propreté acceptable pour les navets et la ligne pointillée verticale représente le ratio à partir duquel les légumes sont considérés comme propres. Le ratio « terre recueillie / masse de légumes lavés secs » représente la masse de terre recueillie après que les légumes lavés et séchés à l'étuve aient été brossés par rapport à la masse de légumes lavés et séchés. Ce ratio est le plus faible pour les légumes les plus propres.

Figure 2. Pourcentage de particules de sol résiduelles sur les navets lavés en fonction du ratio d'eau potable: effet du pré-trempage.



Notes. La ligne horizontale représente le niveau de propreté acceptable pour les navets et la ligne pointillée verticale représente le ratio à partir duquel les légumes sont considérés comme propres. Le ratio « terre recueillie / masse de légumes lavés secs » représente la masse de terre recueillie après que les légumes lavés et séchés à l'étuve aient été brossés par rapport à la masse de légumes lavés et séchés. Ce ratio est le plus faible pour les légumes les plus propres.

Figure 3. Pourcentage de particules de sol résiduelles sur les navets lavés en fonction du ratio d'eau potable: effet du resalissage.

3.3. Traitement des eaux de lavage

3.3.1. Méthodologie

Les principes de sédimentation et de traitement aérobie par boues activées ont été sélectionnés pour faire la conception de la chaîne de traitement. Cette dernière est composée de cinq bassins d'un mètre cube installés en série, de façon à ce que le trop-plein de chaque unité se déverse dans l'unité suivante (figure 4). Afin de reproduire le principe de traitement par boues activées (Moletta, 2006), les deux premiers bassins sont utilisés pour la décantation, le 3^e bassin pour l'aération, et les deux derniers bassins pour la clarification. Le système d'aération installé dans le troisième bassin permet de favoriser l'action bactérienne. Ce système comporte un compresseur poussant de l'air dans des débitmètres afin que les débits d'air soient mesurés et modifiés au besoin (figure 5). À partir des débitmètres, des tubes avec l'extrémité pourvue d'une pierre poreuse servant à diffuser l'air étaient déposés au fond du bassin aéré. À partir des équations fournies par Moletta (2006), il a été possible de calculer les besoins en oxygène pour le bassin d'aération. Un débit d'air de 9 L/ min a été fourni au troisième bac, correspondant à un taux d'aération de $0,009 L_{\text{air}} / L_{\text{eau}}\text{-min}$. Un exemple de calcul est présenté à l'annexe 1.

La décision de doubler les bassins de décantation et de clarification est directement reliée à la question de l'espace. Selon Guillou (2013), l'idéal pour un bassin de décantation est d'être le plus long possible. Pour compenser sur la longueur des bassins, Epuvaleur (2004) suggère de compartimenter la chaîne de traitement. La réalisation d'au moins deux bassins en série est privilégiée pour les petites stations. L'un des bassins ou les deux peuvent être séparés au moyen d'un mur rideau de façon à obtenir trois ou quatre cellules, permettant ainsi d'augmenter le rendement sans devoir augmenter le temps de rétention.

Lors des essais expérimentaux réalisés à Deschambault, toute l'eau de lavage issus des essais a été pompée à un débit constant d'environ 18 L/ min vers la chaîne de traitement des eaux. Ainsi, le temps de séjour de l'eau dans la chaîne de traitement était d'environ 4,6 heures.

Des échantillons d'eau de la chaîne de lavage expérimentale ont été recueillis au cours de trois essais de lavage de navets (essais 4, 5 et 2.2). Les essais 4 et 5 ont été réalisés le 14 août après l'essai 1, et l'essai 2.2 a été réalisé le 15 août après les essais 8 et 10. Les échantillons ont été pris à l'entrée de la chaîne de traitement, à la sortie du 2^e bac de décantation, à la sortie du bassin d'aération, et à la sortie du 2^e bassin de clarification. L'eau utilisée pour la recirculation dans la laveuse a aussi été échantillonnée pour ces essais. Enfin, l'eau du bassin de pré-trempage à la fin des essais du 14 août a été échantillonnée.



Figure 4. Chaîne de traitement des eaux de lavage.



Figure 5. Système d'aération avec débitmètres utilisé pour tous les essais.

3.3.2. Résultats et discussion

Les résultats des analyses (tableau 3) ont démontré que l'eau de lavage à l'entrée de la chaîne de traitement respectait les critères du MDDEFP concernant la DBO_5 et le P_{total} . Comme la DBO_5 de l'effluent était relativement faible (9 à 10 mg/ L), la chaîne de traitement a eu peu d'impact sur ce paramètre. Ensuite, le système de traitement a tout de même permis de réduire les concentrations de P_{total} de près de 50 % dans tous les cas et ce, même si la concentration respectait les critères choisis à l'entrée de la chaîne. Enfin, l'impact le plus important de la chaîne de traitement se situait au niveau des MES, permettant un abattement de 82 à 88 %. La cible établie (70 mg/ L) a été atteinte dans tous les cas à la sortie du système. Un exemple d'échantillons pris lors de l'essai 4 démontre l'efficacité du système à abattre les MES, les échantillons étant de plus en plus limpides d'un bac à l'autre (figure 6).

Le sol récolté sous le dessableur a été analysé en laboratoire. Il s'agissait d'un loam, avec des teneurs en matière organique, sable, limon et argile de 4,4, 46, 35 et 19 % respectivement. Ainsi, plus de 80 % des particules (sable et limon) devraient sédimenter en moins de cinq heures, ce qui correspond au temps de séjour approximatif de la chaîne de traitement. Les résultats obtenus (abattement de 82 à 88 % des MES) concordent bien avec la théorie. Il est donc difficile de justifier la pertinence de l'aération pour ces essais, car la sédimentation a été suffisante pour traiter l'eau de lavage avec une bonne efficacité.

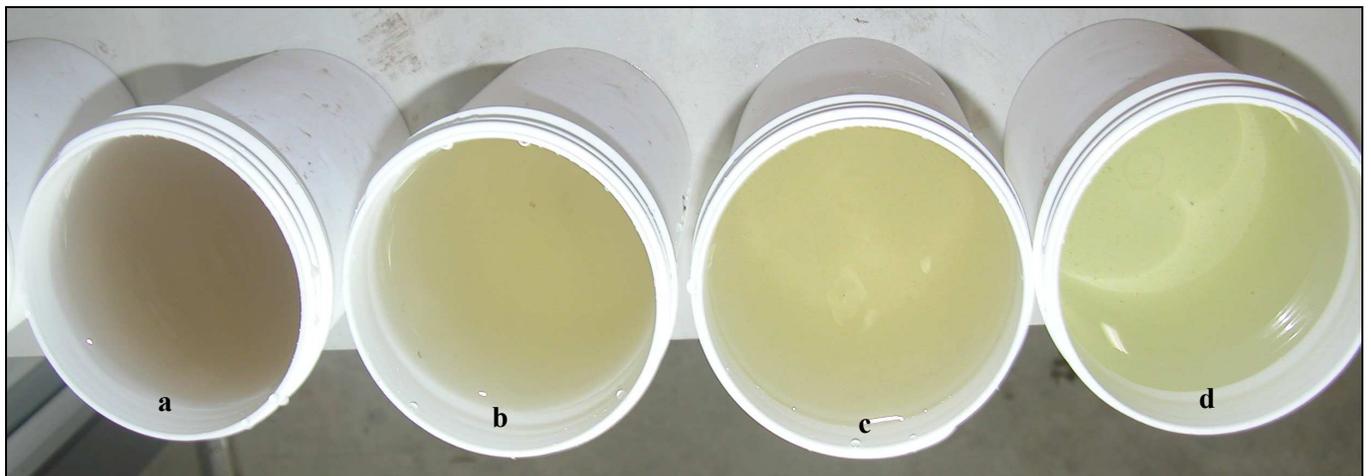


Figure 6. Échantillons d'eau à l'entrée de la chaîne (a), après la décantation (b), après l'aération (c) et à la sortie de la chaîne (d).

Tableau 3. Résultats des essais de traitement des eaux de lavage.

Date (2013)	Paramètres		Effluent	Après décantation	Après aération	Après clarification	Recirculation	Pré-trempage
Essai 4 (14 août)	pH		7,07	7,16	7,46	7,3	7,15	---
	MES	mg/ L	134	40	64	15	130	---
	DBO ₅	mg/ L	10	9	9	9	20	---
	P _{total}	mg/ L	0,815	0,629	0,655	0,469	0,92	---
	N _{total}	mg/ L	1,83	1,89	1,94	1,9	1,54	---
	N-NH ₄	mg/ L	1,24	1,54	1,38	1,3	0,683	---
	N-NO ₃ +NO ₂	mg/ L	0,239	0,009	0,167	0,142	0,329	---
Essai 5 (14 août)	pH		7,31	7,5	7,51	7,53	7,25	6,85
	MES	mg/ L	216	76	54	24	110	2723
	DBO ₅	mg/ L	8	10	8	9	9	92
	P _{total}	mg/ L	0,862	0,592	0,58	0,454	0,5	6,079
	N _{total}	mg/ L	2,08	1,97	1,89	1,81	1,9	1,74
	N-NH ₄	mg/ L	0,997	1,47	1,36	1,12	0,517	0,246
	N-NO ₃ +NO ₂	mg/ L	0,926	0,229	0,204	0,195	1,05	0,009
Essai 2.2 (15 août)	pH		7,44	7,55	7,36	7,62	7,41	---
	MES	mg/ L	180	125	95	32	97	---
	DBO ₅	mg/ L	10	9	9	4	9	---
	P _{total}	mg/ L	0,783	0,809	0,688	0,4	0,474	---
	N _{total}	mg/ L	1,93	2	1,89	1,58	1,91	---
	N-NH ₄	mg/ L	0,916	1,4	1,18	0,787	0,471	---
	N-NO ₃ +NO ₂	mg/ L	0,709	0,356	0,371	0,263	1,09	---

Note. Les cellules en gris représentent des données conformes aux normes de rejet du MDDEFP visées.

4. Essais de centrifugation

Le lavage de légumes racines cultivés en sol organique crée des rejets dont le contenu en DBO₅ est particulièrement riche en raison de la haute teneur en matière organique naturellement présente dans ce type de sol. La matière organique est composée de substances non humifiées, d'acides fulviques et humiques, ainsi que d'humine. Le sol organique mis en solution aqueuse se comporte de façon différente des sols minéraux et une partie de son contenu ne sédimente pas comme l'argile, le limon ou le sable. L'utilisation unique de bassins de sédimentation ne pourrait donc pas suffire à abattre significativement les paramètres physico-chimiques d'intérêt dans ce projet.

La revue de littérature effectuée dans le cadre des travaux antérieurs de l'équipe a révélé que des séparateurs mécaniques ayant recours à la force centrifuge pouvaient être utilisés dans le traitement des eaux de lavage de légumes (Côté et al., 2011). Par contre, la littérature révélait que ces équipements étaient efficaces lorsque les effluents contenaient un taux de matière sèche supérieur à 5 %. Bien que l'eau de lavage de carottes cultivées en sol organique mesurée dans le cadre des projets antérieurs ait présenté un taux de matières sèches inférieur à cette valeur limite, il semblait intéressant d'étudier le phénomène. Pour ce faire, une centrifugeuse en opération à la ferme expérimentale de l'IRDA à St-Lambert-de-Lauzon (figure 7) a été mise à profit pour étudier les taux d'abattement de plusieurs

paramètres dans de l'eau de lavage de carottes prélevée dans une entreprise en Montérégie-Ouest. Trois essais basés sur les travaux de Martin et al. (2006) ont été réalisés à 4 300 tours par minute et les teneurs en MES, phosphore et azote totaux, azote ammoniacal, nitrates et nitrites, de même que de DBO₅ ont été mesurées à l'entrée et à la sortie de la centrifugeuse de façon à calculer des taux d'abattement. Ces résultats sont présentés au tableau 4.

Les résultats ont indiqué que la centrifugation peut s'avérer une avenue intéressante, particulièrement quant à l'abattement des MES. Par contre, bien que présentant des taux d'abattement notoires, la centrifugation n'a pas permis de rendre l'effluent final conforme aux critères du MDDEFP quant aux MES et à la DBO₅. Il est probable que cet équipement, utilisé dans des entreprises lavant des produits issus de sols minéraux, présente une efficacité plus importante. Le coût associé à cette technologie est toutefois élevé, la rendant peu accessible aux entreprises lavant des légumes racines.



Figure 7. Centrifugeuse utilisée pour les essais dans l'eau de lavage de carottes cultivées en sol organique.

Tableau 4. Contenu physico-chimique de l'eau de lavage de carottes cultivées en sol organique à l'entrée et à la sortie de la centrifugeuse et taux d'abattement.

		Entrée (mg/ L)	Sortie (mg/ L)	Abattement (%)
Essai 1	MES	333	87	74
	DBO₅	60	47	22
	P_{total}	1,39	1,41	0
	N_{total}	0,23	0,25	0
	N-NH₄	0,011	0,006	45
	N-NO₃+NO₂	0,012	0,025	0
Essai 2	MES	420	150	64
	DBO₅	69	86	0
	P_{total}	1,702	1,947	0
	N_{total}	0,19	0,25	0
	N-NH₄	0,005	0,007	0
	N-NO₃+NO₂	0,010	0,027	0
Essai 3	MES	307	92	70
	DBO₅	71	56	21
	P_{total}	1,360	1,534	0
	N_{total}	0,215	0,241	0
	N-NH₄	0	0	0
	N-NO₃+NO₂	0,004	0,013	0

Note. La centrifugation n'a pas changé le pH des effluents. Les cellules en gris représentent des paramètres répondant aux critères choisis du MDDEFP.

5. Projet pilote – Site 1

5.1. Caractérisation initiale

L'entreprise de la région de Lanaudière lave des carottes, des panais et des betteraves jaunes et rouges cultivés dans un loam argileux dont l'analyse physico-chimique est présentée au tableau 5. Les légumes sont lavés dans une laveuse à baril rotatif d'une longueur de 6,1 mètres (figure 8) précédée d'un dessableur de 1,2 mètre. Les bennes de légumes provenant de la récolte sont retournées dans une trémie d'alimentation. Un convoyeur achemine ensuite les légumes vers le dessableur qui se décharge sur un deuxième convoyeur conduisant les légumes vers la trémie d'alimentation de la laveuse (figure 9). Les solides qui tombent sous ces unités sont récupérés dans quatre bennes dont deux sont placées sous la trémie d'alimentation des légumes, une sous le dessableur et une autre sous le deuxième convoyeur (figure 10). Les buses de la machine à laver sont alimentées avec de l'eau potable provenant d'un puits. Les eaux chargées de particules de sol sont évacuées par un orifice pratiqué dans la trémie de récupération de l'eau sous la laveuse, puis dans une lagune à l'extérieur du bâtiment (figure 11). La trémie de récupération de l'eau est séparée en deux par une paroi munie d'une valve à guillotine et, au besoin, une pompe récupère l'eau dans la section sortie de la trémie d'évacuation des eaux pour la diriger avec un tuyau sur les légumes qui déboulent dans la trémie d'alimentation de la machine à laver.

Lors du bilan massique du 27 septembre 2012, le débit d'eau potable utilisé était de 136 L/ min et l'effluent final contenait, en moyenne, 447, 2 228 et 19,08 mg/ L de DBO₅, MES et P_{total}.

Tableau 5. Contenu physico-chimique du sol prélevé sous la chaîne de lavage au site 1.

pH	N-NH ₄	N-NO ₃	P	K	Ca	Mg	Al	Matière organique	Sable	Limon	Argile	texture
	ppm							%				
6,95	1,2	2,73	92,6	405	2 414	217	842	3,38	39	33	28	loam argileux



Figure 8. Laveuse de type baril rotatif en opération au site 1.



Figure 9. Trémie d'alimentation et dessableur en opération au site 1.



Figure 10. Unités de récupération des matières solides sous la trémie d'alimentation, le dessableur et le convoyeur au site 1.



Figure 11. Lagune en opération au site 1.

5.2. Système de traitement de l'eau et échantillonnages

L'installation des équipements servant au traitement expérimental de l'eau de lavage au site 1 s'est effectuée le 3 septembre 2013. Le système de traitement décrit à la section 3.3.1 a été mis en place (figure 12). Le trop-plein de la dernière unité se déversait dans la lagune présente sur le site. Le système d'aération a été ajusté afin d'aérer la troisième unité à un taux de $0,009 \text{ L}_{\text{air}}/\text{L}_{\text{eau}}\cdot\text{min}$. La pompe submersible, installée à l'entrée de la lagune (figure 8), pompait un débit d'environ $15 \text{ L}/\text{min}$, ce qui représentait environ 10 % du débit de rejet réel de l'entreprise.

Deux essais se sont déroulés au site 1, le premier du 10 au 20 septembre, et le second du 21 au 24 septembre. Les bassins non aérés ont été vidés entre les deux essais. Le tableau 6 présente la chronologie des opérations réalisées durant toute la période.



Figure 12. Unités de sédimentation et système d'aération installé au site 1.



Figure 13. Dispositif de pompage installé à l'entrée de la lagune au site 1.

Tableau 6. Calendrier des opérations réalisées au site 1

Date	Produit lavé	Échantillons prélevés	Heures de pompage ¹
10 septembre	Betteraves rouges	Entrée du bassin 1 + sortie finale	7h à 17h
11 septembre	Carottes	Bassins 3 (aéré) et 4 (non aéré) pour analyse de couleur seulement	8h à 17h
12 septembre	Carottes		7h à 17h
13 septembre	Betteraves rouges		7h à 17h
14 septembre	Carottes		7h à 17h
15 septembre	Pas de lavage		
16 septembre	Carottes	Entrée du bassin 1 + sortie finale pour analyse de couleur seulement	Pas de pompage
17 septembre	Betteraves rouges		10h à 17h
18 septembre	Betteraves rouges		10h à 17h
19 septembre	Betteraves jaunes		7h à 17h
20 septembre	Betteraves rouges	Vidange des bassins non aérés	Pas de pompage
21 septembre	Betteraves rouges et panais		Pas de pompage
22 septembre	Pas de lavage		
23 septembre	Betteraves rouges et carottes		7h à 14h30 ²
24 septembre	Panais	Entrée du bassin 1 + sortie finale	7h à 14h

¹ L'aération du 3^e bassin a débuté le 10 septembre et a cessé le 24 septembre et ce, 24h/24.

² La pompe fonctionnait de façon périodique, en raison des nombreuses racines l'obstruant.

5.3. Résultats et discussion

5.3.1. Analyse physico-chimique

Les résultats d'efficacité de la chaîne de traitement expérimentale pour les deux essais réalisés au site 1 sont présentés au tableau 7. Les concentrations de chaque élément dans l'effluent initial et à la sortie de chaque bac sont présentées. Les valeurs respectant les normes de rejets visés pour les MES (70 mg/ L), la DBO₅ (55 mg/ L) et le P_{total} (2,6 mg/ L) sont sur fond gris. Les taux d'abattement calculés sont présentés au tableau 8. Les résultats démontrent que les quatre premiers bacs ont une certaine efficacité d'abattement des contaminants. Cependant, l'aération dans le bac 3 ne semble pas avoir amélioré l'efficacité d'abattement, remettant en suspension les particules de sol.

Tableau 7. Résultats des essais de traitement des eaux de lavage au site 1.

Date (2013)	Paramètres	Unité	Effluent initial	Bac 1	Bac 2	Bac 3 Aéré	Bac 4	Bac 5
10 septembre	pH		7,43	7,34	7,28	7,4	7,27	7,76
	MES	mg/ L	16860	1860	630	370	230	360
	STS	mg/ L	15002	2585	705	353	200	312
	DBO ₅	mg/ L	190	190	140	120	100	76
	P _{total}	mg/ L	29,477	7,131	3,922	3,107	2,431	2,608
	N _{total}	mg/ L	0,415	0,646	1,48	3,11	3	1,51
	N-NH ₄	mg/ L	0,017	0,017	0,625	1,88	2,07	0,859
	N-NO ₃ +NO ₂	mg/ L	0	0,018	0,021	0,04	0,025	0,02
24 septembre	pH		7,16	7,28	7,48	7,5	7,89	7,82
	MES	mg/ L	386	311	250	253	142	142
	STS	mg/ L	279	241	188	199	100	106
	DBO ₅	mg/ L	100	140	68	62	46	47
	P _{total}	mg/ L	1,63	2,156	1,937	1,988	1,928	1,908
	N _{total}	mg/ L	0,341	1,13	1,13	1,14	2,83	2,83
	N-NH ₄	mg/ L	0,013	0,044	0,028	0,026	1,12	1,19
	N-NO ₃ +NO ₂	mg/ L	0	0,023	0,014	0,013	0,099	0,036

Tableau 8. Taux d'abattement lors des essais de traitement de l'eau de lavage au site 1.

Date (2013)	Paramètre	Bac 1 (%)	Bac 2 (%)	Bac 3 (%)	Bac 4 (%)	Bac 5 (%)	Total ¹ (%)
10 septembre	MES	89	66	41	38	0	98
	DBO ₅	0	26	14	17	24	60
	P _{total}	76	45	21	22	0	91
24 septembre	MES	19	20	0	44	0	63
	DBO ₅	0	51	9	26	0	53
	P _{total}	0	10	0	0	1	0

¹Taux d'abattement total du système de traitement par rapport à l'effluent initial

5.3.2. Analyse de la couleur

Les graphiques illustrant les résultats des analyses de la couleur lors de trois échantillonnages sont présentés aux figures 14 à 16. Les résultats obtenus lorsque le système de traitement était utilisé en continu (figures 14 et 16) démontrent que le temps de séjour dans les cinq bacs n'est pas suffisant pour faire disparaître le pigment de couleur rouge. La figure 15 illustre la couleur dans les cinq bacs lorsque la pompe submersible est arrêtée et qu'il n'y a aucune nouvelle entrée d'eau dans les bacs, après 36 heures d'aération dans le bac 3. Les résultats démontrent qu'un temps de séjour de 36 heures est suffisant pour éliminer le pigment de couleur rouge.

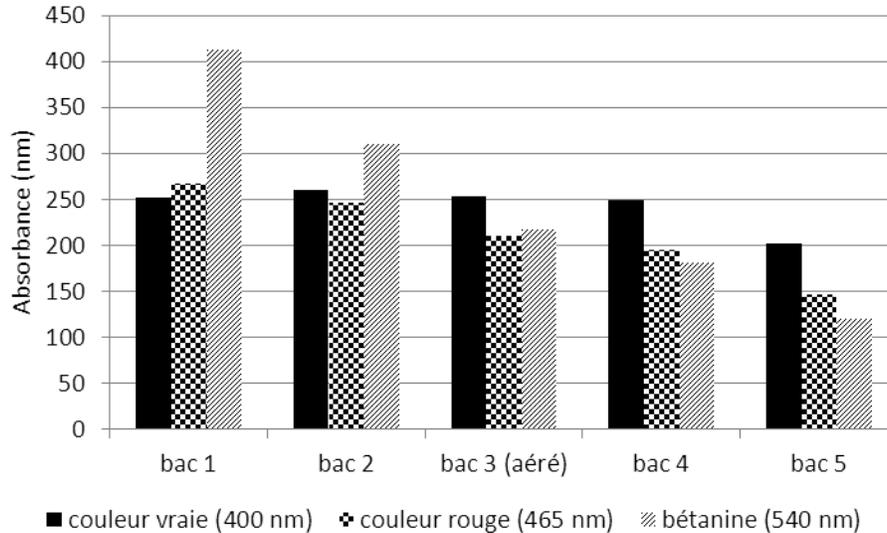


Figure 14. Couleur dans les cinq unités de sédimentation après 9 h de pompage d'eau de lavage de betterave rouge au site 1 (échantillonnage du 11 septembre).

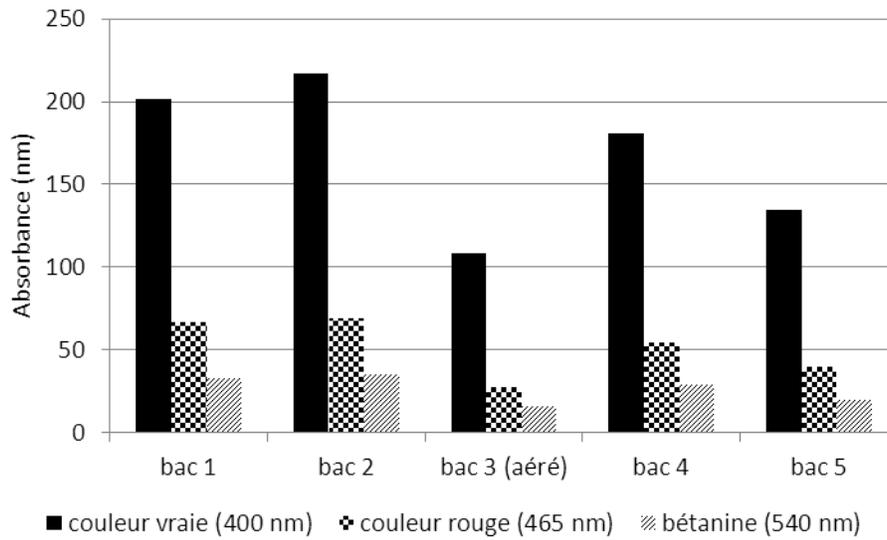


Figure 15. Couleur dans les cinq unités de sédimentation après 2 jours de lavage de betterave et 3 jours de lavage de carotte au site 1, le bac 3 était aéré au taux de 0,009 L_{air}/L_{eau}-min depuis 36 h sans nouvelle entrée d'eau (échantillonnage du 16 septembre).

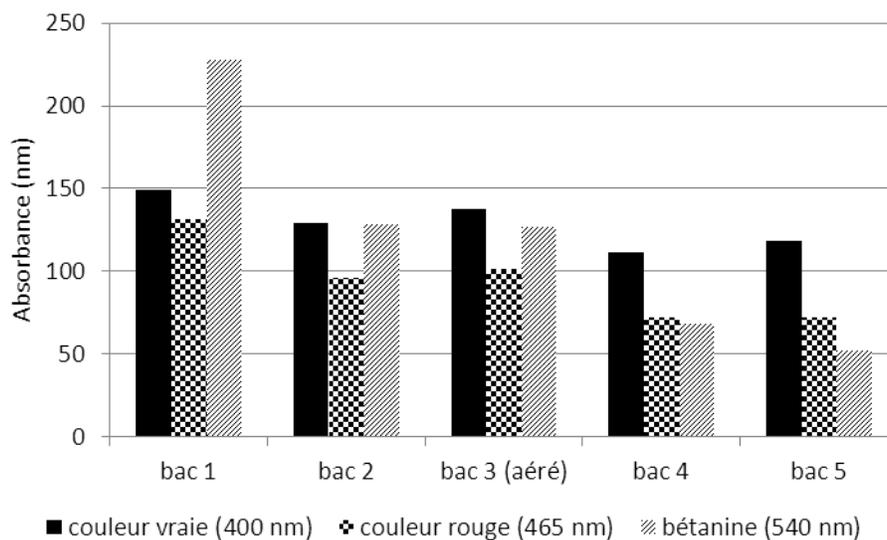


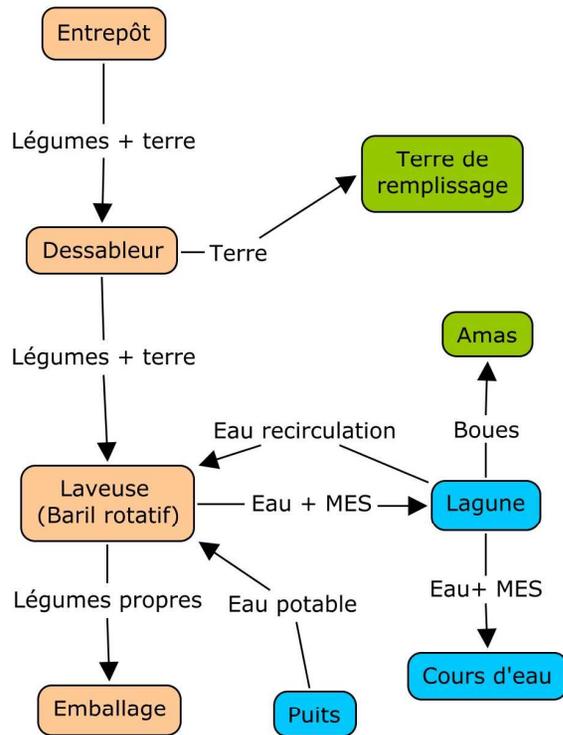
Figure 16. Couleur dans les cinq unités de sédimentation après 1 jour de lavage de betterave, de carotte et de panais au site 1 (échantillonnage du 24 septembre).

5.4. Option de traitement

À partir des résultats obtenus, une option de traitement à l'échelle réelle pour le site pilote 1 a été élaborée. Ainsi, pour tout site de lavage de légumes dont les caractéristiques sont semblables à celles du site 1 (sol de type loam argileux et lavage de betterave rouge), une solution semblable pourrait être adaptée. La chaîne de traitement proposée est composée de bassins de sédimentations hors sol et d'une lagune dont une partie est aérée. La figure 17 présente les schémas des installations existantes ainsi que l'option de traitement.

Site 1

Chaîne actuelle



Option de traitement

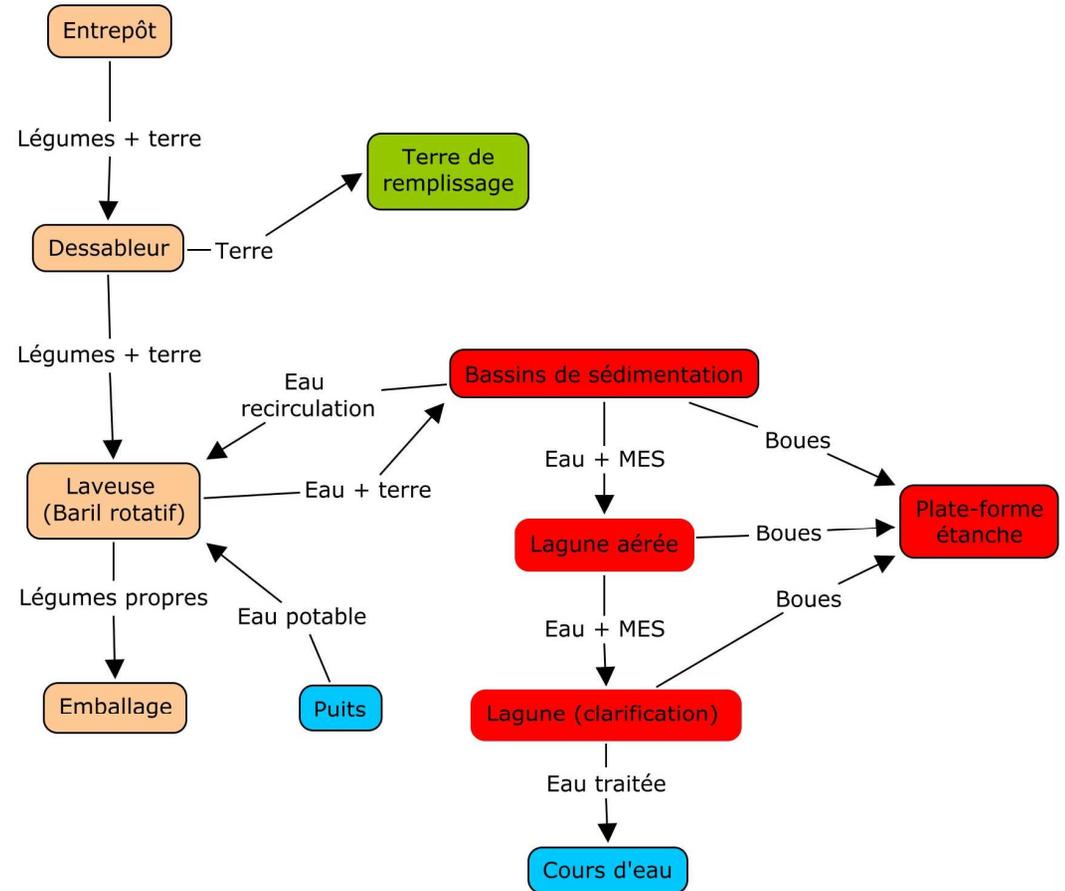


Figure 17. Schéma des installations de lavage actuelles au site 1 ainsi que l'option de traitement.

La première étape du système consiste en une sédimentation dans des bassins étanches hors sol. Cette étape permettrait de sédimenter les particules de sol de plus de 0,01 mm de diamètre (limon fin). Le dimensionnement de ces bassins a été fait selon l'efficacité moyenne de la chaîne de traitement expérimentale. Comme le temps de séjour était de 55 minutes par bac et que l'efficacité optimale a été atteinte à la sortie du bac 4, un temps de séjour correspondant de 220 minutes a été considéré suffisant pour la sédimentation primaire. La capacité nécessaire des bassins de sédimentation, obtenue en multipliant le débit d'eau utilisé (136 L/ min) par le temps de séjour nécessaire (220 min), est égale à 30 m³. Diverses possibilités d'aménagement sont possibles selon la configuration du site. Cependant, afin d'en augmenter l'efficacité, le bassin de sédimentation devrait être séparé en deux pour profiter de l'effet rideau. Deux bassins de 15 m³ pourraient donc être installés en série. Afin d'évacuer les boues au fond des bassins de sédimentation, un système de retrait des boues automatisé devrait être installé. Les boues devraient par la suite être entreposées sur une plate-forme étanche ou dans un bac étanche.

Le trop plein des bassins de sédimentation hors sol serait ensuite dirigé vers une lagune. Dans le cas du site pilote 1, la lagune existante ayant une capacité totale de 225 m³ pourrait être utilisée. Un mur rideau devrait séparer la lagune aux 2/3. Ainsi, un système d'aération serait installé dans la première partie de la lagune (150 m³) et fournirait un débit d'environ 0,009 L_{air} / L_{eau}-min. En divisant la capacité de la lagune par le débit d'eau utilisé, un temps de séjour de 18,4 heures est obtenu. Cela représente un temps de séjour de 2,3 jours, puisque la durée d'une journée de lavage typique est généralement de 8 heures. Selon les résultats obtenus précédemment, un temps de séjour de 36 heures permet de faire disparaître le pigment de couleur rouge dans l'eau de lavage. Un temps de séjour de 2,3 jours est donc jugé satisfaisant. En effet, en plus d'avoir un impact sur la dégradation du pigment rouge, l'aération favorise l'activité bactérienne, permettant d'abaisser la DBO₅.

La dernière section de la lagune (75 m³) serait utilisée comme clarificateur et ne serait pas aérée. Elle permettrait ainsi la sédimentation des particules qui n'auraient pas eu le temps de sédimenter dans la lagune aérée. Cette section permettrait d'obtenir un temps de séjour de 1,15 jour supplémentaire.

L'efficacité estimée de la solution proposée est présentée au tableau 9 pour les MES, la DBO₅ et le P_{total}. Les concentrations dans l'effluent initial proviennent d'analyses effectuées lors du bilan massique réalisé en 2012. Les pourcentages d'abattement moyens des deux essais après 4 bacs pour chaque paramètre ont été utilisés pour calculer la concentration à la sortie des bassins de sédimentation. L'efficacité de la lagune a été estimée. Selon les théories de conception d'un système de traitement par boues activées, la lagune devrait permettre d'abaisser la DBO₅ ainsi que le P_{total} sous les limites visées de 55 et 2,6 mg/ L, respectivement. Enfin, le temps de séjour total de la lagune de 3,45 jours pourrait permettre d'abattre environ 60 % des particules d'argile résiduelles dans l'eau de lavage.

Tableau 9. Efficacité estimée du système de la solution de traitement proposée au site 1.

Paramètres	Effluent initial	Bassins de sédimentation		Lagune	
	Concentration mg/ L	Abattement %	Concentration mg/ L	Abattement %	Concentration mg/ L
MES	2 228	81	423	60	192
DBO ₅	447	51	219	> 75	< 55
P _{total}	19	50	9,5	> 73	< 2,6

6. Projet pilote - Site 2

6.1. Caractérisation initiale du site

L'entreprise installée en Montérégie-Ouest lave exclusivement de la carotte cultivée en sol organique. La chaîne de lavage inclut des bassins de pré-trempage (figure 18), une laveuse à baril rotatif d'une longueur de 6,1 mètres, une machine pour broser les légumes et des unités de classement des carottes (figure 19). Différents types de convoyeurs relient les diverses unités de la ligne de traitement.

Les bennes de carottes sont retournées dans un bassin de pré-trempage duquel les carottes sont retirées par un convoyeur oblique qui monte les carottes sur le convoyeur d'alimentation de la machine à laver. Les carottes lavées pénètrent dans une machine pour être brosées puis sont dirigées vers les unités de classement pour être emballées.

Les buses de la machine à laver sont alimentées avec de l'eau potable provenant d'un puits artésien et les eaux de lavage qui dégouttent sous la machine à laver sont acheminées vers les bassins de pré-trempage dans un canal aménagé sous la première partie de la ligne de lavage. À la fin de la journée d'opération et, occasionnellement lorsque les bassins de pré-trempage sont pleins, les eaux sales sont évacuées avec une pompe dans deux lagunes en série à l'extérieur du bâtiment (figures 20 et 21).

Lors du bilan massique effectué le 28 novembre 2012, le débit d'eau potable utilisé au sein de cette entreprise était de 445 L/ min et l'effluent final de lavage contenait en moyenne 260, 1 330 et 4,26 mg/L en DBO₅, MES et P_{total}, respectivement.

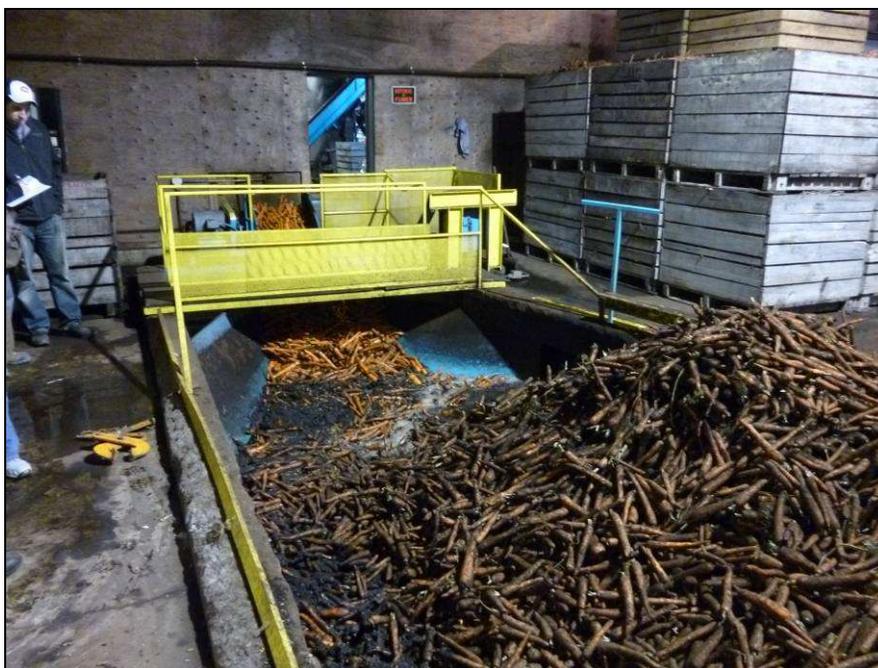


Figure 18. Bassin de pré-trempage en opération au site 2.



Figure 19. Installations de lavage en opération au site 2.



Figure 20. Premier bassin de sédimentation au site 2.



Figure 21. Deuxième bassin de sédimentation au site 2.

6.2. Système de traitement de l'eau et échantillonnages

L'installation du système de traitement expérimental décrit à la section 3.3.1 a été réalisée le 3 octobre 2013 (figure 22). Ce dernier a été installé à proximité de la première lagune, de façon à ce que l'effluent final sortant de l'usine puisse être pompé vers la chaîne de traitement. Pour ce faire, une pompe submersible a été installée dans un bac troué à la sortie de la canalisation entrant dans la lagune, afin de minimiser les grosses particules pouvant être pompées et nuire aux équipements (figure 23). Le système d'aération a été installé de façon à pouvoir aérer les bassins 2 et 3 à un débit de $4 \text{ L}_{\text{air}} / \text{min}$ ($0,004 \text{ L}_{\text{air}} / \text{L}_{\text{eau-min}}$) chacun (figure 24).



Figure 22. Bassins de sédimentation installés en série au site 2.



Figure 23. Bac troué contenant la pompe submersible installée au site 2.



Figure 24. Système d'aération installé au site 2.

Trois essais de pompage d'eau de lavage ont été effectués. L'eau était pompée à un débit d'environ 15 L/ min lors des trois essais. Lors du premier essai, les deux premiers bassins ont été remplis et l'effluent entrant dans le premier a été échantillonné. L'aération a été démarrée dans le 2^e bassin et s'est poursuivie 24 heures par jour durant tout l'essai. Des échantillons ont été prélevés le lendemain et trois jours après dans les deux bassins.

Pour des raisons techniques, le pompage de nouvelle eau de lavage a dû être réalisé quatre jours plus tard. Les bacs n'ont pas été vidés entre les deux essais. Le second essai a donc débuté en pompant de

l'eau de lavage pendant huit heures et des échantillons ont été prélevés dans tous les bacs le lendemain, ainsi que dans les trois premiers bacs après 4,5 jours sans nouvelle entrée d'eau.

Suite au dernier échantillonnage de l'essai 2, la pompe a été redémarrée et le troisième essai a débuté. Après huit heures de pompage d'eau de lavage, la pompe a été arrêtée et l'aération s'est poursuivie 24h/ 24. Des échantillons ont été prélevés le lendemain dans tous les bassins, ainsi que cinq jours après dans les trois premiers.

6.3. Résultats et discussion

Les résultats d'analyse des échantillons prélevés lors des essais 1, 2 et 3 sont présentés aux tableaux 10, 11 et 12, respectivement. Les résultats ont démontré que l'aération était efficace pour favoriser l'abattement de la DBO₅. Cependant, le temps de séjour nécessaire pour atteindre la norme choisie de 55 mg/ L est de plus de 3 jours. L'aération prolongée a aussi une influence sur l'abattement des MES, particulièrement après 4,5 et 5 jours (tableaux 13 et 14). En effet, la teneur en MES dans les bacs non aérés n'atteignait pas la norme visée de 70 mg/ L, comparativement aux bacs aérés. La figure 25 illustre bien l'efficacité du bac aéré après un temps de séjour de 3 jours comparativement au bac non aéré. En effet, l'abattement supplémentaire des MES et de la DBO₅ s'est traduit par une clarification de l'effluent. Dans tous les cas, avec ou sans aération, le P_{total} a été abattu rapidement sous la norme de 2,6 mg/ L. Enfin, l'aération ne semble pas avoir eu d'impact sur l'abaissement des composés d'azote.

Tableau 10. Essai d'aération effectué dans les bassins lors de l'essai 1 au site 2.

Paramètres	Unités	Effluent initial	Durée de l'essai ¹			
			1 jour		3 jours	
			Bac 1	Bac 2 (aéré)	Bac 1	Bac 2 (aéré)
pH		7,25	7,27	7,79	7,25	8,14
MES	mg/ L	124	58	63	45	34
STS	mg/ L	224	46	38	15	17
MVES	mg/ L	134	16	11	23	7
P _{total}	mg/ L	2,74	1,87	1,96	1,82	1,59
DBO ₅	mg/ L	210	180	150	150	64
N _{total}	mg/ L	0,34	0,34	0,64	0,71	0,93
N-NH ₄	mg/ L	0,02	0,02	0,02	0,02	0,21
N-NO ₃ + NO ₂	mg/ L	0,006	0	0,008	0,005	0,008

¹ Nombre de jours après le pompage de nouvelle eau de lavage. Les cellules en gris représentent des données conformes aux normes de rejet du MDDEFP visées.

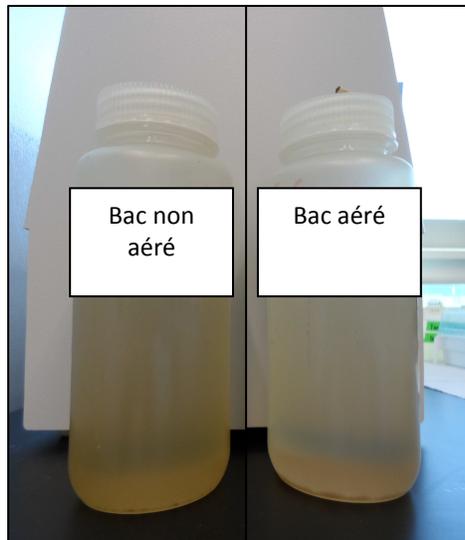


Figure 25. Échantillons prélevés dans le bac non aéré et le bac aéré trois jours après l'entrée de nouvelle eau dans le système.

Tableau 11. Contenu des bassins lors de l'essai 2 effectué au site 2.

Paramètres	Unités	Durée de l'essai ¹					
		1 jour			4,5 jours		
		Bac 1	Bac 2 (aéré)	Bac 3 (aéré)	Bac 1	Bac 2 (aéré)	Bac 3 (aéré)
pH		6,98	7,68	7,75	6,95	7,93	8,14
MES	mg/ L	260	136	120	193	69	55
STS	mg/ L	184	82	98	143	38	37
MVES	mg/ L	137	32	46	128	8	35
P _{total}	mg/ L	2,08	1,75	2,12	1,71	1,67	1,85
DBO ₅	mg/ L	180	150	130	170	31	29
N _{total}	mg/ L	0,70	0,64	0,51	0,55	3,22	3,08
N-NH ₄	mg/ L	0,02	0,03	0,02	0,02	1,68	1,64
N-NO ₃ + NO ₂	mg/ L	0,038	0,063	0,011	0,001	0,036	0,033

¹ Nombre de jours après le pompage de nouvelle eau de lavage. Les cellules en gris représentent des données conformes aux normes de rejet du MDDEFP visées.

Tableau 12. Contenu des bassins lors de l'essai 3 effectué au site 2.

Paramètres	Unités	Durée de l'essai ¹					
		1 jour			5 jours		
		Bac 1	Bac 2 (aéré)	Bac 3 (aéré)	Bac 1	Bac 2 (aéré)	Bac 3 (aéré)
pH		7,18	7,56	7,77	7,36	8,34	8,34
MES	mg/ L	140	95	68	90	13	21
STS	mg/ L	97	43	40	33	11	14
MVES	mg/ L	85	26	34	0	0	0
P _{total}	mg/ L	2,85	1,82	1,86	2,20	1,51	1,68
DBO ₅	mg/ L	190	110	37	180	22	22
N _{total}	mg/ L	0,93	0,97	1,81	0,66	3,27	3,31
N-NH ₄	mg/ L	0,09	0,01	0,63	0,02	1,84	1,93
N-NO ₃ + NO ₂	mg/ L	0,018	0,004	0,015	0,005	0,020	0,016

¹ Nombre de jours après le pompage de nouvelle eau de lavage. Les cellules en gris représentent des données conformes aux normes de rejet du MDDEFP visées.

Les taux d'abattement ont été calculés par rapport à l'effluent initial pour l'essai 1 (tableau 13). Les résultats ont démontré que pour un même temps de séjour, il y a peu de différences entre les bacs aérés et non aérés pour les MES et le P_{total}. Cependant, l'abattement de la DBO₅ est beaucoup plus grand avec l'aération, que ce soit après un ou trois jours. L'augmentation du temps de séjour permet aussi d'augmenter considérablement l'abattement des MES, de la DBO₅ et du P_{total} et ce, particulièrement avec l'aération.

Tableau 13. Taux d'abattement (%) des différents paramètres lors de l'essai 1 au site 2.

Paramètres	Temps de séjour			
	1 jour		3 jours	
	Bac 1	Bac 2 (aéré)	Bac 1	Bac 2 (aéré)
MES	53	49	64	73
P _{total}	32	28	34	42
DBO ₅	14	29	29	70

Note. Les taux sont calculés par rapport à l'effluent initial.

Pour les essais 2 et 3, les taux d'abattement ont été calculés par rapport à l'effluent ayant subi un temps de séjour d'un jour dans les bacs (tableau 14), car l'effluent initial n'a pas été analysé lors de ces essais. Ainsi, les valeurs calculées représentent le gain obtenu lorsque le temps de séjour dépasse un jour. La moyenne des essais 2 et 3 a été calculée, comme les temps de séjour étaient semblables. Les résultats ont démontré qu'une augmentation du temps de séjour permettait un abattement supplémentaire des MES et la DBO₅ mais n'offrait aucun avantage en ce qui concerne l'abattement du P_{total}.

Tableau 14. Taux d'abattement (%) des différents paramètres selon le bac au site 2.

Paramètres	Temps de séjour									
	3 jours (Essai 1)		4,5 jours (Essai 2)			5 jours (Essai 3)			4,75 jours (Essais 2 et 3 combinés)	
	Bac 1	Bac 2 (aéré)	Bac 1	Bac 2 (aéré)	Bac 3 (aéré)	Bac 1	Bac 2 (aéré)	Bac 3 (aéré)	Bac 1	Bacs aérés
MES	22	46	26	49	54	36	86	69	31	65
P _{total}	3	19	18	5	13	23	17	10	21	11
DBO ₅	17	57	6	79	78	5	80	41	5,5	70

Note. Les taux sont calculés par rapport au contenu des bacs après un temps de séjour d'un jour.

6.4. Option de traitement

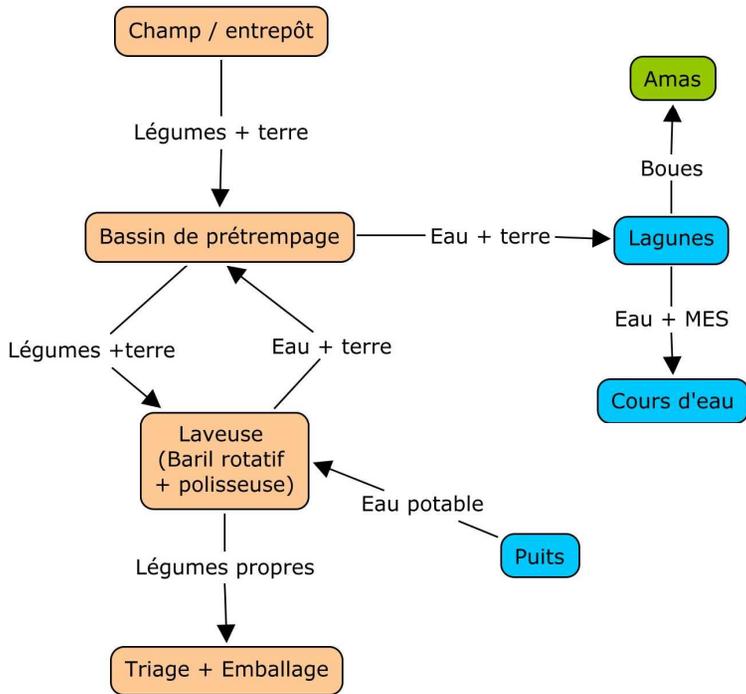
À partir des résultats obtenus, une option de traitement à l'échelle réelle pour le site pilote 2 a été élaborée. Ainsi, pour tout site de lavage de légumes dont les caractéristiques sont semblables à celles du site 2 (légumes cultivés en sol organique), une solution semblable pourrait être adaptée. La chaîne de traitement proposée est composée de bassins de sédimentation hors sol et d'une lagune, dont une partie est aérée. La figure 26 présente le schéma des installations actuelles ainsi que l'option élaborée.

La première étape du système consiste en une sédimentation dans des bassins étanches hors sol. Cette étape permettrait de sédimenter les particules de sol de plus de 0,01 mm de diamètre (limon fin). Le dimensionnement de ces bassins s'est fait selon le temps de séjour théorique de 57 minutes, temps nécessaire pour sédimenter les particules de sol plus grosses que le limon moyen (> 0,02 mm) sur un mètre de colonne d'eau (Guillou, 2013). Un temps de séjour d'une heure a donc été considéré. La capacité nécessaire des bassins de sédimentation, obtenue en multipliant le débit d'eau utilisé (445 L/min) par le temps de séjour nécessaire (60 min), est égale à 27 m³. Diverses possibilités d'aménagement sont possibles selon la configuration du site. Cependant, afin d'en augmenter l'efficacité, le bassin de sédimentation devrait être séparé en deux pour profiter de l'effet rideau. De plus, le bassin devrait avoir une hauteur ne dépassant pas un mètre et sa forme être allongée. Une option serait d'installer en série deux bassins de 3 m x 4,5 m x 1 m, d'une capacité de 13,5 m³ chacun. Afin d'évacuer les boues au fond des bassins de sédimentation, un système de retrait des boues automatisé devrait être installé. Les boues devraient par la suite être entreposées sur une plate-forme étanche ou dans un bac étanche.

Le trop-plein des bassins de sédimentation hors sol serait ensuite dirigé vers une lagune aérée. En effet, comme il a été démontré lors des essais avec la chaîne de traitement expérimentale, un temps d'aération de 3 jours permettait d'abattre considérablement la DBO₅, le P_{total} et les MES dans l'effluent. Dans le cas du site pilote 2, la lagune existante de 338 m³ devrait être agrandie. En divisant la capacité de la lagune par le débit d'eau utilisée (445 L/min), le temps de séjour serait de 12,6 heures, ce qui est égal à 1,6 jour pour une journée de lavage typique de 8 heures. Afin d'obtenir un temps de séjour de 3 jours, la lagune devrait être agrandie pour avoir une capacité de 640 m³. Un système d'aération serait installé dans cette lagune. Selon des calculs faits à partir des équations de traitement par boues activées (Moletta, 2006), le taux d'aération minimal devrait être de 0,0001 L_{air} / L_{eau}-min (voir annexe 1). La deuxième lagune en place au site 2, d'une capacité de 45 m³, serait utilisée comme clarificateur et ne serait pas aérée. Elle permettrait ainsi la sédimentation des particules qui n'auraient pas eu le temps de sédimenter dans la lagune aérée. Cette section permettrait d'obtenir un temps de séjour de 1,7 heure supplémentaire.

Site 2

Chaîne actuelle



Option de traitement

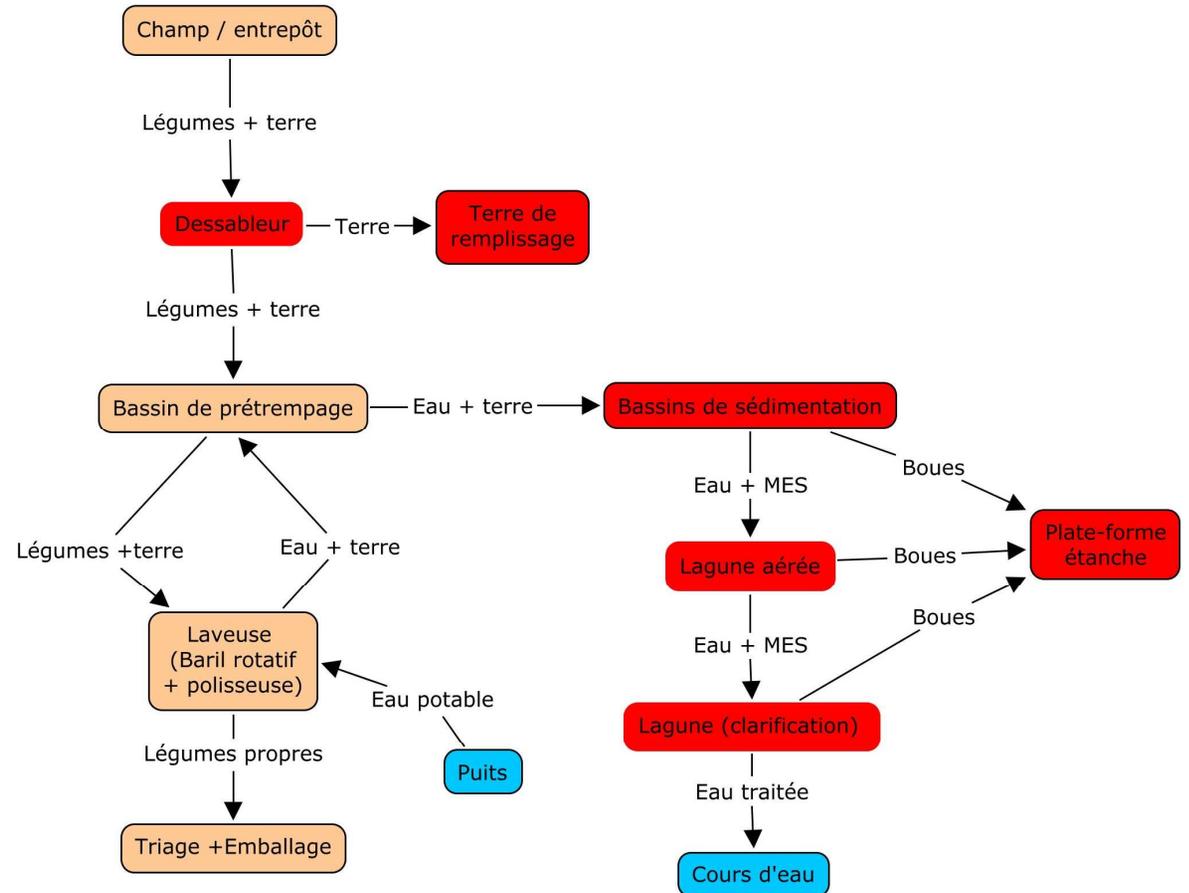


Figure 26. Schéma des installations de lavage actuelles au site 2 ainsi que l'option de traitement.

L'efficacité estimée de cette solution (option 1) est présentée au tableau 15 pour les MES, la DBO₅ et le P_{total}. Les concentrations dans l'effluent initial proviennent d'analyses effectuées lors du bilan massique réalisé en 2012. Les pourcentages d'abattement lors de l'essai 1 après un temps de séjour de 3 jours dans le bac d'aération ont été utilisés pour estimer les concentrations de contaminants à la sortie de la lagune aérée. Selon ces estimations, la norme de 2,6 mg/ L serait atteinte pour le P_{total}. La concentration en DBO₅ serait de 78 mg/ L, légèrement au-dessus de la limite de 55 mg/ L, et la concentration en MES serait abaissée à 359 mg/ L. L'efficacité du système pourrait cependant être légèrement supérieure avec un temps de séjour supplémentaire à l'étape de clarification, qui n'a pas été considérée pour l'estimation de l'efficacité.

Selon les résultats obtenus aux essais 2 et 3, un temps de séjour plus long (entre 4,5 et 5 jours) permettrait un taux d'abattement supplémentaire de la DBO₅ et des MES. Cependant, pour obtenir ces temps de séjour au site 2, la lagune aérée devrait avoir une capacité d'environ 1000 m³. Selon le taux d'abattement moyen après 4,75 jours (tableau 15), les MES pourraient être abattues à 241 mg/ L et la DBO₅ à 56 mg/ L. Cependant, cette 2^e option occasionnerait des coûts d'investissement beaucoup plus élevés au producteur pour un abattement supplémentaire relativement faible par rapport à la lagune de 640 m³. De plus, l'abattement du P_{total} ne serait pas augmenté.

Tableau 15. Efficacité estimée du système de la solution de traitement proposée au site 2.

Paramètres	Effluent initial	Bassins hors sol		Lagune aérée (option 1) 640 m ³ (t.s. 3 jours)		Lagune aérée (option 2) 1 000 m ³ (t.s. 4,75 jours)	
	[]	Abatt.	[]	Abatt.	[]	Abatt.	[]
	mg/ L	%	mg/ L	%	mg/ L	%	mg/ L
MES	1 330	10	1 197	73	359	82	241
DBO₅	260	0	260	70	78	78	56
P_{total}	4,26	0	4,26	42	2,47	36	2,72

Notes. t.s. : Temps de séjour; Abatt. : Abattement; [] : Concentration

Afin de réduire davantage les MES dans les effluents, l'efficacité d'un dessableur au début de la chaîne de lavage a été évaluée. Selon des essais de dessablage de carottes en sol organique, environ 1 % de la masse totale de carottes non-lavées était enlevée par le dessableur (Généreux et al. 2013). Puis, selon le bilan massique réalisé au site en 2012, 2,2 % de la masse totale qui entrait dans le bassin de pré-trempe était des particules de sol. Le pourcentage de particules enlevées par le dessableur serait ainsi d'environ 45 %. Cela se répercuterait sur le contenu en MES dans l'effluent, qui diminuerait de 45 %, pour atteindre 731 mg/L (tableau 16). La concentration en DBO₅ et en P_{total} a été calculée à partir des équations de régression établies par Pelletier et al. (2013) à partir d'analyses d'échantillons d'eau de lavage provenant de plusieurs sites. Puis, les concentrations en MES, DBO₅ et P_{total} à chaque étape de traitement ont été calculées à partir de l'efficacité d'abattement déterminée précédemment.

Les résultats obtenus ont démontré que l'ajout d'un dessableur permettrait d'augmenter considérablement l'efficacité de la chaîne de traitement. En effet, la concentration en DBO₅ pourrait être abaissée à 38 mg/ L avec la lagune aérée de 640 m³. L'agrandissement de la lagune à 1000 m³ ne serait donc pas nécessaire pour atteindre la norme de 55 mg/ L en DBO₅. De plus, la concentration en MES dans la lagune aérée de 640 m³ serait inférieure si un dessableur était ajouté à la chaîne de lavage.

Tableau 16. Efficacité estimée du système de la solution de traitement proposée au site 2 (avec dessableur).

Paramètres	Effluent initial	Bassins de sédimentation		Lagune aérée (option 1) 640 m ³ (t.s. 3 jours)		Lagune aérée (option 2) 1 000 m ³ (t.s. 4,75 jours)	
	[]	Abatt.	[]	Abatt.	[]	Abatt.	[]
	mg/ L	%	mg/ L	%	mg/ L	%	mg/ L
MES	731	10	658	73	197	82	131
DBO₅	128	0	128	70	38	78	28
P_{total}	2,8	0	2,8	42	1,624	36	1,72

Notes. t.s. : Temps de séjour; Abatt. : Abattement; [] : Concentration

7. Projet pilote - Site 3

7.1. Caractérisation initiale du site

L'entreprise, située dans la région de la Capitale-Nationale, lave des panais et des carottes cultivés dans un loam argileux. L'analyse des échantillons de sol prélevés sous le dessableur est présentée au tableau 17. Lors du bilan massique du 13 septembre 2012, les opérations de lavage des légumes étaient conduites avec une laveuse à baril rotatif équipée d'un hydrocyclone permettant de retirer une fraction solide de l'eau de lavage qui est réutilisée dans la laveuse. Le débit d'eau potable utilisé lors de ce bilan était de 82,3 L/ min et l'effluent issu du lavage contenait, en moyenne, 234, 1 976 et 3,23 mg/ L en DBO₅, MES et P_{total}.

Tableau 17. Contenu physico-chimique des échantillons de sol prélevés sous le dessableur au site 3.

pH	N-NH ₄	N-NO ₃	P	K	Ca	Mg	Al	Matière organique	Sable	Limon	Argile	Texture
6,99	1,34	0,715	86,5	223	2703	131	1002	4,23	25	42	33	Loam argileux
6,97	0,957	0,284	286	549	2459	153	1200	4,28	37	32	31	Loam argileux

Un nouveau système de lavage a été mis en place en 2013 (figure 27). Un dessableur et un dépierreur ont été ajoutés à la chaîne de lavage. De plus, la laveuse à baril rotatif a été remplacée par une laveuse polisseuse. Ainsi, les légumes provenant des opérations au champ sont désormais acheminés dans la trémie d'alimentation. Un convoyeur achemine ensuite les légumes vers le dessableur, puis les légumes tombent dans le bassin dépierreur. Il s'agit d'une machine remplie d'eau qui permet à la terre de se détacher des légumes et de sédimenter au fond du bassin. Les sédiments sont évacués automatiquement par un convoyeur qui gratte le fond du bassin. Les légumes ressortent du bassin dépierreur à l'aide d'un convoyeur oblique et sont redirigés vers la trémie d'alimentation de la polisseuse. Les légumes sortant de la polisseuse sont ensuite acheminés vers la salle d'emballage. L'alimentation en eau se fait à partir d'un puits. L'eau pompée dans le petit réservoir surmonté d'une plaque perforée sous la polisseuse (figure 28) est dirigée directement du côté de l'entrée de la polisseuse. Une deuxième pompe installée au même endroit redirige de l'eau de lavage dans le bassin dépierreur au besoin.



Figure 27. Chaîne de lavage au site 3, incluant la trémie d'alimentation (a), le bassin dépierreur (b), et la polisseuse (c).



Figure 28. Système de dessablage au site 3, incluant le convoyeur (a), le dessableur (b) et le bassin dépierreur (c).

7.2. Système de traitement de l'eau et échantillonnages

L'installation des équipements servant au traitement expérimental de l'eau de lavage au site 3 s'est effectuée le 23 octobre 2013. Le système de traitement décrit à la section 3.3.1 a été mis en place près du bâtiment dans lequel le lavage a lieu (figure 29). Une pompe submersible, installée dans le petit réservoir surmonté d'une plaque perforée sous la polisseuse (figure 30), pompait de l'eau de lavage dans le premier bac à un débit d'environ 19 L/ min, ce qui représente environ 23 % du débit de rejet réel de l'entreprise. Le trop-plein du dernier bac se déversait dans la fosse septique du producteur. Dès le 25 octobre, le producteur faisait fonctionner la pompe alimentant le système de traitement en continu lorsque des légumes étaient lavés.

Deux essais ont été menés. Le premier essai, qui s'est déroulé du 25 au 30 octobre, visait à évaluer l'efficacité du système de traitement fonctionnant en continu sans aération. Deux séries d'échantillons (l'effluent à la sortie de la chaîne de lavage et la sortie de chaque bac) ont été prélevées. Chaque échantillonnage a été réalisé après que le système ait fonctionné pendant au moins 4h20, représentant le temps de séjour dans le système lorsque ce dernier fonctionne en continu.

Le deuxième essai a débuté à la suite du 2^e échantillonnage. Le système d'aération a été installé afin d'aérer en continu les bacs 2 et 3 à un taux de $0,004 \text{ L}_{\text{air}} / \text{L}_{\text{eau}}\text{-min}$ chacun. Cet essai s'est déroulé du 30 octobre au 8 novembre et trois séries d'échantillons ont été prélevées et analysées.



Figure 29. Réservoir surmonté d'une plaque perforée sous la polisseuse au site 3.



Figure 30. Chaîne de traitement des eaux de lavage au site 3.

7.3. Résultats et discussion

Les résultats d'analyse des échantillons prélevés lors de l'essai 1 sont présentés au tableau 18. Les taux d'abattement dans chaque bac et le taux d'abattement total du système de traitement pour les MES, la DBO_5 et le P_{total} sont présentés au tableau 19. Ces résultats ont démontré que chaque bac avait une certaine efficacité d'abattement. Au total, la chaîne de traitement permettait d'abattre les MES de 78 et 93 %, la DBO_5 de 6 et 64 % et le P_{total} de 54 et 77 %. Malgré cela, la concentration en MES à la sortie du système n'atteint pas la limite visée de 70 mg/ L dans les deux séries d'échantillons. La concentration en P_{total} est sous la limite de 2,6 mg/ L dans les deux cas et la DBO_5 est abaissée sous la limite de 55 mg/ L dans la première série d'échantillons. Les concentrations en azote total, azote ammoniacal, nitrites et nitrates sont demeurées relativement stables tout au long de la chaîne de traitement.

Tableau 18. Résultats d'analyses de l'essai 1 au site 3.

Date (2013)	Paramètres	Unité	Effluent	Bac 1	Bac 2	Bac 3	Bac 4	Bac 5
28 octobre	pH		7,12	7,21	7,23	7,38	7,38	7,44
	MES	mg/ L	2818	1940	1090	565	305	200
	DBO ₅	mg/ L	69	36	35	31	33	25
	P _{total}	mg/ L	4,927	4,177	3,178	2,042	1,363	1,115
	N _{total}	mg/ L	0,146	0,125	0,15	0,185	0,206	0,225
	N-NH ₄	mg/ L	0,038	0,019	0,007	0	0,018	0,02
	N-NO ₃ + NO ₂	mg/ L	0,005	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002
30 octobre	pH		7,21	7,17	7,16	7,13	7,14	7,22
	MES	mg/ L	2780	1980	1100	940	760	620
	DBO ₅	mg/ L	66	84	98	92	74	62
	P _{total}	mg/ L	5,477	4,476	3,518	3,390	3,062	2,542
	N _{total}	mg/ L	0,222	0,222	0,235	0,21	0,208	0,231
	N-NH ₄	mg/ L	0,026	0,036	0,042	0,02	0,028	0,029
	N-NO ₃ + NO ₂	mg/ L	0,012	0,015	0,019	0,019	0,015	0,014

Tableau 19. Taux d'abattement dans chaque bac lors de l'essai 1 au site 3.

Date (2013)	Paramètres	Bac 1 (%)	Bac 2 (%)	Bac 3 (%)	Bac 4 (%)	Bac 5 (%)	Total ¹ (%)
28 octobre	MES	31	44	48	46	34	93
	DBO ₅	48	3	11	0	24	64
	P _{total}	15	24	36	33	18	77
30 octobre	MES	29	44	15	19	18	78
	DBO ₅	0	0	6	20	16	6
	P _{total}	18	21	4	10	17	54

¹Taux d'abattement total du système de traitement par rapport à l'effluent initial

Les résultats d'analyse des échantillons prélevés lors de l'essai 2 sont présentés au tableau 20. Les taux d'abattement dans chaque bac et le taux d'abattement total du système de traitement pour les MES, la DBO₅ et le P_{total} sont présentés au tableau 21. Comme pour l'essai 1, la chaîne de traitement n'a pas fait diminuer les concentrations en composés azotés. Cependant, lors de chaque échantillonnage, le traitement a permis d'abattre les MES et la DBO₅. Le P_{total} a diminué lors de deux échantillonnages, soit de 22 et 33 %. En comparant les taux d'abattement des deux essais, l'aération ajoutée aux bacs 2 et 3 lors de l'essai 2 ne semble pas avoir augmenté l'efficacité du système de traitement. En effet, les abattements les plus importants ont été atteints lors de l'essai 1. De plus, les deux essais ont permis d'atteindre les limites de 55 mg/ L de DBO₅ et 2,6 mg/ L de P_{total} pour la plupart des échantillonnages. Cependant, les MES ne sont jamais abaissées sous les 70 mg/ L.

Tableau 20. Résultats d'analyses de l'essai de sédimentation et d'aération au site 3.

Date (2013)	Paramètres	Unité	Effluent	Bac 1	Bac 2 (aéré)	Bac 3 (aéré)	Bac 4	Bac 5
1er novembre	pH		7,21	7,1	7,16	7,25	7,26	7,3
	MES	mg/ L	620	665	575	555	560	575
	DBO ₅	mg/ L	60	68	60	60	53	51
	P _{total}	mg/ L	1,850	1,913	1,986	1,921	2,043	2,129
	N _{total}	mg/ L	0,282	0,25	0,27	0,276	0,274	0,248
	N-NH ₄	mg/ L	0,018	0,015	0,01	0	0,028	0,06
	N-NO ₃ + NO ₂	mg/ L	0,017	0,014	0,02	0,011	0,015	0,008
6 novembre	pH		7,11	7,22	7,25	7,21	7,25	7,26
	MES	mg/ L	375	465	300	235	230	210
	DBO ₅	mg/ L	88	91	88	76	74	63
	P _{total}	mg/ L	1,467	1,470	1,264	1,191	1,143	1,149
	N _{total}	mg/ L	0,228	0,239	0,23	0,245	0,274	0,252
	N-NH ₄	mg/ L	0,044	0,061	0,053	0,047	0,055	0,054
	N-NO ₃ + NO ₂	mg/ L	0,016	0,014	0,025	0,019	0,013	0,016
8 novembre	pH		7,22	7,17	7,12	7,12	7,27	7,24
	MES	mg/ L	430	380	365	325	305	245
	DBO ₅	mg/ L	75	75	75	70	62	56
	P _{total}	mg/ L	1,705	1,664	1,658	1,451	1,315	1,145
	N _{total}	mg/ L	0,269	0,249	0,235	0,235	0,225	0,309
	N-NH ₄	mg/ L	0,055	0,062	0,067	0,058	0,036	0,045
	N-NO ₃ + NO ₂	mg/ L	0,011	0,009	0,016	0,018	0,015	0,015

Tableau 21. Taux d'abattement de chaque bac lors du 2^e essai au site 3.

Date (2013)	Paramètres	Bac 1 (%)	Bac 2 (%)	Bac 3 (%)	Bac 4 (%)	Bac 5 (%)	Total ¹ (%)
1 ^{er} novembre	MES	0	14	3	0	0	7
	DBO ₅	0	12	0	12	4	15
	P _{total}	0	0	3	0	0	0
6 novembre	MES	0	35	22	2	9	44
	DBO ₅	0	3	14	3	15	28
	P _{total}	0	14	6	4	0	22
8 novembre	MES	12	4	11	6	20	43
	DBO ₅	0	0	7	11	10	25
	P _{total}	2	0	12	9	13	33

¹Taux d'abattement total du système de traitement par rapport à l'effluent initial

7.4. Option de traitement

À partir des résultats obtenus, une option de traitement à l'échelle réelle pour le site pilote 3 a été élaborée. Ainsi, pour tout site de lavage de légumes racines dont les caractéristiques sont semblables à celles du site 3 (légumes cultivés en sol minéral, sans pigmentation de betterave), une solution semblable pourrait être adaptée. La chaîne de traitement proposée est composée de bassins de sédimentation hors sol et de lagunes non aérées. Comme l'aération n'a pas semblé augmenter l'efficacité de la chaîne de traitement lors des essais expérimentaux, l'option de traitement sera donc basée uniquement sur le principe de sédimentation. La figure 31 présente le schéma des installations actuelles ainsi que l'option élaborée.

La première étape du système consiste en une sédimentation primaire dans des bassins étanches hors sol. Cette étape permettrait de sédimenter les particules de plus de 0,01 mm de diamètre (limon fin). Le dimensionnement de ces bassins s'est fait selon l'efficacité moyenne de la chaîne de traitement expérimentale. Comme le temps de séjour dans la chaîne de traitement était de 4h20, un temps de séjour correspondant a été considéré suffisant pour la sédimentation primaire dans les bassins hors sol. La capacité nécessaire des bassins de sédimentation, obtenue en multipliant le débit d'eau utilisé (82 L/min) par le temps de séjour nécessaire (263 min), est égale à environ 22 m³. Diverses possibilités d'aménagement sont possibles selon la configuration du site. Cependant, afin d'en augmenter l'efficacité, le bassin de sédimentation devrait être séparé en deux pour profiter de l'effet rideau. Deux bassins de 11 m³ chacun pourraient donc être installés en série. Afin d'évacuer les boues au fond des bassins de sédimentation, un système de retrait des boues automatisé devrait être installé. Les boues devraient par la suite être entreposées sur une plate-forme étanche ou dans un bac étanche.

Le trop-plein des bassins de sédimentation hors sol serait ensuite dirigé vers une lagune. Dans le cas du site pilote 3, la lagune existante d'une capacité de 108 m³ pourrait être utilisée. En divisant la capacité de la lagune par le débit d'eau utilisé, un temps de séjour de 22 heures est obtenu. Cela représente un temps de séjour de 2,7 jours, après avoir divisé le temps de séjour en heures par la durée d'une journée de lavage typique, soit 8 heures.

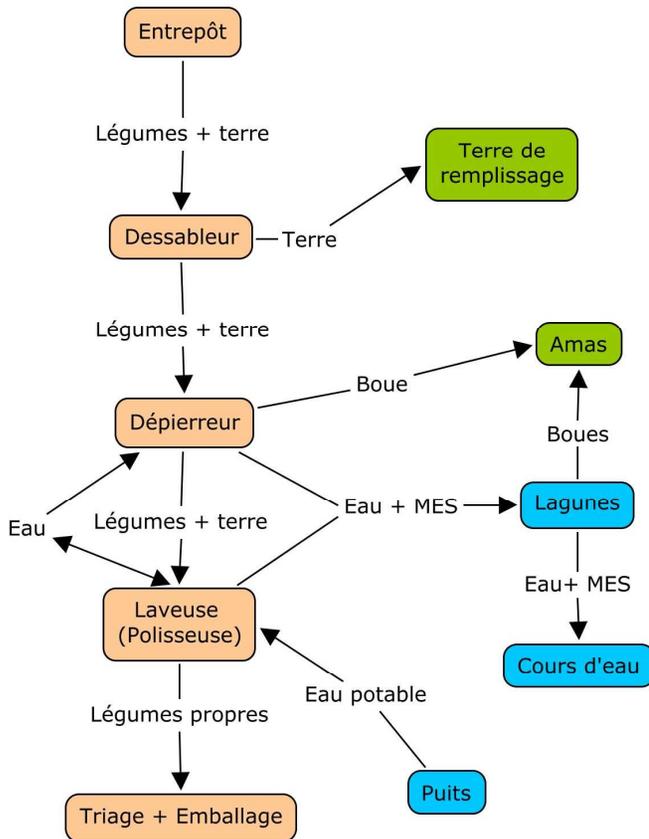
La deuxième lagune existante de 30 m³ serait utilisée comme clarificateur. Elle permettrait ainsi d'obtenir un temps de séjour supplémentaire de 6 heures, pour un temps de séjour total de 3,5 jours dans les deux lagunes.

L'efficacité estimée de la solution proposée est présentée au tableau 22 pour les MES, la DBO₅ et le P_{total}. Les caractéristiques de l'effluent initial représentent les concentrations moyennes mesurées lors de chaque essai. Les pourcentages d'abattement moyens du système de traitement des cinq séries d'échantillonnage ont été utilisés pour calculer l'efficacité des bassins de sédimentation et la concentration de chaque paramètre à leur sortie.

L'efficacité de la lagune a été estimée. Selon les théories de conception d'un système de traitement par boues activées, la lagune devrait permettre d'abaisser la DBO₅ ainsi que le P_{total}. Enfin, le temps de séjour total de la lagune de 3,5 jours pourrait permettre d'abattre d'environ 60 % les particules d'argile résiduelles dans l'eau de lavage. La solution proposée au site 3 pourrait donc permettre d'abattre les MES de 1 330 à 250 mg/L, la DBO₅ de 73 à moins de 53 mg/L et le P_{total} de 2,81 à moins de 1,77 mg/L.

Site 3

Chaîne actuelle



Option de traitement

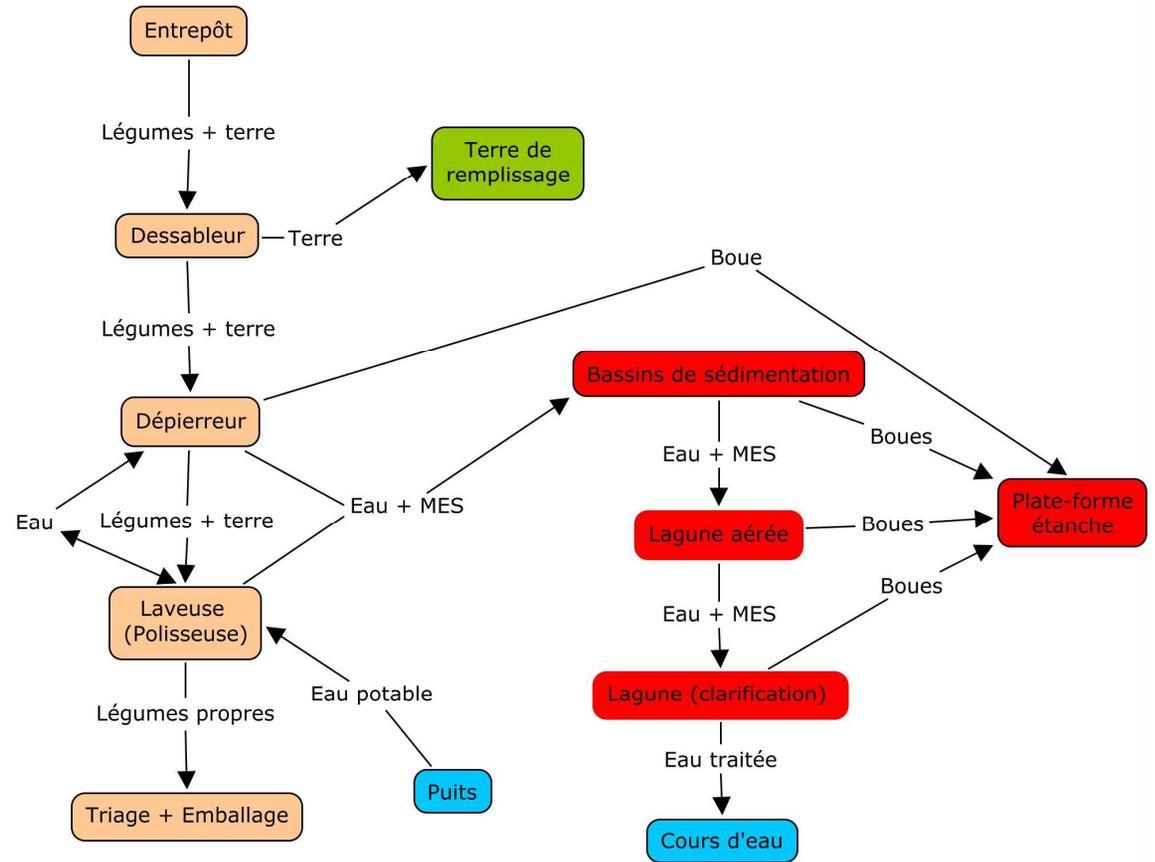


Figure 31. Schéma des installations de lavage actuelles au site 3 ainsi que l'option de traitement.

Tableau 22. Efficacité estimée du système de la solution de traitement proposée au site 3.

Paramètres	Effluent initial	Bassins hors sol		Lagunes	
	Concentration mg/ L	Abattement %	Concentration mg/ L	Abattement %	Concentration mg/ L
MES	1 330	53	625	60	250
DBO ₅	73	28	53	--	< 53
P _{total}	2,81	37	1,77	--	< 1,77

8. Analyse des coûts d'abattement

8.1. Mise en contexte

Il est connu, de la littérature économique, que la réduction de la pollution est considérée comme soumise aux mêmes forces que tout autre marché, c'est-à-dire en fonction d'une demande et d'une offre de réduction de la pollution (Randall 1987, Perman et al. 1996). Aussi, un prix d'équilibre peut être découvert lorsque cette demande et cette offre s'égalisent, tel qu'il est illustré à la figure 32.

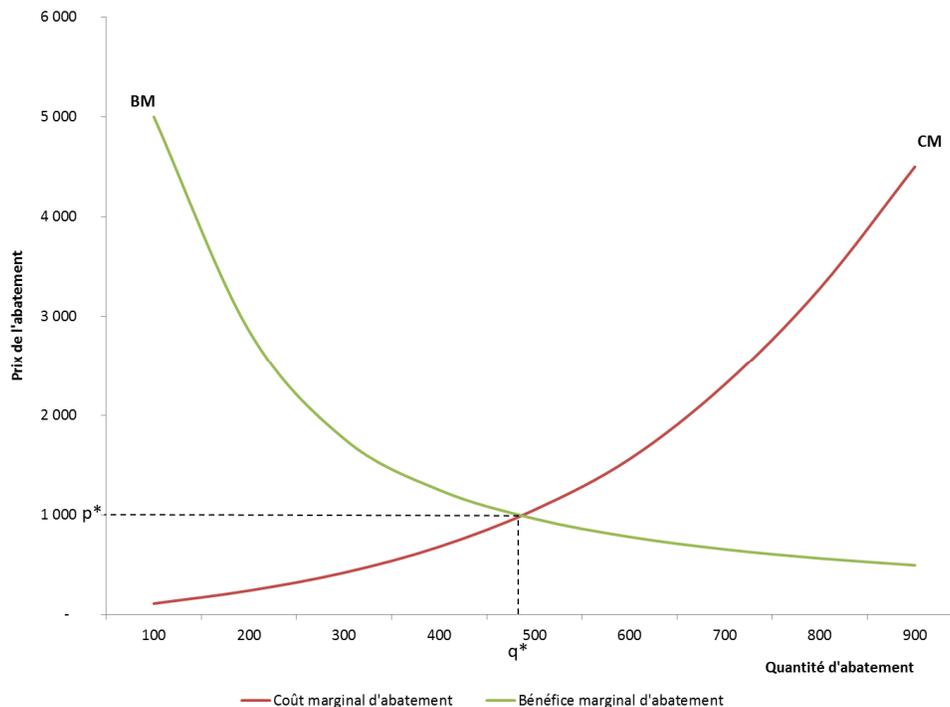


Figure 32. Bénéfices et coûts d'abattement marginaux de la pollution

Cette illustration montre à quoi s'attendre, sur une base théorique, en matière d'évolution des coûts et des bénéfices associés à la réduction de la pollution. La demande pour la réduction de la pollution est illustrée par la courbe des bénéfices marginaux (BM) et l'offre de réduction l'est par la courbe des coûts marginaux (CM). La courbe des BM décroissante illustre le fait que les bénéfices retirés à réduire les premières unités de pollution sont plus grands que pour les dernières unités, car le risque de dommage

public (ex. : risque sur la santé publique) décroît au fur et à mesure de la dépollution. Inversement, la courbe croissante des CM illustre le fait qu'il est plus difficile et plus coûteux pour les entreprises de réduire les dernières unités de pollution que les premières. La convexité des deux courbes illustre le principe théorique que les BM et les CM varient de façon non-linéaire. Enfin, le prix $p^* = 1\ 000$ illustre le prix d'équilibre et la quantité $q^* \approx 500$, la quantité d'équilibre.

Dans ce projet, l'objectif de l'analyse économique était de vérifier si le traitement des eaux de lavage suivait le patron des CM illustré dans la figure 32. Cette question est importante car si elle se vérifiait, les investissements nécessaires à l'abattement des dernières unités de contaminants exigeraient des coûts d'investissement reliés à la dépollution qui seraient plus élevés en raison des procédés et des équipements supplémentaires pour réduire les unités incrémentielles de contaminants. Or, il est important pour les producteurs, comme tous les intervenants, de connaître comment évoluent les coûts d'abattement marginaux en fonction des différents traitements proposés et les équipements qui y sont associés.

8.2. Méthode et résultats

Dans la chaîne de conditionnement des légumes que l'on peut retrouver sur une entreprise maraîchère, les contaminants pouvant se retrouver dans les eaux de lavage sont retirés lors de trois principales étapes. En premier lieu, on retrouve des équipements de dessablage par où passent les légumes avant l'étape du lavage et où certains contaminants sont retirés avec la terre qui est amassée à cette étape. Ensuite, les légumes subissent l'intervention du lavage en soit et c'est à cette étape que les contaminants attachés aux particules de sol qui persistent sur les légumes vont se mélanger à l'eau de lavage. Cette eau est alors dirigée vers des bassins de sédimentation (étape « sédimentation ») pour ensuite être rejetée vers des lagunes (étape « lagune »).

Les coûts d'abattement marginaux des contaminants peuvent donc être compilés et analysés selon ces trois étapes de réduction des contaminants. Pour y arriver, le phosphore (P) a été choisi comme le contaminant de base à chaque étape. En effet, contrairement au P, les matières en suspension (MES) et la DBO₅ ne peuvent être comparées aux trois étapes car elles ne sont pas présentes au dessablage. Sur la base de la production de légumes annuelle de chaque site ainsi que le sol retiré au dessablage et l'eau utilisée au lavage, il est possible de compiler les quantités d'abattement de P à chaque étape. Ces quantités sont présentées au tableau 23.

Tableau 23. Abattement annuel du phosphore par site d'essai et par étape de conditionnement des légumes

Information sur l'abattement	Site 1	Site 2	Site 3
Analyses du sol en P _{total} récupéré au dessablage (mg/ kg sol)	136,75	304,00	68,73
Abattement en P au dessablage (kg/ an) ^a	12,85	N/A	0,59
Abattement en P au bassin de sédimentation (mg/ L)	9,50	0	1,04
Abattement en P au bassin de sédimentation (kg/ an) ^b	57,01	0	5,38
Abattement en P à la lagune (mg/ L)	6,90	1,79	0
Abattement en P à la lagune (kg/ an)	41,41	43,65	0

- La quantité de sol prélevée annuellement au dessablage se base sur les données du bilan de masse et des volumes de production de légumes annuels tels que déclarés par les producteurs. Dans le souci de préserver la confidentialité des données de production, le calcul complet n'est pas présenté dans ce tableau.
- L'eau de lavage utilisée annuellement est calculée sur la base des volumes de production de légumes annuels tels que déclarés par les producteurs. Dans le souci de préserver la confidentialité des données de production, le calcul complet n'est pas présenté dans ce tableau.

Les résultats présentés au tableau 23 montrent que lorsque l'on examine ceux des sites 1 et 3, l'efficacité d'abattement du P pourrait être cinq à dix fois plus grande à la sédimentation en bassin, comparativement à l'abattement au dessablage. En observant ensuite les résultats d'abattement du P en lagune pour le site 1, l'efficacité d'abattement y diminue par rapport à l'étape des bassins de sédimentation, alors que l'abattement en lagune est de moins de 75 % celui en bassin de sédimentation.

Ces résultats sont relativement révélateurs de l'ordre des investissements qui devraient être faits sur la seule base de l'abattement en P. Ainsi, l'essentiel de ces investissements devraient porter sur l'étape de la sédimentation en bassin. Cela ne veut pas dire qu'il ne faille pas investir à l'étape de dessablage. Cependant, toute proportion gardée, l'investissement au dessablage devrait être relativement limité si un producteur a seulement à l'esprit le coût marginal d'abattement en P à chaque étape de la chaîne.

L'option de traitement présentée à la section 5.4 peut être utilisée pour illustrer la situation. On sait que cette option préconise, en plus du dessablage, l'utilisation de deux bassins de sédimentation entre l'étape de lavage et du rejet des eaux de lavage vers la lagune. Selon différentes sources d'information consultées, on peut supposer alors un investissement de 15 000 \$ aux bassins de sédimentation et de 20 000 \$ à l'étape de la lagune. Le montant associé aux bassins de sédimentation inclut les bassins en soit ainsi qu'un système pour en retirer les sédiments de même qu'une pompe pour transporter l'eau de la laveuse aux bassins. Pour ce qui est de l'investissement à la lagune, celui-ci consiste essentiellement au coût d'acquisition d'un aérateur. L'amortissement associé aux bassins est établi à 15 ans tandis que celui relatif à l'aérateur de la lagune est de 20 ans. Finalement, un coût annuel de 1 000 \$ est ajouté pour l'entretien de la lagune, en supposons des travaux de reprofilage qui dureraient environ une journée à 150 \$/heure. Ces données de base sont reportées dans le tableau 24 et elles servent au calcul du coût d'acquisition maximal d'un dessableur.

Tableau 24. Calcul du coût d'acquisition optimal d'un dessableur sur la base de l'efficacité d'abattement.

Équipement/infrastructure	Coût d'acquisition	Amortissement annuel	Autre coût annuel	Total des coûts annuels	Abattement P (kg/an)	Coût d'abattement (\$/kg P)
Pompe	5 000 \$	500 \$		500 \$		
Bassin de sédimentation 1	5 000 \$	333 \$		333 \$	57,01	5,85 \$
Bassin de sédimentation 2	5 000 \$	333 \$		333 \$	57,01	5,85 \$
Lagune (aérateur)	20 000 \$	1 000 \$	1 000 \$	2 000 \$	41,41	48,30 \$
			Total	3 167 \$	155,43	20,37 \$

Ce coût d'acquisition se fonde sur un coût d'abattement qui serait le même au dessablage que lors des étapes en post-lavage. Ainsi, tel que présenté dans le tableau 24, le coût d'abattement du P en post-lavage est d'un peu plus de 20,00 \$/ kg P. En considérant une période d'amortissement de 15 ans et un abattement annuel du P au dessablage de 12,85 kg, le coût d'acquisition maximal pour un dessableur s'élèverait à pratiquement 4 000 \$¹. Ici, les coûts d'énergie ne sont pas inclus, car ils étaient d'abord jugés comme relativement peu importants en plus d'être difficiles à estimer pour chaque étape individuellement. Dans le même ordre d'idée, les coûts liés à la gestion du sol issu du dessablage, ainsi que des boues dans les bassins de sédimentation n'ont pas été considérés. La gestion des boues dans les bassins et les lagunes est toutefois plus complexe et coûteuse que la gestion du sol sec, renforçant l'idée d'optimiser les étapes du lavage en phases sèches.

Ces résultats signifient donc que pour une entreprise maraîchère du type du site 1, avec la même option de traitement, les mêmes données de production et la même efficacité d'abattement, l'investissement dans un dessableur devrait se limiter à environ 4 000 \$. Relativement aux références obtenues sur le coût d'acquisition moyen d'un dessableur, ce montant est peu élevé, car le coût d'un dessableur se situerait plutôt entre 7 000 \$ et 15 000 \$ selon ses dimensions et ses caractéristiques.

9. Diffusion des résultats

Les activités de diffusion réalisées dans le cadre de ce projet sont présentées à la page suivante. De plus, les documents liés à ces activités sont présentés à l'annexe 2.

¹ (20,37 \$/kg P * 12,85 kg P/an) * 15 ans = 3 926 \$

DIFFUSION DES RÉSULTATS

<i>Activités prévues de l'ANNEXE A</i>	<i>Activités réalisées</i>	<i>Description (thème, titre, endroit, etc.)</i>	<i>Date de réalisation</i>	<i>Nombre de personnes rejointes</i>	<i>Visibilité accordée au PCAA (logo, mention)</i>
Fiche synthèse (français et anglais)	Fiche synthèse (français et anglais)		Janvier 2014		Logo et mention
Article dans le journal Primeurs	Article dans le journal Primeurs maraîchères	« Problématique des eaux de lavage des légumes-racines »	Octobre 2013, vol.1, no 1		logo
Conférence vulgarisée	Association des Ingénieurs en Agroalimentaire du Québec, dans le cadre de l'Assemblée générale annuelle et d'un mini-symposium	« Gestion de l'eau de lavage des légumes-racines : état de la situation et solutions » Québec	15 mai 2013	40	
Conférence scientifique	Société canadienne de génie agroalimentaire et de bioingénierie	« Management of Wastewater Produced by On Farm Root Crop Washing » Saskatoon	8 juillet 2013		
Formation (portes ouvertes)	Visite d'un des 3 sites expérimentaux par les principaux intervenants du projet		17 septembre 2013	10	Non applicable

10. Conclusions

Ce projet a permis de préciser des options de traitement de l'eau issue du lavage des légumes racines, en se basant sur trois cas réels représentant 1) le lavage à la ferme de légumes racines, incluant la betterave, produits en terre minérale; 2) le lavage de légumes racines issus de plusieurs sites de production en terre noire; 3) le lavage à la ferme de légumes racines produits en terre minérale.

Il permettra de guider les producteurs agricoles dans le choix des interventions à mettre en place pour pouvoir procéder au rejet au cours d'eau des eaux issues du lavage des légumes racines. Étant donnée la très grande variabilité entre les sites, les solutions envisagées doivent être considérées comme des exemples et servir de bases de réflexion lors d'éventuels changements à une chaîne de lavage des légumes racines.

Les recommandations issues de ces travaux sont :

- 1) Chaque entreprise devrait connaître les caractéristiques des eaux issues du lavage des légumes de façon à définir les efforts nécessaires à fournir quant à l'abattement des paramètres considérés par le MDDEFP pour le rejet dans l'environnement.
- 2) Le dessablage à sec devrait être favorisé dans la majorité des entreprises afin de faciliter la manutention des solides extraits, de réduire la quantité d'eau requise pour le lavage et de diminuer la dimension des bassins de sédimentation ou aérés. L'investissement relié à ce dernier doit toutefois tenir compte de plusieurs paramètres dont l'espace disponible dans l'entreprise pour en faire l'installation, ainsi que l'efficacité d'abattement des contaminants tels que le phosphore.
- 3) Les volumes d'eau potable utilisés devraient être diminués, soit en réduisant les débits, soit en favorisant une plus grande recirculation de l'eau dans la première partie de la laveuse. Il ne faut pas oublier que le dernier rinçage des légumes doit se faire avec de l'eau de qualité potable.
- 4) En terre minérale, la sédimentation des effluents permet d'abattre les contaminants à des niveaux acceptables pour le rejet dans l'environnement. Une sédimentation primaire en bassins étanches hors sol permet de réduire le volume requis des lagunes creusées en plein sol et ainsi de réduire les superficies et l'entretien nécessaires. L'efficacité des bassins est accrue s'ils sont séparés en deux afin de bénéficier de l'effet rideau.
- 5) Le traitement du pigment de la betterave nécessite une étape de traitement en bassin aéré.
- 6) En terre noire, la sédimentation et la centrifugation sont peu efficaces pour abattre la majorité des contaminants puisque ceux-ci sont sous des formes solubles. Afin d'éviter l'ajout de coagulants, le séjour en lagune aérée est approprié. Celle-ci devrait être précédée d'une sédimentation primaire en bassins hors sol afin de retirer les particules minérales et les particules organiques rapidement sédimentables. L'ajout d'un dessableur permettra de réduire le volume du bassin aéré, ce qui contribuera à diminuer les superficies occupées, les coûts d'entretien et la puissance de l'aérateur.

Afin d'assurer la pérennité du projet, le comité regroupant des producteurs agricoles et des intervenants du MAPAQ, du MDDEFP, de l'APMQ et de l'IRDA continuera d'être actif et assurera la communication entre les intervenants afin de proposer des solutions applicables pour le producteur agricole tout en répondant aux critères environnementaux.

La mise en place des interventions à la ferme permettra de valider l'efficacité et l'applicabilité des pratiques sur une base quotidienne et prolongée. Ainsi, il sera nécessaire d'acquérir et adapter des installations pour assurer, par exemple, le pompage de l'eau sortant de la laveuse vers les bassins de sédimentation primaire, la protection contre le gel de celles-ci, le procédé de vidange des solides sédimentés dans les bassins hors sol, ainsi que la méthode d'aération des lagunes.

11. Sommaire des accomplissements du projet

L'eau issue du lavage des légumes racines contient des niveaux de composés tels que le phosphore et les matières en suspension trop élevés pour en faire le rejet au cours d'eau. Il est nécessaire de mettre en place des procédés de traitement qui, tout en réduisant l'impact environnemental des rejets, pourront être adoptés par les producteurs agricoles.

Ce projet a été mis en place afin de trouver des solutions efficaces et applicables à l'échelle de la ferme permettant le rejet au cours d'eau de l'eau issue du lavage des légumes racines. Des suivis de différents contaminants tels que le phosphore, les matières en suspension et la DBO₅ ont été faits dans trois entreprises agricoles dont une partie des rejets ont été traités par sédimentation et/ou aération. Ces entreprises représentaient : 1) le lavage à la ferme de légumes racines, incluant la betterave, produits en terre minérale; 2) le lavage de légumes racines issus de plusieurs sites de production en terre noire; 3) le lavage à la ferme de légumes racines produits en terre minérale. Aussi, une chaîne de lavage expérimentale a permis de documenter les volumes d'eau nécessaires pour le lavage ainsi que l'effet de la sédimentation et/ou l'aération sur les contaminants. Ces simulations ont permis de proposer une chaîne de traitement pour chaque entreprise qui permettrait un meilleur contrôle des contaminants.

Ce projet a également permis de préciser les voies de traitement qui devraient être envisagées selon les pratiques et opérations en place dans les entreprises. Ainsi, le dessablage à sec devrait être favorisé dans la majorité des entreprises afin de faciliter la manutention des solides extraits, de réduire la quantité d'eau requise pour le lavage et de diminuer la dimension des bassins de sédimentation ou aérés. L'investissement relié à ce dernier doit toutefois tenir compte de plusieurs paramètres dont l'espace disponible dans l'entreprise, ainsi que l'efficacité d'abattement des contaminants. L'utilisation d'eau potable doit également être réduite, que ce soit en réduisant les débits ou en favorisant la recirculation de l'eau dans les premières parties de la laveuse.

En terre minérale, la sédimentation permet d'abattre les contaminants à des niveaux acceptables pour le rejet dans l'environnement. Une sédimentation primaire en bassins étanches hors sol permet de réduire le volume requis des lagunes creusées en plein sol et ainsi de réduire les superficies et l'entretien nécessaires. L'efficacité des bassins est accrue s'ils sont séparés en deux sections afin de bénéficier de l'effet rideau. Le traitement du pigment de la betterave nécessite une étape de traitement en bassin aéré.

En terre noire, la sédimentation et la centrifugation sont peu efficaces pour abattre la majorité des contaminants puisque ceux-ci sont sous des formes solubles. Afin d'éviter l'ajout de coagulants, le séjour en lagune aérée est approprié. Cette étape devrait être précédée d'une sédimentation primaire en bassins hors sol afin de retirer les particules minérales et les particules organiques rapidement sédimentables. L'ajout d'un dessableur permettra de réduire le volume du bassin aéré, ce qui contribuera à diminuer les superficies occupées, les coûts d'entretien et la puissance de l'aérateur.

Bien que des options de traitement aient été proposées, celles-ci doivent être validées pour leur utilisation à l'échelle de la ferme sur une base quotidienne et une longue période. De plus, en raison de l'importante variabilité entre les sites, l'extrapolation des options présentées à d'autres entreprises est également difficile. Parmi les éléments qui devront être résolus lors d'une implantation à la ferme, notons le pompage de l'eau sortant de la laveuse vers les unités de sédimentation primaire, la protection contre le gel de celles-ci, la méthode de vidange des solides sédimentés dans les bassins hors sol, ainsi que la méthode d'aération des lagunes.

12. Plan de financement et conciliation des dépenses

Les documents sont joints à l'envoi de ce rapport.

Dernière mise à jour du formulaire par le CDAQ : 17 mars 2010

Références

- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2012. *Étangs et puits - Coût du matériel et de l'excavation. AGDEX 754*. CRAAQ, 3 pages.
- Côté, C., M. Généreux, S. Godbout et F. Pelletier. 2011. Gestion environnementale de l'eau en production maraîchère – Analyse et revue de littérature sur la gestion des eaux de lavage des légumes-racines. IRDA. 25 pages.
- Evupaleau. 2004. Systèmes d'épuration de petites tailles. Belgique. 44 pages.
- Généreux, M., J.P. Larouche, C. Côté, A. Ramirez, F. Pelletier, S. Godbout, M. Béliveau Simoneau, S. Karasira. 2013. Propositions de solutions intégrées pour une gestion durable des eaux de lavage de légumes. IRDA, 52 pages.
- Guillou, M. 2013. Fiche technique – Bassin de stockage et sédimentation : Concept et dimensionnement. MAPAQ. 16 pages.
- Hamel, C., M. Généreux et C. Côté. 2010. Gestion environnementale de l'eau en production maraîchère : Phase 1. Rapport final de projet 1er mars 2009 – 31 mars 2010. Fédération des producteurs maraîchers du Québec (FPMQ). 17 pages et annexes.
- Kern, J., W. Reimann et O. Schluter. 2006. Treatment of recycled carrot washing water. *Environmental Technology* 27: 459-466.
- Martin, D.-Y., F. Léveillé, C. Landry, R. Carrier. 2006. Installation et essais à la ferme d'un système de separation solide-liquide du lisier de porc complémenté par la stabilisation et l'entreposage de la fraction solide. Rapport final de projet CORPAQ # 703015, 100 pages.
- MDDEFP. 2012. Guide pour l'étude des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées d'origine domestique. Direction des politiques du secteur municipal – Service de l'expertise technique en eau. Accessible au : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/domestique/index.htm>.
- Moletta, R. 2006. Gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires. Éditions : Techniques et Documentation, Paris. 720 pages.
- Moss, J. A., D. D. Steele et D. C. Kirkpatrick. 2002. Small-Scall Mechanical Carrot washer for Research Sample Preparation. *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 18 (2); 235-241.
- Pelletier, F., S. Godbout, C. Côté, M. Généreux, J.-P. Larouche, M. Girard et M. Belzile. 2013. Predicting wash water characteristics produced by root crop washing processes. Présenté au Congrès annuel 2013 de la CSBE|SCGAB à Saskatoon, 7 au 10 juillet 2013. 9 pages.
- Perman, R., Y. Ma et J. McGilvrey. 1996. *Natural Resource & Environmental Economics*. Addison Wesley Longman Limited. 396 p.
- Randall, A. 1987 *Resource Economics. An Economic Approach to Natural Resource and Environmental Policy. Second Edition*. John Wiley & Son. 434 p.
- Reith, C., B. Birkenhead. 1998. Membranes enabling the affordable and cost effective reuse of wastewater as an alternative water source. *Desalination* 117: 203-210.
- Safe Drinking Water Foundation. 2010. WasterWater Treatment. [En ligne], page consultée 11 juin 2013, lien web : <http://www.safewater.org/images/WastewaterTreatment.pdf>.

Annexe 1 – Calculs de l'efficacité de bassin de traitement par boues activées et de besoins en O₂

Équation du calcul des besoins en oxygène

$$BO = a'.Q(I_0 - I_s) + b'.X.V$$

Où

a' = Coefficient de consommation d'oxygène à des fins énergétiques (kgO₂/kgDBO₅ éliminé)

b' = Coefficient de consommation d'oxygène pour la respiration endogène ou autooxydation (kgO₂/kg MVES)

Q = Débit journalier à traiter (m³)

I_s = Concentration de l'effluent traité (kg DBO₅)

I₀ = Concentration de l'effluent à l'entrée (kg DBO₅)

X = Concentration en MVES dans le bassin d'aération (kg/m³)

V = Volume du bassin d'aération (m³).

a' et b' sont des coefficients respiratoires déterminés en laboratoires par des techniques respiratoires et peuvent être estimés, selon que le système soit en condition de faible charge (a' = 0,66 et b' = 0,07) en moyenne charge (a' = 0,55 et b' = 0,08) ou en forte charge (a' = 0,5 et b' = 0,12).

Équation de dimensionnement et d'estimation de l'efficacité de bassin de traitement par boues activées

Le type de charge d'un système de traitement par boues activées (un indicateur de son efficacité) est déterminé par la charge massique appliquée (C_{ma}, en kg DBO₅ / m³.j) calculée selon l'équation suivante:

$$cma = \frac{Q.I_0}{X.V}$$

Tableau A1. Conditions de fonctionnement d'un bassin d'aération d'une station à boues activées (adapté de Moletta, 2006)

	Faible charge	Moyenne charge	Forte charge
Charge massique appliquée (C _{ma})	C _{ma} < 0,10 C _{ma} < 0,07 (aération prolongée)	0,15 < C _{ma} < 0,40	0,4 < C _{ma} < 1,2
Remarque	Rendement ≥ 90 %	Rendement 80-90 %	Rendement < 80 %

Exemple de calculs – Solution de traitement au site 2.

Calcul de la charge massique appliquée :

Paramètres:

Débit journalier à traiter (Q) : 214 m³/j

Volume du bassin d'aération (V) : 640 m³

Concentration en DBO₅ à l'entrée (l₀) : 260 mg/ L = 0,26 kg/m³

Concentration en MVES dans le bassin d'aération (X): 0,134 kg/m³

$$cma = \frac{214 \times 0,26}{0,134 \times 640} = 0,65 \text{ kg DBO}_5/\text{m}^3 \cdot \text{j}$$

Ainsi, un système de traitement par boues activée fonctionnerait en forte charge et son efficacité serait de moins de 80 %.

Calcul des besoins en oxygène :

Paramètres :

a' = 0,5 kgO₂/ kgDBO₅

b' = 0,12 kgO₂/ kg MVES)

l_s = 55 mg/ L = 0,055 kg DBO₅/ m³)

$$BO = 0,5 \times 214 \times (0,26 - 0,055) + 0,12 \times 0,134 \times 640 = 32,2 \text{ kg}_{\text{O}_2} / \text{j}$$

$$BO = 32,2 \frac{\text{kg}_{\text{O}_2}}{\text{j}} \frac{1 \text{ m}^3_{\text{O}_2}}{1,354 \text{ kg}_{\text{O}_2}} \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \frac{1 \text{ jour}}{24 \text{ h}} \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = \frac{16,5 \text{ L}_{\text{O}_2}}{\text{min}} \frac{100 \text{ L}_{\text{air}}}{21 \text{ L}_{\text{O}_2}} = 79 \text{ L}_{\text{air}} / \text{min}$$

$$\text{Taux d'aération} = \frac{79 \text{ L}_{\text{air}}}{\text{min}} \frac{1}{640 \text{ m}^3_{\text{eau}}} \frac{1 \text{ m}^3_{\text{eau}}}{1000 \text{ L}_{\text{eau}}} = 0,0001 \text{ L}_{\text{air}} / \text{L}_{\text{eau}} - \text{min}$$