

Zeitschrift: Yearbook of socioeconomics in agriculture : Agrarwirtschaft und Agrarsoziologie = économie et sociologie rurales
Herausgeber: Schweizerische Gesellschaft für Agrarwirtschaft und Agrarsoziologie
Band: - (2012)

Artikel: From Ash to Cash!
Autor: Tombez, Grégoire
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-966714>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 22.03.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

From Ash to Cash!

Grégoire Tombez

Abstract

Le phosphore (P) est un élément vital pour tous les organismes. L'approvisionnement actuel en engrais phosphaté est assuré principalement par l'extraction de roches mais cette ressource ne se renouvelle pas. La firme ASH DEC a développé une technologie qui permet d'extraire les métaux lourds des cendres de boues d'épuration et de produire ainsi un substrat riche en phosphate et en calcium. Cette étude se compose de l'analyse économique de cette technologie.

Les objectifs sont de présenter la stratégie d'investissement optimale et de tester la rentabilité économique du procédé ainsi que sa sensibilité face à des conditions cadres changeantes. Pour atteindre ces objectifs, un modèle d'optimisation linéaire a été développé.

Dans les conditions cadres de février 2010, malgré une stratégie d'investissement optimale, la construction et l'exploitation d'une usine de production ne permettraient pas de rentabiliser l'investissement et généreraient donc des pertes. La stratégie d'investissement qui minimise les pertes est la construction d'une unique usine à Oftringen transformant deux tonnes de cendre par heure. La perte annuelle moyenne s'élèverait à CHF 515'300. La rentabilité du procédé est très sensible aux changements des conditions cadres (p.ex. le prix du phosphore) et peut varier amplement et très rapidement. Un tel investissement peut donc devenir très vite rentable mais comporte aussi d'importants risques financiers.

Keywords: *boues d'épuration, métaux lourds, recyclage, phosphore, rentabilité, Phoskraft*

JEL classification: Q12

1. Introduction

Le phosphore (P) est un élément vital pour tous les organismes. Il fait partie intégrante de toutes les cellules vivantes. Sous forme de phosphate, il est un composant de l'acide désoxyribonucléique (ADN), source de l'information génétique de tout être vivant. Il participe aussi activement à la transmission d'énergie dans les cellules en tant que composant de l'adénosine triphosphate (ATP) et du nicotinamide adénine di nucléotide phosphate (NADPH). Dans les chloroplastes, lors de la photosynthèse, l'ATP et le NADPH sont des maillons indispensables dans la formation de matière organique (Karp 2004). Les plantes absorbent le phosphore exclusivement à partir du sol. Chaque récolte induit donc la nécessité de remplacer le phosphore prélevé avec des engrais minéraux ou organiques (Spiess 1999 et GRUDAF, 2009). L'apport en engrais phosphaté est donc une nécessité pour garantir la sécurité de l'alimentation de la population mondiale ou pour proposer des sources d'énergie alternatives et renouvelables (Smill, 2000). L'approvisionnement actuel en engrais phosphaté est assuré principalement par l'extraction de roches phosphatées mais cette ressource ne se renouvelle pas; sa durabilité n'est donc pas assurée (Steen 1998 et Smill, 2000). L'analyse du cycle du phosphore en Suisse démontre une accumulation importante de phosphore dans les déchets produits à partir des boues d'épuration (Binder, De Baan et al. 2009). Les boues d'épuration contiennent, certes, des substances nutritives nécessaires à la croissance des plantes mais aussi des métaux lourds, des agents pathogènes et des polluants organiques provenant des ménages et de l'industrie (Lötscher, 1999). Pour cette raison, il existe depuis 2006 une interdiction générale d'épandage des boues d'épurations en Suisse (OFEV 2004). Chaque année, les stations d'épurations suisses produisent environ 4 millions de tonnes de boues liquides, soit environ 210'000 tonnes de matières sèches (OFEV 2008). Une fois déshydratée, les boues doivent être incinérées dans des mono-incinérateurs¹ ou dans les incinérateurs d'ordures ménagères. L'incinération permet d'éliminer les agents pathogènes et les polluants organiques; les cendres résultantes sont ensuite mises en décharge. Si les boues déshydratées sont ensuite séchées, il est possible de les incinérer

¹ Un mono-incinérateur est un incinérateur entièrement dédié à l'incinération des boues d'épurations; les autres déchets sont incinérés séparément. Les cendres ainsi obtenues résultent exclusivement des boues d'épuration.

dans les cimenteries (OFEV 2004). Les filières d'élimination des boues disponibles actuellement ne représentent pas une solution durable concernant le phosphore. De ce fait, l'agriculture suisse est contrainte d'importer des engrais phosphatés pour couvrir le besoin des cultures (Binder, De Baan et al. 2009). Le recyclage du phosphore contenu dans les cendres de boues d'épuration permettrait d'éviter une accumulation du phosphore dans les décharges et augmenterait ainsi la durabilité dans l'approvisionnement suisse en phosphore.

La firme ASH DEC a développé un procédé qui permet d'extraire les métaux lourds des cendres des boues d'épuration. Le procédé de transformation des cendres proposé par ASH DEC peut être divisé en quatre blocs distincts (Berner, 2008 et Hermann, 2009). La préparation et le conditionnement des cendres constituent le premier bloc. Le second bloc comprend la manipulation thermique et chimique des cendres qui permet de séparer les métaux lourds du substrat. Dans le troisième bloc, la concentration en phosphore du produit est ajustée pour correspondre à la demande. Enfin, le quatrième bloc comprend la filtration et la purification des gaz émis avant le rejet dans l'atmosphère. Le produit final, Phoskraft, est une poudre contenant 26% de P_2O_5 et dont la concentration des divers métaux lourds se situe en dessous de toutes les valeurs limites fixées par la Confédération. Le processus décrit ci-dessus permet d'établir une fonction de production qui permet de calculer les intrants nécessaires en fonction de la quantité et de la qualité des cendres travaillées. Ces quantités sont basées sur l'expérience d'ASH DEC accumulée sur leur installation pilote en Autriche. Ainsi, pour une tonne de cendres transformées, les additifs suivants sont nécessaires: 72 kg de chlorure de magnésium, 125 kg d'adsorbant ASH DEC OEM® et 80 kg d'hydroxyde de calcium (adsorbant). Le chlorure de magnésium, avec les chlorures recyclés dans le bloc 4 (366 kg/t de cendre), sont mélangés avec les cendres (Bloc 1). Une tonne de cendres génère donc 1.438 t de mélange qui va entrer dans le four rotatif (Bloc 2). Le four rotatif consomme 450 KWh de gaz naturel et 84 Nm³ d'oxygène liquide par tonne de mélange et les divers travaux (mélange des cendres, manutention, système d'échappement des gaz) nécessitent 50 KWh d'électricité par tonne de mélange. Les deux types d'adsorbants sont ensuite insérés dans le processus de purification des gaz (Bloc 4). En fonction de la masse des cendres travaillées et de leur concentration en phosphore, il est possible de déduire directement la quantité d'additifs, d'énergie et de superphosphate triple (TSP) indispensa-

bles à l'obtention du produit fini. La quantité de TSP doit être adaptée selon la formule suivante:

$$QTSP = (CCi - 1.247 * \frac{CCe}{FM}) / (0.87 * (CTSP - CCi))$$

Où **QTSP** est la quantité de TSP / tonne de cendre transformée, **CCi** la concentration cible en P_2O_5 du produit fini, **1.247** et **0.87** des facteurs de perte de poids dans le réacteur, **CCe** la concentration en P_2O_5 des cendres, **FM** le facteur de masse dû à l'insertion des additifs et **CTSP** la concentration en P_2O_5 du TSP.

Par exemple, pour des cendres comprenant 18% de P_2O_5 et une concentration cible dans le produit fini de 26%, 597 kg de TSP à 46% doivent être ajoutés par tonne de cendres travaillées. Dans ces conditions, 60% du phosphore contenu dans le produit final proviennent du TSP et seulement 40% proviennent effectivement des cendres. Enfin pour moudre, mélanger et stocker le produit fini, 50 KWh d'électricité par tonne de produit fini sont consommés. Ces quantités et ces diverses formules seront utilisées dans les calculs de rentabilité.

Avant de construire une ou plusieurs usines de production, il est essentiel, pour les investisseurs, de savoir si une telle production serait capable de rentabiliser leurs investissements et de générer du profit. Le but de cette étude est de planifier la phase de production afin de tester la rentabilité de l'activité dans des conditions cadres données. Une prévision du chiffre d'affaire, des charges et du bénéfice pour une entreprise investissant dans cette production a été effectuée, dans les conditions de marché actuelles. Dans un deuxième temps, une analyse de sensibilité de la rentabilité face à des conditions changeantes a été effectuée. Les facteurs affectant la rentabilité de l'activité et leur influence ont été exposés. A partir de ces objectifs, quatre questions de recherche sont traitées dans cet article: i) Quelle est la stratégie d'investissement maximisant les bénéfices de l'exploitation du procédé ASH DEC? ii) Quel est le chiffre d'affaire, les charges et les gains auxquels peuvent s'attendre d'éventuels investisseurs? iii) Est-ce que la production de Phoskraft est rentable dans les conditions de février 2010? et finalement iv) Quels sont les facteurs qui influencent cette rentabilité et de quelle manière?

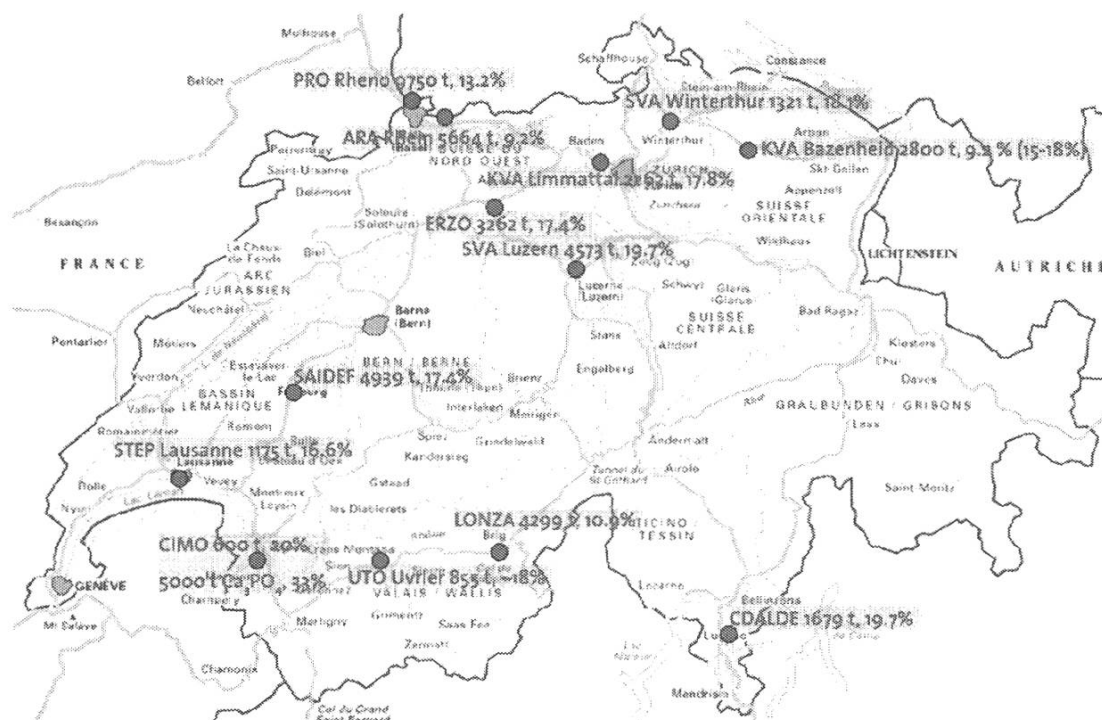
2. Méthode

Pour pouvoir planifier la phase de production et calculer la rentabilité d'une stratégie d'implantation donnée, un modèle d'optimisation linéaire a été développé. Ce modèle, nommé *Ash_to_cash*, a pour but d'intégrer les conditions cadres suisses aux calculs de rentabilité et d'investissement. Ainsi, les coûts de transport, la qualité et la disponibilité des cendres aux divers lieux d'implantations sont pris en compte. Toute l'activité économique est modélisée et simulée afin de pouvoir effectuer une prévision des résultats de l'entreprise. Vu sa grande flexibilité, le modèle est aussi d'une aide très précieuse pour effectuer l'analyse de break-even et de sensibilité des résultats. *Ash_to_cash* est un modèle mathématique qui optimise la stratégie d'implantation pour maximiser le gain de l'entreprise qui effectue les investissements et qui gère ensuite la production. Les variables libres sont les sources de cendres à exploiter, le ou les lieux d'implantation, le nombre et la taille des usines. Chaque taille implique des coûts d'investissement, un nombre d'employés et un approvisionnement en cendres spécifiques. La taille d'usine de transformation peut varier de 1.5 à 4 t de cendres transformées/heure. Le modèle a été programmé grâce à l'interface LPL et sa résolution est assurée par un solveur distribué par VirtualOptima. Pour pouvoir effectuer l'analyse de rentabilité d'une ou de plusieurs installations, de nombreux paramètres et contraintes ont dû être considérés et diverses hypothèses formulées. Ces hypothèses fixent le cadre du scénario *Fév_2010*. Elles sont basées sur les conditions cadres effectives en février 2010 et sont présentées dans les sous-chapitres suivants.

2.1. Paramètres, hypothèses et contraintes structurels

Tout d'abord, il a été admis qu'une usine de transformation des cendres doit obligatoirement être installée à proximité d'un incinérateur. Cette hypothèse est justifiée par le fait que les cendres de l'incinérateur peuvent être récupérées chaudes directement à la sortie du four. Cela permet d'économiser des coûts de transport et de réduire les coûts énergétiques de la manipulation thermique effectuée dans le bloc 2. Par ailleurs, les lieux où se trouve déjà un incinérateur de boues d'épuration sont les endroits où les habitants sont le plus familiarisés avec le recyclage des boues d'épuration et où les chances d'aboutissement du projet sont les plus grandes.

Figure 1: Carte des mono incinérateurs avec leur production annuelle [en tonne] et la qualité des cendres [en % de P2O5]. Elaboré d'après Nanzer 2009.



Les distances séparant les incinérateurs ont été mesurées à l'aide d'un service de cartographie (Google Map). La matrice des kilomètres de route séparant les incinérateurs a été utilisée pour calculer les coûts de transport des cendres induits par une quelconque stratégie d'implantation. Chacun des 13 mono incinérateurs produit une masse spécifique de cendre de boues d'épuration. Cette masse de cendres est la masse disponible pour le processus ASH DEC. Selon la provenance des boues, la concentration en phosphore dans les cendres varie assez largement. La figure 1 présente la production annuelle des 13 incinérateurs et la teneur moyenne en phosphore des cendres générées. On peut constater que les cendres ne sont pas d'égale qualité à la sortie de tous les incinérateurs. Lorsque le taux de phosphore varie dans les cendres, la quantité de TSP à insérer pour équilibrer le produit final varie également. Cette fonction de correction de la concentration de phosphore, présentée dans l'introduction, a été insérée dans le modèle.

2.2. Paramètres, contraintes et hypothèses liés aux coûts

La quantité des intrants consommés est calculée à partir de la fonction de production décrite dans l'introduction. Le prix des intrants est basé sur le prix du marché en février 2010. Ces prix ont été établis lors d'une analyse de marché antécédente réalisée dans le cadre du projet Phoskraft (Tombez, 2011). Pour permettre à une installation d'être opérationnelle, plusieurs types d'employés sont nécessaires (direction, entretien, ingénierie et manutention). En fonction de la taille de l'usine, leur nombre varie de 6 pour une petite installation (1.5 t de cendres transformées/h) à 8 pour une grande (1.5 t de cendres transformées/h)². Chaque employé représente, en moyenne, une charge salariale annuelle de CHF 130'000.–, charges sociales comprises. Le salaire brut moyen est basé sur les données de l'office fédéral de la statistique (OFS 2009). Les frais généraux comprennent les frais d'entretien et d'assurances, les coûts de décharge et les coûts d'infrastructure. Les frais annuels d'entretien et d'assurances s'élèvent à 2.7% de la valeur totale des actifs immobilisés. Les coûts de décharge sont générés par l'extraction des métaux lourds qui doivent être stockés. La fraction contenant les métaux lourds extraits représente 5% de la masse de cendre travaillée. Il n'existe, à ce jour, aucun procédé rentable pour valoriser ce sous-produit. Les coûts de décharge s'élèvent à CHF 200.–³par tonne de sous-produit générée. Les coûts d'administration et d'infrastructure couvrent les frais de bureau et de gestion et les frais de stockage et de manutention (chargeur etc.). Ils s'élèvent à CHF 400'000.–⁴par année. Les frais de commercialisation et de vente n'ont pas été pris en compte. L'hypothèse est que l'entreprise de production du Phoskraft trouve un partenaire déjà présent sur le marché pour écouler le produit à travers les canaux de distribution existants. Dans la production d'engrais minéraux, pour obtenir un produit adapté aux distributeurs centrifuges des agriculteurs, une dernière étape est nécessaire avant la commercialisation: la granulation. Pour produire les engrais composés du commerce, cette étape intervient après le mélange des différents nutriments. Le Phoskraft peut donc être inséré sous forme de poudre dans les mélanges. Les coûts de

2 Source: Estimation d'ASHDEC, 2010

3 Source: Estimation d'ASHDEC, 2010

4 Source: Estimation d'ASHDEC, 2010

granulation ne font donc pas partie des coûts de production du Phoskraft. Il existe une multitude de possibilités pour financer un projet industriel. Celle qui a été retenue est la suivante; 40% du capital initial provient de sources privées et est donc net d'intérêt; ce capital est rétribué par les résultats de l'entreprise. Les 60% restants sont prêtés par un établissement financier. Le taux d'intérêt actuel fixé pour 10 ans pour les hypothèques de ce genre se situe à 3.5%⁵. L'hypothèque n'est pas amortie les deux premières années et seuls les intérêts sont payés. Dès la troisième année, l'hypothèque est amortie linéairement sur dix ans. Depuis la troisième et jusqu'à la treizième année, l'annuité se monte donc à 10% de l'hypothèque plus les intérêts de l'hypothèque restante. Ce mode de financement a l'avantage d'exercer une charge légère sur l'entreprise mais implique que l'entreprise dispose de liquidités suffisantes pour assurer le remboursement rapide de l'hypothèque. Les coûts d'investissement n'augmentent pas linéairement avec la capacité de transformation. Par exemple, si on augmente de 1.5 tonnes par heure la capacité du four rotatif (de 2.5 à 4 tonnes/heure), son prix n'augmente que de 10%. Cette augmentation non linéaire du prix est aussi valable pour le filtre à poussière et à adsorption ainsi que pour la halle de production et ses fondations. Dans l'autre sens, si on réduit la capacité de l'installation, on ne réduit que sensiblement les coûts d'investissement. Ainsi les coûts d'investissements varient de CHF 17'400'000.– pour une petite usine (1.5 tonnes de cendre par heure) à 26'600'000 pour une grande (4 tonnes de cendre par heure) (Tombez, 2011).

2.3. Paramètres, contraintes et hypothèses liés aux recettes

Les recettes peuvent être divisées en deux catégories: La première regroupe les recettes issues de la prime de reprise des cendres de boues d'épuration. Actuellement, les cendres sont mises en décharge et les incinérateurs payent entre CHF 95.– et CHF 150.–⁶ par tonne pour s'en débarrasser. N'ayant aucune autre alternative, on peut donc estimer qu'ils sont prêts à payer le même montant à l'entreprise qui les leur débarrassera. Une prime moyenne de CHF 120.– par tonne de cendre travaillée peut être donc créditée aux recettes de l'entreprise

⁵ Source: Banque cantonale de Fribourg, conditions en février 2010

⁶ Source: Questionnaire des mono incinérateurs suisses, Nanzer, 2009

de transformation qui prend en charge les cendres. La seconde catégorie regroupe les recettes obtenues par la vente du produit fini. L'engrais est composé de calcium, de 26% de P_2O_5 et de 8% de Mg. Comme le Phoskraft se différencie peu des autres engrais phosphatés, il n'est pas possible de fixer librement son prix de vente qui est déterminé par le prix des engrais phosphatés actuellement présents sur le marché. En février 2010, la valeur d'une unité de P_2O_5 en poudre et en vrac était de CHF 1.13 (Tombez, 2011) et celle d'une unité de Mg est de CHF 0.30⁷. Une tonne de Phoskraft contient 260 kg P_2O_5 et 80 kg Mg. A prix égal avec les engrais du commerce, il peut donc être vendu à CHF 317.– la tonne sur le marché suisse. A la même époque, sur le marché européen, la valeur d'une unité de phosphore se situait à CHF 0.85.–. Cette différence s'explique par les frais de transport induit par l'importation en Suisse. Le Phoskraft peut donc être vendu à CHF 244.–/tonne sur le marché européen.

Pour modéliser la quantité demandée en suisse, différentes hypothèses ont dû être formulées. La première hypothèse est que les agriculteurs travaillant des terres alcalines seront peu intéressés par ce produit (Tombez, 2011). Ces terres représentent environ 30% des terres ouvertes suisses (GRUDAF 2009; Agricura 2010). La deuxième hypothèse se base sur la structure du marché. En effet, l'acteur principal de la distribution des engrais phosphatés en Suisse contrôle 70 à 80% de la distribution (Tombez, 2011). Si cet acteur est partenaire du projet, les concurrents ne devraient pas s'intéresser à l'achat de Phoskraft. Cela réduit la part de marché restante de 25%. Le cumul de ces deux hypothèses nous indique qu'il est possible d'acquérir une part de marché de 52.5% (5619 tonnes de P_2O_5 /année) sur le marché suisse si le prix du Phoskraft est égal à celui du TSP. Toute la production supplémentaire est exportée en Europe au prix européen. En plus des paramètres et des hypothèses décrites précédemment, différentes conditions cadres (taux de changes, coûts de transport) peuvent avoir un effet direct sur la rentabilité de l'investissement. Leurs valeurs sont basées sur l'état des marchés en février 2010. Une analyse de sensibilité permettra de constater l'effet de leurs variations sur les résultats de l'entreprise.

7 Liste de prix des engrais LANDOR, 2010

3. Résultats et discussion

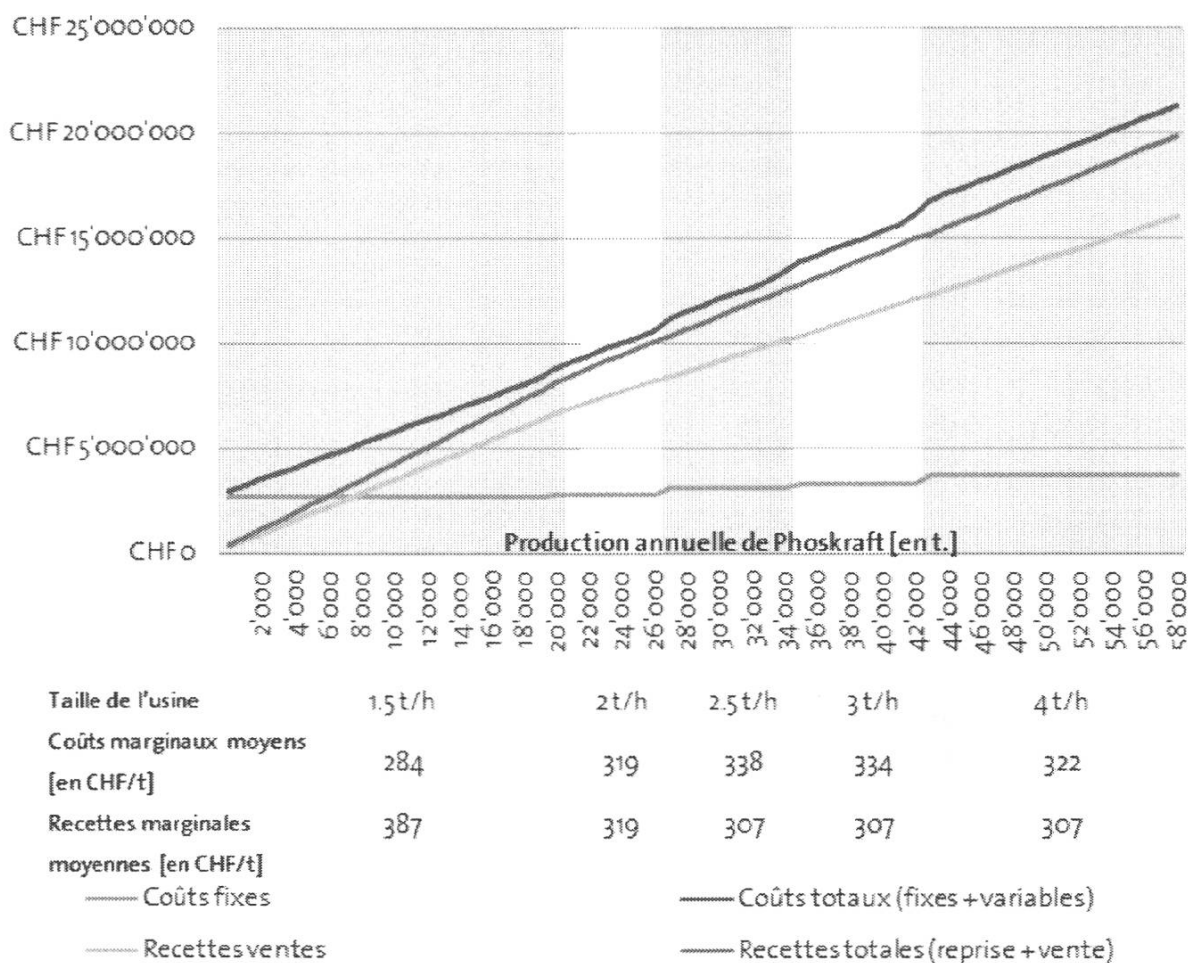
3.1 Analyse de rentabilité

Avec les hypothèses formulées dans le chapitre précédent, la meilleure stratégie d'implantation est la construction d'une unique usine à proximité de l'incinérateur ERZO à Oftringen. Ce résultat s'explique par la position centrale de cet incinérateur. La taille de l'usine optimale, ou la quantité de production optimale, est atteinte lorsque la différence entre les recettes et les coûts est maximale. Les résultats de l'optimisation ont montré que la capacité optimale de l'usine de transformation est de 2 tonnes par heure, soit une transformation annuelle de 16'000 t de cendres. La production annuelle de Phoskraft s'élève alors à 27'827 tonnes soit 7'235 tonnes de P_2O_5 . 21'612 tonnes (5'619 t de P_2O_5) peuvent être écoulées sur le marché suisse pour couvrir la totalité de la part de marché disponible (52.5%). Les 6215 t de Phoskraft restantes (1'616 t de P_2O_5) doivent être exportées au prix européen. A ce point, les recettes marginales sont égales aux coûts marginaux (Figure 2). Avec une faible production on constate que les recettes marginales sont supérieures aux coûts marginaux; la courbe des coûts totaux et la courbe des recettes totales convergent l'une vers l'autre. On observe cette situation jusqu'à une production de 21'000 t de Phoskraft par année. Jusqu'à ce point les recettes marginales s'élèvent à CHF 387.–. Si la quantité de Phoskraft produite augmente encore les recettes marginales diminuent pour s'établir à CHF 319.– puis à CHF 307.–. Cet effet est dû à la limitation du marché suisse. Une fois que la part de marché suisse estimée est couverte, la quantité de produit supplémentaire doit être exportée à un prix inférieur.

Concernant les coûts marginaux, on constate qu'ils augmentent dans un premier temps puis diminuent ensuite avec une production plus importante. On pourrait s'attendre à un effet plus marqué, mais l'économie d'échelle est réduite par le fait que les cendres de très bonne qualité avec une concentration en phosphore élevée ne sont disponibles qu'en quantité limitée. Par conséquent, pour assurer un approvisionnement suffisant en cendres d'une grande usine, la sélectivité lors du choix des sources doit être revue à la baisse. Cela influence négativement les coûts variables pour deux raisons; d'une part car davantage de TSP doit être inséré pour assurer une concentration de 26% de P_2O_5 dans le

Phoskraft et d'autre part car l'éloignement des incinérateurs supplémentaires fournissant les cendres entraîne une augmentation des coûts de transport.

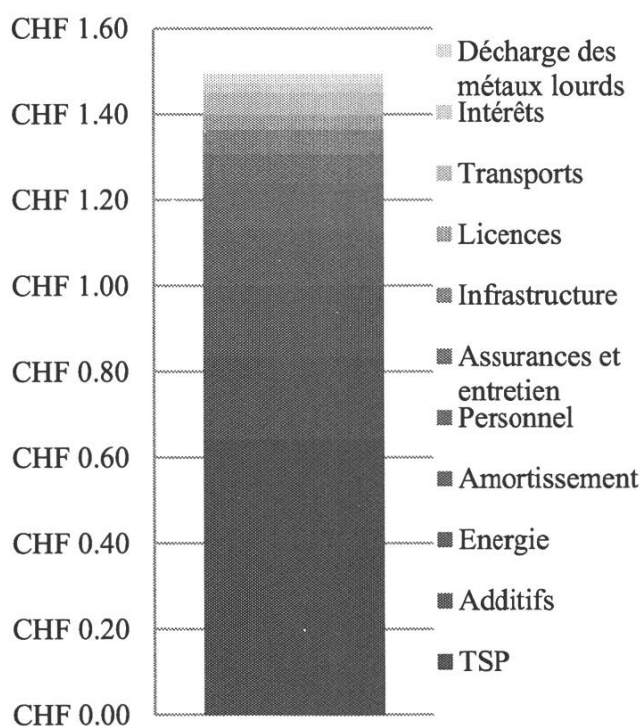
Figure 2: Analyse Break-Even d'une usine implantée à Oftringen



Dans le scénario *Fév_2010*, les recettes ne sont jamais supérieures aux coûts. Par conséquent, il est économiquement inintéressant d'investir dans cette production et dans ces conditions, malgré une stratégie d'implantation optimale. Les coûts totaux de production, amortissements et intérêts des capitaux étrangers compris, s'élèvent à CHF 10'811'000.– par année, soit CHF 1.49 par kilogramme de P_2O_5 produit. La plus grande partie des coûts est constituée par l'achat de TSP pour l'équilibrage du taux de phosphore (CHF 0.64/kg P_2O_5). Suivent ensuite les coûts d'additifs (CHF 0.19/kg P_2O_5) puis les coûts d'énergie, d'amortissement et de personnel (resp. CHF 0.17, 0.13 et 0.11/kg P_2O_5). Les

coûts restants s'élèvent au total à CHF 0.25/kg P_2O_5 (Figure 3). Les recettes annuelles totales s'élèvent à CHF 10'295'000.–. Comme toute la production ne peut pas être écoulee sur le marché suisse, les recettes sont composées de la vente du Phoskraft en Suisse et en Europe ainsi que de la prime de reprise des cendres. Par unité de P_2O_5 , cela représente CHF 1.42. CHF 1.16 proviennent directement de la vente du Phoskraft et CHF 0.26 sont issus de la prime de reprise des cendres (Figure 4). On constate que les recettes ne sont pas suffisantes pour couvrir les coûts et que la différence s'élève à CHF 0.07 par kilogramme de P_2O_5 . La production de Phoskraft, dans ces conditions, génère un gain EBITDA⁸ moyen annuel de CHF 572'700.– et un déficit EBT⁹ moyen annuel de 515'300.–.

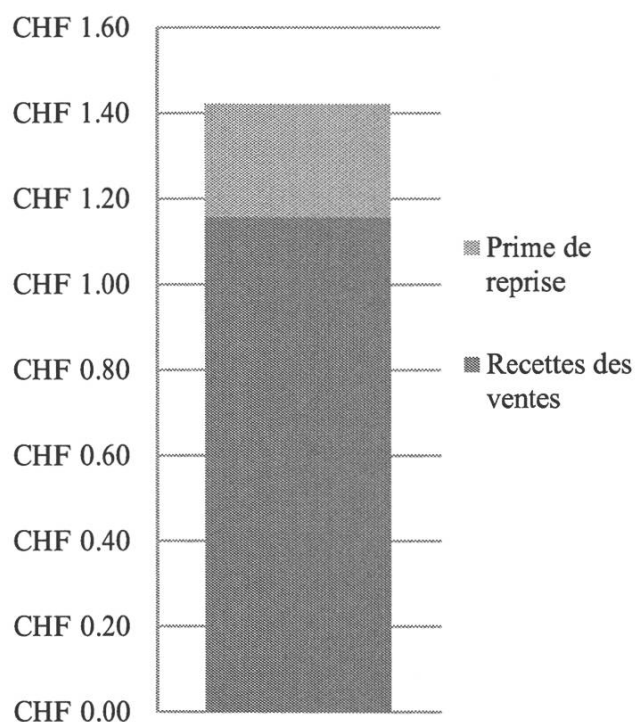
Figure 3: Structure des coûts de production d'un kilogramme de P_2O_5 dans le Phoskraft



8 EBITDA = Earnings before interest, taxes, depreciation and amortization (gain avant intérêts, impôts, dépréciation et amortissement)

9 EBT = Earnings before tax (gain avant impôts)

Figure 4: Structure des recettes de production d'un kilogramme de P₂O₅ dans le Phoskraft



L'installation consomme toutes les cendres produites par l'incinérateur ERZO à Oftringen. Cette quantité est cependant insuffisante pour alimenter le four rotatif. Dès lors, il est nécessaire de s'approvisionner vers les incinérateurs proches produisant des cendres avec une forte teneur en phosphore. La solution optimale est décrite dans le Tableau 1.

Tableau 1: Source de cendres exploitées par l'usine de transformation

Lieux de l'incinérateur	Quantité consommée en tonne	Pourcentage de la production (%)
SAIDEF, Posieux	3'982	81
CIMO, Monthey	600	100
SVA, Winterthur	1'321	100
SVA Luzern, Emmenbrücke	4'573	100
KVA Limmattal, Dietikon	2'262	100
Total	16'000	

Malgré la proximité des incinérateurs ARA Rhein et PRO Rheno, leur cendres ne sont pas exploitées. En effet, elles possèdent une trop faible concentration en phosphore à cause de la provenance des boues incinérées. Beaucoup de boues sont d'origine industrielle et le phosphore s'y trouve donc dilué. Les cendres utilisées ont un taux de P_2O_5 moyen de 18.3%. Dû à l'ajout d'additifs lors du processus de transformation, cette concentration est réduite à 15.9% à la sortie du four rotatif. Comme prévu, le produit final est constitué de 26% de P_2O_5 . Par conséquent, 40.4% du phosphore présent dans le produit final est issu effectivement des cendres. Les 59.6% restants proviennent du TSP qui est utilisé pour équilibrer le taux de phosphore à 26%.

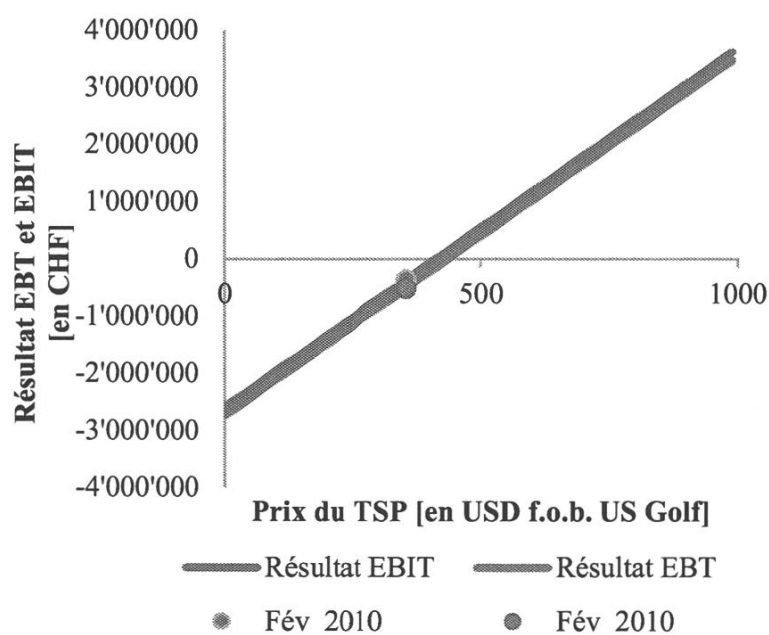
3.2. Analyse de sensibilité

Prix du TSP

Le principal paramètre qui influence directement la rentabilité de la production de Phoskraft est le prix du TSP. En effet, il représente un indicateur précis du prix d'une unité de P_2O_5 et définit à quel prix peut être vendu le Phoskraft. Il affecte donc directement les recettes. Cependant, comme le TSP entre dans la composition du Phoskraft, son prix affecte aussi les coûts. On constate qu'à partir d'un prix supérieur à USD 437.– au départ d'Amérique du Nord, les recettes issues de la production de Phoskraft sont suffisantes pour couvrir les

coûts et le résultat EBT passe en terrain positif (Figure 5). À partir d'USD 414.–, le résultat EBIT¹⁰ devient positif. A titre de comparaison, le prix du TSP s'élevait à USD 355.– en février 2010 et a connu un pic à plus de USD 1150.– pendant l'été 2008. Ces seuils de rentabilité se situent donc entièrement dans les fluctuations normales du marché.

Figure 5: Résultat EBT et résultat après dividende en fonction du prix du TSP



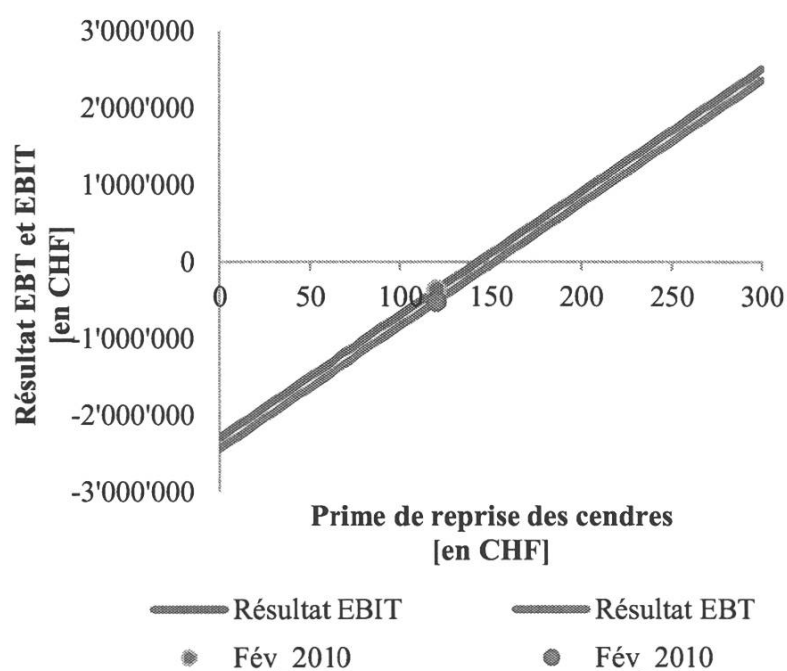
Le taux de change

Grâce au modèle, il est possible de juger l'impact sur la rentabilité de toutes les combinaisons des taux de change (EUR, CHF, USD). Pour illustrer leur influence, il n'a été retenu que l'évolution du franc suisse par rapport au dollar US. La raison de ce choix se trouve dans le fait que le TSP, qui est utilisé comme indicateur du prix du phosphore, est coté en dollars US. Cette analyse n'est donc valable que si le cours de l'euro reste identique par rapport au franc suisse. Si le franc suisse et l'euro sont globalement forts, le prix du phosphore en Suisse et en Europe sera plus faible.

¹⁰ EBIT = Earnings before interest and taxes (gain avant intérêt et impôts)

Il en découle que le Phoskraft pourra être vendu moins cher car il concurrence directement les importations d'engrais phosphatés. Au contraire, si le franc et l'euro s'affaiblissent par rapport au dollar US, les recettes générées par la vente du produit augmenteront. Ainsi avec un taux de change de 1.30 USD/CHF, le résultat EBT est nul et c'est déjà à partir de 1.23 USD/CHF qu'il est possible de couvrir les coûts et de dédommager les capitaux étrangers (Figure 6). A titre de comparaison, le dollar se négociait à CHF 1.07 dans le scénario *Fév_2010*.

Figure 6: Influence du taux de change USD/CHF sur la rentabilité de la production

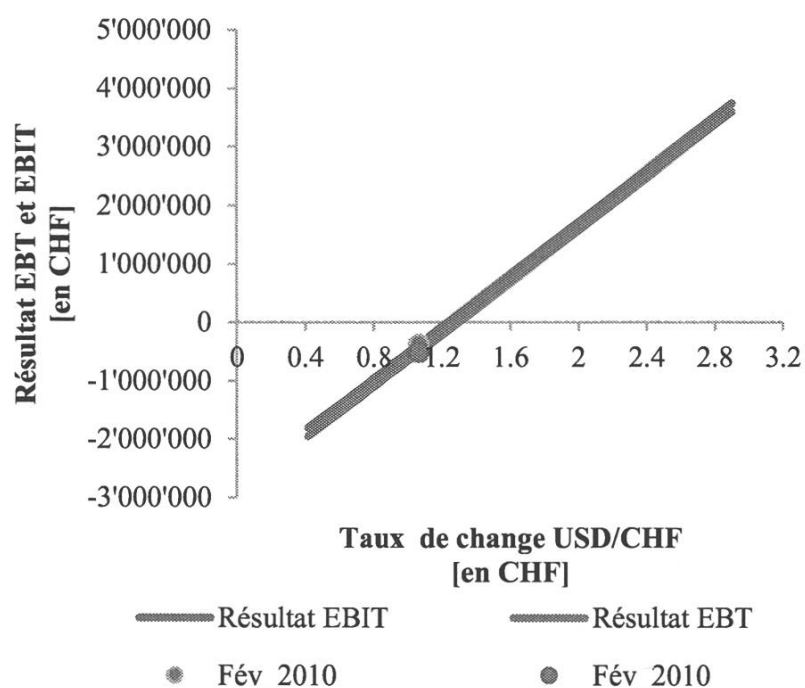


La prime de reprise des cendres

Le montant de la prime de reprise des cendres dépend des alternatives que possèdent les incinérateurs pour s'en débarrasser. Dans le scénario *Fév_2010*, il est admis que les cendres peuvent être mises en décharge pour un coût d'opportunité de CHF 120.-/t de cendres. La prime de reprise considérée est donc équivalente. Cependant, la mise en décharge n'est pas une solution durable et il est probable que les incinérateurs se voient imposer à terme de nouvelles règles pour l'élimination des cendres. La hauteur de la prime de reprise pourrait donc varier à l'avenir. Comme, dans notre cas, la transformation des cendres

est limitée à 2 tonnes par heure (16'000 tonnes/par an) et que cette capacité est totalement exploitée, le montant de la prime n'influence pas la stratégie d'approvisionnement en cendre mais influence linéairement les recettes et la rentabilité de la production (Figure 7). Une prime de reprise de CHF 143.–/t permet aux recettes de couvrir les coûts et une prime supérieure à CHF 152.–/t permet de couvrir les coûts et de dédommager les capitaux étrangers.

Figure 7: Influence su montant de la prime de reprise des cendres sur la rentabilité de la production

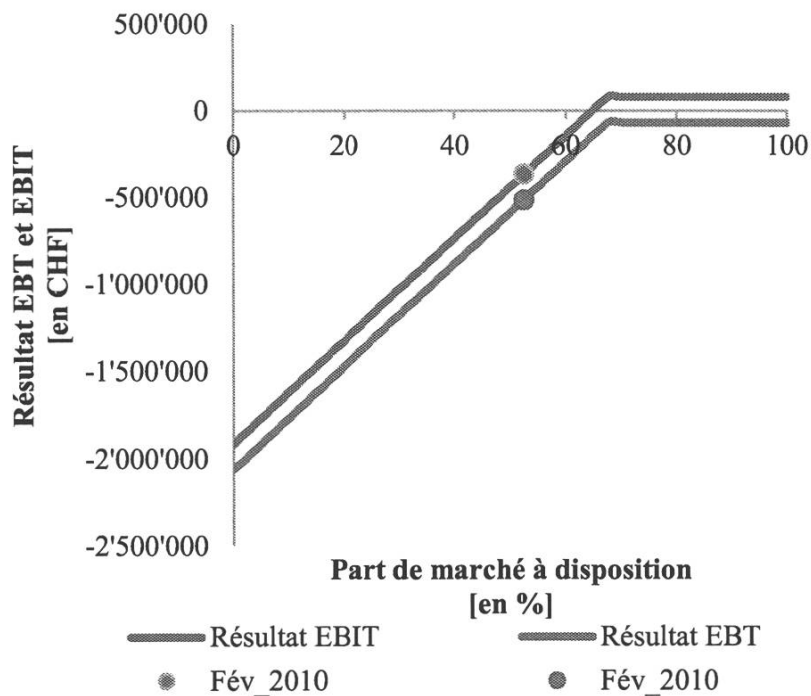


La part de marché suisse

Dans le scénario *Fév_2010*, la part de marché que peut couvrir le Phoskraft s'élève à 52.5% soit 5'619 tonnes de P_2O_5 par an ou 21'610 tonnes de Phoskraft 26%. Comme un acteur représente actuellement 80 à 90% de l'offre de phosphore et qu'il sera certainement le principal acheteur de Phoskraft, la part de marché que le Phoskraft pourra couvrir est soumise aux décisions de ce principal client. Il est donc utile d'observer les conséquences de la taille de part de marché sur la rentabilité de la production. Avec une installation transformant 16'000 tonnes de cendres par an, on a pu constater qu'une part de marché de 52.5% ne suffisait pas à écouler la totalité de la production et qu'une partie

devait être exportée. S'il est possible d'atteindre une part de marché de 68%, la totalité de la production d'une usine transformant 16'000 tonnes de cendres par an peut être écoulee sur le marché suisse (Figure 8). Dans ces conditions, l'usine de transformation génère toujours une perte EBT de CHF 69'000.– par an. Si, par contre, la part de marché suisse est réduite à zéro, toute la production doit être exportée sur le marché européen. Dans ce cas de figure, la production génère une perte EBT de CHF 2'062'000.–.

Figure 8: Influence de la part de marché à disposition sur la rentabilité de la production



4. Conclusions

Dans les conditions de février 2010, il n'est pas intéressant d'investir dans la production de Phoskraft. Malgré une stratégie d'investissement optimale, la production de Phoskraft n'est pas rentable. L'étroitesse du marché suisse et le prix du phosphore sur le marché européen ne permet pas d'exploiter les économies d'échelle des grandes installations. En effet, les coûts totaux restent dans tous les cas supérieurs aux recettes, peu importe le volume de production.

Par contre, de nombreux éléments permettent de penser qu'à l'avenir la situation risque d'évoluer positivement. D'un côté, le phosphore se raréfie et la qualité des gisements diminue. De l'autre, la population mondiale croît et la pression de la demande en engrais phosphatés devrait suivre cette évolution. Le prix du phosphore va donc probablement suivre une tendance à la hausse et permettre ainsi d'augmenter les recettes et l'attractivité des procédés de recyclage. Il est difficile d'évaluer l'évolution de la prime de reprise des cendres, la seconde source de recette. En effet, on peut penser que le gouvernement a un intérêt à inciter le recyclage du phosphore en augmentant la pression sur les incinérateurs. Dès lors, ils seront prêts à payer une prime de reprise plus élevée pour se débarrasser de leurs cendres. D'un autre côté, si les conditions évoluent positivement, il est probable que d'autres procédés de recyclage fassent leur apparition et concurrencent le Phoskraft dans l'approvisionnement en cendres riches en phosphore. Cette concurrence exercerait une pression à la baisse sur la prime de reprises des cendres.

Comme décrit dans l'analyse de sensibilité, un investissement dans la production de Phoskraft comporte d'importants risques financiers. En cas d'investissement, une stratégie de couverture devrait être mise au point. Il existe de nombreuses possibilités pour se couvrir contre les risques liés à une baisse du prix du phosphore ou à une hausse du prix du franc suisse, comme les produits structurés par exemples (options, contrat à terme etc.). Les résultats décrits dans ce travail partent du principe qu'une part importante du marché suisse peut être acquise. Pour ce faire, la conclusion d'un partenariat avec le distributeur principal est vitale. En cas d'investissement, c'est une étape qui doit être entreprise très tôt dans le projet.

Références

- BERNER, P. AND C. KUHN (2008). «Bericht Konzeptskizze ASH DEC-Verfahren, Trevis AG im Auftrag des AWEL (non public, l.hermann@ashdec.com).
- BINDER, C. R., L. DE BAAN, ET AL. (2009). Phosphorflüsse der Schweiz – Stand, Risiken und Handlungsoptionen. Bern, OFEV.
- CORDELL, D., J.-O. DRANGERT, ET AL. (2009). «The story of phosphorus: Global food security and food for thought.» *Global Environmental Change* 19(2): 292–305.
- GRUDAF (2009). «Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau.» *Agrarforschung* 16(2): 1–100.
- HERMANN, L. (2009). «Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwasserreinigung. Eine Bestandsaufnahme» (non public, l.hermann@ashdec.com).
- KARP, G. (2004). Biologie Cellulaire et Moléculaire. De Boeck Université.
- LÖTSCHER, R., T. KUPPER, ET AL. (1999). «Abfälle zur Verwendung im Pflanzenbau.» *Agrarforschung* 6(1).
- NANZER, S. (2009). Résultats des interviews des différents mono-incinérateurs suisses (non public, simone.nanzer@ipw.agrl.ethz.ch).
- OFEV (2004). «Élimination des boues d'épuration en Suisse.» DOCUMENTS ENVIRONNEMENT N° 181. Berne
- OFEV (2008). Boues d'épuration: quantités et filières d'élimination. Berne.
- OFS (2009). Enquête suisse sur la structure des salaires 2008. Vie active et rémunération du travail. Office fédéral de la statistique. Neuchâtel.
- SMIL, V. (2000). Phosphorus in the environment : Natural flows and human interferences. Palo Alto, CA, ETATS-UNIS, Annual reviews.
- SPIESS, E. (1999). «Stickstoff- und Phosphorbilanz der Schweizer Landwirtschaft.» *Agrarforschung* 6(7): 261–264.
- STEEN, I. (1998). «Phosphorus availability in the 21st Century: management of a non-renewable resource.» *Phosphorus and Potassium* 217(1998).
- TOMBEZ, G. (2011). «From Ash to Cash!» Travail de master, ETH, Zürich

Liste des abréviations

ADN

Acide désoxyribonucléique

ARA

Abwasserreinigungsanlage (station d'épuration)

ATP

Adénosine triphosphate

EBIT

Earnings before interest and taxes (gain avant intérêt et impôts)

EBITDA

Earnings before interest, taxes, depreciation and amortization (gain avant intérêts, impôts, dépréciation et amortissement)

EBT

Earnings before tax (gain avant impôts)

KVA

Kehrichtverbrennungsanlage (incinérateurs d'ordures ménagères)

KWh

Kilowatt heure

MS

Matière sèche

NADPH

Nicotinamide adénine di nucléotide phosphate

OFEV

Office fédéral de l'environnement

OFS

Office fédéral de la statistique

P

Phosphore

STEP

Station d'épuration

SVA

Schlammverbrennungsanlage (incinérateurs de boues d'épuration)

TSP

Superphosphate triple

Grégoire Tombez

Swiss Reinsurance Company Ltd

Mythenquai 50/60

CH-8022 Zürich

E-Mail: Gregoire_Tombez@swissre.com