Développement du procédé Phos4Life et étude de faisabilité sur le site Emmenspitz

Rapport destiné à la publication

27 avril 2023

RAMBOLL

TECNICAS REUNIDAS

fbi Fiedler Beck Ingenieure AG

VTU engineering

tbfpartner

Projet	**Étude de faisabilité du procédé Phos4life sur le site Emmenspitz**
P4L	**P4L**
Destinataire	**Groupe de pilotage Phos4life Emmenspitz**
Typologie	**Rapport**
Version	**01**
Date	**27 avril 2023**
Auteur	**Stefan Schlumberger, Tobias Hofstetter & équipe de concepteurs P4L**
Validation	**Comité de pilotage Phos4life Emmenspitz**
Partenaires	**ACR, ERZ, Epura, ERZO, REAL, SAIDEF, SIG, ZASE**

Abréviations

ACTS	Système d'unités mobiles pour le transport intermodal
BD	Boues déshydratées (30% MS)
BE	Boues d'épuration
BS	Boues séchées (100% MS)
BT	Basse tension
CAPEX	Dépenses d'investissement
CBE	Cendres de boues d'épuration
CFC	Code des frais de construction
CFAO	Cendres de farines animales et les poudres d'os
CVCSE	Chauffage, ventilation, climatisation, sanitaire et électricité
EMCRG	Infrastructures électrique-mesure-commande-régulation-gestion
EP-EIE	Enquête préliminaire à l'étude d'impact sur l'environnement
FAS	Incoterms: Free Alongside Ship
FOB	Incoterms: Free on Board
IBC	Intermediate Bulk Container
ITEU	Installation de traitement des eaux usées
MS	Matière sèche
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OLED	Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets
OPEX	Dépenses d'exploitation
P	Phosphore
P4L	Phos4life
STEP	Station d'épuration des eaux usées urbaines
SX	Extraction par solvant
TEU	Traitement des eaux usées
TR	Técnicas Reunidas SA, Madrid, Espagne
TSP	Superphosphate triple
UVTD	Usine de valorisation thermique des déchets
Vapeur BP	Vapeur basse pression, 150°C, 4 bar
ZASE	Zweckverband der Abwasserregion Solothurn-Emme

SOMMAIRE

1. Management Summary 1

2. Contexte et objectifs 3

2.1 Introduction 3

2.2 Evaluation du procédé de production d'acide phosphorique 4

2.3 Développement du procédé et installation pilote Phos4life 5

2.4 Possibilités de récupération du phosphore en Suisse 7

2.5 Examen de la faisabilité du procédé Phos4life sur le site Emmenspitz 7

2.6 Mandat et objectifs de l'étude de faisabilité 8

3. Le site Emmenspitz 10

4. Centrale Phos4life 11

4.1 Procédé Phos4life 11

4.2 Installations annexes 14

4.3 Plan logistique 14

4.4 Infrastructures électriques et système de gestion 16

4.5 Intégration et optimisation énergétique 16

4.6 Plan d'affectation et intégration 17

4.6.1 Bâtiment Phos4Life 18

4.6.2 Fondations 19

4.6.3 Secteurs / locaux et fonctions 19

4.6.4 Installations de chantier et aire de montage 23

4.7 Aspects relatifs aux autorisations et aspects environnementaux 24

4.8 Modèle d'exploitation 24

5. CAlcul de rentabilité 25

5.1 Coûts d'investissement 25

5.2 Coûts d'exploitation et calcul de rentabilité 26

6. Ecologie 28

7. contexte et commercialisation du produit 30

8. analyse des Risques 33

9. Etude de faisabilité et potentiel d'optimisation 35

10. Suite de la démarche et perspectives 36

ANNEXES

1. MANAGEMENT SUMMARY

Le phosphore est un nutriment essentiel pour les végétaux, les animaux et les êtres humains. Il est irremplaçable et constitue le troisième tiers nutritif, à côté de l'azote et du potassium, entrant dans la composition de nombreux engrais. A travers notre alimentation, nous ingérons du phos-phore, qui se retrouve dans les eaux usées. D'abord considéré comme polluant, le phosphore doit être séparé au sens de la protection des eaux. En Suisse, l'élimination chimique se fait essentiel-lement par floculation. Ensuite, les boues d'épuration contenant le phosphore lié font l'objet d'une valorisation thermique. La monocombustion des boues d'épuration a pour conséquence que la charge totale de phosphore se retrouve dans les cendres des boues d'épuration. Ces cendres sont actuellement mises en décharge sans autre valorisation.

Le Conseil fédéral a édicté le 4 décembre 2015 l'ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (OLED), en vertu de la loi sur la protection de l'environnement et de la loi sur la protection des eaux. Selon cette ordonnance, le phosphore contenu dans les eaux usées communales, les boues d'épuration des stations centrales d'épuration des eaux usées ou les cendres résultant du traitement thermique de ces boues doit être récupéré et faire l'objet d'une valorisation matière. L'art. 51 OLED fixe la mise en œuvre de l'obligation de récupérer le phosphore au 1er janvier 2026.

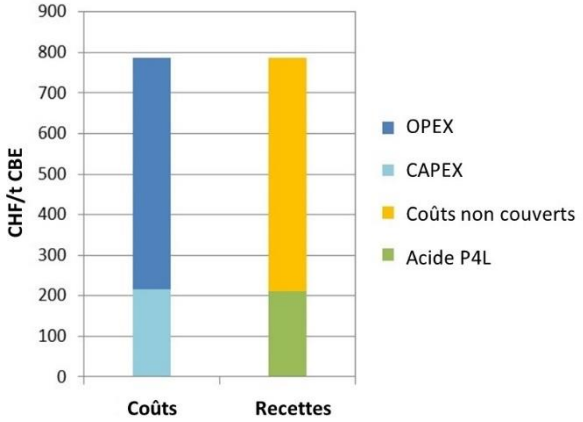
Les boues d'épuration déshydratées et les cendres de boues d'épuration (CBE) provenant des STEP avec palier d'élimination chimique du phosphore présentent une teneur en phosphore assez faible (resp. 2 à 6 % et 5 à 12 % P) et des concentrations relativement élevées en métaux lourds. Elles ne conviennent donc pas à l'utilisation directe ni à la fabrication d'engrais phosphorés. Les produits de haute qualité demandés par le marché ne peuvent pas être fabriqués directement et nécessitent de grandes quantité de phosphore «propre» pour la dilution. La fabrication d'acide phosphorique techniquement pur à partir de CBE offre des perspectives permettant de pallier ce problème.

Une évaluation des procédés a été menée en 2014. Elle a débouché sur la constatation qu'il n'existait pas sur le marché de procédé généralisé et opérationnel pour la fabrication d'acide phosphorique techniquement pur à partir de CBE. Sur mandat de la Direction des travaux publics du canton de Zurich, la Fondation ZAR a cherché un partenaire technologique à même de déve-lopper une solution: son choix s'est porté sur Técnicas Reunidas SA de Madrid (Espagne). Le pro-cédé Phos4life a été développé conjointement avec l'entreprise générale espagnole TR, testé avec succès dans une installation pilote (2015 – 2018) et simplifié et optimisé en permanence.

La mise en œuvre du procédé Phos4life pour le traitement de 40'000 t/a CBE a été étudiée sur le site Emmenspitz (Zuchwil, SO). Ce site présente de précieux avantages, notamment la présence de KEBAG, fournisseur d'énergie renouvelable sous forme de vapeur et d'électricité, ainsi qu'une excellente connexion aux réseaux routier et ferroviaire. Par ailleurs, l'équipe opérationnelle de KEBAG dispose déjà d'une longue expérience acquise sur une installation basée sur une techno-logie analogue (procédé FLUREC), un savoir-faire qui offre de belles perspectives de synergies pour la future exploitation de la centrale Phos4life. Les surfaces de dégagement nécessaires à la logistique pourraient être mises à disposition ou réutilisées moyennant la conservation du bâti-ment FLUREC, de sorte que la réalisation du projet Phos4life pourrait être envisagé à partir de 2027. Toutefois, il faut au préalable déconstruire les bâtiments existants qui seront désaffectés ou transférés après la mise en service de la nouvelle usine d'incinération des ordures ménagères KEBAG Enova. En clair, une centrale de récupération de phosphore à Emmenspitz pourra être opérationnelle seulement à partir de 2030, ce qui ne permet pas de respecter le délai légal actuel.

Les agents d'exploitation nécessaires ainsi que les résidus peuvent être transportés dans des conditions appropriées. L'exploitation de la centrale Phos4life représente un mouvement global de quelque 175'000 t/a de marchandises, dont plus de la moitié sera transférée sur le rail pour alléger l'empreinte écologique du système. L'enquête préliminaire à l'étude d'impact sur l'environnement a débouché sur un préavis positif du canton de Soleure, les prescriptions appli-cables en matière de protection de l'environnement peuvent toutes être respectées.

Les tensions géopolitiques actuelles se traduisent par un facteur d'incertitude très élevé, tant en ce qui concerne le calcul des coûts que la situation sur le marché des matières premières. L'analyse des coûts d'investissement et des coûts d'exploitation se base sur les prix 2020. Les coûts d'investissement calculés dans le cadre du projet se montent à CHF 155 mio. pour la cons-truction de l'installation jusqu'à l'exploitation régulière. La marge de précision est de ±30 %. Les coûts de financement et les coûts d'amortissement se montent à env. 220 CHF/t CBE et représen-tent environ 25 % des coûts globaux. Les coûts d'exploitation chiffrés à env. 570 CHF/t CBE sont prédominants. Les recettes provenant des ventes d'acide phosphorique permettent de couvrir 210 CHF/t CBE. La centrale Phos4life ne génère aucun bénéfice, mais ses coûts d'exploitation doi-vent être couverts de manière stable. Il y a donc lieu de prévoir une taxe de traitement sur les livraisons de cendres de boues d'épuration. Cette taxe se monte à env. 580 CHF/t CBE pour com-penser les coûts non couverts.



L'acide phosphorique techniquement pur peut être écoulé à des prix correspondant au marché à travers deux canaux: l'industrie chimique et la production d'engrais minéraux. La production d'engrais permet de fabriquer un engrais minéral phosphoré de haute valeur qui présente des avantages écologiques déterminants par rapport aux engrais minéraux courants – notamment eu égard aux teneurs plus basses en uranium et en métaux lourds. L'acide phosphorique Phos4life présente des avantages écologiques déterminants par rapport à la production primaire d'acide phosphorique. L'empreinte écologique et le bilan carbone du procédé Phos4life sont nettement meilleurs. Au niveau du bilan carbone en particulier, les prochaines phases du projet permettront d'approfondir les possibilités d'optimisation en développant des débouchés pour l'acide sulfu-rique présent dans le flux d'eaux usées générées par la centrale Phos4life.
La faisabilité du procédé Phos4life pour le traitement de 40'000 t/a CBE sur le site Emmenspitz est démontrée. Les objectifs de la convention de projet ont été atteints et les questions posées ont trouvé réponse. La Fondation ZAR terminera le projet en établissant un plan business d'ici fin 2023, qu'elle présentera aux partenaires du projet.

Perspectives:
La suite du projet nécessite la création d'une entité qui assume notamment les futurs dévelop-pements, la réservation du site, la forme d'organisation, le modèle d'exploitation et la collabora-tion au niveau national pour la planification stratégique. Avant de créer cette entité, il faut d'abord clarifier au niveau politique la question du financement de la récupération du phosphore de ma-nière contraignante. Cette démarche est indispensable dans la mesure où il suffit de traiter une partie des boues d'épuration ou leurs cendres pour couvrir la demande en phosphore de l'agriculture suisse, en complément du phosphore présent dans les farines carnées. Après clarifi-cation du financement, il sera possible de réaliser sur le site Emmenspitz une centrale capable de traiter la moitié des boues d'épurations générées en Suisse: ce serait un projet phare pionnier correspondant totalement à l'esprit de l'économie circulaire.

2. CONTEXTE ET OBJECTIFS

2.1 Introduction

En Suisse, les boues d'épuration ont été utilisées comme engrais par épandage direct sur les champs jusqu'à leur interdiction en 2006. Cette interdiction repose sur le principe de précaution – un pilier essentiel de la législation suisse en matière de santé et d'environnement. Ce principe pourrait aussi être invoqué en faveur du recyclage du phosphore dans le but de limiter l'apport de polluants dus aux engrais minéraux. Ce principe exige «que l'on limite suffisamment tôt les effets qui peuvent devenir nuisibles ou incommodants, même lorsque l'on ne dispose pas de la preuve scientifique irréfutable de leur nocivité»[1]. Les boues d'épuration contiennent certes des nutriments utiles pour les plantes, tels que phosphore ou azote, mais elles diffusent aussi dans le sol de nombreux polluants et agents pathogènes provenant de l'industrie et des ménages. Ce qui était un engrais est ainsi devenu un déchet sous l'effet de l'interdiction. Or, les boues d'épuration sont riches en phosphore: il s'agit de recycler ce potentiel considérable pour valoriser la ressource phosphore. La Confédération a édicté le 4 décembre 2015 l'ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (OLED), en vertu de la loi sur la protection de l'environnement et de la loi sur la protection des eaux. Selon cette ordonnance, le phosphore contenu dans les eaux usées communales, les boues d'épuration des stations centrales d'épuration des eaux usées ou les cendres résultant du traitement thermique de ces boues doit être récupéré et faire l'objet d'une valorisation matière. Les dispositions actuelles prévoient la mise en œuvre de l'obligation de récupérer le phosphore à partir de 2026.

Il existe plusieurs scénarios pour récupérer le phosphore: obtention d'un engrais phosphoré à partir des boues d'épuration ou de leurs cendres, ou fabrication d'un produit de haute valeur à base de phosphore, p. ex. l'acide phosphorique. Sur mandat de la Direction des travaux publics du canton de Zurich, la Fondation ZAR a développé de 2011 à 2018, avec le concours de plusieurs partenaires, un procédé d'extraction de phosphore à partir des boues d'épuration produites par le canton de Zurich (Fig. 2-1). De 2011 à 2013, l'objectif était dans un premier temps de produire un engrais secondaire (phosphate de calcium) à partir des cendres de boues d'épuration. BSH Umweltservice AG a développé à cet effet un procédé baptisé «LeachPhos»[2]: ce procédé consiste à extraire le phosphore brut des CBE en utilisant de l'acide sulfurique, puis à le transformer en engrais à base de phosphate de calcium. Une installation pilote a permis de tester ce procédé à l'échelle industrielle fin 2012. Malgré sa faisabilité technique, ce développement n'a pas été poursuivi à cause de l'évaluation des risques liées avant tout au produit et à aux perspectives de commercialisation, le procédé répondant insuffisamment aux buts recherchés. Il n'y avait en Suisse aucun marché demandant du phosphate de calcium riche en aluminium et en fer. La commercialisation de ce produit dans les régions limitrophes était très risquée, étant donné le très petit nombre d'acheteurs étrangers et la très faible marge commerciale par rapport aux coûts de transport. En 2014, ces considérations ont nécessité un nouveau développement de cette solution, appuyé par une réorientation stratégique. Le but était désormais d'obtenir un produit de haute valeur, répondant aux standards du marché, susceptible d'être commercialisé avec davantage de succès tout en limitant les risques. La réponse à toutes ces exigences a été trouvée dans la production d'acide phosphorique techniquement pur à partir des cendres de boues d'épuration.

[1] Communiqué de presse de la Confédération (DETEC), Les boues d'épuration ne serviront plus d'engrais, Berne, 26.03.2003

[2] Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung (2019), EBP Schweiz AG, sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement

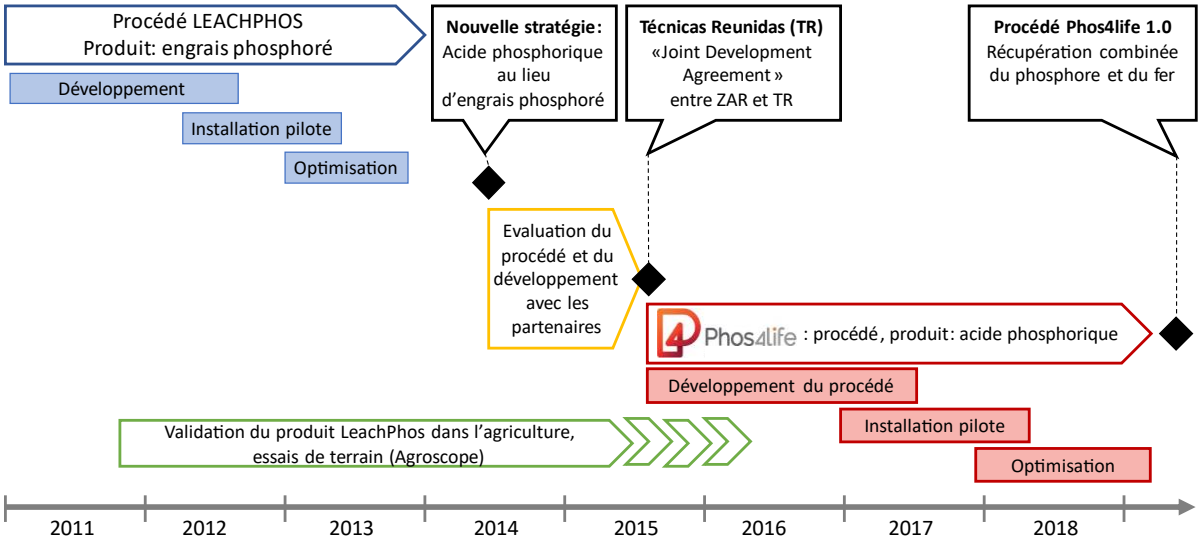


Fig. 2-1: Développement de l'extraction du phosphore, sur mandat de la Direction des travaux publics du canton de Zurich

Voir les fiches d'information « Phosphore » n° 1 à 3 et le plan business 1.0 pour la documentation complémentaire relative à la phase de développement de 2011 à 2013. Ces documents sont référencés sous https://zar-ch.ch/zar/kompetenzenprojekte/phosphormining/.

2.2 Evaluation du procédé de production d'acide phosphorique

En 2014, le marché ne proposait aucun procédé validé et opérationnel pour la fabrication d'acide phosphorique techniquement pur à partir des CBE. Sur mandat de la Direction des travaux publics du canton de Zurich, la Fondation ZAR s'est mise à la recherche d'un partenaire technologique capable de développer la production d'acide phosphorique à partir des CBE. Pour obtenir de l'acide phosphorique de haute qualité à partir de CBE, il faut passer par une étape cruciale, à savoir la séparation efficace des métaux lourds présents dans les CBE.

Les procédés envisageables sont les réactions de précipitation, la séparation membranaire, la séparation par échange d'ions dans un réacteur à lit fixe ou à lit fluidisé, ou l'extraction par solvant. Dans la production primaire d'acide phosphorique, l'extraction par solvant est un procédé appliqué depuis des décennies au niveau mondial pour obtenir des acides phosphoriques de haute qualité (pureté technique, qualité alimentaire, etc.) à partir de l'acide phosphorique brut (c'est-à-dire impur). Ce procédé correspond à l'état actuel de la technique. Les expériences industrielles faites en Suisse en matière de récupération des métaux lourds à partir des cendres volantes provenant de l'incinération des déchets ont démontré le rendement et la stabilité de l'extraction par solvant par rapport à la séparation par échange d'ions dans un réacteur à lit fixe. Compte tenu de la qualité et de la quantité de matière recyclable, l'extraction par solvant s'est avérée nettement supérieure. Ainsi, en 2008, la production de sulfate de zinc par échange d'ions dans des réacteurs à lit fixe a été abandonnée à l'UVTD de Linth. En 2013, la KEBAG à Zuchwil a mis en service le procédé FLUREC, basé sur le principe d'extraction par solvant. Depuis lors, cette installation est capable de récupérer entre 200 et 300 tonnes par année de zinc *special high grade (*degré de pureté >99.995%) et de le commercialiser sous l'étiquette 100% «vert».

Etant donné les expériences recueilles dans la production primaire d'acide phosphorique et le recyclage des métaux lourds à partir des cendres volantes en Suisse, le choix s'est porté sur l'extraction par solvant pour la fabrication d'acide phosphorique de qualité supérieure à partir des CBE. Ainsi, il

devrait être possible de satisfaire aux objectifs d'un processus visant un niveau élevé et constant en termes de qualité et de rendement de même qu'en termes de disponibilité et de fiabilité.

Forte de cette conclusion, la ZAR a engagé des démarches à la recherche d'un partenaire technologique disposant des références nécessaires à l'échelon européen pour la réalisation d'extracteurs par solvant de taille industrielle. Cette évaluation a débouché sur une sélection de trois candidats (constructeurs ou entreprises générales) de réputation internationale. La ZAR a approfondi son évaluation dans le cadre de discussions exploratoires et d'études conceptuelles. Au final, le choix s'est porté sur Técnicas Reunidas SA (TR), sise à Madrid, pour ses compétences en ingénierie et sa maîtrise en entreprise générale, d'autant que cette société s'est déclarée prête à prendre en charge 40% des coûts de développement. Les 60% restants des coûts de développement ont été pris en charge par le canton de Zurich sous forme de subvention. En contrepartie, TR met à disposition de la Fondation ZAR, représentante actuelle de la future entité de financement suisse, une ou plusieurs licences gratuites pour la construction et l'exploitation d'unités de récupération de phosphore. Un contrat de coopération (Joint Development Agreement) a été signé en 2015 entre TR et ZAR.

Forte de quelque 6 500 collaborateurs, TR est bien implantée depuis 1960 sur le marché international des installations industrielles. Elle compte à son actif plus de 1'000 installations réalisées dans 50 pays. Elle a notamment construit des extracteurs par solvatation pour la récupération du zinc dans les pays suivants: Espagne, Portugal, Namibie, Japon, Italie, Etats-Unis. TR annonce un chiffre d'affaires dépassant les 4 milliards d'euros par an. Elle dispose de son propre pôle de développement, le José Lladó Technology Centre, dont la bonne centaine de collaborateurs forme une équipe expérimentée en développement des procédés.

Fig. 2-2: José Lladó Technology Centre, Técnicas Reunidas SA, Madrid, Espagne.

2.3 Développement du procédé et installation pilote Phos4life

Técnicas Reunidas a développé le procédé Phos4life entre 2015 et 2017, conjointement avec la Fondation ZAR. Une installation pilote (Fig. 2-3) a été construite au Centre de développement de Madrid et a été testée en horaire continu avec des cendres de boues d'épuration provenant du canton de Zurich. Plusieurs campagnes de test se sont succédé de 2017 à 2018 pour optimiser le procédé. Dénommé Phos4life 1.0 (Fig. 2-4), le procédé permettait de récupérer non seulement le phosphore,

mais aussi le chlorure ferrique utilisé comme agent de précipitation dans les stations d'épuration pour l'élimination chimique du phosphore. L'acide phosphorique obtenu par ce procédé est techniquement pur et peut être utilisé aussi bien dans l'industrie technico-chimique que pour la production d'engrais de haute qualité.

Fig. 2-3: Installation pilote Phos4life, José Lladó Technology Centre, Madrid, Espagne.

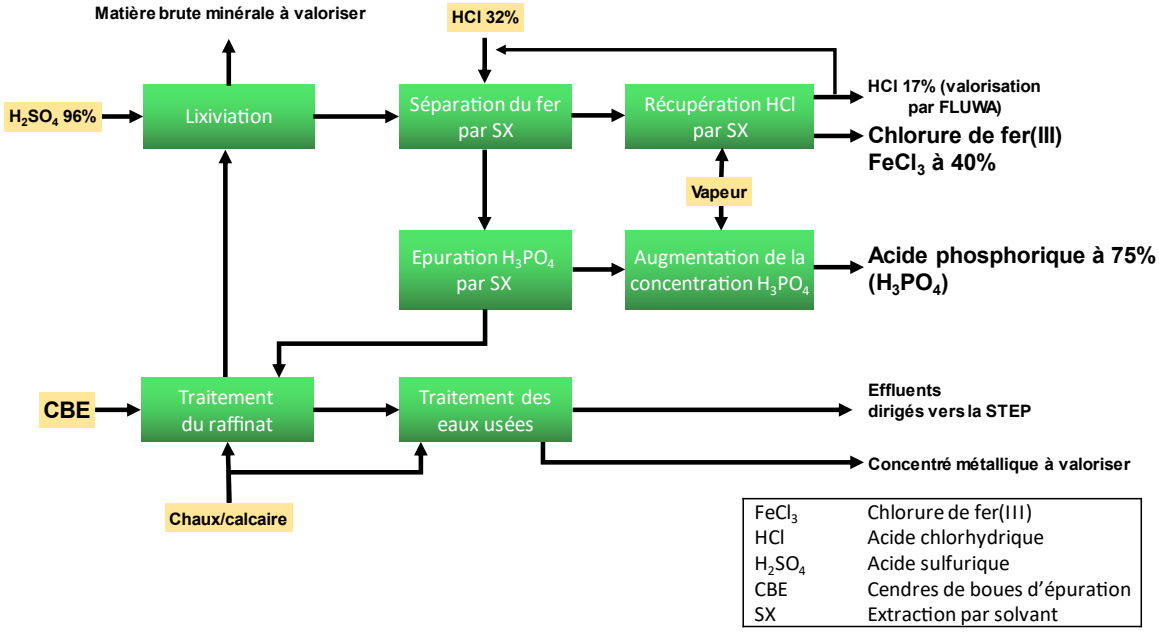


Fig. 2-4: Modélisation du procédé Phos4life 1.0 intégrant la récupération de fer.

Voir le rapport détaillé sur les résultats de la phase pilote et la capsule vidéo sous ce lien: https://zar-ch.ch/zar/kompetenzenprojekte/phosphormining/.

2.4 Possibilités de récupération du phosphore en Suisse

L'obligation de récupérer le phosphore contenu dans les boues d'épuration (BE) et dans les cendres résultant de leur incinération (CBE) nécessite la création d'une nouvelle infrastructure en Suisse. L'évaluation du procédé a mis en lumière le fait que la fabrication d'acide phosphorique à partir de CBE répond parfaitement à l'objectif d'une récupération éco-efficiente du phosphore. En Suisse, les STEP génèrent actuellement des boues d'épuration équivalant à quelque 180 000 tonnes par an de matière sèche, soit quelque 90'000 tonnes de CBE après incinération. Il faut donc prévoir des installations capables de traiter une telle quantité, des infrastructures de transport adaptées (fret ferroviaire, fret routier, etc.) ainsi que des réserves de terrain pour la construction et l'exploitation des installations. Les procédés de fabrication d'acide phosphorique actuellement connus nécessite une technologie complexe et sont très gourmands en énergie dans la mesure où ils nécessitent l'évaporation de grandes quantités d'eau à des fins d'augmentation de la concentration. La mise à disposition d'une source d'énergie ou de chaleur renouvelable sur le site choisi fait partie des prérequis.

En Suisse, le nombre de sites potentiels répondant à ces prérequis est très limité. L'un d'entre eux est Emmenspitz à Zuchwil (SO). Il s'agit de montrer ici la faisabilité du procédé Phos4life sur ce site.

2.5 Examen de la faisabilité du procédé Phos4life sur le site Emmenspitz

Sur mandat[3] d'une entité regroupant 8 partenaires communaux (STEP et usines de mono-incinération des boues d'épuration), la Fondation ZAR examine la mise en œuvre du procédé Phos4Life sur le site Emmenspitz. Les 8 partenaires de cette entité génèrent actuellement une quantité de CBE de quelque 40'000 t/a, soit environ la moitié de la quantité de CBE générées en Suisse. Dès lors, la centrale Phos4life prévue doit être dimensionnée pour une capacité de 40'000 t/a CBE.

En vue des travaux nécessaires, la ZAR a mandaté l'entreprise Ramboll en qualité de bureau d'assistance au maître d'ouvrage, ainsi que les concepteurs Fiedler Beck Ingenieure (architecture, construction), Ramboll (technique EMCRG), TBF Partner (génie civil, logistique, écologie, technique du bâtiment), Técnicas Reunidas SA (technologie clé) et VTU Schweiz (installations annexes) pour élaborer les bases de l'étude du projet. L'organigramme figure ci-après.

[3] Convention de projet signée entre la Fondation ZAR et les 8 partenaires de l'entité, juillet/août 2019

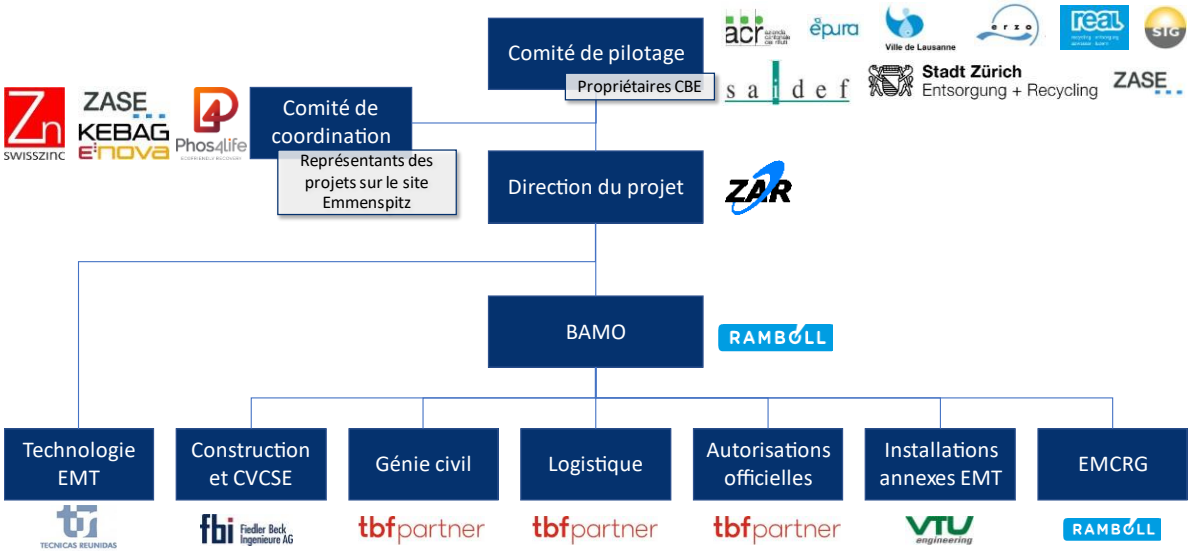


Fig. 2-5: Organigramme pour la phase d'étude 2021-2023

L'étude de faisabilité du projet Phos4Life sur le site Emmenspitz repose notamment sur les points suivants:

- élaboration d'un plan logistique coordonné privilégiant l'utilisation du raccordement existant au réseau ferroviaire
- analyse des espaces disponibles, des bâtiments et de la configuration
- identification de toutes les parties d'installation nécessaires à l'exploitation de la centrale Phos4life: préparation des agents d'exploitation, stockage et évacuation des produits et des résidus, EMCR et interfaces avec les autres installations. L'analyse tient compte de l'intégration aux infrastructures existantes dans la mesure du possible et du raisonnable.
- examen des critères d'éligibilité du projet en vue des autorisations officielles
- budgétisation des dépenses d'investissement et d'exploitation

Dans tous ces aspects, il faut impérativement tirer parti des synergies escomptées avec l'usine SwissZinc et l'usine KEBAG Enova. Toutefois, aucune de ces synergies n'est prise en compte dans le calcul CAPEX/OPEX de la présente étude.

2.6 Mandat et objectifs de l'étude de faisabilité

L'étude de faisabilité répond aux objectifs suivants:

1. le projet remplit les critères d'éligibilité pour les autorisations;
2. un plan logistique optimal a été défini pour l'exploitation;
3. les schémas de principe et les diagrammes fonctionnels sont prêts;
4. La maquette de l'ouvrage préfigure la configuration complète de la centrale, comprenant les parties principales, les parties annexes, les locaux collectifs, les locaux annexes, le laboratoire, etc.;

5. Les dépenses d'investissement et d'exploitation ont été budgétées (OPEX +/- 10%, CAPEX +/- 30%)
6. Les synergies potentielles ont été évaluées
7. Les risques et les facteurs de blocage ont été identifiés et analysés.
8. Les premières étapes visant à créer une entité de financement «Phos4life» sont engagées.

Le présent rapport final d'étude technique résume les principaux résultats du projet. L'historique et les jalons du projet, de l'optimisation du procédé Phos4life à l'examen de la faisabilité sur le site Emmenspitz, sont schématisés ci-après. Ces étapes sont détaillées dans les chapitres suivants. Des documents complémentaires seront condensés sous forme de plan business d'ici fin 2023.

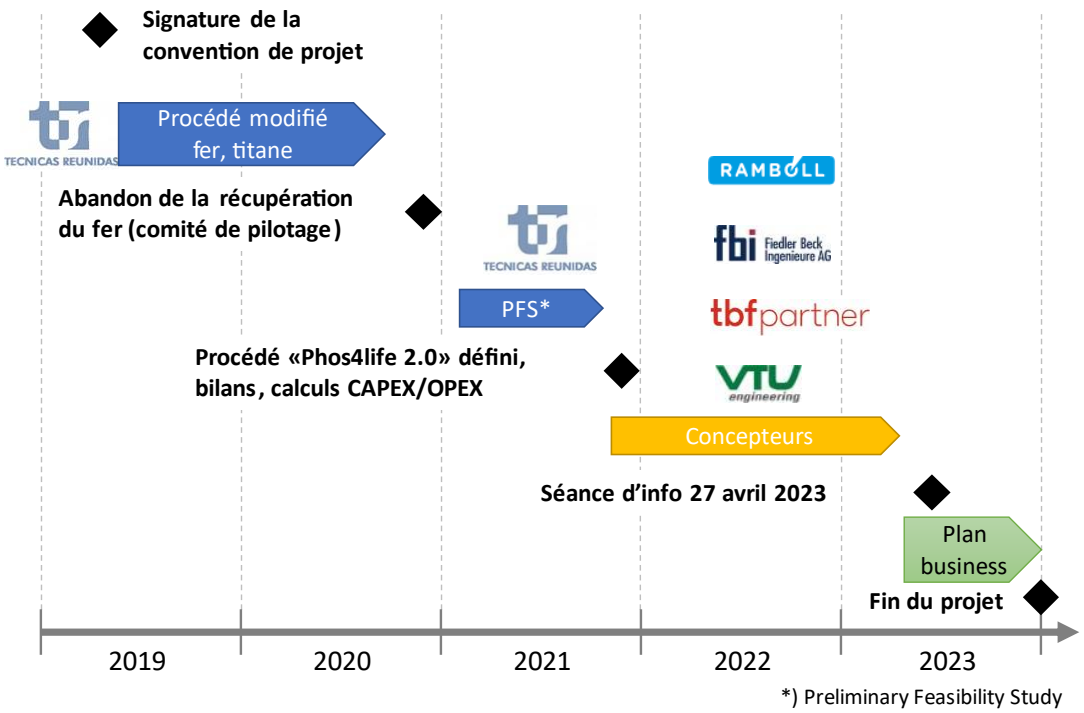


Fig. 2-6 Historique et jalons du projet

3. LE SITE EMMENSPITZ

Le site Emmenspitz dispose de différentes sources d'énergie renouvelable sous forme d'électricité, de vapeur et de chaleur à distance grâce à l'usine KEBAG Enova. Les connexions aux réseaux routier et ferroviaire offrent de bonnes ressources logistiques, lesquelles peuvent encore être développées au besoin. Ces ressources doivent toutefois faire l'objet d'une synchronisation avec les autres projets en cours sur le même site. Outre ces conditions d'ordre «constructif», le personnel d'exploitation présent sur le site a déjà l'expérience opérationnelle de l'installation FLUREC qui fonctionne selon une technologie similaire au procédé Phos4life, ce qui constitue un atout décisif pour l'intégration du procédé Phos4life.

Aujourd'hui, le site «Emmenspitz» regroupe les exploitations KEBAG et ZASE (voir fig. 3-1). La nouvelle UVTD (KEBAG Enova) est déjà en cours de construction et sa mise en service est attendue pour 2025. Quant au projet SwissZinc, il sera probablement réalisé entre 2025 et 2028.

Le terrain destiné à la nouvelle centrale Phos4Life sur le site Emmenspitz s'étend sur env. 1'900m^2 et mesure environ 95m de long sur 20m de large. Il se trouve entre l'UVTD existante, qui sera déconstruite après la mise en service de la nouvelle usine KEBAG Enova, et la STEP, qui reste en service. Deux bâtiments se trouvent encore dans la zone de construction, à savoir le bâtiment «FLUREC» et la «halle des turbines TG2» avec atelier intégré. La déconstruction possible de ces deux bâtiments nécessite une solution de remplacement pour l'atelier, lequel devrait être reconstruit dans le secteur KEBAG Enova. La réalisation du procédé Phos4life implique donc que l'usine KEBAG Enova soit en fonction, que l'ancienne UVTD soit déconstruite et que le nouvel atelier soit en fonction. Il n'y a actuellement pas d'autre terrain disponible sur le site Emmenspitz. Etant donné l'interdépendance avec le projet KEBAG Enova en cours et la déconstruction des parties d'installation existantes, le chantier Phos4life ne peut pas démarrer avant 2027.

1) UVTD KEBAG existante
2) ZASE (STEP)
3) Nouvelle KEBAG Enova (2020-2025)
4) SwissZinc (2023 - 2028)
5) Phos4life (2024 – 2030)

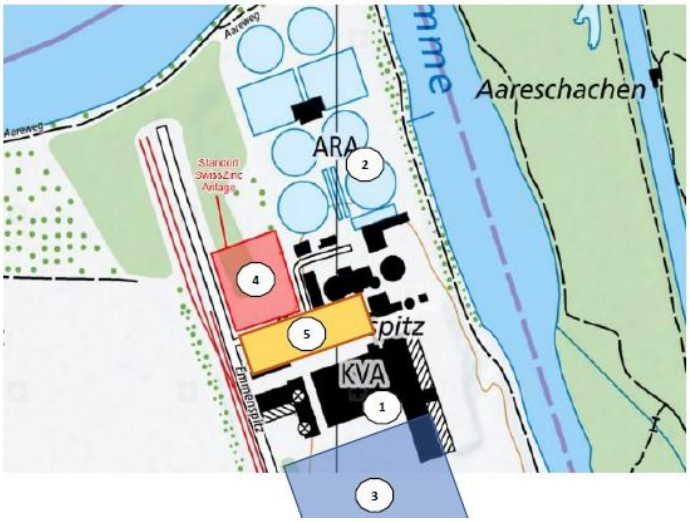


Fig. 3-1: Plan de situation des différentes exploitations sur le site Emmenspitz: KEBAG, ZASE, nouvelle centrale KEBAG Enova, projets SwissZinc et Phos4life

4. CENTRALE PHOS4LIFE

4.1 Procédé Phos4life

Le procédé Phos4life a été adapté et simplifié par rapport à la version présentée au chap. 2.3. En effet, le titane, utilisé sous forme de blanc de titane (oxyde de titane pur) dans différents produits, s'accumule aussi dans les cendres de boues d'épuration (voir fiche d'information 01, Le titane dans les cendres de boues d'épuration, 2020[4]). Au cours de la phase de récupération du fer (intégrée au processus Phos4life 1.0, cf. chap. 2.3), le titane s'enrichit lentement dans la phase organique de l'extraction du fer par solvatation. Il faudrait intégrer un palier complexe d'épuration pour corriger ce phénomène (cf. fiche d'information 02, Le titane dans les cendres de boues d'épuration, 2021[4]), ce qui entraînerait des coûts très élevés pour les agents d'exploitation (cf. annexe 01).

Le procédé Phos4life 2.0 se limite à la fabrication d'acide phosphorique techniquement pur à partir des cendres de boues d'épuration (CBE) et comporte trois paliers dans sa nouvelle mouture (Fig. 4-1). Les CBE sont transférées par camion dans des wagons-silos, qui eux-mêmes sont déchargés dans des silos fixes permettant une alimentation en continu du procédé. Le premier palier consiste à extraire le phosphore contenu dans les CBE sous acide sulfurique (lixiviation) et à le séparer sous forme d'acide phosphorique brut. La part minérale des cendres de boues d'épuration forme le lixiviat, composé essentiellement de gypse, de sable et d'oxyde de fer, qui doit être valorisé dans les cimenteries ou mis en décharge en Suisse. Le deuxième palier consiste à épurer l'acide phosphorique brut issu du palier précédent. La lixiviation mobilise non seulement le phosphore, mais aussi les métaux lourds par dissolution. Ceux-ci sont alors séparés au moyen d'une extraction par solvant (SX) pour former un résidu distinct (conditionnement), qui est recyclé ou éliminé. Le troisième palier consiste à concentrer l'acide phosphorique par évaporation, pour atteindre une concentration p. ex. à 75%, après quoi une épuration finale est obtenue à l'aide d'additifs (hydrogénosulfure de sodium NaHS et carbonate de baryum $BaCO_3$).

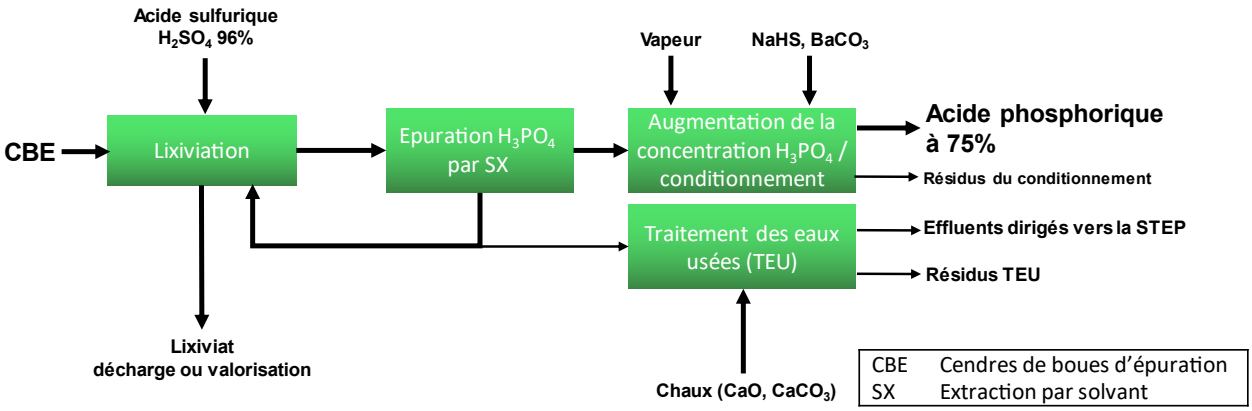


Fig. 4-1: Schéma de principe du procédé Phos4life 2.0

Le projet admet par hypothèse que les CBE ont une teneur moyenne en phosphore de 9% - en se fondant sur la teneur moyenne en phosphore des CBE du canton de Zurich sur le long terme, telle qu'elle a été établie pendant la phase de développement du projet en Espagne. La teneur en phosphore des cendres produites par les installations mono-incinération du projet est d'environ 8,3% en valeur pondérée, ce qui correspond au même ordre de grandeur. Le procédé Phos4life permet de

[4] Voir https://zar-ch.ch/zar/kompetenzenprojekte/phosphormining/

transférer le phosphore présent dans les cendres des boues d'épuration à >80% sous forme d'acide phosphorique. Les impuretés éliminées en cours d'épuration sont valorisées avec le résidu du conditionnement ou mises en décharge. Les eaux usées internes sont traitées dans une installation spécifique pour que leur déversement dans la STEP locale de la ZASE soit conforme à la protection des eaux. A cet effet, il faut neutraliser une quantité significative d'acide sulfurique non valorisable provenant de l'épuration de l'acide phosphorique par adjonction de chaux ($CaCO_3$). Le résidu forme une quantité significative de gypse (résidu TEU) qui peut être valorisée dans une filière de recyclage. La Fig. 4-2 rend compte des principaux flux de matières sous forme de bilan énergétique et de bilan de masse. A cet effet, le procédé a été subdivisé en deux sous-procédés fonctionnels, la «production de phosphore» et le «traitement des eaux usées». Le second est nécessaire seulement lorsqu'il n'y a aucune possibilité de valorisation externe de l'acide sulfurique contenu dans le flux interne d'eaux usées.

La chaleur résiduelle des condensats et des vapeurs des deux évaporateurs servant à concentrer l'acide phosphorique est récupérée au profit de la production de chaleur demandée par le procédé et par les installations du bâtiment (cf. annexe 3, Plan thermique). La chaleur des condensats est récupérée par un échangeur de chaleur pour couvrir la majeure partie de la chaleur nécessaire à l'exploitation (1,6 MW). La chaleur des vapeurs d'évaporation est récupérée par trois échangeurs de chaleur pour couvrir la demande en chaleur du bâtiment (1,7 MW) et pour couvrir le reste de la chaleur nécessaire à l'exploitation (0,2 MW). Quant au solde de 4 MW provenant du «refroidissement résiduel», une solution adéquate sera mise au point dans une phase ultérieure du projet (p. ex. dessiccation thermique des résidus P4L, SwissZinc, etc.), à partir du moment où la réalisation des autres projets envisagés sur le site Emmenspitz sera assurée. L'optimisation du plan thermique a permis de réduire la demande en chaleur d'environ 3,3 MW grâce à la récupération de chaleur.

Dans une étape ultérieure du projet, il s'agira d'évaluer de nouvelles solutions pour valoriser la quantité d'acide sulfurique générée, p. ex. une valorisation proportionnelle via SwissZinc, le «lessivage» des fractions de scories sèches, la remise à des recycleurs externes. Le projet présenté ici illustre le «scénario du pire», soit l'exploitation autonome du système P4L. L'acide sulfurique est neutralisé en totalité par adjonction de chaux et le gypse qui en résulte est valorisé ou éliminé. Les synergies avec SwissZinc, qui permettraient de valoriser au maximum 40% de cette quantité d'acide sulfurique sur le site même, ne sont pas prises en comptes à ce stade. Elles seront d'actualité à partir du moment où la réalisation du procédé SwissZinc sera assurée. Le plan présenté ici constitue en ce sens un scénario de référence autonome, réalisable au plan du traitement des eaux usées, mais pas encore optimisé, de sorte que son potentiel d'économie n'est pas encore épuisé.

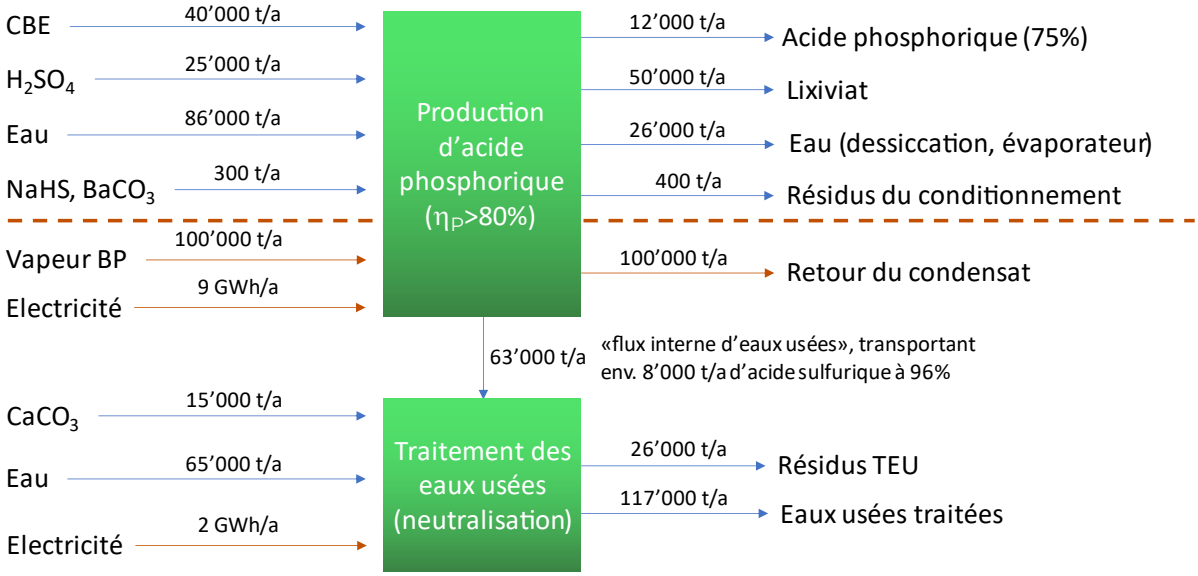


Fig. 4-2: Bilan de masse et bilan énergétique des flux principaux du procédé Phos4life intégrant le traitement des eaux usées (neutralisation de l'«acide sulfurique résiduel»)

L'acide phosphorique obtenu par le procédé Phos4life est de très haute qualité et répond aux spécifications de l'acide phosphorique techniquement pur (*technical grade acid*, TGA). Le tableau ci-dessous compare la composition de l'acide phosphorique et des cendres de boues d'épuration (matière de départ).

Outre le phosphore, on pourrait également exploiter les CBE pour récupérer le chlorure ferreux utilisé comme agent de précipitation, comme le prévoyait le procédé d'origine. Cela nécessiterait toutefois une installation nettement plus grande et des transbordements de matières nettement plus importants, pour lesquels l'espace nécessaire à la construction et à l'exploitation n'est pas disponible. En concertation avec le comité de pilotage P4L, ce procédé n'a pas été retenu dans l'étude du projet. Voir annexe 1 pour les détails à ce propos.

Tableau 4-1: Composition chimique des cendres de boues d'épuration (produit intermédiaire), de l'acide phosphorique P4L (produit) et de l'acide phosphorique technique répondant aux standards du marché (acide phosphorique Budenheim, techniquement pur)

Elément	CBE	Acide phosphorique P4L, 75%	Acide phosphorique Budenheim, techniquement pur, 75-85%
Teneur P [%]	9.0	23	23 - 27
Aluminium [mg/kg]	38'000	< 220	nd
Arsenic [mg/kg]	15	< 1	< 1
Plomb [mg/kg]	100	< 2	< 1
Cadmium [mg/kg]	5	< 0.5	< 1
Chrome [mg/kg]	200	< 1	< 1
Fer	170'000	< 3	< 5
Cuivre [mg/kg]	750	< 1	< 1
Nickel [mg/kg]	160	< 1	< 1
Sulfate [mg/kg]	12'000	<150	< 200
Zinc [mg/kg]	1'900	<5	Nd

Le procédé Phos4life doit être dimensionné de manière à offrir une capacité maximale de traitement de 40'000 t/a CBE et une disponibilité annuelle de 7'500 h/a. La centrale est conçue pour fonctionner 24h par jour et 7 jours par semaine (24/7) en horaire continu. Sa gestion devra être organisée conjointement avec celle de l'usine SwissZinc, qui se trouve sur le même site (cf. chap. 4.8, Plan d'exploitation).

4.2 Installations annexes

Les installations annexes englobent toutes les parties d'installation nécessaires à la gestion du procédé Phos4life. Elles ont été dimensionnées pour une durée d'exploitation de 7'500 heures par an et une autonomie sans entrée ni sortie de matières pendant 5 à 10 jours. Les installations annexes sont les suivantes:

- 4 silos de 375 m^3 pour le stockage des cendres de boues d'épuration
- réservoirs en bunkers de 1'000 m^3 et de 2'000 m^3 pour le stockage pendant 5 jours et l'évacuation des résidus
- parc à conteneurs pour le stockage et l'évacuation des résidus de conditionnement
- entrepôt destiné au stockage des produits chimiques, équipé des systèmes de remplissage et de dosage pour les agents d'exploitation (notamment 2 silos à 160m^3 pour la chaux, 2 réservoirs à 216m^3 pour l'acide sulfurique, 3 réservoirs à 94m^3 pour l'acide phosphorique)
- générateur d'air comprimé
- système de traitement de l'eau en fonction des qualités requises (eau adoucie et eau totalement déminéralisée)
- installations de traitement des eaux usées
- surfaces de stockage pour petits réservoirs, Big Bags et conteneurs IBC
- installations de ventilation technique

En ce qui concerne l'entrepôt de produits chimiques, une attention particulière a été portée à la question de la substitution du sulfure d'hydrogène (H_2S) recommandé par TR pour l'épuration de l'acide phosphorique: en effet, le sulfure d'hydrogène présente un risque de manipulation élevé pour le transport, le stockage et l'utilisation. En cours de développement, ce produit chimique a pu être remplacé par l'hydrogénosulfure de sodium (NaHS), nettement plus facile à manipuler, ce qui a permis de réduire les risques encourus (cf. analyse des risques).

4.3 Plan logistique

Le plan logistique se fonde sur la liste des flux de matières représentés au Tableau 4-2 et les flux massiques pertinents. Le fonctionnement de la centrale Phos4life implique l'arrivée d'environ 85'000 tonnes de matériaux par an et le départ de 90'000 tonnes par an, soit un volume total de transbordement de 175'000 tonnes par an. Les flux massiques prédominants sont les cendres de boues d'épuration, l'acide sulfurique et le lixiviat généré par la production de l'acide phosphorique, l'utilisation de chaux et le gypse résultant du traitement des eaux usées.

Tableau 4-2: Flux de matières P4L par route et par train

Désignation	Consom-mation [t/a]	Moyens de transport	Nombre de récipients Par année	Par jour
Input				
Cendre de boues d'épuration (CBE)	40'000	camion	1667	7
Acide sulfurique 96%	25'000	train	417	2
Chaux (CaCO3)	15'000	camion	625	3
Soude caustique 50%	2'000	camion	84	<1
Chaux vive (CaO)	600	camion	25	<1
Sole NaCl 30%	560	camion	24	<1
Solution d'hydrogénosulfure de sodium NaHS	290	camion	12	<1
Acide chlorhydrique 32%	250	camion	11	<1
Produits en petites quantités (agent floculant, carbonate de baryum, charbon actif, etc.)	< 200	camion		<1
Output				
Acide phosphorique 75%	12'000	train/ camion	200/500	1/2
Lixiviat, 90% MS	50'000	train	3846	15
Résidu de conditionnement 70% MS	400	camion	31	<1
Résidu du traitement des eaux, 90% MS	26'000	train	2000	8

Les flux de transport routiers et ferroviaires ont été examinés à la lumière de cette analyse quantitative. S'agissant du transbordement des produits chimiques, une nouvelle desserte ferroviaire doit être aménagée à l'ouest de la future usine SwissZinc pour rejoindre la centrale Phos4life. Le raccordement à la centrale Phos4life se fait par pompage des produits chimiques. L'évacuation des résidus solides par train emprunte la desserte existante, partagée avec KEBAG Enova et SwissZinc. Le transbordement du fret routier est illustré à titre d'exemple à la Fig. 4-3 pour la livraison des cendres de boues d'épuration et de chaux. L'annexe 2 représente la situation pour les autres flux de livraison et d'évacuation. Les flux de matières font l'objet d'un pesage à l'entrée et à la sortie en partageant les plateformes de pesage dont la réalisation est prévue dans le cadre du projet KEBAG Enova. Des solutions ont ainsi pu être trouvées pour tous les flux de matières et sont intégrées au plan logistique existant.

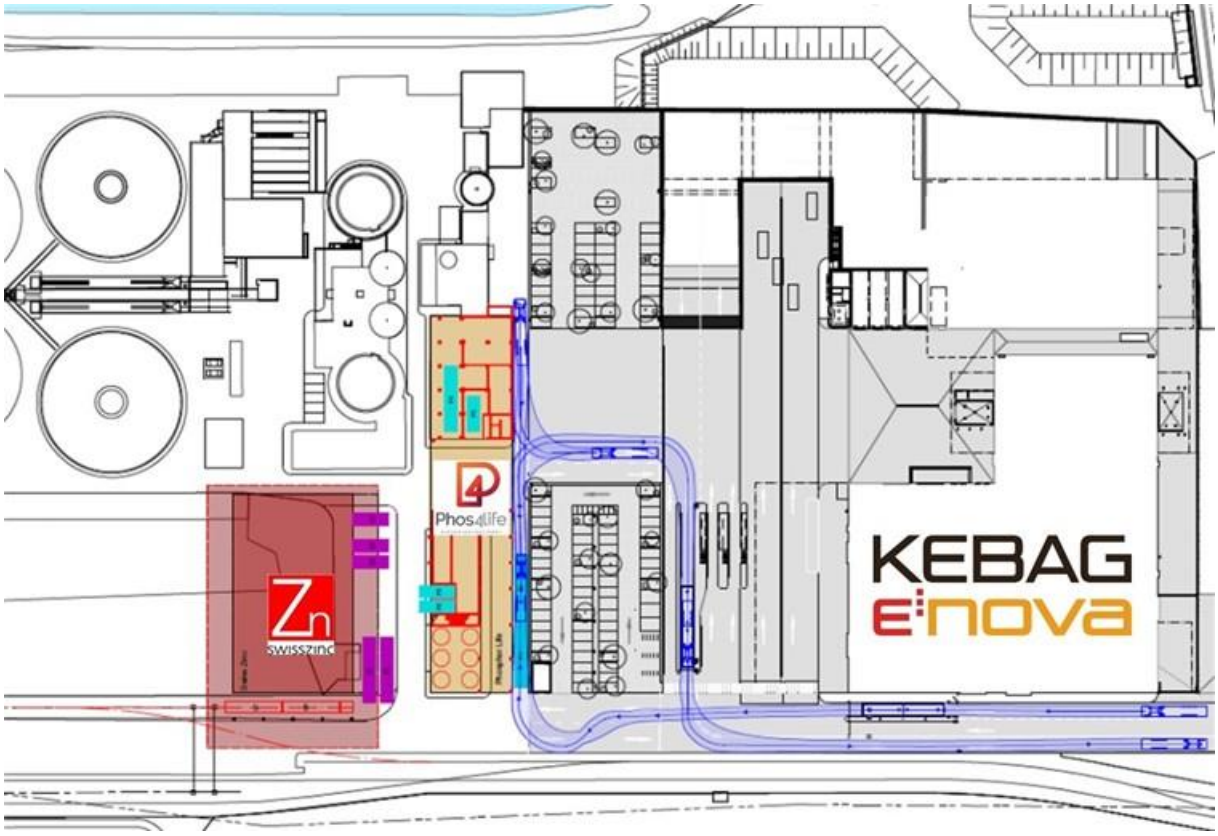


Fig. 4-3 Scénario de livraison des cendres de boues d'épuration et de chaux par camion/wagon-silo

4.4 Infrastructures électriques et système de gestion

Les infrastructures électriques et le système de gestion s'intègrent dans le système existant sur le site (base de référence: KEBAG Enova). Le bâtiment est alimenté en moyenne tension à partir de la ceinture de distribution électrique du site. Le bâtiment P4L est doté de deux transformateurs indépendants ainsi que d'un tableau de distribution basse tension. Le système de gestion est exécuté de manière analogue au système de gestion de KEBAG-Enova pour exploiter de manière optimale les synergies au niveau exploitation, maintenance et stock de pièces détachées (cf. chap. 4.8).

L'alimentation électrique est assurée via KEBAG Enova et nécessite une puissance de raccordement d'env. 3'000 kVA. Le procédé représente globalement env. 600 instruments, 300 consommateurs d'électricité et 1'300 émetteurs de signaux raccordés et gérés.

4.5 Intégration et optimisation énergétique

Outre l'alimentation électrique évoquée ci-dessus, l'exploitation de la centrale Phos4life a besoin d'énergie avant tout pour l'évaporation, l'augmentation de la concentration de l'acide phosphorique et le refroidissement. L'optimisation du plan énergétique chaud/froid permet une intégration idéale sur le site et repose sur les principes suivants:

- L'approvisionnement en chaleur est fourni sous forme de vapeur par KEBAG Enova,
- Le refroidissement est obtenu en premier lieu en utilisant l'eau de l'Aar,
- Le refroidissement est fourni par des unités hybrides lorsque l'eau de l'Aar ne peut pas être utilisée en raison des prescriptions légales (température de l'Aar >25°C).

La demande en chaleur de la centrale Phos4life se monte à environ 11,5 MW, dont 8,2 MW pour l'augmentation de la concentration de l'acide phosphorique par évaporation de l'eau, 1,6 MW pour le reste du procédé technique et 1,7 MW pour les installations du bâtiment. L'optimisation du plan de récupération de chaleur (voir schéma, annexe 3) a permis de réduire la demande globale en chaleur à 8,5 MW (chaleur d'évaporation nécessaire). La demande en chaleur pour le reste du procédé technique ainsi que pour les installations du bâtiment est couverte par le refroidissement des vapeurs générées par les évaporateurs. Les condensats ainsi générés sont réutilisés dans le processus, ce qui réduit la consommation d'eau de la centrale.

La Fig. 4-4 illustre l'évolution de la température moyenne et de la température maximum de l'Aar. Le site Emmenspitz est soumis par le canton de Soleure à la condition que si la température de l'Aar dépasse 25°C, elle ne peut être augmentée que de 0,01°C maximum. Cette marge de température est déjà complètement épuisée par KEBAG-Enova.

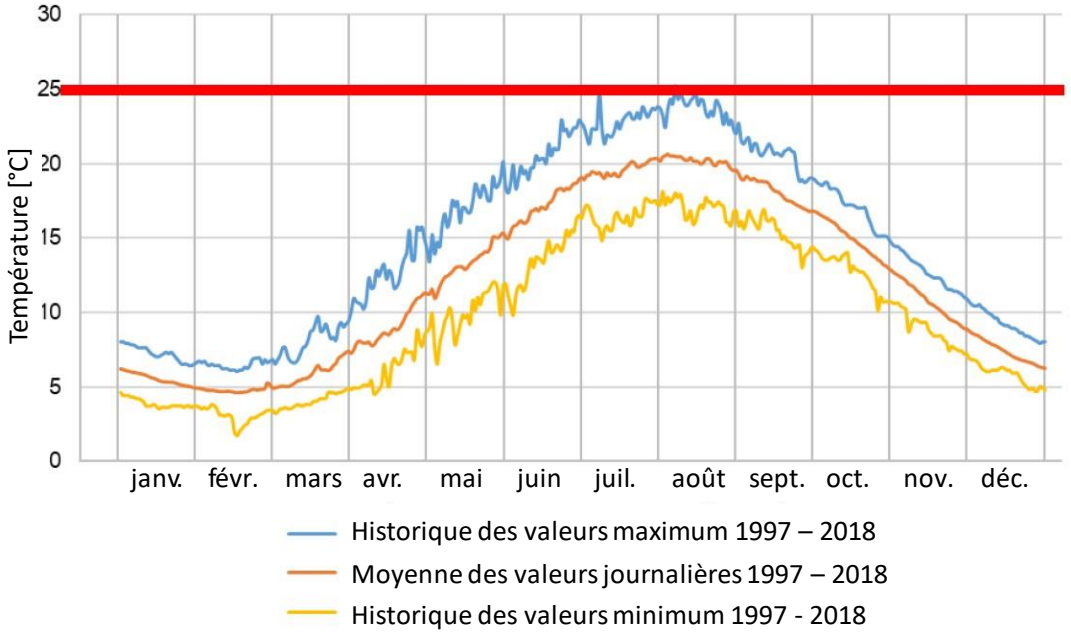


Fig. 4-4 Historique de la température de l'Aar

Les jours durant lesquels l'Aar atteint une température >25°C étaient très rares par le passé et ont même disparu depuis l'arrêt de la centrale nucléaire de Mühleberg. Toutefois, on s'attend à ce que la température de l'Aar dépasse les 25°C pendant des périodes assez longues sous l'effet du changement climatique et de la sécheresse croissante. La puissance de refroidissement de la centrale Phos4life doit être garantie en toute situation. Par conséquent, elle est dotée de 7 refroidisseurs hybrides d'une puissance de 1MW chacun pour pouvoir fonctionner en toute indépendance. Ce facteur est déjà pris en compte dans les dépenses d'investissement (CAPEX), mais pas dans les dépenses d'exploitation (OPEX), étant donné qu'il n'est pas pertinent.

4.6 Plan d'affectation et intégration

L'affectation des locaux et des surfaces nécessaires aux processus principal, aux installations annexes, aux installations techniques et aux installations électriques des locaux collectifs et des locaux d'exploitation est définie par le plan d'affectation. L'analyse a notamment porté sur la question de

savoir si les deux bâtiments existants «FLUREC» et «Halle des turbines TG2» peuvent être conservés en tout ou partie.

La halle des turbines, de construction mixte béton armé/acier léger, ne peut être réutilisée pour les composants du système Phos4life à cause de ses structures légères en acier. Elle sera donc complètement déconstruite et remplacée par le nouveau bâtiment Phos4Life.

Le bâtiment FLUREC présente une construction massive, et est déjà équipé pour le transbordement et le stockage des produits chimiques étant donné son ancienne affectation. Ce bâtiment peut être réaffecté au système Phos4Life et doit être conservé en majeure partie, respectivement intégré au nouveau bâtiment Phos4Life.

4.6.1 Bâtiment Phos4Life

Le bâtiment Phos4Life occupe une surface au sol d'environ 1'900m^2. Il comporte un niveau de caves, un rez-de-chaussée et cinq étages. Il atteint une hauteur maximale d'environ 30 mètres. Le volume construit est de 57'800m^3. Le bâtiment FLUREC demeure conservé dans sa majeure partie. Il est relié à partir du 1er étage à la façade ouest du nouveau bâtiment et sera surmonté d'un étage supplémentaire.

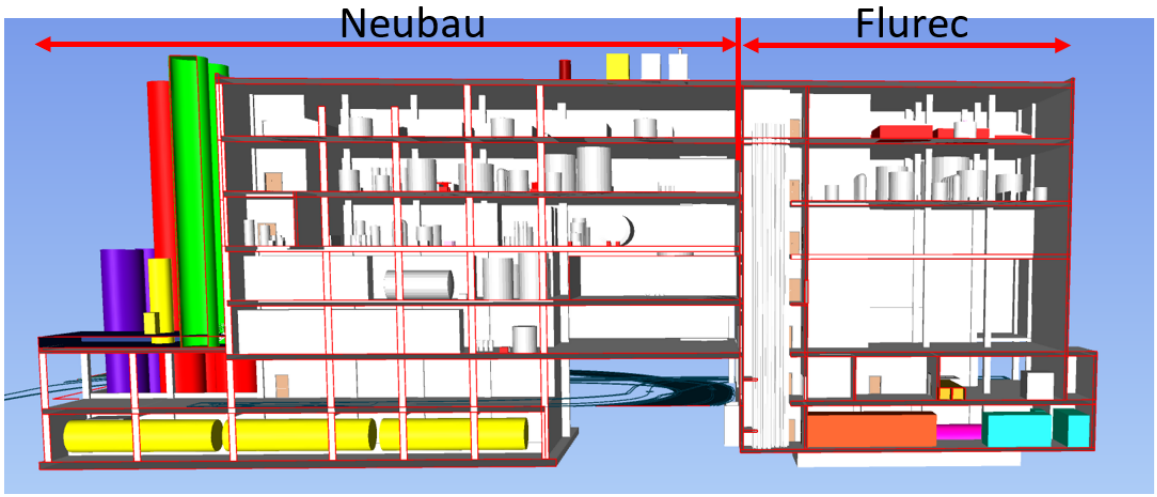


Fig. 4-5 Vue en coupe de l'ouvrage (direction est-ouest). La zone extérieure ouest est occupée par les silos à cendres de boues d'épuration (rouge), à chaux (violet) ainsi que par les réservoirs d'acide sulfurique (vert). Le passage conservé entre le nouveau bâtiment et l'ancien bâtiment «FLUREC» facilite la gestion des agents d'exploitation et l'accès à l'usine SwissZinc ainsi qu'à la STEP ZASE.

Tous les niveaux du bâtiment sont reliés par la cage d'escaliers existante et par l'ascenseur du bâtiment FLUREC ainsi que par la nouvelle cage d'escaliers et le nouvel ascenseur aménagés dans le nouveau bâtiment. Les deux cages d'escaliers permettent d'accéder au niveau du toit. Le niveau des caves et le rez-de-chaussée sont subdivisés en deux corps de bâtiment - FLUREC et nouvelle construction – sans liaison directe. A partir du 1er étage (niveau du terrain +4,90m), les deux bâtiments sont reliés.

Compte tenu des conditions de logistique dans l'enceinte du site, un passage de 8m de largeur a été aménagé au niveau du rez, du côté sud du nouveau bâtiment Phos4Life. Ce passage suit le long du nouveau bâtiment et passe entre les deux bâtiments. Il sert de liaison routière vers la STEP et vers la future usine SwissZinc ainsi que vers la place de transbordement des produits chimiques.

Les locaux collectifs indispensables sont aménagés dans le nouveau bâtiment, à partir du 3e étage (niveau du terrain +14,70m), dans une aile saillante de trois étages. Elle abrite les vestiaires, les locaux sanitaires, le laboratoire, les archives ainsi que les bureaux, la cafétéria et les salles de réunion. Cette aile saillante a une longueur de 28,5m et un porte-à-faux de 6m côté nord, surplombant la surface de dégagement jouxtant l'usine SwissZinc.

Tel qu'il est prévu, le bâtiment Phos4Life offre une surface utile d'env. 9'500m^2. Selon l'état actuel des études, le système Phos4Life occupera env. 8'000m^2, soit 84% des surfaces disponibles. Les surfaces libres sont essentiellement groupées dans le bâtiment FLUREC et servent de réserve pour l'évolution future du projet.

4.6.2 Fondations

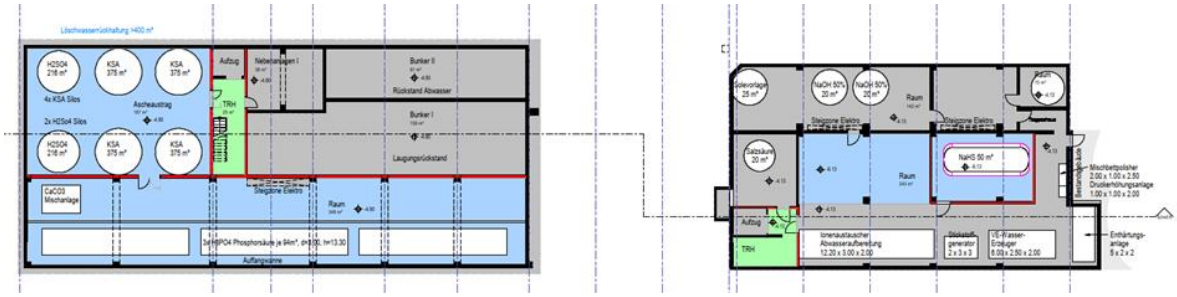
Le sous-sol a fait l'objet d'investigations coordonnées avec les travaux en cours pour la construction de l'usine KEBAG Enova. D'après les résultats, il faut partir du principe que le nouveau bâtiment Phos4Life nécessite des fondations profondes. Il s'agit de choisir une méthode de soutènement par pieux forés pour réduire autant que possible les vibrations.

De plus, la zone dans laquelle le bâtiment FLUREC s'engrène dans le nouveau bâtiment nécessite une semelle filante coulée également sur des pieux forés pour assurer la reprise de charge des appuis au niveau des caves.

4.6.3 Secteurs / locaux et fonctions

Il s'agit ici de décrire schématiquement l'affectation des différents locaux, subdivisés en deux zones, le secteur «FLUREC» et le secteur «construction Phos4life».

4.6.3.1 SS, niveau du terrain -4.90



FLUREC

Les caves du secteur FLUREC sont déjà aménagées pour le stockage des produits chimiques et seront reprises tel quel pour la centrale Phos4Life. Dans la zone nord, les réservoirs existants seront affectés au stockage de la sole (25m^3) ainsi que du NaOH 50% (2x 20m^3). Les deux locaux spécialisés pour l'acide chlorhydrique (20m^3) et l'hydrogénosulfure de sodium NaHS (50m^3) seront aussi repris ou réaffectés.

Par ailleurs, les composants du système de traitement des eaux seront aménagés également ici.

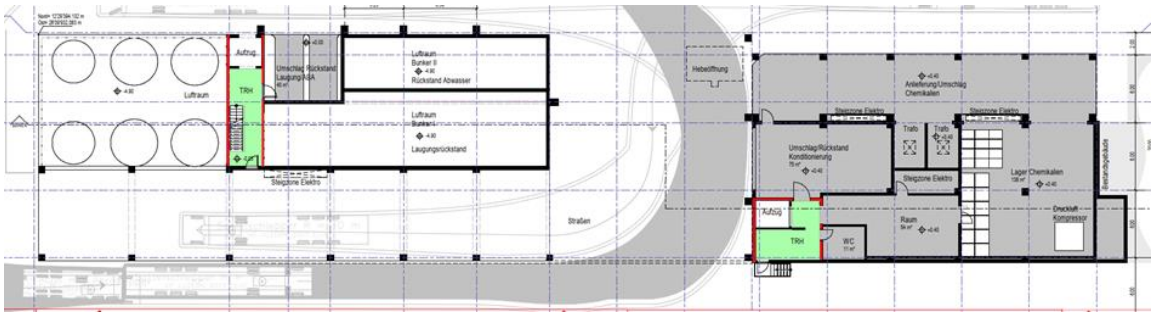
De plus, la zone centrale en bleu, plus profonde, sert de retenue pour l'eau d'extinction en cas d'incendie grave (capacité env. 200m^3).

Nouveau bâtiment

Côté nord, on voit la semelle des deux bunkers qui servent au stockage des lixiviats et du traitement des eaux usées (TEU). Les bunkers ont été dimensionnés pour une capacité de stockage de cinq jours et s'élèvent jusqu'à la hauteur du 3e étage.

A l'extérieur, côté ouest, on voit la semelle de fondation pour les silos destinés au stockage des cendres de boues d'épuration (4 silos) et pour l'acide sulfurique (2 réservoirs). Le stockage de l'acide phosphorique est placé dans une cave côté sud, dans laquelle les trois réservoirs peuvent être logés en position horizontale. Ce local abrite également le mélangeur de $CaCO_3$.

4.6.3.2 Rez-de-chaussée, niveau du terrain +/-0.00m



FLUREC

L'espace du rez-de-chaussée sera repris tel quel pour les installations Phos4Life. Aussi bien la zone de déchargement protégée par l'avant-toit côté nord que la halle de chargement sont réutilisables. Dans les locaux à disposition ici, il est prévu de placer les deux transformateurs (cf. chap. 3.1) ainsi que le stockage des agents d'exploitation en conteneurs IBC ou en fûts à bonde (matières liquides) et des Big Bags (pour le stockage de solides). La station à air comprimé sera également logée ici.

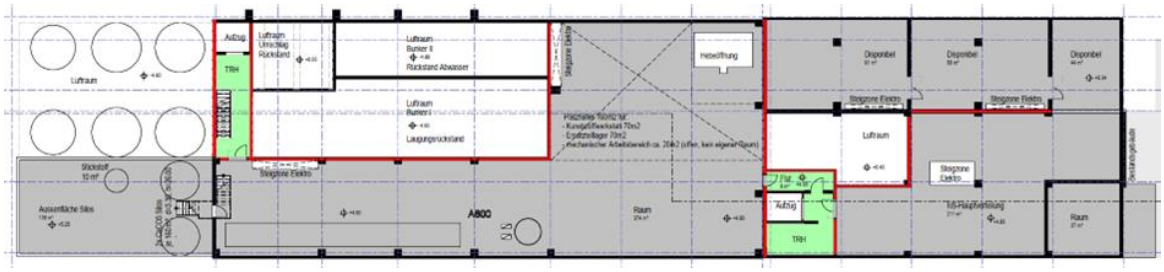
Nouveau bâtiment

Côté nord, deux quais de chargement sont aménagés pour le transbordement des résidus. Ces emplacements servent également au déploiement d'un grappin pour la révision du pont roulant. Les résidus sont transbordés à l'aide d'une grue du bunker au conteneur ACTS, dans lequel ils sont vidés. Le conteneur est ensuite transbordé par un camion à chaîne sur un wagon de ferroutage.

Côté sud de l'installation, on trouve l'entrée principale avec accès à la cage d'escaliers et à l'ascenseur. A cet étage, l'ascenseur a une cage à double ouverture , de sorte qu'il peut être utilisé des deux côtés pour le chargement ou le déchargement

Le passage aménagé entre les deux bâtiments facilite les manœuvres de livraison et de prise en charge des agents d'exploitation ainsi que l'accès à la STEP ZASE de même qu'à l'usine SwissZinc.

4.6.3.3 1er ET, niveau du terrain +4.90m



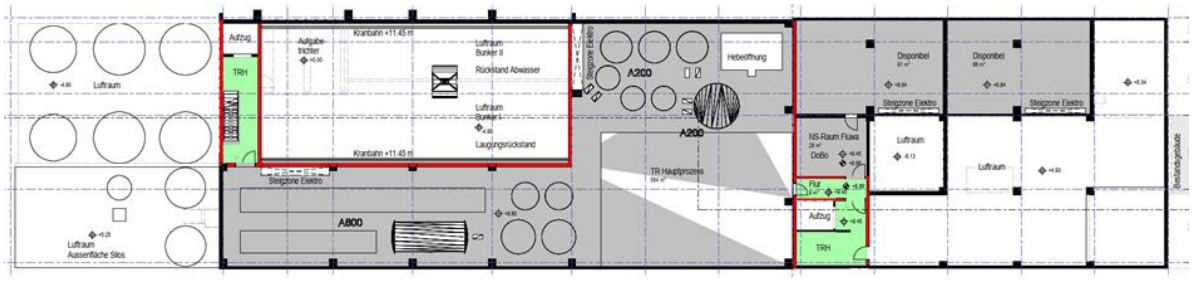
FLUREC

Ce niveau offre suffisamment de place pour loger le tableau de distribution électrique basse tension. Les surfaces et les locaux encore disponibles à cet étage représentent une surface d'environ 260m^2 à disposition pour une future phase de développement du projet.

Nouveau bâtiment

Cet étage est occupé par le stock de pièces détachées, un atelier spécialisé pour les matériaux synthétiques et un atelier de mécanique ouvert. Les autres surfaces intérieures sont réservées pour l'agencement des principaux composants techniques selon le plan de Técnicas Reunidas.

4.6.3.4 2e ET, niveau du terrain +9.40m



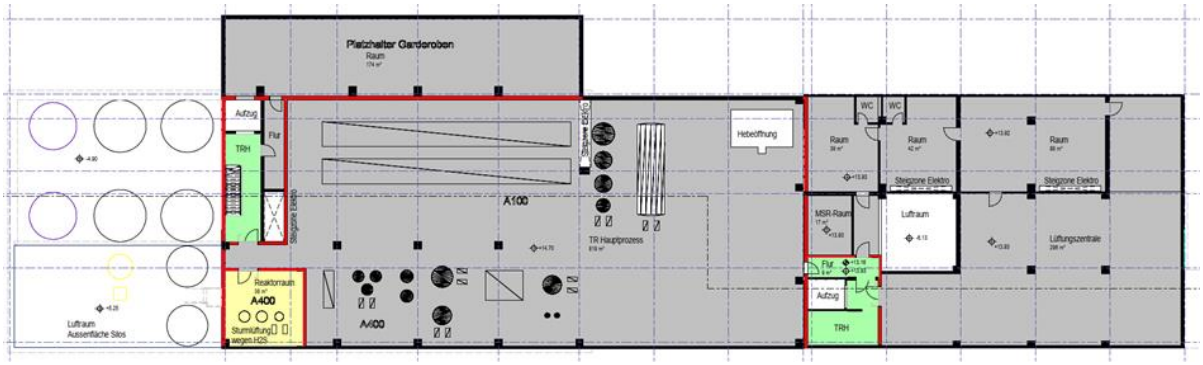
FLUREC

Le «Local NS Fluwa» est destiné à rester au stade du gros œuvre et servira à loger les appareillages électriques. Cet étage offre encore des surfaces et des locaux libres totalisant une surface disponible d'env. 180m^2. Cette zone peut être réaffectée en fonction de nouvelles exigences.

Nouveau bâtiment

La surface totale est réservée pour l'agencement des principaux composants techniques selon le plan de Técnicas Reunidas.

4.6.3.5 3e ET, niveau du terrain +14.70m



FLUREC

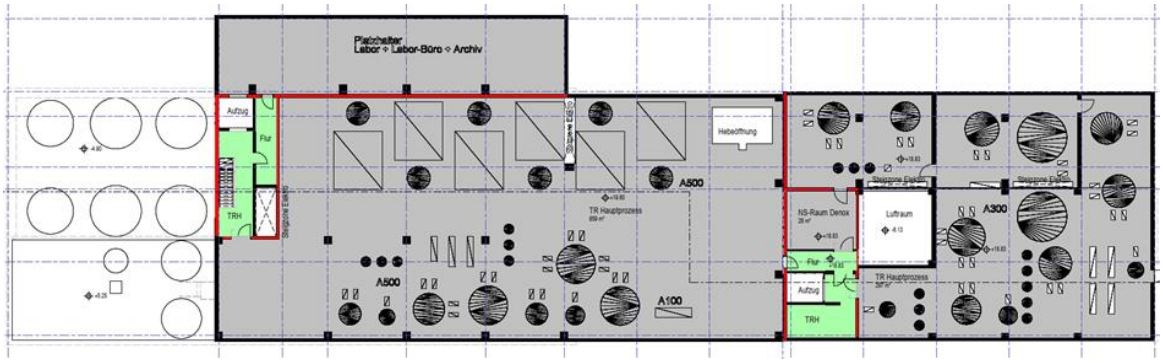
L'actuel local MCR (avec faux-plancher), le local de commande et le laboratoire, y compris les WC, seront réutilisés pour l'exploitation Phos4Life. Cet étage offre suffisamment de place pour loger la nouvelle centrale de ventilation de la centrale Phos4Life.

Nouveau bâtiment

La surface totale est réservée pour l'agencement des principaux composants techniques selon le plan de Técnicas Reunidas. On y trouve notamment le «local des réacteurs», dans lequel les réacteurs seront logés pour la fabrication in situ du sulfure d'hydrogène et pour son utilisation. Ce local doit être rendu étanche au gaz et nécessite une ventilation tempête et des dispositifs de sécurités adaptés.

De plus, un accès direct mène aux vestiaires avec douches et WC qui se trouvent dans la «Saillie Nord». Les vestiaires sont dimensionnés pour 15 personnes présentes simultanément.

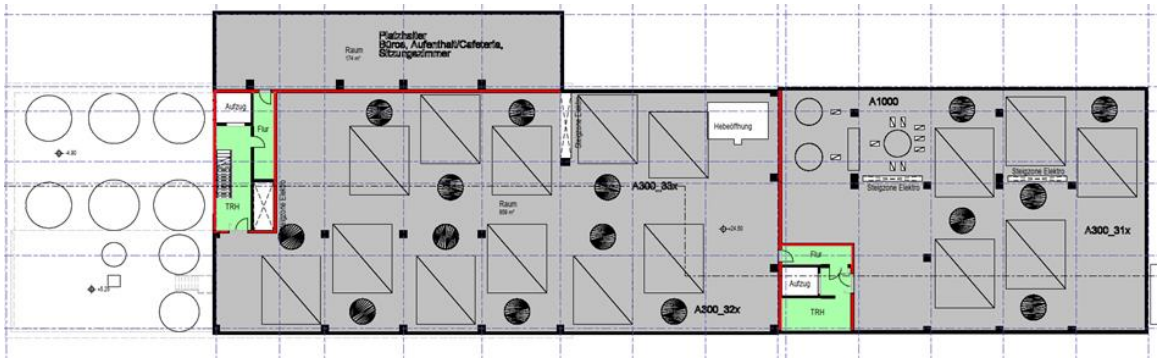
4.6.3.6 4e ET, niveau du terrain +19.60m



FLUREC et nouveau bâtiment

Le local NS Denox existant (avec faux-plancher) est destiné à rester au stade du gros œuvre. La surface restante est réservée pour l'agencement des principaux composants techniques selon le plan de TR et doit être adaptée aux nouvelles exigences. De plus, la «Saillie Nord» accueille un bureau et des locaux de stockage.

4.6.3.7 5e ET, niveau du terrain +24.50m



FLUREC et nouveau bâtiment

La surface totale de ce nouvel étage est réservée pour l'agencement des principaux composants techniques selon le plan de TR. De plus, la «Saillie Nord» accueille la cafétéria et les salles de réunion.

4.6.4 Installations de chantier et aire de montage

Les installations de chantier et l'aire de montage nécessitent un dégagement de min. 1'500m^2. La déconstruction de l'actuelle UVTD libérera une surface équivalente qui servira temporairement à la construction de la centrale Phos4life.

Fig. 4-6 Aires de chantier prévues pour les projets Phos4life et SwissZinc

4.7 Aspects relatifs aux autorisations et aspects environnementaux

Compte tenu du potentiel de risque lié aux quantités stockées, le projet Phos4life tombe sous le coup de l'ordonnance sur les accidents majeurs. Le site Emmenspitz, où sont déjà présents KEBAG Enova et SwissZinc, dispose du savoir-faire et de l'expérience nécessaires pour maîtriser ces risques. Le site en question se trouve en dehors des zones résidentielles, et aucune manifestation publique à forte fréquentation n'a lieu à proximité, ce qui a une incidence positive sur les risques.

La présente étude montre que le procédé Phos4life envisagé sur le site Emmenspitz est conforme au plan de zone. Ce projet respecte les génératrices découlant des prescriptions particulières du plan d'aménagement Emmenspitz.

Selon l'état actuel du projet, la réalisation du projet Phos4life ne nécessite aucune adaptation du plan de zones ni du plan d'aménagement. Les conditions relevant de l'aménagement du territoire peuvent être respectées.

L'enquête préliminaire à l'étude d'impact sur l'environnement (EP-EIE) a débouché sur un résultat positif. En l'état des connaissances actuelles, le projet respecte les prescriptions applicables en matière de protection de l'environnement. Cette conclusion est confirmée par un préavis du canton de Soleure en date du 29.11.22.

Dans le cadre de la prochaine étape du projet, il s'agira d'effectuer l'étude d'impact en elle-même et de clarifier les points en suspens.

4.8 Modèle d'exploitation

Le modèle d'exploitation pour une centrale Phos4life sur le site Emmenspitz devra être coordonné entre l'«entité Phos4life» et les autres entités actives sur le site ou en phase d'étude (KEBAG Enova, SwissZinc). Une exploitation totalement autonome avec un personnel P4L totalement dédié (env. 30 équivalents plein temps, EPT) serait une option très lourde en termes de ressources humaines et de coûts. Les synergies entre les projets SwissZinc et Phos4life, tous deux étant basés sur une technologie similaire, ainsi qu'avec KEBAG Enova resteraient ainsi en friche.

En l'état, l'implantation de SwissZinc sur le site Emmenspitz n'est pas encore entérinée. On ne peut donc formuler que des hypothèses quant aux modèles d'exploitation possibles. Plusieurs variantes entre en ligne de compte. Voici deux scénarios possibles à titre d'exemple:

a) SwissZinc est réalisé sur le site Emmenspitz. SwissZinc et Phos4life se mettent ensemble pour créer une équipe opérationnelle largement indépendante de KEBAG, dont la mission est d'exploiter les deux infrastructures ainsi que le laboratoire central. Seuls les éléments d'ordre supérieur sont organisés de manière centralisée par KEBAG Enova (p. ex. maintenance des équipements mécaniques et électriques), P4L met à disposition 300 pour cent EPT. Les charges en personnel P4L inhérentes à cette variante représentent environ 18 EPT. Les effectifs de personnel commun pour P4L et SwissZinc s'élèvent à env. 40 personnes.

b) SwissZinc n'est pas réalisé sur le site Emmenspitz. Phos4life peut être exploité dans une très large mesure par le personnel KEBAG. Phos4life met à disposition un chef d'exploitation (100%) et le personnel de laboratoire (300%). De surcroît, Phos4life finance les charges salariales pour un collaborateur supplémentaire par équipe horaire, et pour 6 collaborateurs durant les heures de travail diurne: administration (50%), finances (50%), entretien et maintenance (300%), production (150%) et logistique (50%). Ce scénario nécessite la mise à disposition d'env. 14 EPT.

Le budget du procédé Phos4life admet 18 postes EPT. Le modèle d'exploitation devra être précisé dans une phase ultérieure entre la future entité Phos4life et KEBAG.

5. CALCUL DE RENTABILITÉ

Les tensions géopolitiques actuelles se traduisent par un facteur d'incertitude très élevé, tant en ce qui concerne le calcul des coûts que la situation sur le marché des matières premières. L'analyse des coûts présentée ci-après se fonde par conséquent sur le niveau des prix 2020.

5.1 Coûts d'investissement

Les coûts d'investissement ont été calculés dans le cadre du projet avec une marge de +/- 30%. Le terrain nécessaire est mis à disposition par KEBAG moyennant un droit de superficie de 75 ans. Le calcul admet un prix régional pour les terrains industriels de 135 CHF/m^2, aux conditions d'intérêt usuelles, corrigé selon l'indice du renchérissement. Au Tableau 5-1, les coûts d'investissement sont récapitulés selon le Code des frais de construction (CFC). Le détail des postes figure à l'annexe 4. Concernant le plan énergétique optimisé chaud/froid, un montant de CHF 3,5 mio. est déjà inclus au poste CFC 3. Le coût total pour la construction de la centrale se monte à environ CHF 155 mio.

Tableau 5-1 Coûts d'investissement (avant TVA et renchérissement)

CFC	Postes	Coûts [CHF]
0	Terrain (y.c. dédommagements pour les ouvrages existants)	7'000'000
1	Travaux préparatoires	11'000'000
2	Bâtiment	23'000'000
3	Equipements d'exploitation / procédé et installations annexes	67'000'000
4	Aménagements extérieurs	5'000'000
5	Frais secondaires	15'000'000
6	Réserve pour imprévus	25'000'000
9	Ameublement et décoration	2'000'000
	Somme	**155'000'000**

Les «frais secondaires» figurant sous CFC 5 sont fonction de la forme d'organisation et du modèle d'exploitation. Etant donné que la centrale P4L n'est pas une exploitation existante et indépendante, les coûts répertoriés au Tableau 5-2 engagés durant les phases d'étude, de construction et de mise en service doivent être entièrement financés à travers les coûts d'investissement, attendu qu'il n'y aucune recette provenant de l'activité opérationnelle durant ces phases.

Tableau 5-2 Détail des coûts pour les postes CFC 54 à 56, Frais secondaires (avant TVA)

CFC	Postes	Coûts [CHF]
CFC 54	Frais de financement pour les capitaux tiers nécessaires jusqu'au début de l'exploitation régulière	5'600'000
CFC 551	Prestations du maître d'ouvrage (conseil d'administration, direction générale, direction du projet, etc.)	2'500'000
CFC 552	Personnel d'exploitation jusqu'au début de l'exploitation régulière	3'200'000
CFC 59	Honoraires, direction externe du projet, spécialistes, etc.	2'500'000

Compte tenu de la durée d'amortissement indiquée au Tableau 5-3 pour les différentes parties d'installation, les investissements correspondent, compte tenu d'un taux d'intérêt de 2%, à des coûts de financement de CHF 7,6 mio./a, soit 189 CHF/t CBE. Etant donné que la majeure partie des composants mécaniques sert au traitement de liquides non abrasifs, la durée d'amortissement a été fixée à 25 ans pour les installations techniques. Les composants utilisés sont des éléments standard tels que cuves, agitateurs et pompes, et non pas des systèmes complexes et onéreux dont la durée

de vie est plus longue. Les réinvestissements visant à maintenir la valeur des composants mécaniques et électriques n'ont pas été comptabilisés dans les coûts de financement. Ces réinvestissements sont compris dans les coûts d'exploitation courants, au poste Maintenance (cf. annexe 5). Une analyse différenciée des coûts sera établir dans le cadre du plan business à fin 2023.

2

Tableau 5-3 Durées d'amortissement et coûts de financement (avant TVA et renchérissement)

Postes	Investissements [mio. CHF]	Amortissements [a]	Coûts de financement [CHF]
Procédé de récupération du phosphore	35.6	25	1'820'000
Traitement des eaux usées	5.5	25	280'000
Installations annexes	17.9	25	920'000
EMCRG	7.7	15	600'000
Bâtiment	48	33	2'000'000
Frais accessoires	15	33	630'000
Réserve	25.5	25	1'310'000
	155		**7'600'000**

5.2 Coûts d'exploitation et calcul de rentabilité

L'exploitation d'une centrale P4L ayant une capacité de traitement de 40'0000 t/a CBE implique des coûts d'exploitation résumés au Tableau 5-4 (OPEX, marge +/- 15%). Le détail de ces coûts figure à l'annexe 5. KEBAG facture l'électricité à un prix usuel pour la branche, en prenant la moyenne du prix de l'électricité sur trois ans. Pour l'année de référence 2020, le prix de l'électricité se monte par conséquent à 80 CHF/MWh. Les coûts pour la fourniture de vapeur se calculent d'après le manque à gagner sur l'électricité nécessaire pour générer une tonne de vapeur basse pression (BP), soit l'équivalent d'environ 150 kW, ce qui revient à 12 CHF/t vapeur BP au prix de l'électricité précité.

Tableau 5-4 Coûts d'exploitation (avant TVA)

Agents d'exploitation	Coûts [CHF/t CBE]	Coûts [CHF/a]
Agents d'exploitation/récupération du phosphore		
Acide sulfurique	63	2'520'000
Vapeur	30	1'200'000
Électricité	18	735'000
Autres agents d'exploitation et énergie	42	1'715'000
Somme agents d'exploit./récupération du phosphore	**153**	**6'135'000**
Agents d'exploitation traitement des eaux usées	57	**2'290'000**
Résidus récupération du phosphore, y c. transports	100	**4'044'000**
Résidus traitement des eaux usées y c. transports	52	**2'100'000**
Maintenance / entretien	56	2'237'000
Personnel	59	2'340'000
Logistique/transports ferroviaires et routiers	10	440'000
Rente du droit de superficie	0.2	10'000
Assurances (0,5% sur les investissements)	16	620'000
Réserves et imprévus	100	3'930'000
Somme OPEX	**603**	**24'130'000**

La vente de l'acide phosphorique rapporte des recettes escomptées à CHF 8,4 mio., soit 210 CHF/t CBE. Ces recettes couvrent environ 25% du coût total, ce qui montre clairement qu'elles ne suffisent pas pour financer le coût de l'installation (Fig. 5-1).

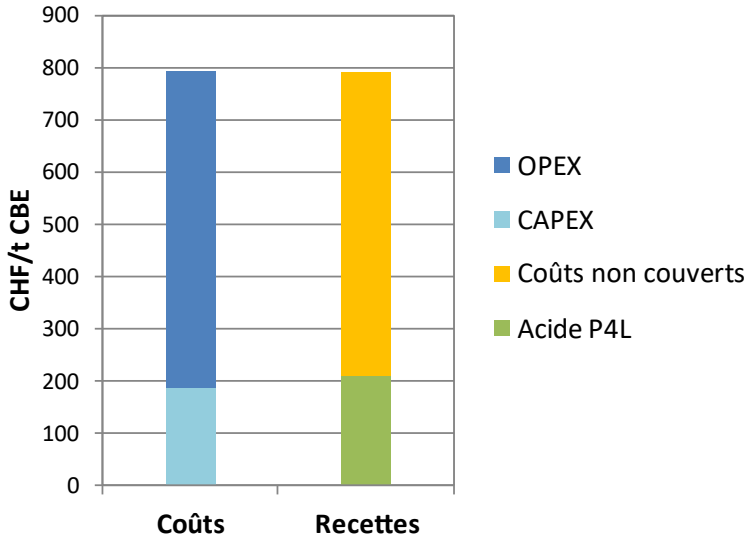


Fig. 5-1 Coûts et recettes pour une centrale Phos4life ayant une capacité de 40'000 t/a CBE.

Les coûts non couverts doivent être financés par une taxe de traitement sur les livraisons de cendres de boues d'épuration à hauteur d'env. 580 CHF/t. Les surcoûts effectifs du procédé Phos4life par rapport à l'actuelle monocombustion et à la mise en décharge des CBE se montent à 490 CHF/t CBE, après déduction des taxes actuelles de mise en décharge, soit env. 90 CHF/t CBE après monocombustion.

6. ECOLOGIE

La fabrication primaire d'engrais minéraux phosphorés utilise de l'acide phosphorique produit à partir de phosphate brut. Le superphosphate triple (TSP) – aujourd'hui devenu un composant de référence dans les engrais minéraux – est obtenu par mélange de 30% P provenant du phosphate brut et 70% P provenant de l'acide phosphorique. L'acide phosphorique est par conséquent la matière de base dominante du produit final, à hauteur de 70 % masse. La production d'acide phosphorique à partir de phosphate brut fait intervenir de l'acide sulfurique. A l'échelle mondiale, chaque tonne d'acide phosphorique génère environ 5 tonnes de résidus, dont du phosphogypse radioactif (contenant p. ex. de l'uranium). Selon les régions, ces résidus sont mis en décharge de manière contrôlée ou non, voire «éliminés» par immersion dans l'océan. Cette empreinte écolo-gique grève aussi tous les engrais phosphorés que la Suisse importe. L'impact environnemental généré dans les pays producteurs est largement ignoré par les pays acheteurs et n'est pratique-ment pas monétisé aujourd'hui.

De manière analogue à la production primaire, la fabrication d'acide phosphorique selon le procédé P4L génère aussi une certaine quantité de phosphogypse dans le lixiviat. En comparaison avec la production primaire, cette charge est moins grande et moins polluante, parce que le phosphore présent dans les CBE n'est pas seulement lié sous forme de phosphate de calcium, mais aussi sous forme de phosphate de fer. Il faudrait encore réutiliser ce résidu minéral dans le cycle des matériaux de construction pour arriver à une fabrication d'acide phosphorique «sans résidus».

Par ailleurs, le lixiviat résultant du procédé Phos4life présente une charge en métaux lourds net-tement inférieure grâce à la séparation efficace des métaux lourds. L'objectif premier est donc de trouver une solution pour valoriser ce gypse riche en fer. Plusieurs acteurs de l'industrie suisse du ciment ont manifesté un intérêt de principe à recycler cette matière, avant tout dans une ap-proche quantitative de la charge de phosphore (cf. chap. 7): en effet, le recyclage du phosphore n'absorbe pas la totalité des boues d'épuration pour couvrir les besoins nationaux en phosphore. Dès lors, la charge de phosphore inutilisée à cet effet peut toujours servir de combustible substi-tutif dans les cimenteries. Le bilan global du phosphore et la modélisation des flux de charges doi-vent intégrer non seulement les critères relatifs au phosphore, mais aussi les facteurs énergé-tiques et l'empreinte carbone de la filière dans son ensemble pour parvenir à l'équilibre de l'économie circulaire. Si une valorisation matière s'avère impossible, le lixiviat doit être mis en décharge.

Si on compare l'écobilan de l'acide phosphorique issu de la fabrication primaire et celui de l'acide phosphorique P4L, le procédé Phos4life est de loin la meilleure solution, tant sur le plan des éco-points (unités de charge écologique, UCE) que sur le plan du bilan carbone (fig. 6 1). Le procédé Phos4life a été analysé selon trois scénarios différents: scénario de référence, scénario du meil-leur et scénario du pire. Les différences résident en particulier dans la provenance des agents d'exploitation (surtout l'acide sulfurique) et dans la valorisation des résidus, à travers le bonus obtenu pour les métaux lourds (SwissZinc), de même que pour le recyclage du fer et du gypse dans les cimenteries (cf. annexe 6).

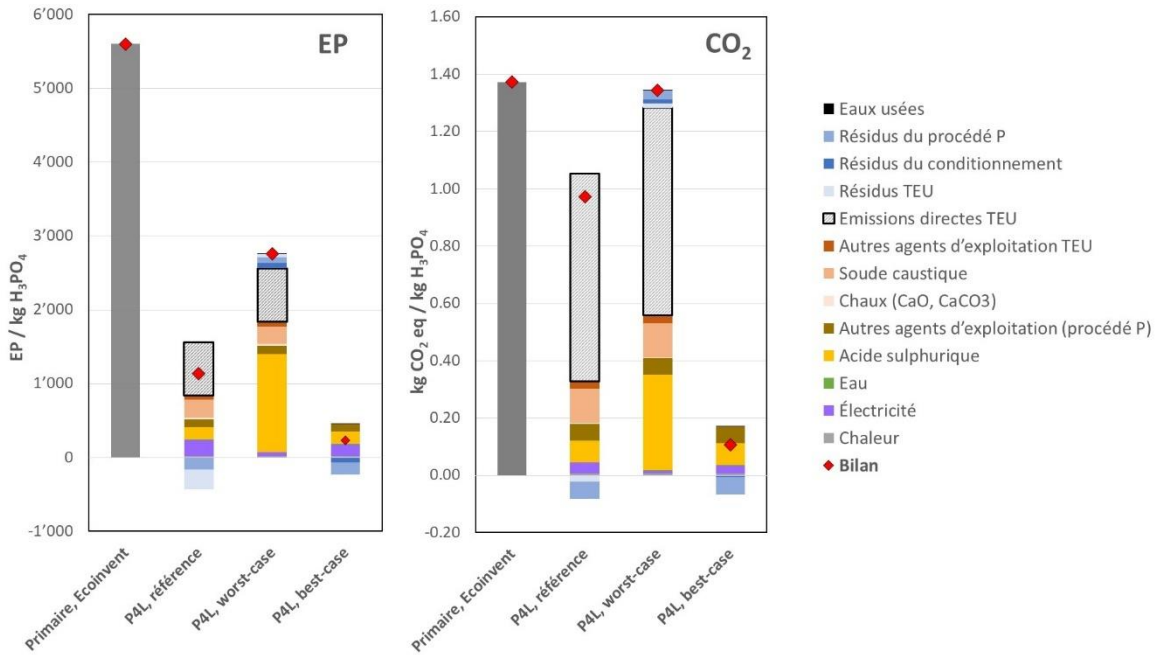


Fig. 6-1 Charge environnementale (UCE) et bilan carbone de l'acide phosphorique: comparaison de la production primaire et du procédé Phos4life.

L'«élimination» de l'acide sulfurique utilisé dans la production de l'acide phosphorique à partir de phosphore issu de la filière des eaux usées (cf. chap. 4.1) et son remplacement par le carbonate de calcium ($CaCO_3$) modifie énormément l'empreinte écologique du recyclage. La neutralisation de l'acide sulfurique nécessite de grandes quantités de chaux, qui libère de grandes quantités de CO_2 par réaction avec l'acide (émissions directe du traitement des eaux usées). Dans une phase ultérieure du projet, il s'agira d'optimiser le traitement des eaux usées et de trouver de nouveaux débouchés pour les quantités d'acide sulfurique résiduel. L'empreinte écologique du procédé Phos4life dépend essentiellement du traitement des eaux usées, de sorte que le potentiel d'optimisation écologique est énorme (cf. scénario du meilleur).

7. CONTEXTE ET COMMERCIALISATION DU PRODUIT

Mis à part la Suisse, seule l'Allemagne connaît l'obligation légale de récupérer le phosphore. Mais en Europe, de nombreux projets et programmes d'encouragement sont en cours pour développer le recyclage du phosphore à l'échelon industriel. L'optique est claire: il s'agit de passer d'une économie linéaire à une économie circulaire du phosphore. Les procédés de récupération du phosphore à partir des cendres pour produire directement un engrais ou de l'acide phosphorique. Cette évolution va de pair avec le développement des capacités de monocombustion. Les procédés qui permettent d'obtenir de l'acide phosphorique techniquement pur à partir de cendres de boues d'épuration ne sont actuellement pas encore testés ni disponibles à l'échelle industrielle. Une première installation est en service depuis deux ans en Allemagne, mais il n'est pas encore possible d'en tirer des conclusions définitives quant à la pertinence de la technologie mise en œuvre. D'autres technologies – analogues au procédé Phos4life – sont proches de la mise en œuvre industrielle, mais une comparaison directe et objective ne sera possible qu'après quelques années d'exploitation. A l'heure actuelle, on ne connaît aucun autre procédé émergent ou susceptible de concurrencer le procédé Phos4life en termes de qualité et d'exigence.

Le procédé Phos4life permet d'obtenir un acide phosphorique techniquement pur, utilisable directement dans l'industrie technico-chimique, où il peut être commercialisé en direct ou via les distributeurs de produits chimiques. La vente directe en Suisse est limitée à env. 25% de la quantité produite, mais au niveau européen, les volumes commercialisés sont largement supérieurs, de sorte qu'une commercialisation à l'extérieur des frontières est envisageable sans créer de distorsion sur le marché. L'acide phosphorique P4L peut aussi être utilisé proportionnellement dans la fabrication d'engrais, s'il s'agit de fabriquer des produits de haute valeur, donc pauvres en polluants. La fabrication du superphosphate triple (TSP 46) ouvre de nouvelles perspectives en Suisse. Le TSP 46 entre dans la composition de la plupart des engrais minéraux phosphatés. Il constitue une référence industrielle depuis des décennies sous forme d'engrais soluble et facilement disponible.

La demande de l'agriculture suisse en engrais minéral phosphoré est comparée dans la figure suivante aux deux flux massiques soumis à l'obligation de récupération du phosphore, à savoir les boues d'épuration et leurs cendres d'une part, et les farines animales (farines animales et les poudres d'os) d'autre part. Compte tenu des nutriments et des fourrages importés, la Suisse a un potentiel de phosphore recyclable largement supérieur à la demande d'engrais minéraux phosphorés. Il existe trois solutions possibles pour exploiter ce potentiel:

1) L'acide phosphorique extrait des cendres de boues d'épuration peut être combiné avec les cendres de farines animales (CFAO) pour produire un engrais adapté au marché suisse (TSP, marquage bleu).

2) Pour couvrir la demande supplémentaire en phosphore, il faut importer des produits spéciaux et de l'acide phosphorique à usage technique (marquage orange et gris).

3) Même si le taux de récupération global de phosphore atteint un niveau assez élevé (p. ex. 70 %), une partie des boues d'épuration pourrait toujours être utilisée comme combustible de substitution dans les cimenteries, par analogie aux filières d'élimination actuelles.

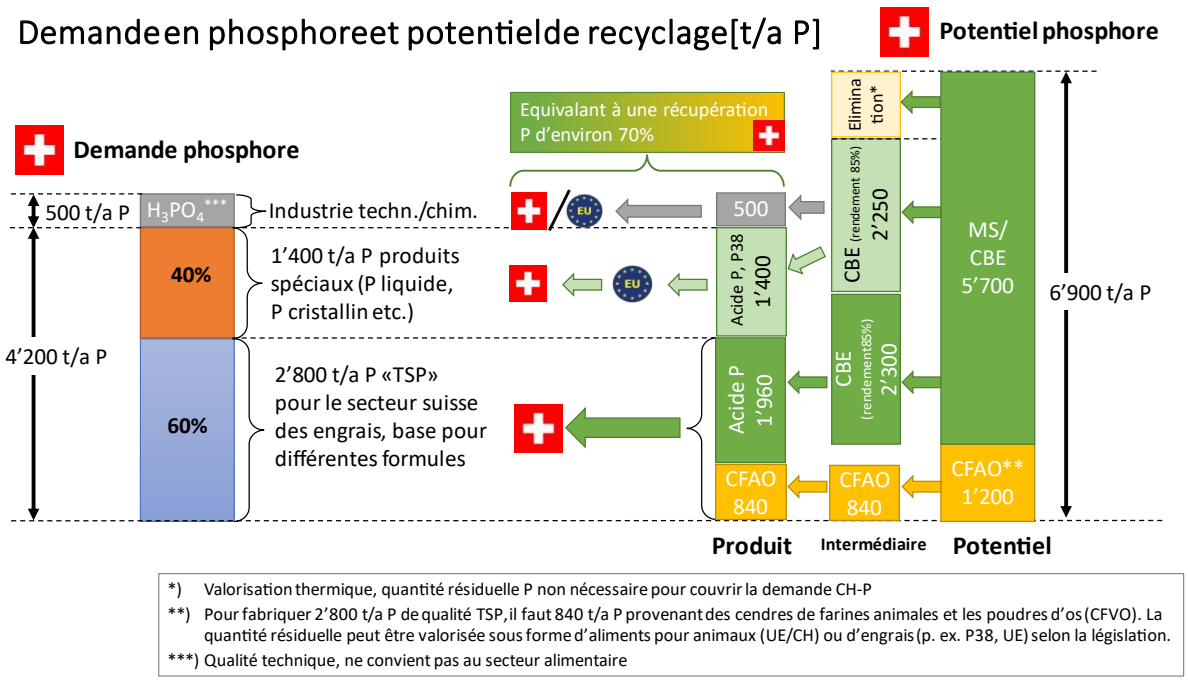


Fig. 7-1 Potentiel P et demande P en Suisse

Les recettes provenant de la vente d'acide phosphorique et de produits phosphorés sont sujettes aux fluctuations typiques du marché. La Fig. 7-2 illustre cette fluctuation au cours de ces 17 dernières années, à l'exemple du phosphate brut et du TSP, qui est un mélange d'acide phosphorique et de phosphate brut.

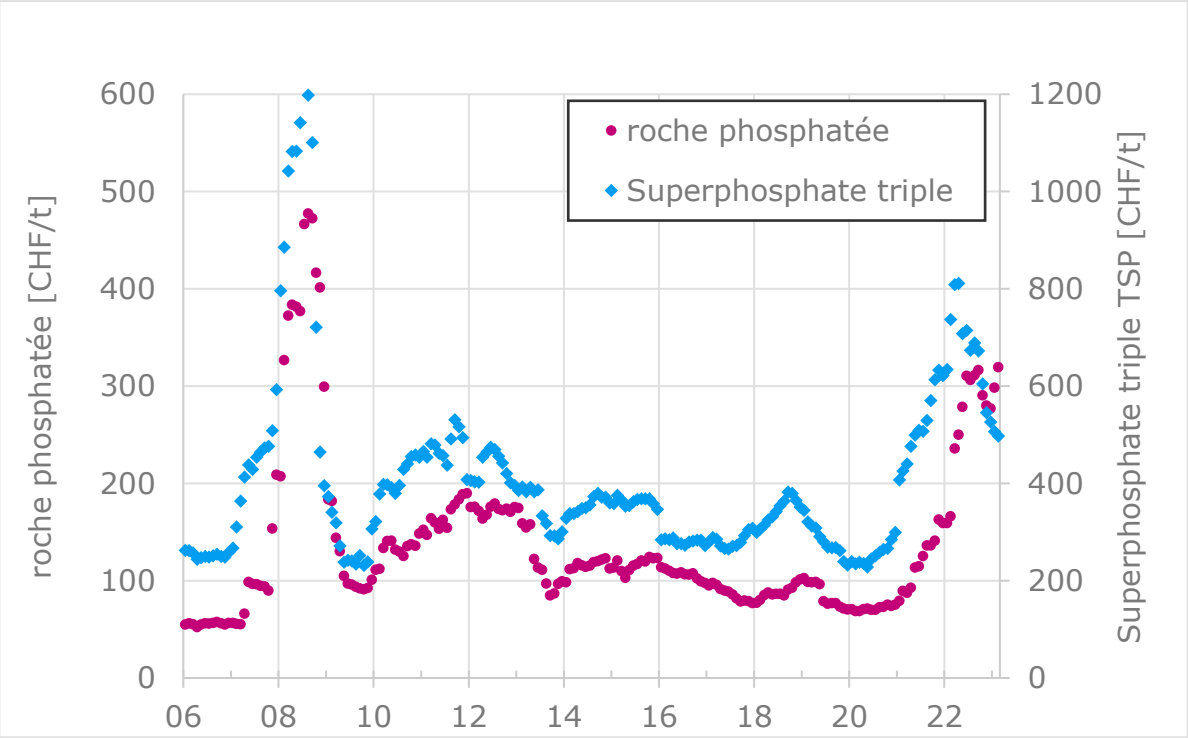


Fig. 7-2 Prix du marché mondial pour le roche phosphate (FAS, Maroc) et le TSP (FOB, Tunisie), source: Indexmundi.com

On reconnaît aisément les incidences des deux dernières années marquées par la pandémie COVID-19 et la situation géopolitique instable en Ukraine, respectivement en Russie. Après une forte montée en flèche des prix, les coûts évoluent actuellement à la baisse.

En résumé, on peut retenir que la vente d'env. 12'000 t/a d'acide Phos4life nécessite au maximum 1'960 t/a de phosphore (soit env. 8'300 t/a d'acide phosphorique à 75%) en cas de production de TSP en Suisse. La quantité restante pourrait facilement être écoulée sur le marché national et international. Si la production suisse d'engrais devait ne pas suivre, il n'y aurait pas de problème en soi, puisque la quantité d'acide P4L haute qualité peut être proposée directement sur le marché européen. La valeur de l'acide évolue en fonction du prix de marché, dont l'incidence sur la taxe de traitement des CBE a déjà été débattue au chap. 5.2.

8. ANALYSE DES RISQUES

La grille des risques établie au début du projet est tenue à jour en permanence. Au départ, elle pointait quatre facteurs de risque majeurs pour la réalisation et le coût du procédé:

1) la mise en œuvre sur le site n'est pas possible (espace disponible, logistique, énergie),
2) l'écocompatibilité de la centrale n'est pas démontrée,
3) la qualité des résidus et du produit ne satisfait pas aux exigences,
4) d'autres procédés concurrents offrent un meilleur rendement.

L'étude de projet a traité ces quatre aspects de manière à réduire autant que possible les risques évoqués par des mesures appropriées. L'analyse actuelle des risques liés à ces quatre volets est résumée ci-après.

Les risques liés à l'emplacement et à la faisabilité du projet P4L ont tous pu être réduits. Le projet actuel remplit les conditions requises, ce qui réduit d'autant les risques en la matière. La place nécessaire à la construction et à l'exploitation de l'usine est disponible et le plan énergétique optimisé permet une bonne intégration et l'utilisation d'une quantité de chaleur constante fournie par KEBAG Enova.

S'agissant des risques relatifs aux autorisations et aux aspects environnementaux, des ajustements techniques, par exemple l'abandon des livraisons de sulfure d'hydrogène au profit d'une fabrication sur site, ont permis de réduire considérablement les risques. Le plan énergétique optimisé chaud/froid a également permis de reformuler la puissance de refroidissement requise en combinant le refroidissement par les eaux de l'Aar et des refroidisseurs hybrides, de manière à ce que le projet soit éligible pour les autorisations officielles. C'est ce que confirme le préavis du canton de Soleure dans le cadre de l'enquête préliminaire à l'étude d'impact sur l'environnement.

Les risques de qualité par rapport à la commercialisation du produit et à la valorisation des résidus riches en gypse n'ont pas pu être réduits de manière significative dans le cadre du projet. La qualité du produit ne pourra être évaluée de manière conclusive qu'après la mise en service de la centrale. Les résultats obtenus avec l'installation pilote P4L n'ont révélé aucun facteur négatif. On peut donc partir de l'hypothèse que le procédé P4L produira un acide phosphorique techniquement pur, en qualité et en quantité constantes, et dont la commercialisation sur le marché européen ne devrait pas poser de problème. La valorisation des résidus, en lieu et place de leur mise en décharge, est une idée de principe qui a été accueillie positivement par différents acheteurs potentiels. Les conditions légales stipulées à l'annexe 4 de l'ordonnance sur les déchets (OLED) devraient toutefois être adaptées à cet effet et concrétisées dans le cadre d'un plan intégral. Selon le principe de l'économie circulaire, la valorisation des résidus ne doit pas être traitée isolément, mais intégrée au contexte de la valorisation matérielle et énergétique globale des boues d'épuration de manière à réduire notre empreinte sur le climat (cf. chap. 7).

Actuellement, on ne connaît aucun autre procédé susceptible de présenter des avantages significatifs par rapport au procédé Phos4life. Certes, le recyclage industriel du phosphore fait l'objet de nombreux efforts, en particulier en Allemagne, et de nombreux projets pilotes de démonstration bénéficient de subventions généreuses, mais aucun procédé commercialisable permettant d'atteindre un produit de qualité équivalente n'a encore pu être réalisé à ce jour (cf. chap. 7). Il s'agit de surveiller cet aspect durant les futures phases du projet et de l'intégrer dans la planification stratégique.

En résumé, les risques techniquement influençables ont été réduits de manière significative dans le projet actuel pour atteindre un niveau de risque résiduel globalement limité. Les risques économiques de financement, de renchérissement et d'évolution des taux ne peuvent pas être activement influencés. Ils feront l'objet d'une présentation détaillée dans le futur plan business. L'analyse du contexte et des risques demeure un volet important pour les prochaines étapes du projet.

9. ETUDE DE FAISABILITÉ ET POTENTIEL D'OPTIMISATION

La faisabilité d'une centrale Phos4life sur le site Emmenspitz pour la production d'acide phosphorique à partir d'une quantité annuelle de cendres de boues d'épuration de l'ordre de 40'000 t/a est démontrée au niveau des concepteurs, du site d'implantation et du canton de Soleure. Le procédé Phos4life a évolué dans le sens d'une simplification visant à garantir la stabilité de l'exploitation et la disponibilité de l'installation. Les risques techniques pour l'environnement ont été réduits en optant pour des processus substitutifs appropriés. La décision de renoncer aux livraisons de sulfure d'hydrogène, gaz toxique et hautement inflammable, mais nécessaire à l'épuration de l'acide phosphorique, pour le produire sur site en est un bon exemple. La place nécessaire aux travaux de construction ainsi que les surfaces de dégagement peuvent être mises à disposition. La charge de trafic supplémentaire – transports routiers et ferroviaires – n'est pas critique du point de vue des autorisations et son important a été encore réduite par la décision de reporte autant que possible les transports sur le rail.

Les potentiels d'optimisation pour les proches étapes du projets sont les suivants:

- Utilisation alternative de l'«acide sulfurique résiduel» dans le flux d'eaux usées généré par la récupération du phosphore ➔ réduction du traitement des eaux usées, moins de résidus
- Adaptation du traitement des eaux usées
- Optimisation du filtrage de l'air vicié et analyse du cycle des solutions à base de sulfure ➔ réduction de la consommation d'hydrogénosulfure de sodium et de soude caustique
- Réutilisation de composants du procédé FLUREC au profit du procédé Phos4life
- Remplacement du déshydrateur électrique (séchage des résidus) par un dispositif de dessication thermique (utilisant la chaleur résiduelle)
- Synergies possibles avec SwissZinc (exploitation, approvisionnement en chaleur, utilisation de l'acide sulfurique, gestion des produits chimiques, etc.)

10. SUITE DE LA DÉMARCHE ET PERSPECTIVES

Selon les prescriptions actuelles de la Confédération, le recyclage du phosphore doit être mis en œuvre à partir du 1er janvier 2026, étant donné qu'à partir de cette date, le phosphore présent dans les eaux usées et dans les cendres de boues d'épuration doit être récupéré à raison de minimum 50%. Même si aujourd'hui, on ne sait si et dans quelle mesure la Confédération prorogera le délai transitoire fixé à l'art. 51 OLED pour la mise en œuvre de la récupération du phosphore, il faudra encore un certain temps pour parvenir à un projet concret de construction pour une centrale Phos4life. Le terrain ne pourra être utilisé qu'à partir de 2027, après la mise en service de la nouvelle UVTD KEBAG Enova (mi 2025) ainsi que la déconstruction de l'ancienne UVTD et de la halle des turbines. Partant de cet état des lieux, le calendrier approximatif des étapes suivantes se présente ainsi:

- Fin de la déconstruction «ancienne» KEBAG — fin 2026
- Construction de l'atelier KEBAG Enova — mi 2027
- Terrain disponible pour P4L — dès juillet 2027
- Construction de la centrale Phos4life — 2027 – 2030
- Mise en service et optimisation P4L — 2030+.

La mise en service d'une centrale P4L sur le site Emmenspitz n'est donc pas réalisable avant 2030. Même si le temps restant est suffisant du point de vue du projet, il s'agit dans un proche avenir de réserver le terrain par l'entremise de la future entité de financement, d'analyser les potentiels d'optimisation, de solliciter les ressources financières nécessaires, de donner les phases suivantes du projet en mandat et de clarifier les questions relatives à l'organisation de l'entité P4L (voir rapport sur le modèle de partenariat Phos4life). Cette démarche est nécessaire pour la sécurité de planification de l'entité Phos4life ainsi que pour la réservation du site Emmenspitz.

Outre ces conditions locales, la réalisation du projet P4L dépend aussi de quelques facteurs d'ordre supérieur. Les décisions politiques et stratégiques concernant l'aménagement et le financement de la récupération du phosphore doivent encore être prises à l'échelon national. Il faut encore attendre la décision quant à la réalisation de la centrale SwissZinc et ensuite coordonner ce projet avec l'étude du projet P4L afin de tirer parti au mieux des synergies possibles sur le site. Cette coordination doit être prise en compte pour les étapes suivantes dans le sens d'une approche systémique afin que ces deux projets importants puissent converger avec succès vers une économie circulaire durable.

En dernier lieu, on retiendra que le mandat des partenaires du projet s'est terminé avec succès, en ce sens que la réalisation d'une centrale Phos4life est faisable et éligible sur le site Emmenspitz.

ANNEXES

Nr.	Documents			
1	Machbarkeit der Eisenrückgewinnung am Standort Emmenspitz			
2	Verkehrswege zur Bewirtschaftung der P4L-Anlage			
3	Optimiertes Wärmekonzept Phos4life			
4	Baukostenplanung (BKP)			
5	Kostenbetrachtung OPEX und CAPEX			
6	Szenarien zur ökobilanziellen Betrachtung			

Annexe 1) Machbarkeit der Eisenrückgewinnung am Standort Emmenspitz

Anfänglich war im Rahmen des Phos4life-Verfahrens auch eine Rückgewinnung des Fällmittels Eisenchlorid, wie es bei vielen Kläranlagen zur chemischen Phosphorelimination eingesetzt wird, vorgesehen. Dieser Prozessschritt wurde so überarbeitet, dass er einer vorgängigen Phosphorrückgewinnung nachgeschaltet und nicht mehr als integraler Bestandteil der Phosphorrückgewinnung betrieben werden kann (Abbildung 3). Mit Salzsäure wird das Eisen dabei aus dem Rückstand der Phosphorrückgewinnung extrahiert, via Solventextraktion aufgereinigt und mittels Verdampfer als 40%ige Eisenchloridlösung aufkonzentriert und vermarktet. Der dabei anfallende mineralische Rückstand besteht hauptsächlich aus Gips und kann einer stofflichen Verwertung zugeführt werden. Das resultierende Abwasser wird neutralisiert, von Schwermetallen befreit und der Kläranlage zugeführt.

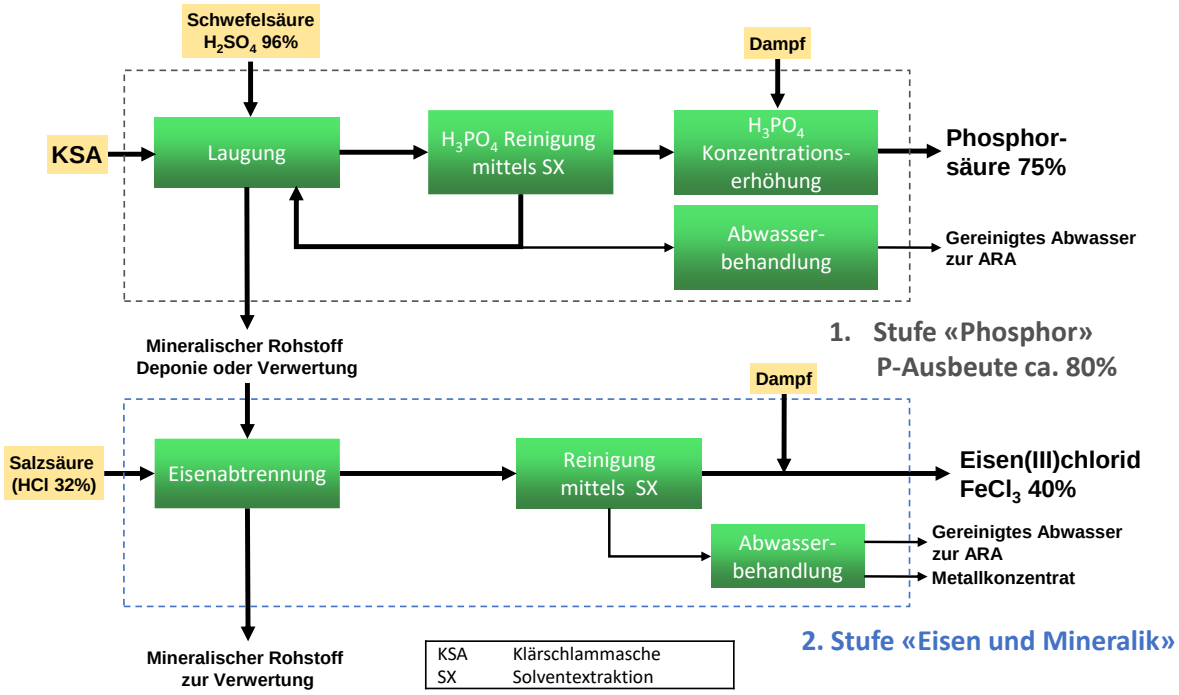
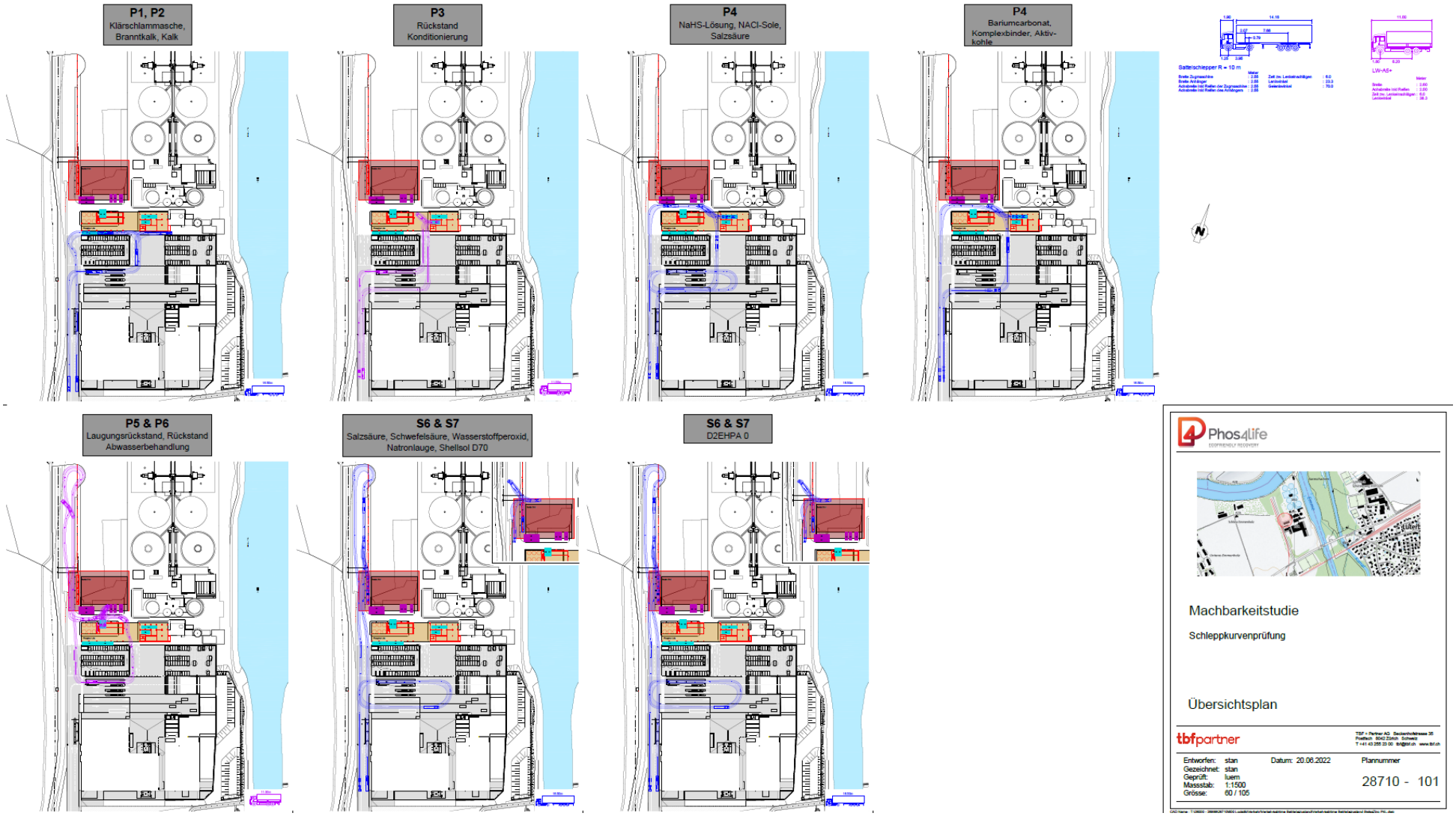


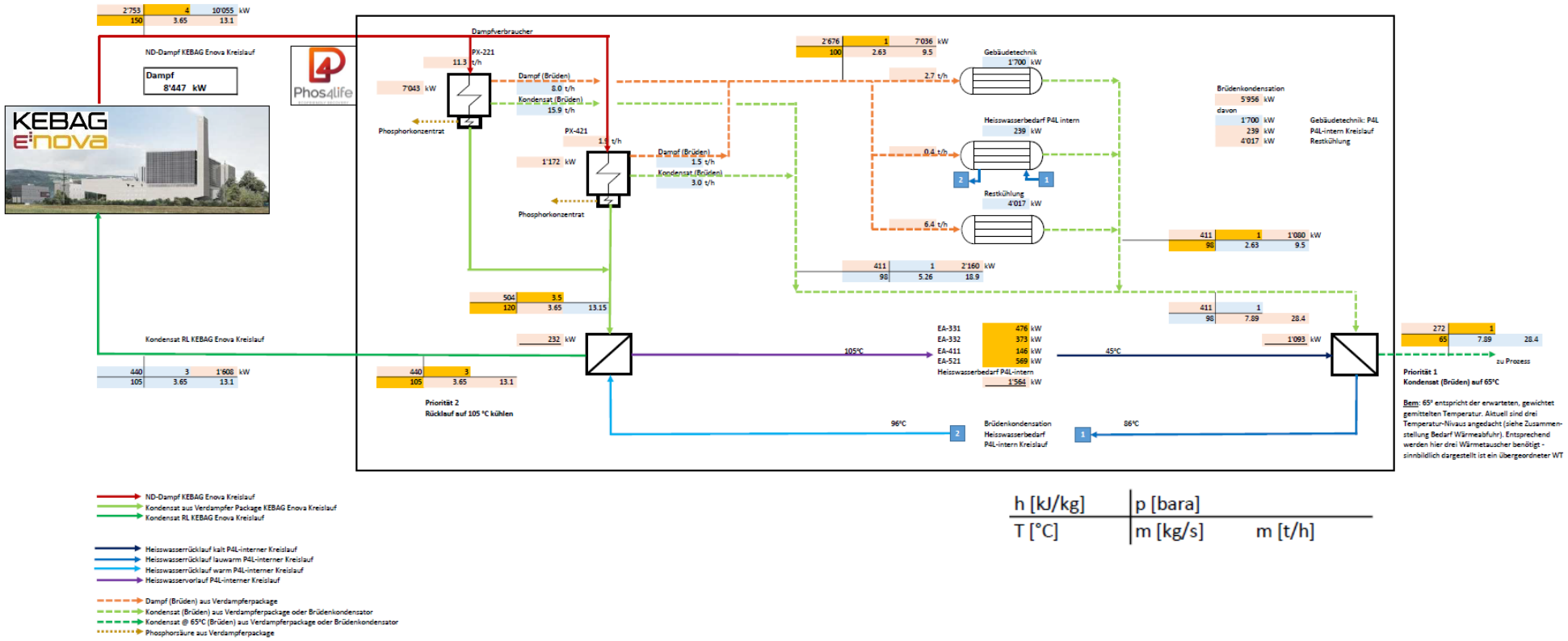
Abbildung 3: Phos4life 2.0-Prozess inklusive optionaler Eisenrückgewinnung

Zur Eisenrückgewinnung aus dem Rückstand der Phosphorrückgewinnung (40'000 t/a KSA) wird unter anderem 123'000 t/a 32%ige Salzsäure benötigt. Diese Menge ist einerseits logistisch am Standort Emmenspitz nicht zu bewerkstelligen und anderseits ist die resultierende Chloridfracht im Abwasserstrom (36'000 t/a Cl) für den Vorfluter Aare deutlich zu gross und nicht bewilligbar. Eine entsprechende Salzrückgewinnungsanlage wäre nur mit sehr hohem Energie- und Kostenaufwand möglich und somit wenig zielführend. Neben diesen beiden Aspekten ist der Platzbedarf für die zusätzliche Verfahrenstechnik am Standort nicht gegeben. Der zusätzlich notwendige Platzbedarf zur Eisenrückgewinnung beläuft sich auf ca. 70% des Platzbedarfs der Phosphorrückgewinnung. Diese zusätzlich benötigte Fläche kann auf dem Areal Emmenspitz nicht zur Verfügung gestellt werden. Die Gesamtbeurteilung der «Eisenrückgewinnung» führt somit zu höheren Kapital- und Betriebsmittelkosten, die durch die Vermarktung des Eisenchlorids nicht vollständig gedeckt werden können und somit zu einer Verteuerung der gesamten Phosphorrückgewinnung führen würde. Die Umsetzbarkeit am Standort Emmenspitz ist aus den zuvor genannten Gründen nicht möglich. Die projektbegleitende Steuergruppe hat daher am 19. Januar 2021 entschieden, auf diesen Verfahrensschritt für die weitere Projektierung zu verzichten.

Annexe 2) Verkehrs- und Logistikwege für die einzelnen Güter



Annexe 3) Plan thermique optimisé, Phos4life



Annexe 4) Code des frais de construction (CFC)

Estimation des coûts P4L (avant TVA et renchérissement, base de prix 2020)

Marge: +/- 30%

		Coûts
	Total des coûts avant TVA et renchérissement	155'000'000
0	Terrain	6'700'000
00	Etudes préliminaires	0
01	Acquisition du terrain ou du droit de superficie	6'700'000
1	Nouvelle construction Atelier	3'000'000
2	Valeur du gros œuvre bâtiment Flurec	3'700'000
02	Frais accessoires à l'acquisition du terrain	0
1	Travaux préparatoires	11'000'000
10	Relevés, études géotechniques	0
11	Déblaiement, préparation du terrain	7'600'000
12	Aménagements provisoires	0
19	Honoraires	3'400'000
2	Bâtiment	23'200'000
20	Excavation	1'600'000
21	Gros oeuvre 1	10'900'000
211	Déduction de la valeur du gros œuvre bâtiment Flurec	-3'700'000
22	Gros oeuvre 2	2'800'000
23	Installations électriques	1'600'000
24	Chauffage, ventilation, conditionnement d'air	2'000'000
25	Installations sanitaires	900'000
26	Installations de transport	400'000
27	Aménagements intérieurs 1	500'000
28	Aménagements intérieurs 2	3'200'000
29	Honoraires	3'000'000
3	Equipements d'exploitation	66'600'000
31	P-Recovery: processus principal	23'100'000
32	P-Recovery: traitement des eaux usées	4'100'000
36	Installations électriques, systèmes de gestion (EMCRG)	7'000'000
37	Installations annexes	13'900'000
38	Divers	1'000'000
39	Honoraires	17'700'000
4	Aménagements extérieurs	5'000'000
40	Mise en forme du terrain	100'000
41	Gros œuvre	0
44	Installations (clôtures, éclairage, surveillance, etc.)	0
45	Conduites de raccordement aux réseaux (à l'intérieur du bien-fonds)	2'700'000
46	Rues, places, etc.	1'400'000
49	Honoraires	900'000
5	Frais secondaires	14'800'000
51	Autorisations, taxes	100'000
52	Echantillons, maquettes, reproductions, documents	200'000
53	Assurances (pour l'ensemble du projet)	300'000
54	Financement dès le début du chantier	5'600'000
55	Prestations du maître d'ouvrage	5'700'000
56	Autres frais secondaires	300'000
59	Honoraires	2'700'000
6	Imprévus	25'400'000
60	Réserve	25'000'000
7	Déconstruction	siehe BKP 11
70	Déconstruction d'ouvrages existants	
79	Honoraires	
9	Ameublement	2'100'000
90	Ameublement: mobilier, vestiaires, bureaux, cafétéria, laboratoire	2'100'000

Annexe 5) OPEX et CAPEX

Kostenbetrachtung Phos4life (Kostenbasis 2020)		Machbarkeit Emmenspitz (März 2023)
Parameter	**Einheit**	**Wert**
Grundlagendaten (Prozess,KSA)		
	t/a	40'000
P-Gehalt in KSA	%	9.0%
P-Ausbeute Phos4Life	%	80.0%
Jährliche H3PO4-Produktion 75%	t/a	12'000
	t/a P	2'845

Operating cost (OPEX)	**Einheit**	**Einheit/t KSA**	**CHF/Einheit**	**t/a**	**CHF/t KSA**	**CHF/a**	**%-Anteil OPEX**	**%-Anteil Gesamt-kosten**
Betriebsmittel P-Prozess								
H2SO4 95%	t	0.63	100	25'200	63	2'520'000	**10.4%**	8%
Bariumcarbonat	kg	0.42	0.319	16.8	0.1	5'359	**0.0%**	0%
Natriumhydrogensulfid (NaHS, 47%)	kg	0.01	0.503	288	3.6	144'778	**0.6%**	0%
Komplexbildner	kg	2.10	8.36	84.0	18	702'240	**2.9%**	2%
Stickstoff flüssig (N2) inkl. Miettank	kg	0.25	0.3	10.0	0.3	12'000	**0.0%**	0%
Aktivkohle (TR)	kg	0.19	2.1	7.60	0.40	15'960	**0.1%**	0%
Aktivkohle für Prozessabluft (VTU)	kg	0.25	2.673	10.00	0.67	26'730	**0.1%**	0%
Aktivkohle für H2S (VTU)	kg	0.03	8.613	1.00	0.22	8'613	**0.0%**	0%
Brauchwasser TR (River water)	m3	0.68	0.08	27'375	0.05	2'190	**0.0%**	0%
Trinkwasser Input VTU-Wasseraufbereitung (für TR Prozess)	m3	1.50	2	60'000	3	120'000	**0.5%**	0%
Aare-Wasser als Kühlwasser	m3	107	0.01	4'260'000	1.1	42'600	**0.2%**	0%
ND-Dampf	t	*2.5*	*12*	*100'000*	30	1'200'000	**5.0%**	4%
Strom (Prozess und Nebenanlagen)	MWh	0.188	80	9'180	18	734'400	**3.0%**	2%
weitere Kleinmengen					15	600'000	**2.5%**	2%
Rundung					0	130	**0.0%**	0%
Zwischensumme Betriebsmittel P-Prozess					**153**	**6'135'000**	**25%**	**19%**
Betriebsmittel Abwasserbehandlung								
CaO (90%)	t	0.02	220	600	3	132'000	**1%**	0%
CaCO3 (90%)	t	0.37	55	14'800	20	814'000	**3%**	3%
Bayoxide	kg	1.88	5.4	75.00	10	404'250	**2%**	1%
Natronlauge 50%	t	0.050	275.0	1'995	14	548'625	**2%**	2%
Salzsäure 32%	t	0.006	88.0	250	1	22'000	**0%**	0%
Salzsole 30% (NaCl)	t	0.01	297	563	4	167'063	**1%**	1%
Brauchwasser Prozess (TR + VTU)	t	1.63	0.01	65'000	0	650	**0%**	0%
Strom	MWh	0.061	80	2'440	5	195'200	**1%**	1%
Rundung					0	6'212	**0%**	0%
Zwischensumme Betriebsmittel Abwasserbehandlung					**57**	**2'290'000**	**9%**	**7%**
Rückstände P-Prozess								
Laugungsrückstand (TS=90%) inkl. Transport	t	1.10	80	48'889	98	3'911'111	**16%**	12%
Konditionierungsrückstand (TS= 70%) inkl. Transport	t	0.01	300	400	3	120'000	**0%**	0%
Kondensat / verdampftes Wasser	t	9.9	0.0	396'000	0	0	**0%**	0%
Rundung						12'889	**0%**	0%
Zwischensumme Rückstände P-Prozess					**101**	**4'044'000**	**17%**	**13%**
Rückstände Abwasserbehandlung								
Abwasser	m3	2.5	0.25	117'000	1	29'250	**0%**	0%
Rückstand Abwasserbehandlung (TS=90%) inkl. Transport	t	0.6	80	25'778	52	2'062'222	**9%**	7%
Kondensat / verdampftes Wasser	t	0.2	0	6'800	0	0	**0%**	0%
Zwischensumme Rückstände Abwasserbehandlung					**52**	**2'091'472**	**9%**	**7%**
Wartung / Unterhalt (4% EMT, 0.5% Bau)	CHF/a				55.9	2'237'093	**9%**	7%
Personal	CHF/a				58.5	2'340'000	**10%**	7%
Bahnlogistik und Umschlag (LKW ACTS)	CHF/a				11	438'450	**2%**	1%
Baurechtszins	CHF/a				0.2	7'290	**0%**	0%
Versicherungen (0.5% Investment)	CHF/a				15.5	620'000	**3%**	2%
Reserve OPEX	CHF/a				98.2	3'927'167	**16%**	12%
Summe OPEX (Genauigkeit: ± 15%)	**CHF/a**				**603**	**24'130'471**	**100%**	**76%**
CAPEX inkl. Honorare	Zinssatz	2.00%						
P-Prozess (Phosphorrückgewinnung)		35'600'000		25	45.6	1'823'448		6%
P-ETP (Abwasserbehandlung)		5'500'000		25	7.0	281'712		1%
Nebenanlagen		17'900'000		25	22.9	916'846		3%
EMSRL	Investment	7'700'000	Abschreibe-dauer [a]	15	15.0	599'256		2%
Gebäude		48'000'000		33	50.0	2'000'953		6%
Baunebenkosten		15'000'000		33	15.6	625'298		2%
Reserve		25'500'000		25	32.7	1'306'121		4%
Summe CAPEX (Genauigkeit: ± 30%)		**155'000'000**			**189**	**7'553'635**		**24%**
Erträge, Produkte					CHF/t SSA			
Erlös Phosphorsäure 75%	CHF/t	700			-210	8'400'000		
Erlös Schwefelsäure in Abwasserbenandlung	CHF/t H2SO4	0						
Zwischensumme Erträge					**-210**	**8'400'000**		
Total zusätzliche Kosten pro Tonne KSA					**582**			

Annexe 6) Scénarios d'écobilan Phos4life

Herkunft und Verwendung der Materialien (Ecoinvent Datenbank Version 3.9.1)

		Standard-Case	Worst-Case	Best-Case
Schwefelsäure	in	Herkunft aus einer Metallhütte als 'Abfall', d.h. burden free, aber Transport über 600 km per Bahn eingerechnet	"Market for" Schwefelsäure, dh. 30% burden free, inkl. Transport	gleich wie Standard-Case
$CaCO_3$	in	"Market for"-Limestone	"Market for"-Limestone	entfällt, da im Best Case die Schwefelsäure nicht neutralisiert, sondern weiterverwendet wird (SwissZinc, Schlackenwäsche etc.)
Wasser	in	"Market for"-Tap water	"Market for"-Tap water	gleich wie Standard-Case
weitere Betriebsmittel (P-Prozess)	in	"Market for"- diverse BM (Bariumcarbonat, NaHS, Flüssig-N2 etc.)	"Market for"- diverse BM (Bariumcarbonat, NaHS, Flüssig-N_2 etc.)	gleich wie Standard-Case
weitere Betriebsmittel (Neutralisation)	in	"Market for"-diverse BM (Bayoxide, NaOH, HCl, NaCl)	"Market for"-diverse BM (Bayoxide, NaOH, HCl, NaCl)	entfällt, da im Best Case die Schwefelsäure nicht neutralisiert, sondern weiterverwendet wird (SwissZinc, Schlackenwäsche etc.)
direkte Emissionen Abwasserbehandlung	out	CO_2 Freisetzung bei der Neutralisation der Schwefelsäure mit $CaCO_3$	CO_2 Freisetzung bei der Neutralisation der Schwefelsäure mit $CaCO_3$	entfällt, da im Best Case die Schwefelsäure nicht neutralisiert, sondern weiterverwendet wird (SwissZinc, Schlackenwäsche etc.)
Rückstand Laugung	out	Verbringung ins Zementwerk (trocken). Nutzung des Eisen- und Mineralik-Gehaltes, aber keine Nutzung des Gipses. Eisengehalt ersetzt Pyritabbrand	Verbringung auf eine Inertstoffdeponie	gleich wie Standard-Case
Wärme zur Konzentrationserhöhung der Phosphorsäure	in	KVA-Dampf (heat, from municipal waste incineration to generic market for heat district or industrial)	KVA-Dampf (heat, from municipal waste incineration to generic market for heat district or industrial)	gleich wie Standard-Case
Trocknung der Rückstände	out	Trocknung mit elektrischer Energie von 60% TS auf 90% TS	Keine Trocknung, da die Rückstände deponiert werden	Nur Trockner P-Prozess. Trocknung des ABA-Schlamms entfällt.
Rückstand Konditionierung	out	Verbringung auf eine Schlackendeponie (Typ D)	Verbringung nach Zementverfestigung auf eine Reststoffdeponie (Typ C)	Verbringung in SwissZinc-Verfahren. Gewinnung von Zink (rein), sowie von Kupfer und Blei (als Konzentrate). Ausschleusung und Deponierung der restlichen Masse
Rückstand ABA	out	Verbringung ins Zementwerk (trocken). Nutzung des Gips-Gehaltes. Kein Bonus und auch kein Malus für den Rest	Verbringung auf eine Inertstoffdeponie	entfällt, da im Best Case die Schwefelsäure nicht neutralisiert wird und damit auch kein Gips entsteht.
Abwasser	out	Anrechnen der Entsorgung ARA als "Market for"-Wastewater (CH)	Anrechnen der Entsorgung ARA als "Market for"-Wastewater (CH)	gleich wie Standard-Case
KSA	in	Zentraler, als unbelastet angenommener Ausgangsstoff (Basis für den Ökobilanzvergleich)		
Phosphorsäure	out	Bezugsgrösse für den Vergleich (UBP bzw. kg CO_2 pro kg Phosphorsäure). Im Fall ohne P4L-Verfahren wird die Phosphorsäure auf dem Weltmarkt eingekauft (market for phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state, GLO)		