

Résultats des études

La valorisation des résidus

31. Récifs artificiels en Bauxaline® et en ciment, avant la pose
32/33. Récifs artificiels en Bauxaline® et en ciment, au fond de l'eau, colonisés sans distinction marquée

La valorisation des résidus

APPLICATIONS DANS LE SECTEUR DE L'ENVIRONNEMENT

Les premiers travaux sur la valorisation des résidus, validés par le Comité Scientifique de Suivi, ont été consacrés en 1996 à l'étude de la colonisation de récifs artificiels fabriqués en brique de Bauxaline® (38).

Le site d'immersion a été choisi dans la zone protégée de Carry-le-Rouet. Les conditions y ont été considérées comme optimales en raison de l'hydrodynamique favorisant un test de résistance aux intempéries et des qualités de la faune et de la flore sous-marine permettant une expérience de colonisation pour des populations qui s'étagent des bryozoaires – colonies d'invertébrés – aux vertébrés de la macro-faune mobile dite vagile.

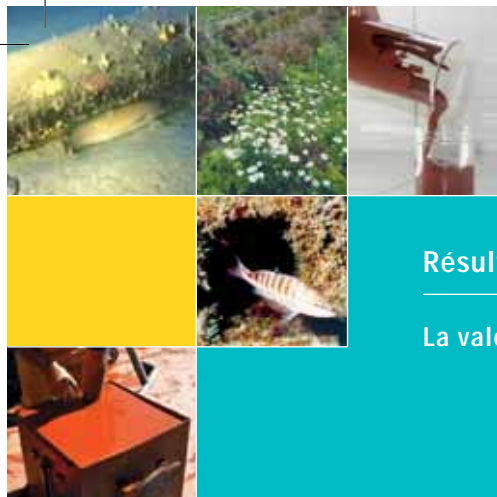


Les résultats enregistrés ont été très encourageants. Par rapport aux récifs témoins, les récifs en Bauxaline®, en tant que substrat, ont été colonisés sans distinction marquée et avec une diversité spécifique et une abondance sensiblement identiques. A 5, 7 et 9 mois de distance du jour de l'immersion, des dizaines d'espèces ont été dénombrées et identifiées : algues et bryozoaires, crustacés, mollusques et polychètes, concombres de mer, oursins et poissons comme la girelle et le cténolabre.

Parallèlement une série d'expérimentations a été conduite pour un usage optimisé de la Bauxaline® en centres d'enfouissement technique (CET) en tant que matériau de couverture d'alvéole. La voie, prometteuse, a été exploitée dès 1995 par le CET de la Malespine à Gardanne en collaboration avec la Mairie et l'est encore aujourd'hui (27, 28, 29).

Les caractéristiques de la Bauxaline® ont conduit à l'utiliser en mélange afin de lui conférer des qualités agronomiques qu'elle ne possède pas naturellement par insuffisance de matière organique dans sa composition. Les études ont porté sur la perméabilité à l'installation et lors de la germination des plantations, ainsi que sur les percolats*, les lessivats* et les lixiviats* (c'est-à-dire les eaux qui se sont infiltrées, celles qui ont ruisselé et celles qui sont restituées par la dégradation des produits d'origine).

Des résultats agronomiques ont aussi été enregistrés au cours des travaux (30) concernant l'installation et le développement de trois strates constitutives d'un couvert (herbacée, arbustive, arborescente) : il en ressort que si les graminées ou les conifères sont susceptibles de s'adapter quand le terrain est préparé de façon adéquate, d'autres familles, peu enclines à supporter les forts pH, ont des croissances ralenties ou nulles, voire ne donnent rien. Les résultats, quoique modestes comparativement à ceux générés par d'autres substrats, ont permis de conclure à l'aspect réaliste de ce type de projet si une attention particulière est apportée à la diminution du pH* du sol reconstitué et à la maîtrise de l'impact des eaux de percolation.



Résultats des études

La valorisation des résidus

- 34. Mise en œuvre de la Bauxaline® à Entressen en 2003
- 35. CET de la Malespine à Gardanne, en partie réhabilité (2002)
- 36/37. Chantier de la RD6 (Bouches-du-Rhône), 2003

En 10 ans de suivi, des projets de réhabilitation de CET, tous présentés au Comité Scientifique de Suivi, ont été réalisés à Entressen dans la Crau pour Marseille, à Gardanne⁽³⁷⁾, à Septèmes, à La Ciotat et à Martigues. De par ses qualités d'imperméabilité qui sont, entre autres, inhérentes à sa granulométrie, la Bauxaline® a été depuis pressentie pour homologation en tant que produit pour les fonds d'alvéoles.

Toujours de par ses propriétés, la Bauxaline® a fait l'objet d'une étude de faisabilité en collaboration avec le CEREGE (Aix-en-Provence l'Arbois) pour l'utilisation de sa capacité de blocage des métaux lourds. Les résultats, positifs pour l'heure, ont suggéré le développement d'un pilote industriel⁽¹⁹⁾.

APPLICATIONS DANS LE SECTEUR DES TRAVAUX PUBLICS

Les applications dans le secteur des travaux publics ont fait l'objet de recherches appliquées en collaboration dans deux directions :

- les remblais et les couches de forme pour route,
- les coulis d'injection.

Ce sont ici encore les qualités intrinsèques des résidus et les quantités disponibles qui ont favorisé cette orientation. Dès 1996, les résultats sont apparus économiquement intéressants.



34



35



36



37

En technique routière, un premier travail d'expérimentation en laboratoire a été mené par le CETE Méditerranée. Il a permis de déterminer les proportions d'un mélange optimum de Bauxaline® avec un liant hydraulique pour des performances mécaniques acceptables. Le liant choisi, en l'occurrence, était fait de cendres volantes de la centrale thermique de Gardanne ; il s'est avéré que, moyennant un temps de mûrissement de 48 heures, la résistance à la compression du mélange devenait satisfaisante, soit à peu près 0,4 Mpa.

Le matériau s'est ainsi vu placé en classe 4, dans la nomenclature des « matériaux de couche de forme traités aux liants hydrauliques ».

L'expérience s'est poursuivie *in situ* lors d'un chantier expérimental dit de la route de Braméfan (Bouches-du-Rhône)^(39, 40). Celui-ci a permis de tester des modalités visant la maîtrise des paramètres de mise en œuvre au cours des travaux : la teneur en eau par exemple. Ce paramètre est, en effet, très important pour l'efficacité du mélange.

Le suivi du comportement chimique du matériau lorsqu'il est en place (en cas de variation du pH et de lixiviation*) et de la stabilité aux périodes de gel-dégel a été assuré par le BRGM (Unité de développement des procédés). Il en ressort que la

Résultats des études

La valorisation des résidus

lixiviation n'entraîne pas d'éléments lourds Cd, Pb, Sn... et que la résistance à la compression est en moyenne multipliée par trois après gel-dégel.

Les résultats, obtenus *in fine*, ont été concrétisés et l'avenir de la Bauxaline® ainsi pérennisé dans ce secteur, par la réalisation de la RD6 en 2002 (Bouches-du-Rhône). Cette portion routière de 350 mètres de longueur a nécessité 2 500 t de mélange à 33 % d'humidité et 8 % de cendres volantes.

Concernant les coulis de remplissage (ces coulis servent entre autres à la réhabilitation de sites miniers et de carrières), la collaboration s'est organisée entre plusieurs sociétés : EDF, GTS, Surschistes et Ineris^{41, 42, 56}). C'est à nouveau le mélange de cendres volantes et de Bauxaline® qui a été étudié.

Le programme complet d'expérimentation s'est déroulé en trois étapes :

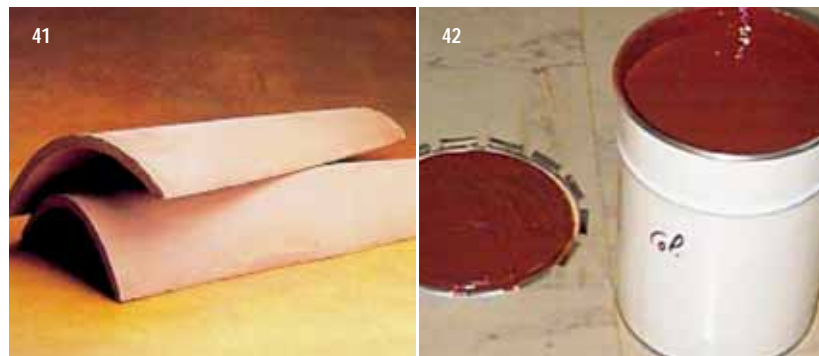
- essais en laboratoire et formulation,
- pilote industriel sur le site de Mange-Garri,
- réalisation sur le site de la carrière de Peynier (Bouches-du-Rhône).

Les essais de laboratoire et le pilote ont donné lieu à la rédaction d'un cahier des charges ; les contraintes fixées au départ étaient les suivantes :

- injectabilité à faible pression,
- stabilité à court terme,
- stabilité à long terme,
- résistance mécanique supérieure à un seuil,
- conformité à la réglementation environnementale.

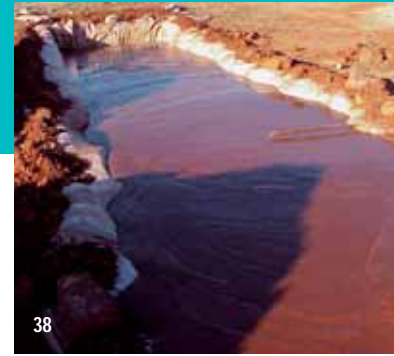
Sur plusieurs formulations, les premiers résultats se sont avérés décevants. La fluidité du mélange était réduite (temps de mise en œuvre trop court) ou sa résistance à la compression insuffisante. Il a finalement été décidé que pour les essais suivants, le mélange comporterait du ciment. La deuxième série d'essais réalisée à partir d'un mélange ainsi reformulé a donné les résultats attendus avec une résistance à la compression supérieure à 5 Mpa. C'est cette formulation qui a été utilisée à l'essai de pilotage industriel mené sur le site de Mange-Garri. Les résultats obtenus ont été conformes à ceux recueillis en laboratoire.

Utilisation du pouvoir colorant de l'oxyde de fer pour :
41. Tuiles / 42. Peinture



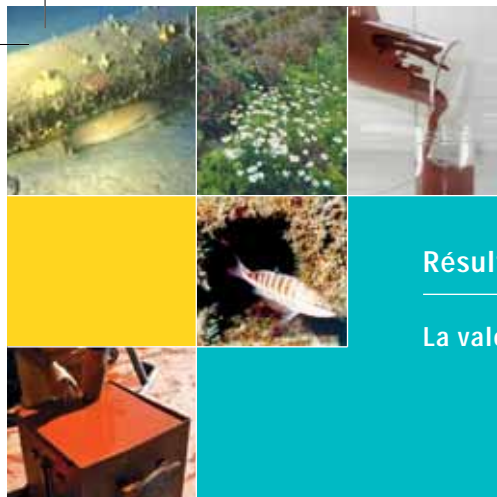
Une première mise en œuvre du mélange en vraie grandeur, dans une formulation des plus prometteuses, a été entreprise à Peynier dans une ancienne carrière devenue champignonnière.

38. Coulis d'injection à Mange-Garri, 2004
39/40. Coulis d'injection à la carrière de Peynier, 2004



APPLICATIONS DANS LE SECTEUR DU BÂTIMENT

Les applications dans le secteur du bâtiment ont procédé, pour la plupart d'entre elles, du pouvoir colorant de l'oxyde de fer très présent dans la Bauxaline®. C'est ainsi qu'en étroite collaboration avec des spécialistes dans chaque domaine concerné ou



Résultats des études

La valorisation des résidus

Utilisation du pouvoir colorant
de l'oxyde de fer pour :
43. Sol élastomère

sur leur initiative, l'établissement Aluminium Pechiney Gardanne a développé toute une série d'études puis des prototypes en vue de produire industriellement des matériaux de construction préfabriqués teintés : tuiles, parpaings, briques cuites, blocs de terre, bordures de jardin, enduits ou encore adjuvant pour béton auto-nivelant, peinture, sol élastomère, céramique...

Certaines pistes ont été abandonnées car considérées comme n'offrant pas ou que peu de perspectives. D'autres, plus intéressantes, sont encore en cours d'étude.



APPLICATIONS DANS LE SECTEUR HORTICOLE

Des essais démarrés en 1994 au sein même de l'usine de Gardanne ont servi de base de travail pour la validation de l'hypothèse d'une utilisation de la Bauxaline® comme substrat de culture.

Ecotechnologie (Avignon) a été chargé du suivi^(31, 43, 51, 62, 63) et a présenté régulièrement ses résultats au Comité Scientifique de Suivi. En cours d'expérimentation, d'autres sites que celui de Gardanne ont été préparés à la Bauxaline® et plantés ; les résultats ont permis de nuancer ou compléter les résultats déjà obtenus.

Un panel de végétaux a été mis en place, classiquement, sur plusieurs préparations de sols essentiellement faits de Bauxaline® avec un sol témoin. Des mesures et des analyses ont été pratiquées tous les ans sur les végétaux et les eaux de lessivage. Il a ainsi été possible de classer les espèces en trois catégories : espèces bien adaptées, espèces tolérantes et espèces mal adaptées, tout en considérant l'évolution significative des sols.

Les préparations des sols mélangés ont globalement donné de meilleurs résultats que la Bauxaline® pure. En effet, les végétaux plantés sur celle-ci ont souffert de chlorose dès la quatrième année. Néanmoins, les espèces bien adaptées se sont satisfaites de ces conditions difficiles. Un pH plus « agronomique » de 9,5 était du reste atteint la troisième année du programme par lessivages successifs des arrosages et de la pluie.



44. Chantier Autoroutes du Sud de la France à Salon-de-Provence, un an après plantation

Un essai avec les Autoroutes du Sud de la France à Salon-de-Provence⁽⁴⁵⁾ a renforcé ces résultats en montrant une bonne reprise à la plantation des lavandes et une inhibition efficace de l'installation des adventices.

Des essais en pots⁽⁵⁰⁾ ont été conduits en 1998 sur deux espèces préalablement reconnues pour leurs différences de sensibilité à la salinité des sols : le laurier rose (tolérant) et le romarin (non tolérant). Ces résultats ont aussi été conformes aux essais de Gardanne.

Avec et suite à ces essais, il a été envisagé de lancer une procédure d'homologation de la Bauxaline® en tant que matière fertilisante, mais les caractéristiques exigées pour ce type de produit ont, pour l'heure, interdit toute perspective dans ce sens.

Résultats des études

La valorisation des résidus

45. Minéral de bauxite
46. Procédé industriel d'obtention de la Bauxaline®



DÉMARCHE PRODUIT

Les années de travaux en laboratoire et sur le terrain ont donné lieu à la structuration d'une « démarche produit » qui a fait des résidus de bauxite du traitement de la bauxite par le procédé Bayer, la Bauxaline® (10, 11, 12, 13, 14, 15).

Cette démarche, devenue une approche, a intégré les dimensions « du marché » dans les perspectives de gestion, donc de valorisation, des résidus (44, 52, 61). Le Comité Scientifique de Suivi s'est ainsi vu présenter, ces dernières années, un ensemble d'études détaillant une systémique d'intégration du produit sur le marché des matériaux secondaires.

- Un nom commercial, la Bauxaline®, a été octroyé aux résidus de bauxite, traités par décantation.
- La Bauxaline® a été peu à peu créditée de caractéristiques commerciales en termes de composition et de propriétés (directement dépendantes de la bauxite dont elle est issue) :

Éléments majeurs

| Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | SiO ₂ | TiO ₂ | Na ₂ O | MgO | Autres |
|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|------------------|-------------------|-------|--------|
| 14 % | 42 % | 14 % | 6 % | 11 % | 2,3 % | 0,5 % | 10 % |

Éléments agronomiques

| Carbone (Anne) | Azote (Kjeldahl) | P (eau) | K ₂ O (total) | P ₂ O ₅ (total) |
|----------------|------------------|---------|--------------------------|---------------------------------------|
| 4,1 % | 0,23 % | 11,6 % | 0,02 % | 0,041 % |

Granulométrie

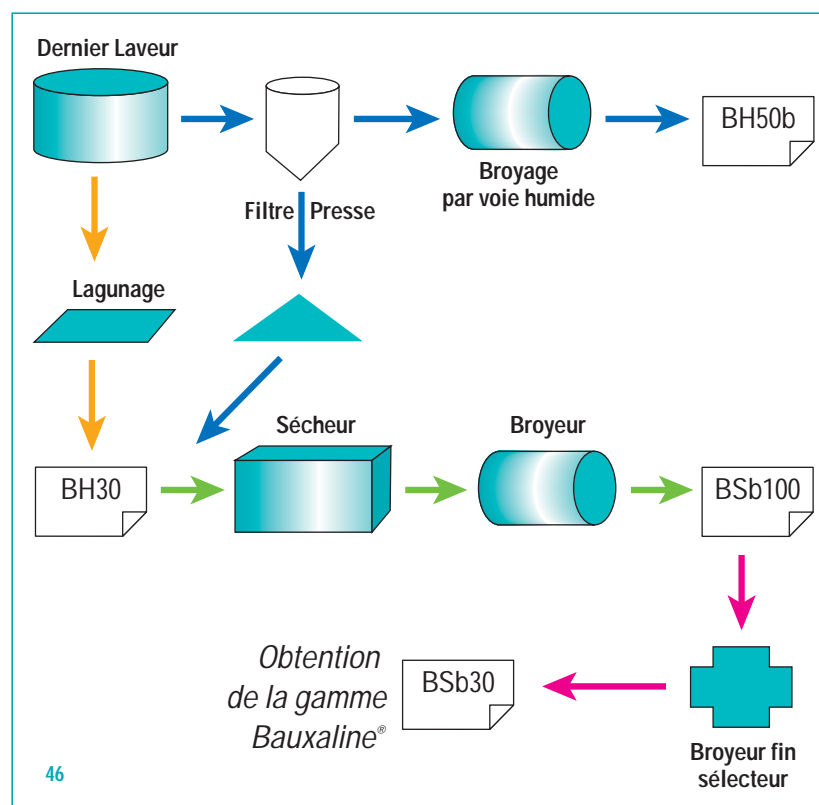
| 0 à 2 μ | 2 à 5 μ | 5 à 20 μ | 20 à 200 μ | 200 μ à 2 mm |
|---------|---------|----------|------------|--------------|
| 26,3 % | 44,3 % | 12 % | 14 % | 3,4 % |

Géotechnique

Perméabilité : $K = 10^{-8}$ m/s à 10^{-9} m/s ;
teneur en eau à l'optimum Proctor : 32 % ;
densité à l'optimum Proctor : 14,5 Kn/m³ ;
angle de frottement : 25° ;
cohésion résiduelle : 10 Kpa.

- Ces qualités ont été fiabilisées par obtention à l'aide d'un procédé industriel suivant une gamme, BH ou BSb.
- Des fiches « produit » commerciales ont été éditées pour chaque élément de la gamme.
- Enfin une politique commerciale a été développée.

La démarche produit se poursuit aujourd'hui au sein de l'établissement de Gardanne conjointement entre la Direction de l'Environnement et le Centre de Recherche des alumines de spécialité.



Perspectives



47

47. Aluminium Pechiney Gardanne veut faire de la Bauxaline® un co-produit à part entière



48

48. Zéro rejet au large de Cassis

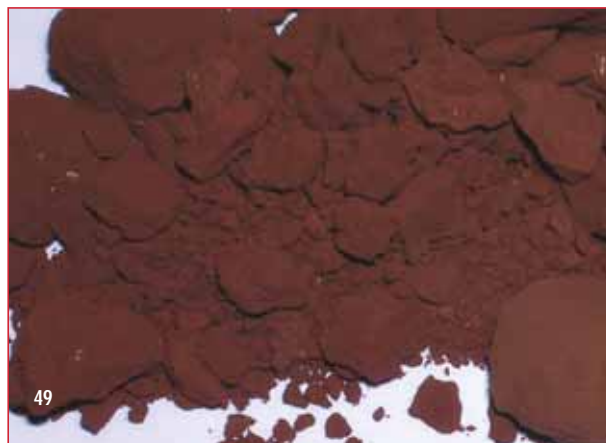
2015 : arrêt total des rejets de résidus

Au 31 décembre 2015, l'établissement de Gardanne devra avoir cessé tout rejet de résidus en mer. Il arborera un nouveau profil environnemental dans lequel la valorisation à 100 % des résidus sous forme de Bauxaline® se présente aujourd'hui comme une perspective probable. Les aménagements et les équipements nécessaires seront réalisés et fonctionneront à plein...

Pour ce faire et pour l'heure, le Comité Scientifique de Suivi approuve les choix fait par l'établissement de Gardanne de favoriser les solutions de valorisation sous forme de Bauxaline® qui permettent la mise en œuvre de forts tonnages.

Il recommande d'être attentif à l'égard de la faune benthique en contact avec les dépôts sous-marins et de la faune nageant près du fond (poissons nectobenthiques*) afin de contrôler le risque inhérent à l'accumulation des métaux dans la chaîne trophique.

Il recommande enfin de faire part de cette expérience de 10 années de suivi par des publications, afin que celle-ci soit comprise et que ses résultats soient connus et reconnus ⁽²³⁾.



49

49. Échantillon de Bauxaline®

La Bauxaline® comme un co-produit

Si 2015 peut se présenter comme une date butoir, 2015 peut aussi représenter un objectif à atteindre ! L'ambition de faire de la Bauxaline® un co-produit de l'alumine, à terme, suppose, en effet, d'accepter l'enjeu de l'intégration de l'environnement dans la stratégie industrielle de l'établissement et d'anticiper les effets de la contrainte réglementaire afin de la négocier plus aisément.

Les résidus, inertes car stables dans l'environnement, sont lentement devenus un produit secondaire de par leurs qualités. Préparés, conditionnés, ils sont aujourd'hui connus sous le nom de Bauxaline®.

Recommandations, classifications et homologations pour des usages précis seront par conséquent les étapes à franchir pour que la Bauxaline® soit enfin un co-produit.