

**RAPPORT ANNUEL 2003**

**DU COMITE SCIENTIFIQUE DE SUIVI**

**RESIDUS DE TRAITEMENT DE  
BAUXITE  
(BAUXALINE)**

**AP GARDANNE**

**WIMEREUX le 23 mars 2004**

## RAPPORT ANNUEL 2003 DU COMITE SCIENTIFIQUE DE SUIVI RESIDUS DE TRAITEMENT DE BAUXITE (BAUXALINE) AP GARDANNE

### Réglementation des installations classées

Depuis le décret 87-279 du 16 avril 1987 pris au titre de la législation des Installations classées - loi du 19 juillet 1976 - et de la Police des Eaux- loi du 16 décembre 1964 - les rejets en provenance des Installations Classées sont soumis à la réglementation des Installations Classées. Leur sont donc applicables les dispositions du décret modifié du 21 septembre 1977. C'est à ce titre que l'arrêté préfectoral du 24 mai 1994 impose des prescriptions complémentaires à Aluminium Pechiney Gardanne sur l'ensemble des installations de rejet en mer avec notamment :

- \* dans son article 5.1.1 une programmation d'opérations de suivi du milieu marin tous les cinq ans de l'extension du dépôt et de son épaisseur et le suivi de l'évolution de la macrofaune benthique sur des stations de prélèvement représentatives du milieu concerné par le rejet et sur des stations de référence.

- \* dans son article 5.1.2. une étude de l'effet du rejet sur les activités de pêche avec les professionnels de la pêche.

- \* dans son article 5.2.1. des études hydrauliques et de la masse d'eau afin d'évaluer la dispersion et le transport dans la masse d'eau des éléments rejetés et leurs impacts sur le milieu.

- \* dans son article 7. la constitution d'un Comité Scientifique de suivi.

L'article 2-2 de l'arrêté du 1 juillet 1996 complétant l'arrêté 24 mai 1994 indique « La société Aluminium Pechiney proposera au service chargé de la police des eaux et à l'inspecteur des Installations classées un programme d'étude relative à la toxicité des résidus et notamment à leur persistance, accumulation, interaction et effet sur l'écosystème marin. Une attention particulière sera portée sur la bio-accumulation du chrome et du vanadium. Cette étude sera lancée dès le début de l'année 1997. A l'issue de cette étude, un programme de suivi de la toxicité des résidus sur le milieu pourra être engagé.

L'article 4 de l'arrêté du 1 juillet 1996 « Réduction quantitative des rejets » précise.

\* 4-1. Les premier et troisième alinéas de l'article 4.5. de l'arrêté préfectoral du 24 mai 1994 sont abrogés.

\* 4-2. Grâce à la poursuite des actions de diminution de la production des résidus et d'emploi dans des techniques de valorisation, la société ALUMINIUM PECHINEY cessera tout rejet en mer au 31 décembre 2015 selon le programme déjà engagé suivant :

	1986	1990	1995	2000	2005	2010	2015
Quantité déposée en mer en millions de tonnes	1,04	0,5	0,33	0,31	0,25	0,18	0

### **Composition du Comité Scientifique au 14 mai 2002 et rôle du Comité Scientifique de Suivi**

Le comité de suivi prévu par l'article 7 de l'arrêté préfectoral du 24 mai 1994 a été mis en place par décision préfectorale en date du 30 octobre 1995. La décision du 14 mai 2002 modifie la liste des membres du CSS sur proposition du Président le 11 mars 2002 et désigne les sept membres suivants :

Madame Claude AMIARD-TRIQUET (Directeur de Recherches au CNRS, Université de Nantes, spécialiste en écotoxicologie) ;

Monsieur Pierre BLAZY (Ancien Directeur du Centre de Recherche et de Valorisation des Minerais de Vandoeuvre, retraité, spécialiste du traitement et de la valorisation de la bauxaline) ;

Monsieur Jean-Claude DAUVIN (Professeur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille, Station Marine de Wimereux, océanographe) Président ;

Monsieur DAUZAT, Chef de Service du CETE, Aix les Milles ;

Monsieur BURSI, EDF Lyon ;

Monsieur Henri FARRUGIO (Cadre IFREMER, Station de Sète, halieute) ;  
Monsieur Raymond GAUDY (Directeur de Recherches au CNRS, Centre Océanologique de Marseille, station marine d'Endoume, planctonologue).

Le Comité Scientifique de Suivi a trois principales missions ; il :

- i) examine et analyse les résultats des travaux entrepris sur la bauxaline et le devenir en mer des résidus de traitement de bauxite ;
- ii) donne son avis sur les programmes en cours et à venir ;
- iii) produit un rapport annuel qui est ensuite présenté en séance plénière du Conseil Départemental d'Hygiène des Bouches-du-Rhône.

### **Rapport 2003**

Les travaux entrepris en 2003 portent sur deux domaines bien distincts :

I. Acquérir une meilleure connaissance du devenir en mer des Résidus de Traitement de Bauxite et déterminer leur toxicité ;

II. Rechercher les voies d'utilisation de la bauxaline.

Le rapport annuel comporte en 2003 deux principaux volets. Le premier le plus conséquent concerne les résultats de la campagne de prélèvements de septembre 2002. Le second résume les démarches entreprises en 2003 et les projets 2004 par l'usine Aluminium Pechiney Gardanne pour utiliser, valoriser la bauxaline afin de réduire de façon drastique les rejets en mer. Il s'ajoute à ces deux points une proposition de démarche sur les risques sanitaires liés à l'ingestion de poissons vivant dans le canyon de Cassidaigne suite à l'interpellation du CDH du 26 juin 2003 au sujet de l'éventuelle toxicité des résidus de bauxite rejetés en mer sur l'homme.

## Rappel sur la campagne en mer ALPECAST2

La campagne d'échantillonnage **ALPECAST2 en 2002** avait pour but de mettre en évidence d'éventuelles modifications dues à l'extension, l'accumulation ou la redistribution des boues. Elle est basée sur des suivis granulométrique, chimique, biologique et toxicologique après les campagnes de 1991 (pente), 1995 (remontée sur le plateau continental et piégeage de particules), 1997 (pente) et 1999 (base du talus).

Trois principaux objectifs ont été poursuivis lors de ces campagnes :

\*. Connaître l'extension maximale des dépôts de résidus inertes.

\*\*. Connaître l'évolution temporelle de la macrofaune benthique sur les zones de dépôts et à proximité.

\*\*\*. Evaluer la toxicité des sédiments superficiels sur les zones de dépôts et à proximité.

La campagne a eu lieu à bord du N.O. Castor 2 (Société FOSELEV, La Seyne sur Mer, Commandant Bernard PETRONET) présentant une grande plage arrière et permettant de travailler dans de bonnes conditions. Elle a duré 6 jours entre le 28 septembre et le 3 octobre dans de bonnes conditions de mer permettant ainsi de réaliser la totalité des 12 stations prévues et situées dans la zone de la pente à l'exclusion du plateau continental (absence de remontées significatives), du canyon (écoulement direct de boues rouges et de la base du talus, à l'est du canyon (absence de boues rouges). Elles se trouvent dans la zone de propagation des boues mise en évidence par l'observation de la couleur des sédiments superficiels et par les concentrations en titane(Figure 1).

Parmi les douze stations, six ont concerné des analyses chimiques, de faune et de toxicité, les six autres n'ont comporté que des analyses chimiques et de faune (Tableau 1).

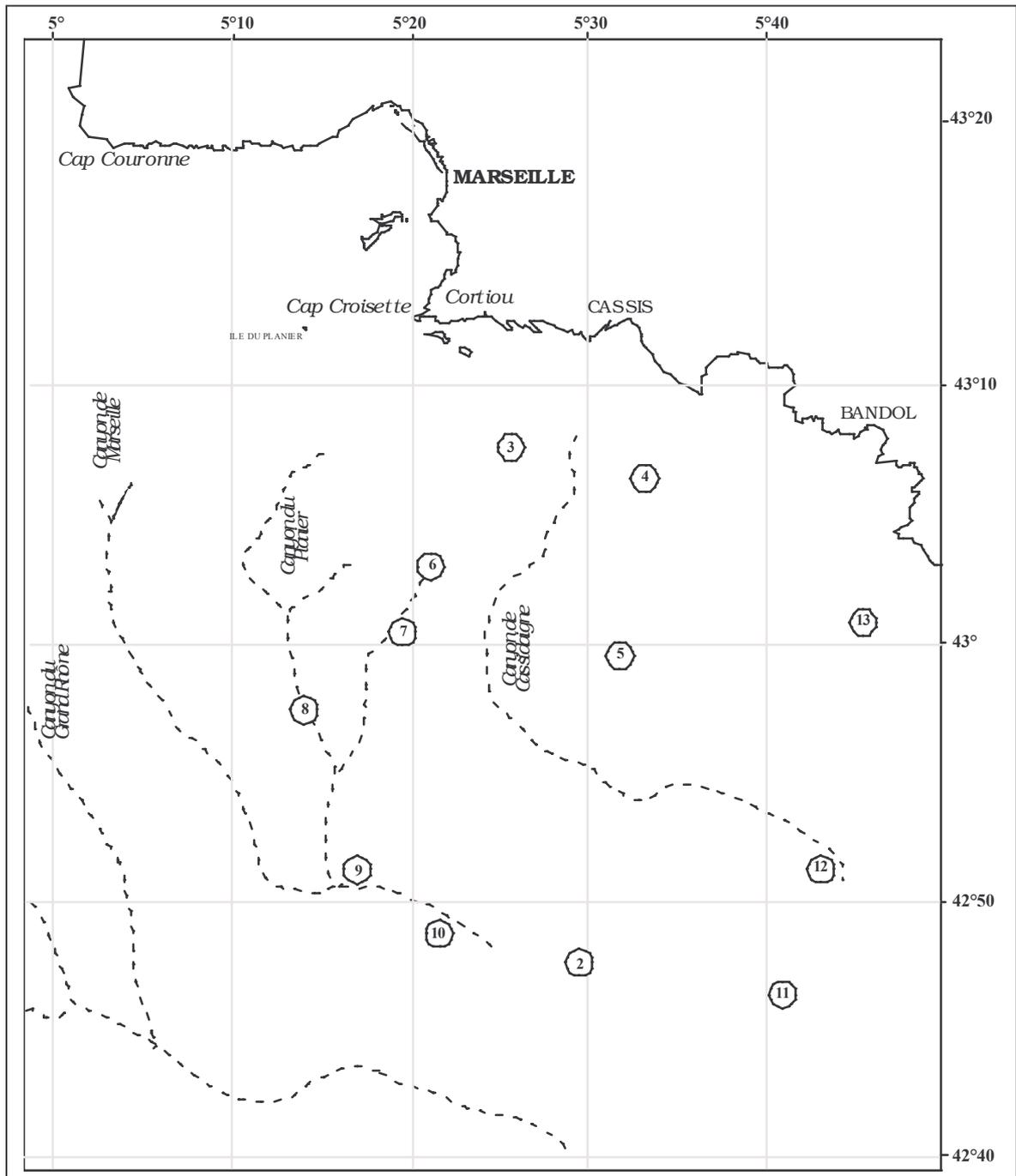
**Tableau 1.** Caractéristiques des stations prospectées lors de la campagne ALPECAST2 en 2002.

Station	Latitude	Longitude	Profondeur m	Chimie macrofaune	Ecotoxicologie
U02	42° 48'03	05° 29'97	2126	X	
U03	43° 07'05	05° 26'11	270	X	X
U04	43° 06'20	05° 33'00	228	X	X
U05	42° 59'39	05° 31'85	740	X	X
U06	43° 02'40	05° 21'00	610	X	X
U07	43° 00'10	05° 21'00	1066	X	X
U08	42° 57'43	05° 14'04	1514	X	
U09	42° 50'95	05° 17'06	1990	X	
U10	42° 49'234	05° 21'95	2152	X	
U11	42° 46'22	05° 40'80	2253	X	
U12	42° 48'297	05° 45'787	2320	X	
U13	43° 00'45	05° 45'534	980	X	X

**Extrait du rapport A. Arnoux & G. stora. Analyses granulométrique et chimique de sédiment prélevés dans la zone de rejet des boues résiduares de l'industrie de l'aluminium, canyon de Cassidaigne.**

L'étude de la dispersion des boues est basée sur la comparaison des valeurs obtenues au cours d'une même campagne. Etant essentiellement descriptive, l'appréciation de la contamination se fait en prenant comme référence les taux moyens de chaque métal dans les niveaux inférieurs des carottes.

Les cartes établies respectivement pour les fractions < 2 mm et < 20µm, rendent compte des distributions pour chacun des métaux pour lesquels on dispose des valeurs discriminantes (ce qui exclue le vanadium). D'une manière générale, il n'apparaît pas de différence fondamentale par rapport aux distributions décrites antérieurement pour tous les métaux caractéristiques des boues rouges (fer, titane, chrome, et, à un moindre degré, le plomb, trop lié à la pollution générale du littoral).



**Figure 1.** Localisation des stations

La situation peut se résumer en trois points (Figures 2 et 3) :

- \* présence de fortes concentrations dans l'axe du canyon ;
- \*\* propagation préférentielle vers l'ouest avec une différenciation entre une zone à mi-pente du talus (stations 6, 7, 8) et une autre s'étendant à la base du talus, dans des fonds de plus de 2000 m (stations 11, 2, 10).

\*\*\* extension très discrète vers l'est, envisageable à la station 5 située sur le flan est du canyon. Elle est inexistante à la station 13, vraisemblablement exposée aux apports de la région toulonnaise.

Les plus fortes concentrations sont relevées à la station 2 (déjà constaté en 1999) et à la station 12 qui n'avait pas fait l'objet de prélèvement depuis 1991. L'augmentation des concentrations en Fe, Ti, Cr et Pb, entre ces deux dates, témoignent de la progression des boues dans l'axe du canyon.

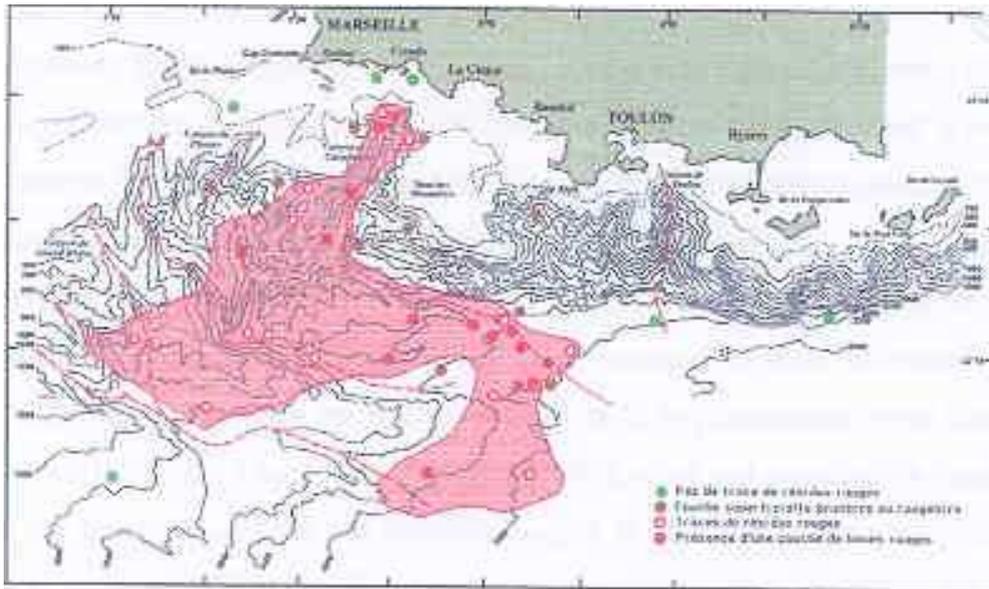


Figure 2. Couleur des sédiments superficiels.

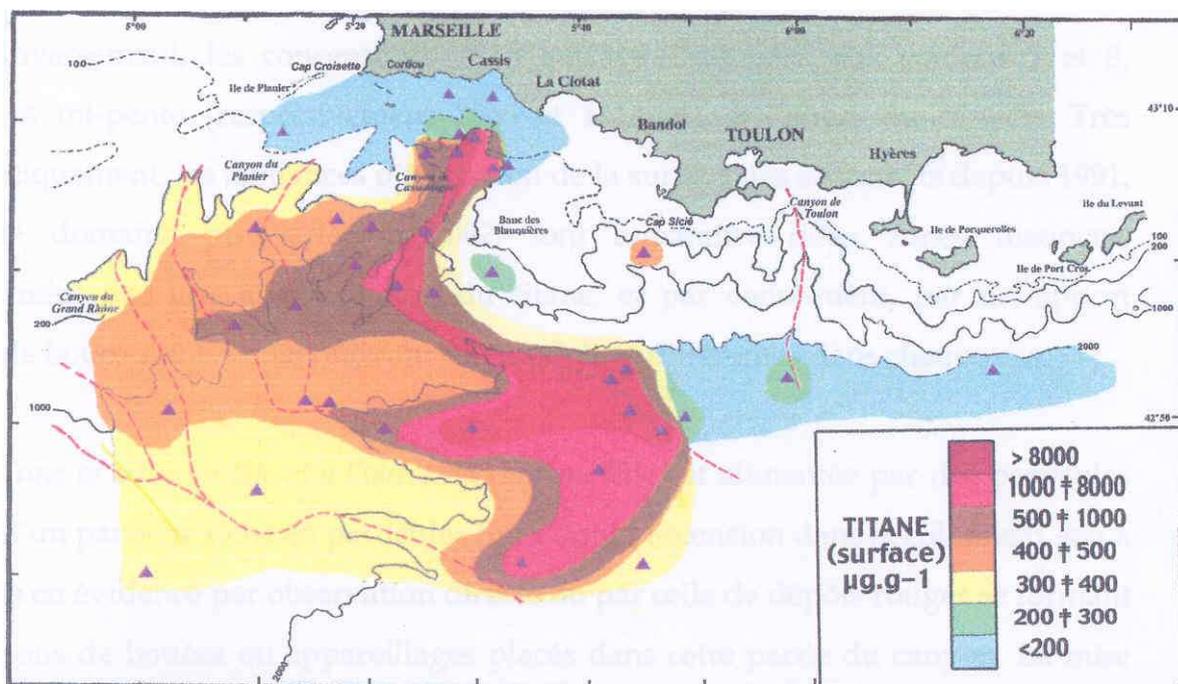


Figure 3. Titane dans les sédiments superficiels dans l'ensemble du site.

## Mise en évidence d'une évolution de la qualité des sédiments superficiels depuis 1991

Au cours du temps, les sédiments superficiels peuvent subir des modifications, soit par apport permanent et régulier de boues, soit par extension de leur domaine de sédimentation, soit, au contraire, par diminution des apports. L'évolution par station peut être appréciée à partir des concentrations du métal le plus représentatif, le titane, dans le niveau superficiel et par le rapport entre les taux en surface et le niveau inférieur (6-9 cm) de chaque carotte pris comme référence du sédiment à chaque station. *A priori*, aucun changement notable ou significatif n'est observé aux stations 4, 5, 9 et 13. La poursuite des apports avec accumulation en surface entraîne une augmentation modérée aux stations 6 et 10, et proportionnellement plus importante à la station 3 (270 m, en tête de canyon). L'enrichissement est beaucoup plus marqué en 11 et, surtout en 2 et 12, stations correspondant à des fonds compris entre 2126 et 2320 m. Si le phénomène avait déjà été mentionné pour la station 2 après la campagne 1997, il n'est pas possible de dater la progression des boues dans l'axe du canyon, jusqu'à la station 12. Tout au plus, peut-on constater qu'entre 1991 et 2002 la coulée de boues a avancé d'environ 4 à 5 km, ce qui place son front à plus de 60 km du point de rejet.

Inversement, les concentrations en surface diminuent aux stations 7 et 8, situées à mi-pente (respectivement 1066 et 1514 m), à l'ouest du canyon. Très schématiquement, les tendances d'évolution de la surface des sédiments depuis 1991, dans le domaine prospecté en 2002, font apparaître deux zones distinctes caractérisées par une augmentation du titane, et par conséquent, par un apport récent de boues rouges, mais suivant des modalités différentes dans chaque cas.

1. *L'une se situe en tête et à l'ouest du canyon.* Elle est alimentée par des particules issues d'un panache riche en particules fines dont l'ascension dans la colonne d'eau a été mise en évidence par observation directe ou par celle de dépôts rouges se formant au-dessous de bouées ou appareillages placés dans cette partie du canyon. La mise en suspension est provoquée par :

\* la turbulence engendrée par le déversement de l'émissaire ;

- \* la dilution de la solution alcaline génératrice de phénomènes de convection ;
- \* la progression rapide de la coulée de boues sur le fond, dans les premiers kilomètres du canyon ;
- \* les éboulements fréquents du matériel instable accumulé sur les parois abruptes de la partie amont du canyon ;
- \* les éventuels upwellings.

L'ascension des particules dans la colonne d'eau est d'autant plus élevée que leur finesse et, par conséquent, leur mobilisation sont plus grandes. Dépendant étroitement du débit de l'effluent, les dimensions et la densité du nuage turbide subissent d'importantes variations dans le temps et l'expansion des particules peut différer d'une campagne à l'autre. Quoiqu'il en soit, le matériel remontant dans la colonne d'eau est susceptible d'être repris par les courants portant préférentiellement vers l'ouest.

Son transfert sera d'autant plus lointain que l'aptitude à la sédimentation des particules sera plus faible. Ainsi, et compte tenu de la très fine granulométrie des matières en suspension, leur dépôt peut se faire loin du point d'émission, comme le montrent, d'une part le gradient croissant observé en 1991 entre les stations 6 et 8, d'autre part, les valeurs trouvées en 1991 et 1997 aux stations 57 et 18 (Tableau 2). Le relief accidenté caractérisant le talus favorise le piégeage et la rétention de ces apports modernes.

La sédimentation des particules issues du rejet a dû nettement régresser depuis la mise en application du programme de réduction du débit des boues, durant la dernière décennie. En 2002, elle se poursuit aux stations 3 et 6, les plus proches du point de rejet. Par contre, la propagation vers l'ouest semble plus limitée si l'on en juge par la diminution des concentrations en titane aux stations 7 et 8. Toutefois, avant de conclure à un effet d'une réduction des apports dans cette direction, il est nécessaire de vérifier si cette baisse des teneurs en surface n'est pas due, au moins en partie, à une accélération de l'incorporation de particules dans la colonne sédimentaire, en relation avec une bioturbation plus active.

**Tableau 2.** Titane – Profils E - W dans la zone du talus de 1991 à 2002

Station	N°	1	2	6	59
Localisation		Cassidaigne	Cassidaigne	Planier E	Planier W
Bathymétrie	m	1200	1300	590	585
Distance du canyon	km	0	0	5,9	10,7
1991 Surface	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	13200		382	
1991 0 – 3 cm	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		11760	419	436
1997 Surface	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$			341	
1997 0 – 3 cm	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$			256	
2002 Surface	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$			604	
2002 0 – 3 cm	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$			515	

Station	N°	58	7	8	57	18
Localisation		Planier	Planier E	Planier W	Marseille	Grd Rhône
Bathymétrie	m	975	1065	1540	1437	1245
Distance du canyon	km	20	10,2	18,5	26,4	39
1991 Surface	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		1100	2073		
1991 0 – 3 cm	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	493	465	448	753	
1997 Surface	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		808	2556		436
1997 0 – 3 cm	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		675	707		195
2002 Surface	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		953	953		
2002 0 – 3 cm	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		694	792		

Un phénomène analogue s'observe en tête de canyon, à la station 3 qui profite également des nouvelles modalités de transfert et de sédimentation.

Comme le montrent les taux de titane dans ce secteur, le flux particulaire est relativement peu important et progressif, ce qui permet le maintien d'une activité biologique assurant le transfert des particules dans la colonne sédimentaire.

2. *A la base du talus.* L'expansion des boues se fait suivant un processus différent, sans intervention de phénomènes aussi turbulents que ceux mis en jeu dans la partie amont du canyon. Ici, la situation est dominée par l'arrivée massive et passive des boues s'étalant au débouché du canyon, à plus de 60 km du point de rejet (station 12) et par la propagation d'une partie importante de ce matériel de ce matériel sur des fonds de plus de 2000 m. L'arrachement de particules et leur entraînement près du fond, est commandé par les courants balayant la base du talus continental. Toutes proportions gardées, les mécanismes sont équivalents à ceux

prévalant dans une zone deltaïque avec formation d'un cordon littoral dont l'extension et les modifications sont commandées par les conditions hydrauliques et hydrodynamiques. Ils conduisent à des concentrations élevées dans un domaine s'étendant largement vers l'ouest (stations 2, 11, 10). Pour la Station 9, les données sont plus aléatoires, mais il convient de rappeler que sa position a été modifiée d'une campagne à l'autre. On notera toutefois, une augmentation relativement importante entre 1997 et 2002.

La comparaison des résultats des campagnes successives met en évidence une progression nette des boues vers le sud et vers l'ouest. Contrairement à ce qui est observé dans la zone du talus, et en accord avec l'hypothèse d'un processus de transfert dominant, on observe une accumulation essentiellement superficielle, souvent massive, sans mélange perceptible avec les vases sous jacentes. La permanence des dépôts n'étant pas assurée, on peut envisager la possibilité d'une mobilisation contribuant à la migration des boues vers l'ouest.

Le transfert dans la colonne sédimentaire est peu favorisé par la compacité des vases profondes et la faible activité biologique.

En définitive, ce déplacement des boues sur le fond, déjà envisagé après la campagne 1999 (station 2), ne peut que se poursuivre et s'amplifier vers l'ouest, puisque la source des particules que constitue la coulée de boues dans l'axe du canyon, continue à être alimentée et à progresser vers le large.

Les faibles variations de la bathymétrie facilitent le déplacement des particules sur un très large domaine dont les limites actuellement identifiables se situent, actuellement, au-delà du canyon du Grand Rhône.

D'une manière générale, il est logique d'envisager que la réduction des rejets jusqu'à leur arrêt en 2015, s'accompagnera d'une régression rapide de la sédimentation dans la zone du talus où la plus grande partie de la charge particulaire acquise sera progressivement incorporée et fixée dans la colonne sédimentaire. Par contre, la situation à la base du talus perdurera avec le maintien d'un stock important au débouché du canyon qui continuera à être approvisionné, pendant une durée difficile indéterminée, par glissement du matériel fluide accumulé dans le canyon.

Par ailleurs la persistance du décapage des dépôts superficiels très mobilisables assurera leur entraînement et leur dispersion de plus en plus lointains vers l'ouest.

Un dernier groupe de trois stations (4, 5 et 13) situées à l'est du canyon ne subit pas de changements significatifs, ce qui est en accord avec leur situation dans une région considérée comme peu ou pas soumise à l'impact des boues rouges.

**Extrait du rapport de G. Stora, A. Arnoux, E. Duport, C. Ré et F. Gilbert. Etude de la macrofaune benthique dans le secteur du canyon de Cassidaigne. Campagne ALPECAST 02**

L'analyse de la faune benthique a été effectuée sur la totalité des 12 stations échantillonnées (Figure 1 et Tableau 1). Les résultats portent, d'une part sur la campagne 2002 et d'autre part sur la comparaison des peuplements des stations échantillonnées en 1991, 1997 et 2002.

**Méthode de prélèvements et traitement des données**

Les prélèvements ont été réalisés avec le carottier USNEL. Deux coups de benne ont été effectués sauf à la station 12. Chaque benne étant divisée en 2 sous échantillons pour un total de 4 répliquats sauf à la station U09 où seulement 3 répliquats sont disponibles. Les 15 premiers centimètres de sédiment de chaque échantillon ont été tamisés sur un tamis de maille AFNOR de 250 µm permettant de récupérer 100 % de la macrofaune présente. Les refus de tamis fixés au formol neutre à 6 % ont été triés au laboratoire après coloration légère au rose bengale. L'ensemble des groupes zoologiques présents ont été séparés, déterminés dans la mesure du possible jusqu'au niveau spécifique et dénombrés.

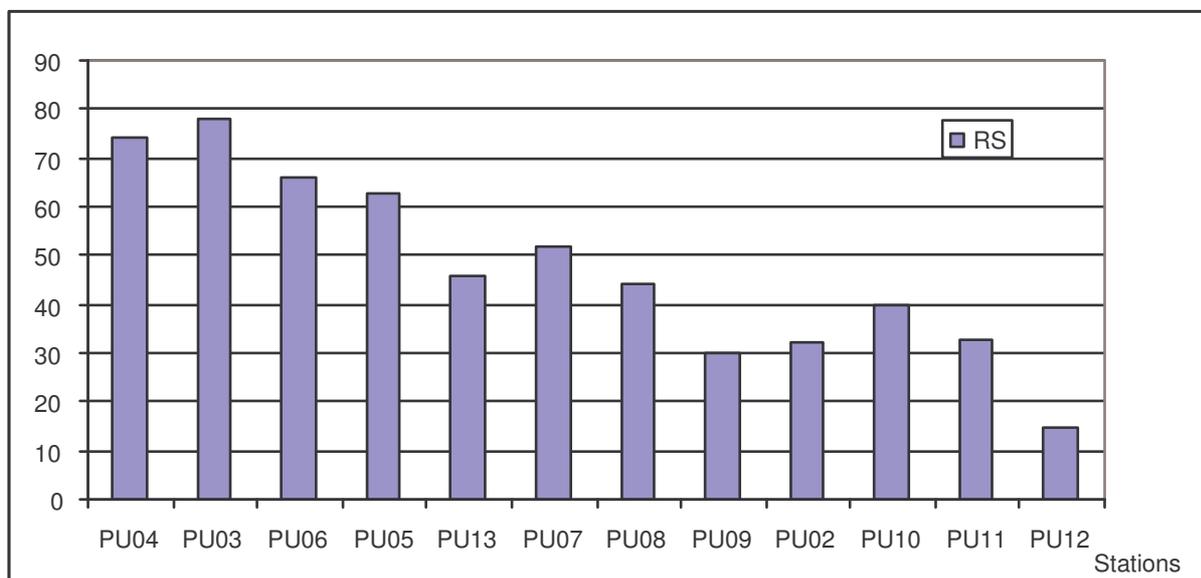
Différentes méthodes statistiques, graphiques ou basées sur la signification écologique des espèces ont été employées :

- i) détermination de la richesse spécifique (nombre d'espèces dans le peuplement) ; la densité (nombre d'individus de chaque espèce pour 1 m<sup>2</sup>) ; la dominance (pourcentage de chaque espèce calculé par rapport au nombre

- total d'individus obtenus dans le prélèvement), comparaisons de densités moyennes en utilisant la technique de l'analyse de variance (ANOVA) ;
- ii) similitude entre stations à partir des coefficients quantitatifs de BRAY-CURTIS et qualitatifs de SORENSEN. La représentation graphique des matrices de similitude a été effectuée par la technique de l'analyse hiérarchique ascendante (algorithme du saut moyen) ;
  - iii) mesure de la diversité des peuplements par la méthode de raréfaction de SANDERS modifiée par HURLBERT, la diversité (H) de SHANNON-WEAVER et l'équitabilité de PIELOU ;
  - iv) détermination des degrés d'affinités des assemblages, et recherche des indicateurs biologiques et des espèces dominantes et subdominantes ;
  - v) analyse factorielle des correspondances à partir du Logiciel ADE. La base de la méthode est de fournir la représentation simultanée dans un seul plan de la projection de l'ensemble des lignes et des colonnes d'un tableau de contingence. Les corrélations existantes entre l'ordination des variables sur les axes choisis et les caractéristiques physiques et chimiques des sédiments des différentes stations ont été recherchées (coefficient de rang de Spearman). Pour cela, ont été pris en compte, d'une part les paramètres environnementaux mesurés dans la couche superficielle des sédiments et dans l'ensemble de la colonne sédimentaire en considérant pour chaque paramètre analysé la moyenne des valeurs obtenues dans les couches 0-3 cm, 3-6 cm et 6-9 cm ;
  - vi) MDS : Méthode de positionnement multidimensionnel. La relation entre les variables environnementales et les peuplements des différentes stations a été étudiée en utilisant le programme BIOENV du logiciel PRIMER consistant en une étude de corrélation de rang (coefficient de Spearman) entre une matrice de similarité (Bray-Curtis) obtenue à partir des données biologiques obtenues dans les stations échantillonnées et une matrice de dissimilarité (distance euclidienne) calculée pour les variables environnementales mesurées dans ces stations.

## Principaux résultats 2002

Au cours de cette campagne, 3888 individus ont été récoltés et 151 espèces identifiées. Les peuplements appartiennent à l'assemblage de la Vase Profonde (VP) marquée par la présence des espèces caractéristiques exclusives telles que les polychètes *Ancistrosyllis groenlandica*, *Aricidea monicae*, *Brada villosa*, *Harmothoe impar*, *Onuphis quadricuspis*, *Fauvelopsis brevis*, *Heterospio reducta*, *Spiophanes kroyeri reyssi*, les crustacés *Leucon longirostris*, *Campylaspis vitrea*, *Gnathia oxyrea*, *Maera schmidtii*, *Eriopisa elongata*, *Callocaris macandreae*, les mollusques *Abra longicallus*, *Thyasira ferruginea*, *Chlamys vitrea*, *Dentalium agile*, *Nucula tenuis* l'échinoderme *Amphilepis norvegica* et les sipunculien *Golfingia minuta* *Sipunculus norvegicus* et *Onchnesoma steenstrupii*. Au sein de cet assemblage de la vase profonde on peut noter la présence d'espèces caractéristiques de la Vase Terrigène Côtière (VTC) avec les polychètes *Laonice cirrata* et *Phyllodoce lineata* et les crustacés *Gonoplax rhomboides* et *Iphinoe serrata*.

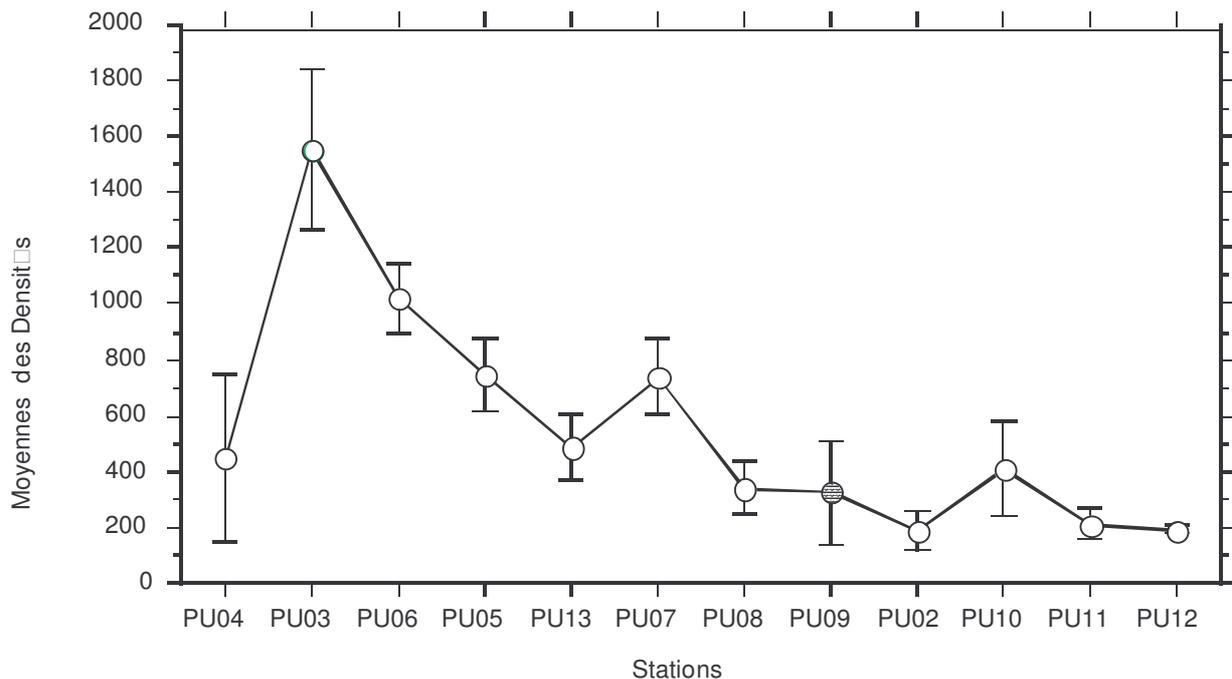


**Figure 4.** Evolution de la richesse spécifique en fonction de la profondeur.

Sur le plan quantitatif, la richesse spécifique évolue de 78 espèces (station PU03) à 15 espèces (station PU12). Cette richesse spécifique tend à diminuer en fonction de la profondeur comme le montre la figure 4. Du fait d'un effort d'échantillonnage différent, la richesse spécifique des stations PU09 et PU12 peut être

sous évaluée. Les courbes de raréfaction réalisées montrent que potentiellement la richesse spécifique de la station PU09 pour un nombre égal d'individus est identique à celle de la station PU08. En revanche, en fonction de l'évolution de la courbe pour la station PU12, on se rend compte que 2 réplicats supplémentaires n'auraient pas augmenté de manière significative le nombre d'espèces récoltées au sein de cette station par rapport aux autres stations.

A l'exception de la station PU04, dont la densité plus faible est due à la présence d'une importante fraction bioclastique dans les sédiments (thanatocenose wurmienne), l'évolution de la densité moyenne des peuplements est similaire à celle de la richesse spécifique en fonction de la profondeur (Figure 5). Le peuplement le plus riche s'observe pour la station PU03 à 270 m de profondeur avec 1552 individus. m<sup>-2</sup> et le plus pauvre à la station PU12 à 2320 m avec 190 individus.m<sup>-2</sup> (différence significative  $p < 0,001$ ).



**Figure 5.** Evolution de la densité moyenne des peuplements en fonction de la profondeur

Les polychètes sont les mieux représentés dans l'ensemble des stations et constituent plus de 50 % des peuplements en place. Les crustacés prédominent respectivement au sein des stations PU03, PU06, PU05, PU09 et PU11 et les mollusques dans les autres stations. Il existe une baisse de la diversité de Shannon en

fonction de la profondeur,  $H'$  passant de 3,92 bits pour la station PU04 à 2,13 bits à la station PU12. Dans la plupart des stations l'équitabilité est supérieure à 0,80, montrant qu'une grande majorité des espèces composant les peuplements au sein de chaque station sont représentées par un nombre d'individus très proche. Les équitabilités de 0,71 et de 0,78 calculées aux stations PU10 et PU12 sont liées en particulier à la densité importante par rapport aux autres espèces de la polychète *Fauvielopsis brevis*.

Sur les 28 espèces recensées comme dominantes et subdominantes, moins d'un tiers d'entre elles sont présentes dans plus de deux stations sur les 12 étudiées. Ces espèces, classées en fonction de leur fréquence croissante sont *Thyasira ferruginea*, *Prionospio steenstrupii*, *Leptognathia* sp. (fréquence F 4/12), *Tachytrypane jeffreysi*, *Fauvielopsis brevis*, *Cirratulus filiformis* (F 5/12), *Paraonis gracilis* (F 6/12), *Glycera capitata* (F 11/12). A l'exception de la station PU04, les espèces caractéristiques exclusives de l'assemblage de la vase profonde dominant dans l'ensemble des stations. Le deuxième groupe le mieux représenté sont les espèces à large répartition écologique au sein de stations PU04 et PU08, les espèces indicatrices de fraction grossière à la station PU12 et les espèces vasicoles strictes et tolérantes dans le reste de stations. Aucun indicateur biologique classique caractérisant une perturbation du milieu n'a pu être récolté au sein des stations étudiées.

Sur le plan quantitatif les regroupements obtenus avec l'indice de Bray-Curtis sont très proches de ceux obtenus avec l'indice de Sorensen qui font apparaître trois groupes de stations. Dans le cas de Bray-Curtis PU12 et PU02 d'une part et la station PU08 d'autre part se repositionnent dans le groupe des stations profondes avec les trois groupes suivants : groupe 1 une station PU04 ; groupe 2, 5 stations PU03, PU05, PU06, PU07 et PU13 et groupe 3, 6 stations PU02 et stations PU8 à PU12. La représentation MDS confirme l'influence de la bathymétrie sur la distribution des peuplements

L'AFC (sans la station PU04 très particulière, voir plus haut) permet une séparation des stations du haut de la pente au-dessus de 1000 m des autres stations situées plus profondément ; la relation avec la bathymétrie est encore évidente. Les corrélations obtenues avec certaines fractions granulométriques montrent

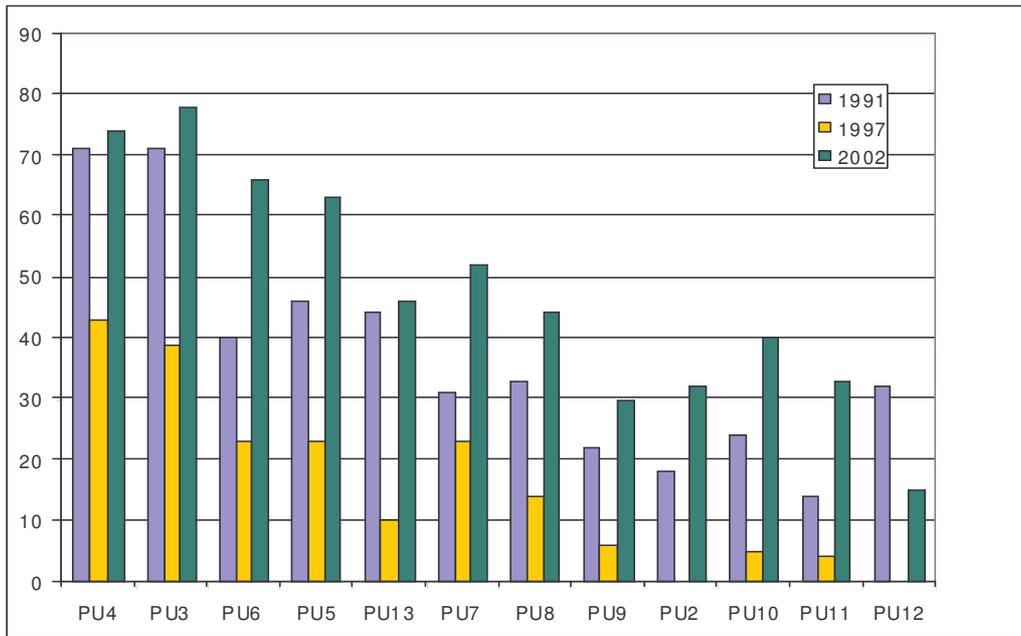
essentiellement l'incidence des conditions de sédimentation sur la structuration des peuplements. Il en est de même pour les corrélations obtenues avec les métaux lourds sur les autres axes. Les analyses chimiques réalisées permettent de mettre en évidence 4 groupes de stations se différenciant par la distribution des concentrations de titane dans la colonne sédimentaire avec séparation des stations ne présentant pas d'accumulation de résidus inertes en surface (Groupe 1, PU13, PU05 ; Groupe 2 : PU06, PU07, PU08), de stations ayant des accumulations marquées de résidus inertes en surface (Groupe 3, PU03, PU09, PU10) ou des accumulation massives en surface (Groupe 4, PU12, PU02 et PU11). L'absence de corrélation significative avec le Titane tend à confirmer que l'on se trouve bien en face d'un problème mécanique de sédimentation et non à une dégradation particulière induite directement par les résidus inertes.

En définitive, l'évolution des peuplements est principalement liée à la bathymétrie et aux caractéristiques granulométriques du site d'étude, les taux de métaux lourds dans les sédiments n'étant que le reflet de la sédimentation différentielle des particules minérales et organiques conditionnée par la bathymétrie, la topographie des fonds et la circulation générale.

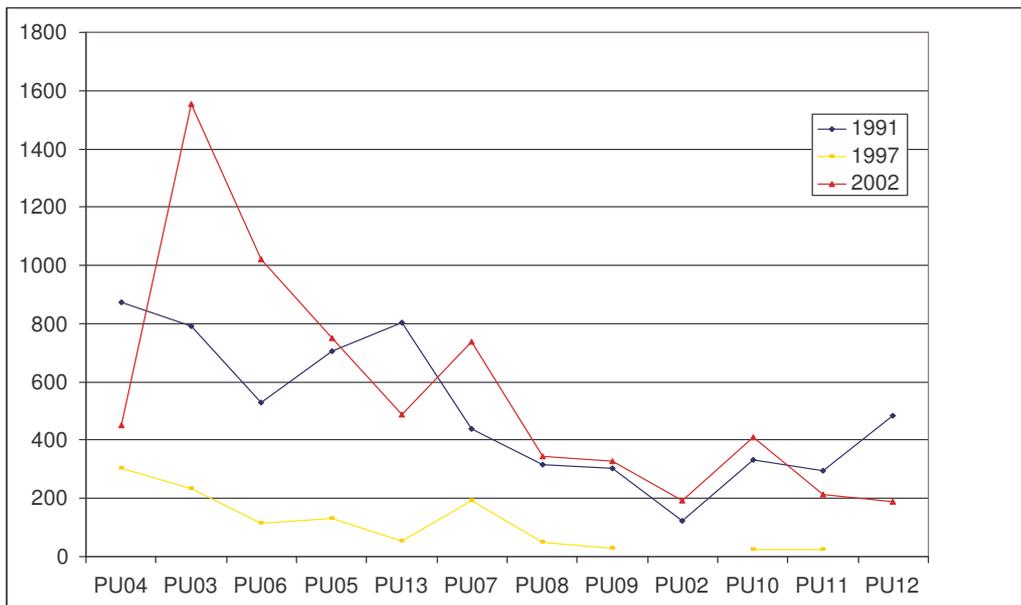
### Comparaisons campagnes 1991/ 1997/ 2002

Pour les trois années d'étude la tendance générale d'une baisse de la richesse spécifique en fonction de la profondeur est similaire (Figure 6). On constate en 2002 une augmentation marquée du nombre d'espèces au sein des différentes stations par rapport à l'année 1997. Si la richesse spécifique se situe à un niveau très proche de celui observé en 1991 pour les stations PU4, PU3 et PU13, le nombre d'espèces est beaucoup plus élevé dans les autres stations en 2002 à l'exception de la station PU12.

Les densités moyennes en 2002 sont proches ou supérieures à celles relevées en 1991 traduisant le caractère exceptionnel de la baisse de densités observée en 1997 (Figure 7). Les analyses hiérarchiques réalisées sur les peuplements des différentes stations montrent à quelques exceptions que les regroupements sont fonction de l'année de prélèvement et de la position bathymétrique des stations sur la pente.



**Figure 6.** Richesse spécifique des stations échantillonnées en 1991 ,1997 et 2002 (PU02 et PU12 non étudiées en 97).



**Figure 7.** Densités des peuplements des stations étudiées en 1991, 1997 et 2002.

Le tableau 3 illustre l'évolution du stock spécifique en fonction du temps. On peut constater que le nombre d'espèces communes à deux ou aux trois années de prélèvements par rapport au nombre total d'espèces recensées pour les périodes considérées est peu élevé.

**Tableau 3.** Nombre d'espèces communes aux campagnes 91-97, 97-02, 91-02 et 91-97-02.

Nombre total d'espèces identifiées	1991	1997	2002
Nombre d'espèces communes aux années 91-97	152	61/ 186	151
Nombre d'espèces communes aux années 97-02		56/190	
Nombre d'espèces communes aux années 91-02		73/230	
Nombre d'espèces communes aux années 91-97-02		45/253	

D'un point de vue diversité spécifique, l'augmentation du nombre d'espèces constatée en 2002 s'accompagne par une augmentation des indices de diversité par rapport aux autres années d'étude. On observe pour l'ensemble des campagnes une décroissance des indices de diversité en fonction de la profondeur du fait de la réduction du nombre d'espèces. On constate que les équitabilités ne sont jamais inférieures à 0,7 montrant l'absence de faciès marqué due à la prolifération particulière d'une ou de quelques espèces pouvant traduire un éventuel déséquilibre des peuplements.

L'analyse MDS réalisée sur l'ensemble des prélèvements (Figure 8) met en évidence tout comme les analyses hiérarchiques la séparation des peuplements de la campagne de 1997 par rapport aux autres années d'étude et l'affinité « plus marquée » des peuplements présents en 1991 et 2002. La bathymétrie influence la distribution des stations indépendamment des années d'étude, les stations évoluant du bord supérieur pour les stations les moins profondes vers le bord inférieur du graphique pour les stations du bas de la pente.

### **Discussion et conclusions**

La campagne 2002 se caractérise par un état florissant des assemblages en place. Aucune station ne présente une destructuration biocénotique, plusieurs espèces caractéristiques exclusives de l'assemblage de la vase profonde se retrouvent dans les prélèvements montrant ainsi une structuration biocénotique des assemblages en place traduisant l'état d'équilibre du milieu.

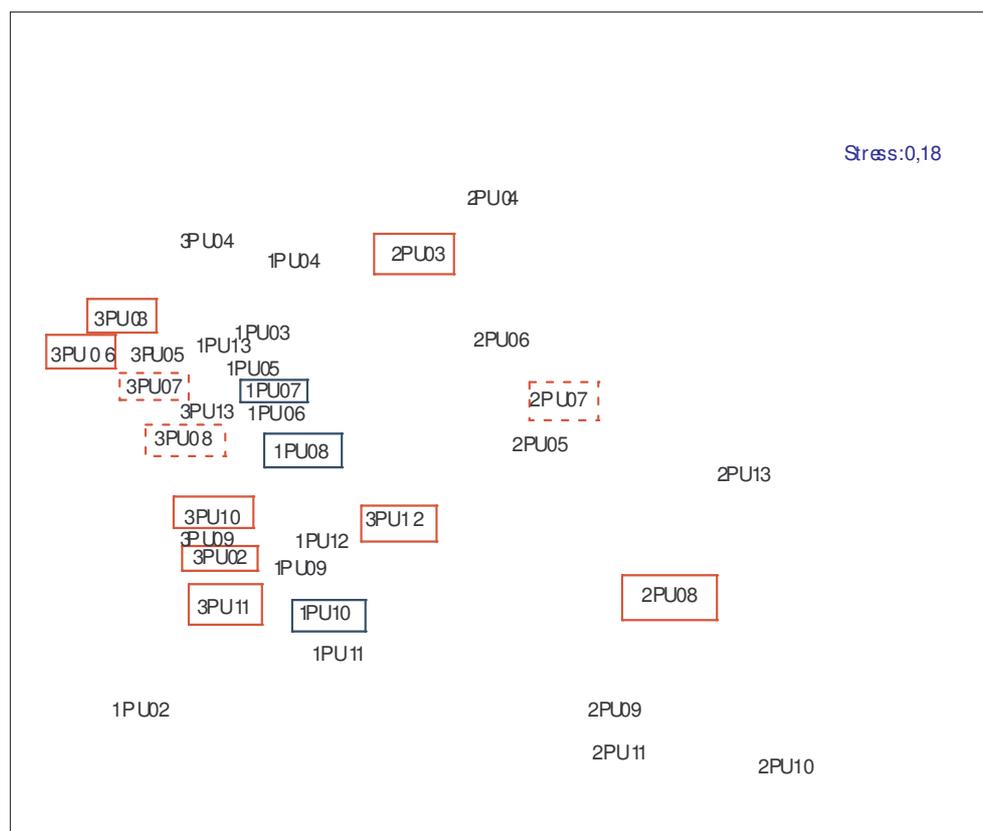


Figure 8. Positionnement multidimensionnel des stations du secteur de Cassidaigne étudiées en 1991 (1PU), 1997 (2PU) et 2002 (3PU). Les stations encadrées présentent en surface des concentrations en titane supérieure à  $500 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ . Rectangle rouge trait plein : augmentation des concentrations par rapport aux campagnes précédentes, trait pointillé : diminution des concentrations.

L'ensemble des études réalisées dans le secteur de Cassidaigne permettent de mettre en évidence la propagation préférentielle vers l'ouest des dépôts de résidus inertes en relation avec la circulation générale. Les comparaisons effectuées sur la richesse spécifique et la densité des peuplements de stations de même profondeur localisées de part et d'autres du canyon entre 250 et 1000 m ont montré que les peuplements à l'ouest du canyon subissaient une légère diminution de leur richesse spécifique ainsi que de leur densité par rapport à ceux situés à l'est. Cet appauvrissement a été attribué à la décantation préférentielle des résidus inertes dans ce secteur. En 2002, le phénomène inverse est observé, marqué par une richesse spécifique et une densité plus faibles des peuplements de la partie est du canyon par rapport aux stations ouest.

L'augmentation des concentrations du titane de 1991 à 2002 à la surface des sédiments des stations PU03 et PU06 montre une persistance des apports en résidus inertes au cours du temps dans ce secteur. On peut se rendre compte qu'en définitive ces apports n'entraînent pas automatiquement, comme le montraient les études précédentes, une baisse de la diversité spécifique et de la densité des peuplements, tout au moins, pour les peuplements localisés dans la partie supérieure de la pente continentale. L'état florissant des peuplements en 2002 se manifeste par une bioturbation active qui limite dans un certain nombre de stations (PU06, PU07, PU08) la formation d'une pellicule de surface et facilite l'incorporation des résidus inertes dans la colonne sédimentaire. Tout comme les années précédentes, il n'a pas été possible en fonction de la composition faunistique et du traitement des données de mettre en évidence une incidence directe des résidus inertes sur les peuplements, pouvant traduire un effet toxique particulier. Ces résultats sont en accord avec les tests écotoxicologiques réalisés.

Les divers traitements statistiques réalisés pour l'ensemble des campagnes mettent en avant le facteur bathymétrie comme un des facteurs prépondérants, régissant la distribution des peuplements. Bien évidemment, à travers la bathymétrie, il faut considérer l'influence de la variation de pression qui en tant que facteur climatique va agir sur la distribution des peuplements. Cependant d'autres facteurs en fonction de l'évolution de la profondeur et de la topographie des fonds vont moduler la répartition des organismes au sein de l'étage bathyal en particulier les conditions de sédimentation et la variation des apports trophiques qui en découle.

Les apports de résidus sur le fond peuvent être soit convectifs en provenance de la colonne d'eau dus à la remise en suspension des résidus inertes sous l'action de différents mécanismes, soit advectifs par charriage sur le fond. Les apports convectifs réguliers ou erratiques alimentent essentiellement les stations localisées entre 250 et 1500 m de profondeur. Malgré ces apports, il n'est pas possible en fonction des analyses réalisées de montrer une influence majeure des résidus inertes sur la composition des peuplements qui ne se différencient pas des peuplements non touchés par les rejets. Les apports à caractère advectifs se manifestent dans l'axe du canyon et dans la zone d'épandage des boues dans les fonds de 2000 m.

La campagne ALPECAST1 réalisée en 1999, qui avait pour but de déterminer pour des conditions bathymétriques proches, l'influence potentielle des résidus inertes sur la faune en place, a permis de montrer que des apports advectifs étaient susceptibles d'entraîner une diminution de la richesse spécifique et de la densité des peuplements du bas de la pente.

Le tableau 4 présente l'évolution de la richesse spécifique et de la densité des peuplements des stations PU10 et PU02 au cours des différentes campagnes d'études

**Tableau 4.** Richesse spécifique (RS) et densité moyenne (D) des peuplements des stations PU10 et PU02.

Stations	PU10	PU10	PU10	PU10	PU02	PU02	PU02
Années	1991	1997	1999	2002	1991	1999	2002
RS	23	4	25	40	20	17	32
D	268	20	270	410	102	162	192,5

Si la richesse spécifique et la densité des peuplements des deux stations sont nettement plus élevées en 2002 par rapport aux autres années d'études, la station PU02 recouverte par 1 cm de résidus inertes présente de manière permanente par rapport à la station PU10 une baisse de la richesse spécifique et de la densité moyenne de l'assemblage de la vase profonde en place. Contrairement aux apports convectifs, les apports à caractère advectif du bas de la pente entraînent de manière persistante un appauvrissement localisé de la faune en place.

En 2002, on note la présence d'un peuplement structuré à la station PU12 recouverte de 15 cm de résidus inertes. Les prélèvements effectués lors des campagnes 1991 entre 300 et 1500 m dans l'axe du canyon où les épaisseurs de boues dépassaient 10 cm se sont toujours révélés azoïques du point de vue macrobenthos. Le facteur évoqué pour expliquer l'absence d'organismes était l'instabilité sédimentaire liée aux glissements des boues dans l'axe du canyon, limitant l'installation et la survie des larves benthiques (Rapport benthos, 1992). Cependant, en 1999, les prélèvements réalisés au bas de la pente dans des fonds de 2200 m à la station MT12 dans l'axe du canyon, proche de la station PU12, avaient permis de

récolter deux polychètes et un sipuncle dans des sédiments composés de résidus inertes sur près de 20 cm d'épaisseur (Rapport benthos, 2000) Deux hypothèses avaient été évoquées pour expliquer cette présence, soit des éboulements latéraux de zones non touchées et un transport fortuit des benthontes dans la boue rouge, soit une plus grande stabilité des dépôts en profondeur permettant l'installation et le développement des organismes macrobenthiques. L'observation d'un peuplement caractéristique du bas de pente, structuré bien qu'appauvri, au sein d'une station recouverte de plus de 10 cm de résidus inertes laisse supposer que la stabilité relative des dépôts est le facteur prépondérant permettant la fixation et la survie de benthontes.

Il faut noter que l'installation d'organismes macrobenthiques dans des boues initialement azoïques prélevées par 750 m de profondeur dans l'axe du canyon de Cassidaigne avait déjà été observé dans les petits fonds du golfe de Fos 6 mois après leur transplantation expérimentale (cf. rapport 1992). La présence d'organismes à 2200 m de profondeur dans des sédiments du canyon de Cassidaigne présentant de fortes concentration en titane ( $23212 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) confirme sur le terrain l'absence d'un effet « chimique » particulier des résidus inertes sur les peuplements en place. Les campagnes ultérieures permettront de confirmer ou d'infirmer le caractère permanent de cette colonisation au sein de la station PU 12 présentant des épaisseurs importantes de boues au bas de la pente. Si la colonisation de dépôts « stabilisés » constitue un phénomène durable, les fonds recouverts par les résidus inertes en l'absence d'effets mécaniques marqués, liées à leur étalement ou sédimentation, devraient rapidement être colonisés par des organismes macrobenthiques après l'arrêt des rejets. Il serait intéressant lors des prochaines campagnes d'étudier plus largement ces zones de dépôts plus ou moins stabilisés au bas de la pente pour apprécier leur potentialité de recolonisation.

Par rapport aux campagnes réalisées en 1991 et 1997, l'année 2002 se caractérise donc par une richesse spécifique particulièrement élevée, il en est de même à un degré moindre pour les densités relevées. Les résultats obtenus en 2002 montrent le caractère épisodique de l'appauvrissement local des peuplements observés en 1997. L'aspect florissant des assemblages en place en 2002 par rapport

aux années 1991 et 1997, alors que les concentrations en titane ont augmenté dans la moitié des stations (PU02, PU03, P06, PU10, OU11, PU12) confirme l'innocuité sur un plan chimique des résidus inertes sur la faune en place et le rôle prépondérant joué par des conditions environnementales globales, générées notamment par la circulation générale sur la structuration de la faune.

**Extrait du rapport de D. Ribera : Evaluation écotoxicologique des résidus inertes de bauxite collectés dans le canyon de Cassidaigne, bilan des campagnes 1997, 1999 et 2002.**

Ce bilan tient compte des résultats acquis sur les sédiments marins collectés au cours des campagnes océanographiques ALPESUR (1997), ALPECAST1 (1999) et ALPECAST 02 (2002) réalisées pour le compte d'Aluminium Pechiney (Usine de Gardanne) par Bio-Tox, 33140 Villenave d'Ornon.

ALPESUR 1997

Huit échantillons collectés au cours de la campagne ALPESUR ont été analysés : U05, U06, U07, U08, U09, U10, U11, U18.

Quatre tests différents ont été pratiqués :

- test de létalité sur bactérie ;
- test de létalité sur le loup ;
- test de génotoxicité ;
- test de développement embryonnaire sur l'oursin.

Les principaux résultats sont :

- absence d'effet mutagène des extraits organiques des sédiments marins ;
- absence d'effet chez le loup ;
- absence d'effet des extraits aqueux et organiques chez *Vibrio fisheri* ;
- effet modéré des surnageants aqueux et effet plus prononcé des sédiments sur le développement larvaire de *Paracentrotus lividus* (oursin).

### ALPECAST 1999

Huit échantillons collectés au cours de la campagne CASTOR II ont été analysés : U02, U10, U23, U24, MT06, MT12, PT02 et PT06.

Cinq tests différents ont été pratiqués :

- test de génotoxicité de l'extrait organique ;
- test de la fraction lixiviée sur le développement embryonnaire de la moule ;
- test de létalité de la fraction lixiviée sur bactérie ;
- test de la fraction solide sur le développement embryonnaire de la moule ;
- test de létalité de la fraction solide sur bactérie.

Les principaux résultats sont :

- absence d'effet mutagène des extraits organiques des sédiments marins ;
- absence d'effet des lixiviats sur le développement larvaire de la moule ;
- absence d'effet des lixiviats chez *Vibrio fisheri* ;
- absence d'effet de la fraction solide sur le développement larvaire de la moule ;
- effet toxique de la fraction solide chez *Vibrio fisheri* (selon le protocole Microtox) ;
- absence d'effet de la fraction solide chez *Vibrio fisheri* (selon le protocole Environnement Canada).

### ALPECAST 02 2002

Six échantillons collectés au cours de la campagne ALPECAST 02 ont été analysés : U03, U04, U05, U06, U07 et U13.

Quatre tests différents ont été pratiqués :

- test de la fraction lixiviée sur le développement embryonnaire de la moule ;
- test d'inhibition de la luminescence de la fraction lixiviée sur la bactérie *Vibrio fisheri* ;
- test de la fraction solide sur le développement embryonnaire de la moule ;

- test d'inhibition de la luminescence de la fraction solide sur la bactérie *Vibrio fisheri*.

Les principaux résultats sont :

- absence d'effet des lixiviats sur le développement larvaire de la moule ;
- absence d'effet des lixiviats sur la bactérie luminescente *Vibrio fisheri* ;
- absence d'effet de la fraction solide sur le développement larvaire de la moule ;
- absence d'effet de la fraction solide sur la bactérie luminescente *Vibrio fisheri* (selon le protocole Environnement Canada).

### Synthèse des résultats

En résumé, tous les tests sont négatifs à l'exception du test de développement larvaire sur oursin (essai contact et lixiviat) en 1997 et du test d'inhibition de la luminescence (essai contact en 1999). La question qui peut être alors être posée est la suivante. Ces effets sont-ils dus à la présence de résidus ou est-ce un artefact lié à la méthodologie.? Pour y répondre, il convient de vérifier s'il existe une proportionnalité entre les teneurs en marqueurs (chrome et vanadium) dans les échantillons et l'amplitude de la réponse écotoxicologique.

Pour les campagnes 1997 et 1999, il a été montré qu'il n'existait pas de proportionnalité entre les effets mesurés et les teneurs en résidus de bauxite dans les échantillons. Les effets sont dus à une autre cause à déterminer mais sans doute pas aux résidus. Les résultats de 2002 sont sans ambiguïté : ni les extraits aqueux ni les fractions solides ne présentent de toxicité. Seuls trois points de prélèvement sont comparables (U05, U06 et U07) entre 1997 et 2002. Les résultats collectés sur les sédiments collectés à ces points ne montrent pas d'évolution temporelle de l'écotoxicité de ces échantillons.

Au vu des éléments disponibles, accumulés sur 3 campagnes 1997, 1999 et 2002, soit un total de 22 échantillons collectés et 136 tests pratiqués, il apparaît une innocuité des sédiments. Une vieille « écotoxicologie » à long terme (campagne tous

les cinq ans) est recommandée sur des sédiments provenant des stations U05, U06 et U07 pour lesquels existent déjà deux observations en 1997 et 2002, sur les tests larves de moules et microtox.

#### *Commentaires du CSS à l'issue des trois exposés sur la campagne ALPECAST 02*

Les résultats de la campagne 2002 comparés avec ceux des campagnes précédentes (1991, 1997, 1999) montrent la présence de fortes concentrations de titane dans l'axe du chenal signature d'une extension vers le sud de la zone des dépôts. Les résultats d'ensemble confirment ceux de 1997 quant aux analyses granulométriques, chimiques, faunistiques, et écotoxicologiques. Absence d'effet des boues sur la faune en place qui peut même coloniser des zones avec plus de 15 cm d'épaisseur de boues. Le suivi à long terme de quelques stations pilotes devient maintenant une des priorités des nouvelles campagnes à la mer comme la nécessité de connaître l'extension vers le sud et l'est de la zone de dépôts.

#### **Evaluation des risques sanitaires liés à l'ingestion de poissons vivant dans le canyon de Cassidaigne : présentation de la démarche**

Suite aux réunions du CDH des Bouches du Rhône du 26 juin 2003 et du CSS du Comité Scientifique Aluminium Péchiney en Comité Restreint « Ecotoxicologie » qui s'est tenu le même jour, le CCS a recommandé à AP d'entreprendre une étude de faisabilité d'évaluation des risques sanitaires liés à l'ingestion de poissons vivant dans le canyon de Cassidaigne dès que possible afin de répondre à l'interpellation du CDH au sujet de la toxicité éventuelle des résidus sur l'homme.

La démarche pourrait être réalisée en quatre phases :

- 1) Recherche des voies d'exposition : la plus probable est la consommation de poissons vivants dans la zone bathyale influencée par les rejets : liste des

espèces présentes dans le canyon, liste des espèces d'intérêt commercial et culinaire ;

- 2) Contamination : rechercher dans la bibliographie des facteurs de concentrations (concentration dans les organismes – concentration de la fraction bio-disponible dans les sédiments) pour les deux éléments suivants : Cr et V et modélisation des concentrations de ces deux éléments dans les poissons ;
- 3) Evaluation des risques d'ingestion lors de la consommation de ces poissons avec les seuils fixés par les réglementations françaises et internationales ;
- 4) Evaluation des quantités maximales ingérées par semaine pour une personne par rapport aux normes OMS.

Cette étude a été confiée par AP à Bio-Tox, 33140 Villenave d'Ornon. La totalité des résultats n'était pas disponible au CSS de décembre 2003 ; il est cependant apparu important de présenter ici la démarche entreprise par Bio-Tox.

### **Déviations par rapport à la demande du CSS**

La demande du CSS correspond à une partie du volet sanitaire d'une étude d'impact. Des méthodologies existent et sont reconnues par les autorités françaises pour réaliser ces évaluations des risques. En conséquence, la démarche répond à la demande en déroulant ces méthodologies. De plus, au regard des analyses des sédiments marins réalisées par le Professeur André Arnoux qui montrent la présence d'autres métaux, il sera choisi de ne pas limiter l'étude aux seuls métaux Chrome et Vanadium, mais de l'étendre à l'ensemble des métaux quantifiés.

### **Démarche d'évaluation du risque**

L'évaluation des risques pour la santé est une science relativement récente développée pour les expositions aux substances chimiques (déjà commercialisées ou

nouvelles), les sols pollués ou l'hygiène au poste de travail. Classiquement, la démarche d'évaluation des risques sanitaires se décompose en quatre étapes :

\* L'identification du potentiel dangereux ou identification des dangers consiste à identifier des effets indésirables qu'une substance peut intrinsèquement provoquer chez l'homme, les voies d'exposition pouvant être respiratoires, digestives ou cutanées.

\*\* L'évaluation du rapport dose réponse correspond à l'estimation de la relation entre la dose ou le niveau d'exposition à une substance et l'incidence et la gravité de l'exposition (on distingue des relations de type à seuil ou déterministes et des relations de type sans seuil ou stochastique).

\*\*\* L'évaluation de l'exposition consiste à déterminer les voies de passage du polluant de la source vers la cible, ainsi qu'à estimer la fréquence, la durée et l'importance de l'exposition.

\*\*\*\* La caractérisation du risque correspond à la synthèse des informations issues de l'évaluation de l'exposition et l'évaluation de la toxicité sous la forme d'une évaluation quantitative du risque pour les différentes substances toxiques concernées. Cette évaluation quantitative du risque est différente selon la nature de la relation dose-réponse à laquelle obéit la substance étudiée et considérant qu'une même substance peut entraîner des effets stochastiques et déterministes. Les détails sur les méthodologies qui seront employées sont présentés plus loin.

## **Identification des dangers**

### **Sélection des substances à retenir**

Depuis de nombreuses années, sous le contrôle du CSS, la société Aluminium Pechiney fait réaliser des prélèvements de sédiments au large de Cassis afin d'évaluer l'impact et l'étendu des dépôts de résidus de bauxite (Figures 2 et 3). L'étendue des dépôts est déterminée par des analyses chimiques de métaux et notamment des traceurs des résidus que sont le Titane, le Chrome et le Vanadium. Nous disposons donc d'une cartographie de ces dépôts et des concentrations dans les sédiments en Aluminium, Chrome, Cuivre, Fer, Plomb, Manganèse, Titane, Vanadium et Zinc

Nous proposons de retenir pour l'évaluation des risques l'ensemble de ses métaux car si certains d'entre eux sont toxiques, d'autres sont des oligo-éléments pour lesquels un dépassement des apports journaliers recommandés (AJR) pourrait également présenter un risque. Par application du principe de précaution, les concentrations retenues pour les calculs de risques seront les concentrations maximales quelle que soit la zone où l'échantillon a été prélevé. Toutefois, considérant que les poissons peuvent être mobiles, il sera effectué deux autres simulations basées sur les teneurs minimales en métaux et sur la moyenne arithmétique des concentrations mesurées à chaque site de prélèvement.

#### Source-vecteur-cible

Les sources de contamination potentielles considérées seront les sédiments de la zone du Canyon de Cassidaigne. Les vecteurs susceptibles de provoquer une exposition des populations sont : le sédiment (activité de fouissage), l'eau interstitielle, les poissons consommateurs primaires et le transfert du sédiment vers la colonne d'eau. Les cibles concernées par ces vecteurs seront les personnes ingérant des poissons du haut de la chaîne trophique (consommateurs primaires et secondaires) pêchés sur la zone.

#### Scénario d'exposition retenu

Compte tenu de la demande du CSS, de la localisation des sédiments et de la source vecteur cible, un seul scénario sera envisagé dans une première évaluation : un scénario d'ingestion de poisson. En effet, des scénarii de baignade ou de contact avec les sédiments ne sont pas réalistes compte-tenu de la profondeur d'immersion des résidus (>350 m).

#### Evaluation du rapport dose-réponse

Deux types de relation dose-réponse seront utilisés conventionnellement. On distingue :

\* **les effets toxiques à seuil.** Ils correspondent aux effets aigus et à certains effets chroniques non cancérigènes, non génotoxiques et non mutagènes dont la

gravité est proportionnelle à la dose. Il existe donc une dose limite en dessous de laquelle le danger ne peut apparaître. On parle alors de dose journalière admissible (DJA) pour une exposition orale et de concentration admissible dans l'air (CAA) pour la voie respiratoire.

\* **les effets toxiques sans seuil.** Il s'agit pour l'essentiel des effets cancérigènes génotoxiques et des mutations génétiques pour lesquels la fréquence – mais non la gravité – est proportionnelle à la dose. Ces effets pourraient apparaître quelle que soit la dose reçue par l'organisme et l'approche probabiliste conduit à considérer qu'il existe un risque non nul qu'une molécule pénétrant dans le corps humain provoque des changements dans une cellule. La valeur toxicologique de référence est alors un Excès de Risque Unitaire (ERU) de cancer. Elle est spécifique d'une voie d'exposition et correspond à la probabilité supplémentaire – par rapport à un sujet non exposé – qu'un individu contracte un cancer s'il est exposé toute sa vie à une unité de dose du composé chimique cancérigène. Parmi les dangers identifiés seul le Chrome VI est classé en groupe 1 : « l'agent (ou le mélange) est cancérigène pour l'homme » par l'IARC (1990).

Les tableaux 5 et 6 résument les Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) qui seront utilisées dans cette étude et précisent les sources de ces VTR. Concernant le choix des VTR, la valeur toxicologique de référence la plus pénalisante sera sélectionnée.

**Tableau 5.** Valeurs toxicologiques de référence pour les effets systémiques

Métal	VTR retenues		Source	
	mg/kg/j	mg/jour (adulte de 60 kg)		
		<b>Min</b>	<b>Max</b>	
Aluminium	1.00	60	RAIS 2003	
Chrome III	1.00	60	RAIS 2003	
Chrome VI	0.003	0.18	IRIS 1998	
Cuivre	1.67-16.67	100.2	1000.2	JECFA 2001
Fer	26.67	1600	JECFA 2001	
Plomb	0.83	50	JECFA 2002	
Manganèse	0.14	8.4	RAIS 2003	
Titane	Sans limite	Sans limite	JECFA 2003	
Vanadium	0.007	0.42	RAIS 2003	
Zinc	0.20	12	RAIS 2003	

**Tableau 6.** Valeurs toxicologiques de référence pour les molécules à effets sans seuil

Métal	ERU adulte	Source
Chrome VI (voie orale)	0,42 (mg/kg/j) <sup>-1</sup>	Ineris 2003

Aucune distinction entre les enfants et les adultes ne sera réalisée. En effet, les valeurs toxicologiques de référence sont données pour une population générale englobant également des populations sensibles telles que les enfants.

### Evaluation de l'exposition

#### Equations liées au calcul des dose journalières d'exposition

Pour appréhender l'impact des sédiments sur les consommateurs de poissons, sera d'abord calculée la concentration des éléments traceurs du risque dans l'eau interstitielle provenant des sédiments. Nous considérerons ainsi que les poissons évoluent dans l'eau interstitielle des sédiments (hypothèse du pire des cas). Nous estimerons ensuite la concentration dans les poissons par application du facteur de bio concentration aux teneurs dans l'eau interstitielle. Seront enfin calculées les expositions en fonction des consommations de poissons en France.

#### Equation pour estimer la concentration dans l'eau interstitielle

Les concentrations dans l'eau interstitielle ont été déterminées par application des formules présentées dans le *Technical guidance document* (2003) de l'Union Européenne.

$$\text{Concentration eau} = (\text{concentration sédiment} \times \text{RHOsed}) / (1000 \times \text{Ksed/water})$$

$$\text{Ksed/water} = \text{Fwater/sed} + \text{Fsolidse} (\text{kd}/1000) \text{RHOsolid}$$

Avec :

- Ksed/water Coefficient de partage sédiment/eau
- Fwater/sed Fraction d'eau dans le sédiment (défaut : 0,8),
- Fsolidse Fraction de solide dans le sédiment (défaut : 0,2),
- kd Coefficient de partition solide/eau dans le sédiment (l/kg),
- RHOsolid Densité de la fraction solide (poids sec) (kg/m<sup>3</sup>) (défaut : 2500),
- RHOsed Densité totale des sédiments (kg/m<sup>3</sup>) (défaut : 1300),
- Concentration sédiment en mg/kg,
- Concentration eau en mg/l.

### Hypothèses concernant les facteurs physico-chimiques

Une recherche de  $K_d$  a été effectuée (coefficient de partition solide/eau dans les sédiments) (Tableau 7) et de BAF (facteur de bioconcentration dans les poissons) dans les différentes bases de données et nous avons retenu le  $K_d$  le plus faible et les BAF les plus élevés ce qui correspond à l'hypothèse la plus majorante.

Concernant le chrome d'autres hypothèses doivent être prises en compte. Le CrIII est peu ou pas soluble dans l'eau donc seul le CrVI est transférable. Pour cette raison, l'INERIS (2003) n'a pas communiqué pour l'instant de  $K_d$  et il n'est pas possible de calculer une concentration dans l'eau avec la formule du TGD (2003). Pour estimer la concentration dans l'eau interstitielle, nous disposons de l'étude du Professeur Wartel (Université des Sciences et Technologies de Lille, rapport en 1997) qui a étudié la géochimie du chrome dans les sédiments collectés lors de la campagne Alpesur. Ces travaux indiquent que seuls 0,1% du chrome est remobilisable dans l'eau de mer et que dans la fraction aqueuse le rapport CrIV/CrIII est de 15. Ces valeurs seront utilisées pour déterminer les concentrations dans l'eau par application des équations suivantes :

$$[\text{Cr total}] \text{ eau} = [\text{Cr total}] \text{ sédiment} \times \% \text{ remobilisable}$$

$$[\text{Cr IV}] \text{ eau} = [\text{Cr total}] \text{ eau} \times 14/15$$

$$[\text{Cr III}] \text{ eau} = [\text{Cr total}] \text{ eau} \times 1/15$$

Toujours selon l'INERIS (2003), le chrome VI ne s'accumule pas dans les poissons. L'absorption intestinale du chrome est faible de l'ordre de 0,5 à 2 %. Au niveau stomacal, le chrome IV alimentaire est réduit enzymatiquement en chrome III. Le chrome III semble s'accumuler un peu plus que le chrome VI chez les poissons. Chez les vertébrés, le chrome est principalement accumulé dans les poumons, le foie, les reins, la rate, les glandes surrénales, le plasma, la moelle épinière et les hématies. Selon de nombreux auteurs, il ne semble pas qu'il y ait de biomagnification du chrome le long de la chaîne trophique. En conséquence, un BAF n'est pas approprié pour évaluer les concentrations dans les poissons. Nous utiliserons le BCF (facteur de bioconcentration) qui permet d'estimer la quantité dans un organisme vivant à partir

de la teneur dans l'eau. Des BCF de 260 à 800 (en poids sec) ont été mesurés sur diverses espèces de poissons (*Lepomis macrochirus*, *Alosa aestivalis*...). Ramené au poids frais (poids sec x 5), un BCF de 160 poids frais pour le CrIII sera utilisé pour la suite de l'étude. Pour le CrVI, considérant que le chrome VI ne s'accumule pas dans les poissons ou qu'il est réduit en CrIII au niveau de l'estomac, un BCF de 1 sera utilisé.

**Tableau 7.** Récapitulatif des kd retenus pour l'étude (RAIS 2003, INERIS 2003)

Métal	Kd (L/m <sup>3</sup> )	Facteur de bioaccumulation chez les poissons (L/kg)	Facteur de bioconcentration (L/kg)
Aluminium	1500	3.20	-
Chrome III	-	-	160
Chrome VI	19	-	1
Cuivre	35	200.00	-
Fer	25	3.20	-
Plomb	900	3.20	-
Manganèse	65	3.20	-
Titane	1000	3.20	-
Vanadium	1000	3.20	-
Zinc	62	3.20	-

#### Hypothèses concernant la consommation de poisson

Les données de consommation des aliments en France sont aujourd'hui disponibles (Tableau 8).

**Tableau 8.** Consommations individuelles de poissons en France (Volatier 2000)

Personnes		Consommations (g/jour/personne)
Population générale	Moyenne	30
	homme	31
	femme	28
	enfant	21
Moyenne par tranche d'âge	15-24 ans	23
	25-44 ans	26.9
	45-64 ans	34.6
	> 65 ans	<b>34.7</b>

Nous considérerons une consommation journalière de 34,7 g/jour/personne sur une période de 365 jours et pour la durée de la vie (hypothèse majorante).

## Equations liées au calcul aux indices de risque

Pour les effets à seuil, la possibilité de survenue d'un effet toxique chez la cible ne s'exprime pas par le calcul d'une probabilité. Cette possibilité de survenue est représentée par un indice de risque  $IR = DJE / DJT$ .

Lorsque cet indice est inférieur à 1, la survenue d'un effet toxique apparaît peu probable même pour les populations sensibles. Au-dessus de 1, la possibilité d'apparition d'un effet toxique ne peut être exclue. Pour les effets sans seuils, un Excès de Risque Individuel (ERI) peut être calculé en multipliant la dose journalière d'exposition (DJE) par l'excès de risque unitaire par la voie d'exposition considérée avec :

$$ERI = DJE \times ERU$$

La circulaire du 10 décembre 1999 donne une valeur de  $10^{-5}$  à ne pas dépasser pour les ERI. Nous prendrons cette valeur comme limite réglementaire à ne pas dépasser dans la présente étude. Lors d'expositions multiples et quelle que soit la voie d'exposition, on considère que le mélange présente un risque quantifiable. Le risque cumulé sera estimé en réalisant la somme des RI pour les substances à effet avec seuil ou des ERI pour les substances à effet sans seuil comme recommandé par la circulaire du 10 décembre 1999 mais sans tenir compte du fait que le principe d'additivité des effets ne s'applique théoriquement que pour des molécules ayant des points finaux toxicologiques identiques. De même, nous considérerons le pire des cas où elles seraient exposées sur l'intégralité de leur vie (enfance plus stade adulte).

## Limites de simulations

Ne seront considérés que les poissons exposés à l'eau interstitielle des sédiments sans tenir compte des mécanismes de dilution dans la colonne d'eau. Les calculs seront effectués avec les  $K_d$  les plus faibles trouvés dans la littérature. Ces hypothèses sont sécuritaires. Nous considérerons que les métaux sont bioamplifiés le long des chaînes trophiques et que les consommateurs n'ingèrent que des carnivores. Les calculs seront effectués avec les facteurs de bioaccumulation (BAF) ou de

bioconcentration (BCF) les plus élevés trouvés dans la bibliographie. Ces hypothèses sont sécuritaires. Concernant le chrome total, nous nous sommes basés sur des études de laboratoire sur la spéciation et la remobilisation de ce métal. Ces travaux indiquent que seul 0,1% du chrome est remobilisable dans l'eau de mer et que dans la fraction aqueuse le rapport CrIV/CrIII est de 15. Bien que les scientifiques s'accordent à considérer que le chrome VI ne s'accumule pas dans les poissons et qu'il n'y ait pas de biomagnification du chrome le long de la chaîne trophique, nous calculerons des concentrations dans les poissons. Nous avons considéré la consommation journalière la plus élevée issue de l'enquête nationale des consommations. Nous avons considéré que la consommation de poisson avait lieu tous les jours (365 j) et pour la durée de la vie. Nous n'avons pas tenu compte des sites d'accumulation des métaux considérant que la quantité bioaccumulée est la quantité ingérée. Ces hypothèses sont sécuritaires.

Des données disponibles dans la bibliographie (IRIS, RAIS, OMS), nous avons retenu la VTR la plus faible ce qui correspond à l'hypothèse la plus sévère. Pour les risques cumulés, nous avons sommé les risques associés à chacune des substances considérées sans tenir compte du fait que théoriquement il n'y a additivité des effets que lorsque les substances ont des cibles toxicologiques (« end-points ») identiques. Cette hypothèse est sécuritaire.

Pour que ces simulations aient un sens, il est indispensable de collecter des poissons benthiques ichtyophages dans le canyon de Cassidaigne et de mesurer les concentrations en CrIII et CrVI effectivement présentes dans leur chair (partie consommée). Compte-tenu des Valeur toxicologiques de référence très basses pour le CrVI, ces analyses devront impérativement avoir un seuil de détection inférieur à 7 µg CrVI/kg de poids frais. Au delà de ce seuil, les excès de risques unitaires seraient tous supérieur à la valeur limite réglementaire de  $10^{-5}$  et cette campagne d'analyse serait sans intérêt. A l'issue de cette campagne de mesure, une évaluation des risques pour les consommateurs pourra être effectuée.

## **Rapport de Messieurs Kocyba, Tilmant et Colombé sur les actions 2003 et les objectifs 2004-2006 d'utilisation de la bauxaline.**

### **Centres d'enfouissements techniques**

CET d'Entressen. Première tranche d'une série de quatre avec Marseille Métropole comme maître d'œuvre et BEC Frères comme maître d'ouvrage, utilisation de 82000 tonnes.

De la mi avril à la mi septembre 2003, il aura fallu transporter 82000 t par camions (80 km), extraire 100000 t de Bauxaline®, créant ainsi de nouvelles capacités de lagunage, stocker, gerber, peser et arroser les pistes et le carreau, et refaire un tronçon de la route d'accès et réaménager les pistes pour le transport de la Bauxaline®.

CET de Septèmes. Opération conduite par la société ONYX pour des tests pour couverture et flancs d'alvéole (3000 t). En 2004, ONYX devrait poursuivre des tests de fond d'alvéole.

CET de Pourrières. 3500 t.

### **Coulis d'injection**

Pilotage de coulis d'injection sur le site de la carrière de Pyenier avec une utilisation de 1000 t de Bauxaline®.

### **Sea line 2003**

La campagne de surveillance des conduites de rejet en mer a été faite par la COMEX avec le navire Sea line ; elle s'est déroulée les 22-24 septembre 2003 dans des conditions normales d'exploitation. Les principaux résultats montrent :

- Pas déviation notable des atteintes à l'enrobage des tuyauteries ;

- Des traces de raclage sur les deux émissaires laissant supposer que le chalutage dans la zone interdite se pratique toujours ;
- Un câble de protection cathodique a été accroché par un mouillage dans la calanque de Port Miou à -12 m de profondeur.

La zone du panache a pu être observée ; ses observations confirment la formation de concrétions en fonctionnement normal de rejet et que les résidus de traitement de bauxite déferlent en avalanche dans la pente du talus continental.

### Communication

1. Au cours des journées EHS (Environnement, Hygiène, Sécurité), qui se sont déroulées les 26 et 27 mars 2003, la Direction de l'environnement et de la gestion des risques industriels a remis au service Environnement du site de Gardanne et à la R & D le Bonsaï Environnement pour le premier prix du meilleur projet présenté par une équipe « une démarche produit : la bauxaline. Cette récompense est une marque de reconnaissance pour l'ensemble du personnel de Gardanne.
2. Participation au congrès de l'Industrie minérale, 15-18 octobre 2003 à Marseille. Présentation dans l'atelier 6 (recyclage, valorisation : nouvelles ressources) de la communication : Utilisation de la Bauxaline® co produit de l'industrie de l'alumine dans les domaines des travaux publics.

### **Prévisions 2004 à 2006 d'utilisation de Bauxaline® en Ktonne (KT).**

<b>Années</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>
Production alumine	605 KT	620 KT	630 KT
Boues produites 0,63 t/t alumine	381 KT	390 KT	397 KT
Rejets en mer autorisés	310 KT	250 KT	250 KT
Bauxaline, production et utilisation	71 KT	140 KT	147 KT

**Centres d'enfouissement techniques : probables et réalisables en Ktonne (KT).**

<b>Années</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>
CET Entressen	80 KT	80 KT	80 KT
CET Martigues	30 KT	30 KT	30 KT

**Travaux routiers.**

Mise à 2x2 voies du RD6 entre l'échangeur de Gardanne et la Barque distance de 5 km + échangeurs : possibilité de variante par mélange Bauxaline et Cendres volantes pour la couche de forme et remblais sur 1m. Travaux : courant 2004 – 2005 – 2006 avec une quantité probable de Bauxaline de 280000 t.

Dans le département des Bouches du Rhône, la consommation des matériaux de remblais est évaluée à 4 millions de tonnes/an.

*Commentaires du CSS à l'issue de l'exposé*

Le volume de bauxaline utilisé en 2003 est en nette croissance et le CSS approuve le choix de privilégier les quelques voies à fort tonnage. Pour 2004 et 2005, les demandes en bauxaline pourraient atteindre voir dépasser 250000 t essentiellement pour des utilisations en couverture de décharge et en travaux routiers. Pour le routier, les demandes en matériaux seraient de 4 millions de tonnes mais il existe des actions fortes de 'lobbying' afin de faire connaître et d'utiliser la bauxaline comme produit 'courant'.

## Recommandations 2003 du Comité Scientifique de Suivi

Le Comité Scientifique de Suivi approuve les choix d'AP Gardanne de focaliser les emplois de la bauxaline dans les voies à forts volumes d'utilisation. Il note la progression significative des volumes utilisés en 2003 (95000 t contre 30000 t en 2002) et souhaite que cette progression se confirme en 2004.

Le C.S.S. approuve Aluminium Péchiney sur le déroulement des études et recherches réalisées en 2003 et les projets d'utilisation de la bauxaline en 2004 telles qu'ils ont été présentés lors de la réunion annuelle du CSS du 17 décembre 2003.

A l'issue des exposés et en fonction des discussions qui ont suivi, le Comité Scientifique de Suivi recommande pour 2004 :

- i) Que soient poursuivies les voies d'utilisation de la bauxaline privilégiant de gros tonnages (domaine des travaux publics, routes, couvertures de centre d'enfouissement de déchets, digues...) tout en mettant l'accent sur les coulis d'injection voie qui mérite une attention particulière compte tenu des volumes qui seront utiles pour combler les cavités comme des anciennes mines.
- ii) Que soient recherchées les concentrations en CrIII et CrVI dans les poissons ichtyophages (roussette, merlu...) fréquentant la zone d'écoulement des boues rouges en mer y compris à des profondeurs de 2000 m (une campagne de chalutage IFREMER prévue à la fin du printemps 2004 pourrait programmer des traits de chalut supplémentaires dans le canyon de la Cassidaigne pour cette étude.
- iii) Que soit expertisés par deux experts (Me Amiard-Triquet et F. Galgani) les résultats de l'étude sur les risques des résidus inertes de la bauxite sur l'homme (étude de D. Ribera) avant de la discuter en CSS lors de sa prochaine session.
- iv) Que soit maintenant programmé tous les cinq ans comme les campagnes de suivi (prochaine campagne en 2007) un suivi en écotoxicologie sur trois stations visitées en 1997, 1999 et 2002 : U05, U06

et U07. Le CSS recommande d'y ajouter une station plus profonde par exemple la station U012 où les concentrations en titane sont importantes. Il recommande également qu'en 2007 des stations plus au sud et plus à l'est soient explorées afin de connaître l'extension maximale des dépôts.

- v) Que soient valorisées les études scientifiques entreprises dans les années 1990 (récifs, chimie, biologie, courantologie) dans des revues à large audience ou lors de conférences ou séminaires (recommandation 2001 et 2002 reconduite qui s'adresse aux scientifiques ayant travaillé dans le cadre de contrats Pechiney.
- vi) Que soit réalisé un fascicule de présentation (20-30 pages) des actions entreprises par AP depuis 1990 sur la valorisation de la bauxaline et le devenir en mer des résidus de traitement de bauxite à l'usage des décideurs, des politiques, des administrations et des associations s'occupant d'environnement (recommandation 2001 et 2002 reconduite). Le Président du CSS pourra assurer un suivi scientifique de l'étudiant (e) à qui sera éventuellement confié (e) ce dossier.
- vii) Qu'Aluminium Pechiney réalise un Résumé non Technique du Rapport Annuel 2003, le CSS se chargeant de la relecture de ce «Digest».

**Wimereux le 23 mars 2004**

**Jean-Claude DAUVIN**

**Professeur de l'Université des Sciences et Technologies de Lille**

**Président du Comité Scientifique de Suivi**