Direction de l'Environnement et de l'Aménagement Littoral
Laboratoire côtier de Boulogne-sur-mer

DESOMBRE Julie
LEFEBVRE Alain
BUCAS Karenn

juillet 2004

DEL / BL / RST / 04 / 09

Campagne RNOSED 1998

Baie d'Authie

Analyse de la contamination des sédiments du littoral Nord / Pas-de-Calais / Picardie

FICHE DOCUMENTAIRE

Numéro d'identification du rapport : DEL/BL/RST/04/09 **Diffusion** : libre [X] restreinte [ ] interdite [ ] **Validé par** : LEFEBVRE Alain **Version du document** : définitive	**date de publication** juillet 2004 **nombre de pages** 118 **bibliographie** (Oui / ~~Non~~) **illustration(s)** (Oui / ~~Non~~) **langue du rapport** Français

Titre et sous-titre du rapport :
Campagne RNOSED 1998.
Analyse de la contamination des sédiments du littoral Nord / Pas-de-Calais / Picardie

Titre traduit :
Series of measurement RNOSED 1998
Analysis of the contamination of the coastal sediments of the Nord / Pas-de-Calais / Picardie

Auteur(s) principal(aux) :	**Organisme / Direction / Service, laboratoire**
Lefebvre Alain	Ifremer/DEL/Boulogne sur Mer
Desombre Julie	Stagiaire MST Expertise et Management en Environnement – Université du Littoral Côte d'Opale.
Collaborateur(s) :	Organisme / Direction / Service, laboratoire

Travaux universitaires :
diplôme : discipline :
établissement de soutenance : année de soutenance

Titre du contrat de recherche : n° de contrat IFREMER

Organisme commanditaire :
Ifremer

Organisme(s) réalisateur(s) :
Institut Français de Recherche pour l'exploitation durable de la mer (Ifremer) Boulogne – 150, quai Gambetta
Responsable scientifique : LEFEBVRE Alain Ifremer/DEL/Boulogne-sur-Mer.

Cadre de la recherche : Suivi Régional des Nutriments
Programme : surveillance et évaluation de la qualité et de la biodiversité des milieux et des eaux côtières — Convention :MEDD
Projet : RNO — Autres (préciser) :
Campagne océanographique : RNOSED 1998 ; N/O Côtes de la Manche

 Copyright

Résumé :

Le Réseau National d'Observation (RNO) de l'IFREMER est un réseau de surveillance de la qualité du milieu marin. Le présent rapport s'intéresse aux résultats de la campagne RNO sédiment de 1998 et porte sur l'analyse de la contamination des sédiments côtiers de la frontière belge jusque Fécamp. Les mesures concernent les métaux lourds et les composés organiques tels les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), les Polychlorobiphényles (PCB) et les pesticides (DDT, Lindane). Un traitement statistique est réalisé à partir des teneurs métalliques normalisées et des teneurs brutes organiques afin de mettre en évidence d'éventuels regroupements de points de prélèvement par niveau de pollution. Les origines de la contamination sont déterminées grâce à un inventaire des sources potentielles représentées essentiellement par les rejets industriels et l'immersion des produits de dragages. Les données sur les rejets industriels proviennent d'organismes de surveillance et de contrôle que sont les Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) et les Services Maritimes (SMBC et PAD).

Abstract :

The National Network of Observation (RNO) of the IFREMER is a monitoring network of the quality of the marine environment. This report is interested in the results of series of measurement from the RNO sediment of 1998 and relates to the analysis of the contamination of the coastal sediments from the Belgian coastal zone to Fécamp. Measurements relate to heavy metals and the organic compounds the such Polyaromatic Hydrocarbons (HAP), Polychlorobiphényles (PCB) and pesticides (DDT, Lindane). A statistical processing is carried out starting from the standardized metal contents and of the organic rough contents in order to highlight possible regroupings of intake points per level of pollution. The origins of the contamination given thanks to an inventory of the potential sources are represented primarily by the industrial wastes and the immersion of the products of dredging. The data on the industrial wastes come from organizations of monitoring and control which are the Regional Directorates of Research , Industry and Environment (DRIRE) and the Maritime Departments (SMBC and PAD).

Mots-clés :
sédiment, RNO, normalisation, contaminants, apports anthropiques.

Keywords :
sediment, RNO, standardization, contaminants, anthropic fluxes.

Commentaire :

 Copyright

Sommaire

INTRODUCTION **1**

1. RESEAU NATIONAL D'OBSERVATION (RNO) **2**

1.1. PRESENTATION 2
1.2. SURVEILLANCE 2

2. SEDIMENTOLOGIE **3**

2.1. SEDIMENTS : TEMOINS DE LA POLLUTION 3
2.2. PHENOMENE D'ADSORPTION - SOURCE DE VARIABILITE DES RESULTATS D'ANALYSE 3
2.3. DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE DE LA MANCHE – MER DU NORD 3

3. MATERIELS ET METHODES **4**

3.1. PRELEVEMENTS 4
3.2. CONDITIONNEMENT DES ECHANTILLONS 10
3.3. ANALYSES 10
3.4. TRAITEMENT DES DONNEES 11
3.4.1. Normalisation des teneurs métalliques dans le sédiment fin 11
3.4.2. Analyse multivariée : classification hiérarchique 15
3.4.3. Statistiques générales par groupe de points 15

4. RESULTATS **16**

4.1. GRANULOMETRIE 16
4.2. TENEURS EN COMPOSES METALLIQUES 24
4.3. CONCENTRATIONS EN COMPOSES ORGANIQUES 25
4.4. CLASSIFICATIONS HIERARCHIQUES 28
4.4.1. Regroupements par rapport aux teneurs métalliques brutes 28
4.4.2. Regroupements par rapport aux teneurs métalliques normalisées 32
4.4.3. Regroupements par rapport aux teneurs en composés organiques 36
4.5. ANALYSES STATISTIQUES PAR GROUPE DE POINTS 40
4.5.1. Teneurs métalliques brutes 40
4.5.2. Teneurs métalliques normalisées 40
4.5.3. Teneurs en composés organiques 41

5. DISCUSSION **42**

5.1. APPROCHE METHODOLOGIQUE 42
5.1.1. Comparaison entre les teneurs brutes et les teneurs normalisées métalliques 42
5.1.2. Comparaison des classifications hiérarchiques basées sur les teneurs métalliques brutes et normalisées 43
5.2. ORIGINES DE CONTAMINATION 44
5.2.1. Valeurs de référence 44
5.2.2. Masses d'eau DCE 45
5.2.3. Apports à la mer 49
5.2.4. Sources de contamination en métaux 54
5.2.5. Sources de composés organiques 58

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES **61**

BIBLIOGRAPHIE **62**

ANNEXES **64**

Introduction

Bien que l'émission des substances à caractère polluant dans les mers européennes soit soumise à une surveillance de plus en plus accrue, voire à une interdiction, les métaux lourds et les composés organiques constituent toujours un risque pour les écosystèmes aquatiques. En effet, de par leur faible solubilité, ces polluants s'associent aux sédiments, lesquels représentent une source majeure de pollution secondaire. Ils contribuent ainsi à la persistance de la pollution initiale. La contamination de l'environnement marin par les métaux est souvent perçue comme un enrichissement du milieu par rapport à ses niveaux naturels alors que la présence de certains contaminants organiques est exclusivement d'origine anthropique. Les littoraux sont le réceptacle des pollutions continentales d'origine industrielle et agricole, rejetées directement ou indirectement par les voies d'eau naturelles ou artificielles via la mer.

Le Réseau National d'Observation (RNO) de l'IFREMER s'intéresse entre autre à la surveillance du compartiment sédimentaire du littoral français (RNOSED). Ce contrôle se traduit par une mesure des teneurs en éléments métalliques et organiques traces au sein des sédiments marins. La présente étude porte sur l'interprétation des résultats obtenus lors de la campagne RNOSED de 1998 dont le champ d'action s'étendait de la frontière belge jusque Fécamp. L'objectif de cette analyse est la mise en évidence des zones côtières contaminées et l'identification des sources potentielles d'apports en polluants.

Cette étude reprend l'ensemble des résultats de mesures de la campagne RNOSED de 1998. L'analyse des teneurs métalliques passe par une normalisation des concentrations en vue d'une extrapolation au sédiment fin alors que les teneurs en composés organiques sont directement utilisées. Une analyse statistique est ensuite réalisée afin de mettre en évidence d'éventuels regroupements de points de prélèvements par niveau de contamination. Les principaux apports considérés dans cette étude concernent les rejets industriels et l'immersion des produits de dragage. Le recensement des principales activités industrielles a été réalisé avec l'aide de la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) de la région Nord-Pas-de-Calais et des départements de Picardie et de Haute-Normandie. Les Services Maritimes des ports de Boulogne-sur-mer, de Calais et de Dunkerque sont à l'origine des informations concernant les zones de clapage. Dans la mesure où les sédiments marins concentrent les contaminants sur de longues périodes, le recensement des sources potentielles de contamination concerne donc la période 1990 à 1998.

1. Réseau National d'Observation (RNO)

1.1. Présentation

Le Ministère chargé de l'Environnement est à l'origine de la création du Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin. Sa mise en place en 1974 vise à évaluer les niveaux et les tendances de la contamination chimique et des paramètres généraux de la qualité du milieu marin.

L'IFREMER coordonne l'ensemble des activités du RNO pour le compte du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. Les données du RNO contribuent également à répondre aux engagements de la France dans le cadre de certaines conventions internationales (OSPAR, Convention de Barcelone). Les données leur sont donc transmises systématiquement, ainsi qu'au CIEM (ANNEXE A).

Alors que les premiers programmes portaient essentiellement sur les eaux marines, la surveillance s'est orientée sur la matière vivante ainsi que sur les sédiments.

Le RNO est opérationnel en Martinique et Guadeloupe depuis fin 2001. Une extension à la Guyane et à la Réunion est actuellement à l'étude.

Une sélection des résultats du réseau est présentée dans un bulletin annuel. Les bulletins, ainsi que certaines données sont disponibles sur le site environnement de l'IFREMER. *http://www.ifremer.fr/envlit/documentation/documents.htm#2*. Sources (1) (2)

1.2. Surveillance

La surveillance des paramètres généraux de qualité (la température, la salinité, les sels nutritifs, la chlorophylle...) est réalisée sur onze sites. L'organisation des campagnes est en majorité confiée aux Cellules Qualité des Eaux Littorales (CQEL) du Ministère chargé de l'Environnement, avec l'appui des Ports Autonomes. Les analyses sont quant à elles réalisées par des laboratoires locaux.

Pour des raisons techniques et financières, cette surveillance est axée en priorité sur la matière vivante et particulièrement sur les moules et les huîtres utilisées comme indicateurs de contamination. La surveillance des contaminants chimiques est également réalisée chez le poisson et dans les sédiments.

Chaque année, la campagne «sédiments» concerne des façades différentes et cela permet de couvrir en huit à dix ans l'ensemble du littoral français. Ces derniers témoignent des contaminations passées de part leur stratification. Ainsi plusieurs années peuvent être représentées dans les premiers centimètres de la couche superficielle selon la dynamique sédimentaire (vitesse de sédimentation, remise en suspension, bioturbation...). C'est pour cette raison que les prélèvements ne sont pas réalisés tous les ans pour un site donné. Les prélèvements sont assurés par les agents de l'IFREMER.

Les polluants recherchés sont les mêmes que dans la matière vivante (métaux, organochlorés, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), accompagnés des paramètres descriptifs et normalisateurs propres à cette matrice, tels que la granulométrie, le carbone organique, les carbonates, la perte au feu, l'aluminium, le fer, le lithium, le manganèse. Les analyses sont effectuées au département DEL/PC de Nantes. Sources (1) (2)

2. Sédimentologie

2.1. Sédiments : témoins de la pollution

La surveillance des contaminants chimiques au niveau des couches sédimentaires superficielles constitue un moyen de visualisation de la contamination spatiale du secteur d'étude. Une description de l'évolution temporelle de l'état de la zone est également possible en procédant à des carottages des couches inférieures du sédiment.

Les profils obtenus reflètent l'historique des apports en contaminants dans les dépôts sédimentaires si ceux-ci n'ont pas été soumis à d'importantes perturbations et si les polluants n'ont pas subi de remise en suspension.

La datation des strates sédimentaires est un moyen de situer les phénomènes dans le temps. Les carottes qui font l'objet d'une datation sont prélevées dans des sites déterminés lors des campagnes RNOSED depuis 1994. Sources (1) (2) (3)

2.2. Phénomène d'adsorption - Source de variabilité des résultats d'analyse

Les dosages de la matrice sédiment présentent un avantage comparativement à la matrice eau ; ainsi le phénomène d'adsorption sur le matériel fin particulaire facilite l'amplification et la stabilisation des contaminants contrairement à la variabilité observable dans la colonne d'eau. Le sédiment n'est donc pas représentatif de pollution en substances solubles dans l'eau. Il ne constitue pas un bon indicateur de contamination en lindane, par exemple, composé de faible affinité pour les particules.

Néanmoins la majorité des contaminants se retrouveraient adsorbés sur le matériel particulaire fin, de diamètre inférieur à 63 μm pour les métaux lourds. L'interprétation de l'analyse des polluants organiques apparaît moins évidente mais les teneurs peuvent être ramenées à la matière organique. La capacité de rétention du sédiment pour les polluants adsorbés est fonction de la taille et de la nature des particules, et de la proportion organique notamment.

Les sédiments contaminés peuvent être soumis à une remise en suspension et au phénomène de bioturbation, conduisant à une éventuelle remobilisation des composés ou à un enfouissement dans les couches profondes. Source (3)

2.3. Dynamique sédimentaire de la Manche – Mer du Nord

Les transferts dominants s'effectuent près de la côte vers le Nord ou l'Est. Dans la région Nord – Pas-de-Calais on constate donc un transfert des sédiments majoritairement de la Manche vers la Mer du Nord. La considération estuarienne est tout autre dans la mesure où l'on peut assimiler ces zones à des pièges à sédiments marins mélangés aux apports telluriques.

La sédimentologie est régie par l'hydrodynamique locale. Les sédiments grossiers tels les cailloutis ou les graviers sont retrouvés dans les zones soumises à un courant fort. Cette classe sédimentaire est prépondérante au niveau du détroit lui-même, avec un élargissement vers les côtes françaises. Par contre les zones à plus faible courant abritent des sédiments plus fins, sables à sables vaseux. Ils sont présents à proximité des côtes et sont particulièrement étendus côté anglais. Source (4)

3. Matériels et méthodes

3.1. Prélèvements

Les points de prélèvement sont identifiés par leur coordonnées géographiques relevées par GPS en précisant le référentiel (ANNEXE B). Ils sont répartis sur les côtes du Nord – Pas-de-Calais, de Picardie et de Haute Normandie. La situation des points d'échantillonnage est présentée par les Figures 3 à 10.

Les prélèvements sont réalisés sous trois mètres d'eau maximum à l'aide de la benne Ekman à manche (Figure 1). Certaines précautions doivent être prises afin de limiter tout risque de contamination. La manipulation exige une protection de la benne grâce à un sac plastique entre les utilisations, la fermeture de la réserve de flaconnage, le port de gants à changer entre chaque prélèvement. Source (4)

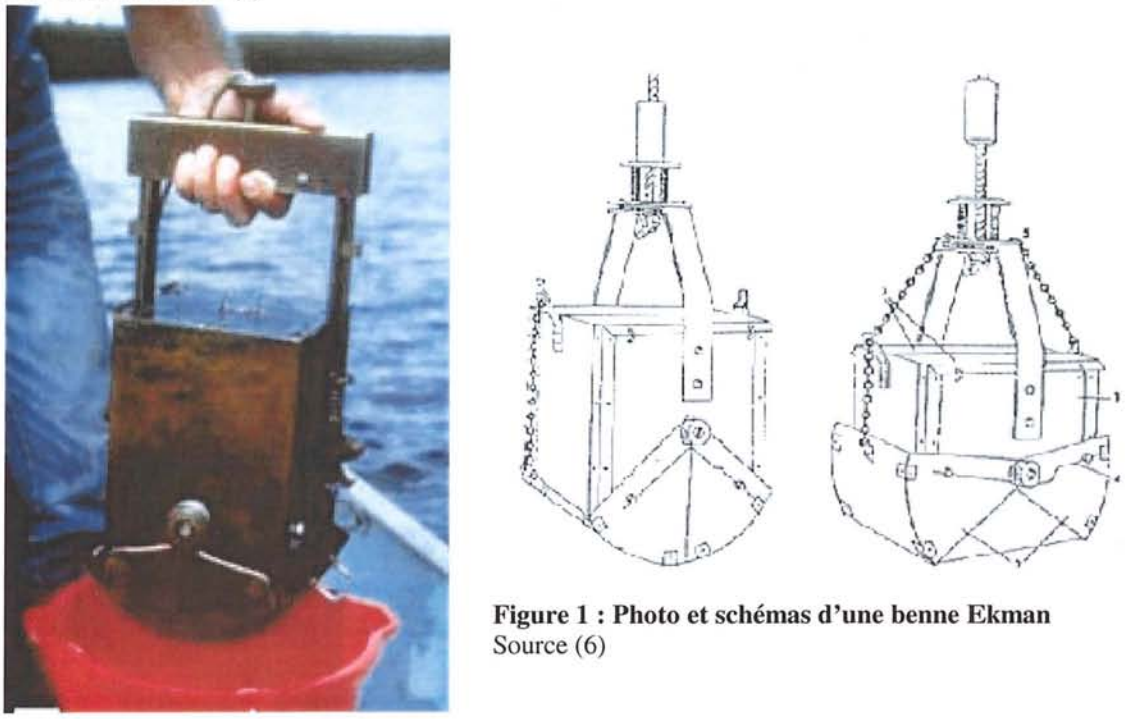


Figure 1 : Photo et schémas d'une benne Ekman
Source (6)

Le sous-échantillonnage est effectué dans le premier centimètre superficiel du sédiment. L'utilisation de la benne Ekman exige une division de la carotte sédimentaire en plusieurs échantillons. Le sédiment destiné à l'analyse granulométrique et à la détermination de la teneur en eau est prélevé dans la partie la plus périphérique en contact avec les parois métalliques de la boîte (Figure 2). L'analyse des métaux s'effectue sur la partie centrale prélevée avec une spatule en polyéthylène ou polypropylène. La partie intermédiaire est prélevée à l'aide d'une spatule en acier inoxydable pour l'analyse des contaminants organiques. Source (5)

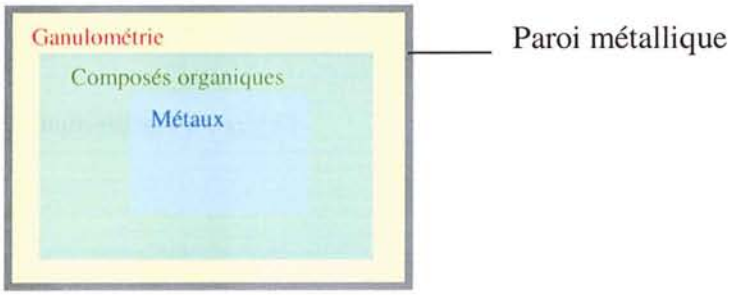


Figure 2 : Détail d'une carotte sédimentaire
Source (5)

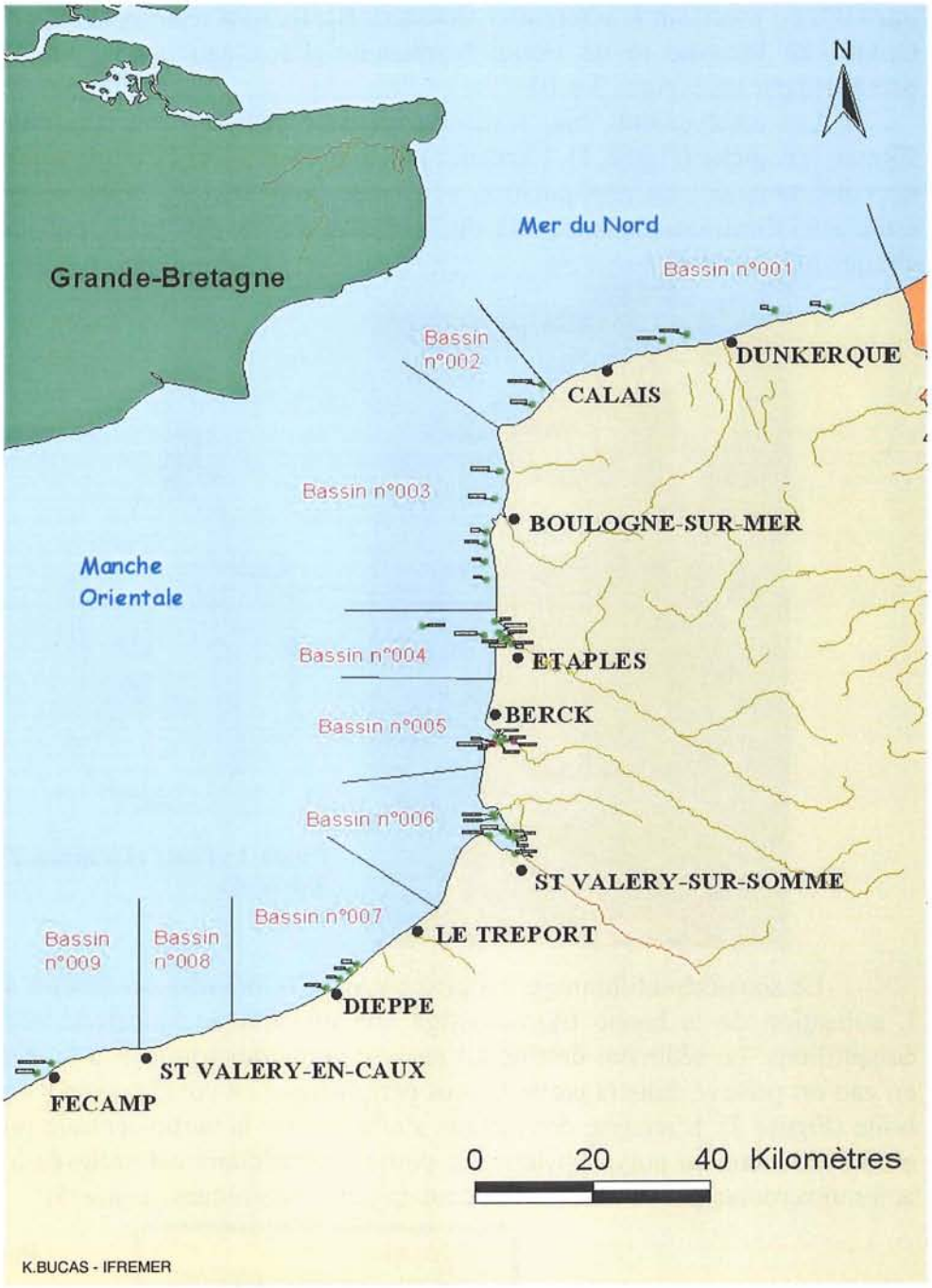


Figure 3 : Localisation de la zone d'étude

Figure 4 : Bassins 001 et 002 (Dunkerque - Calais)

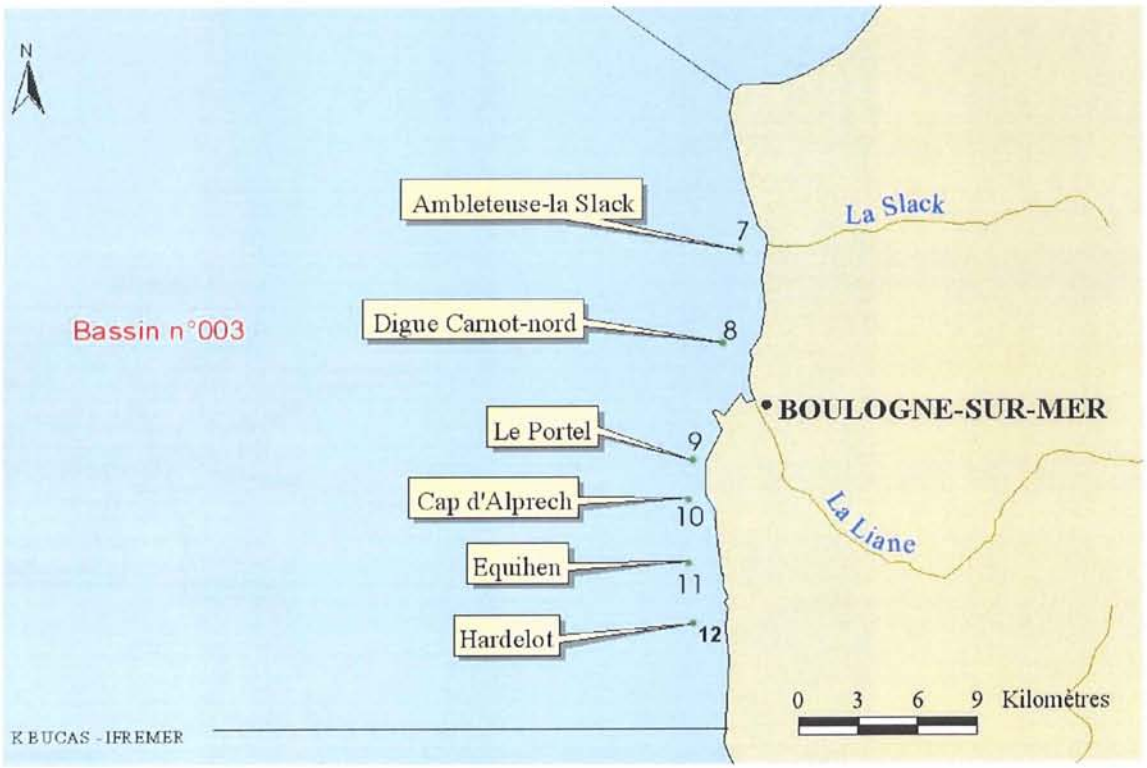


Figure 5 : Bassin 003 (Boulogne-sur-mer)

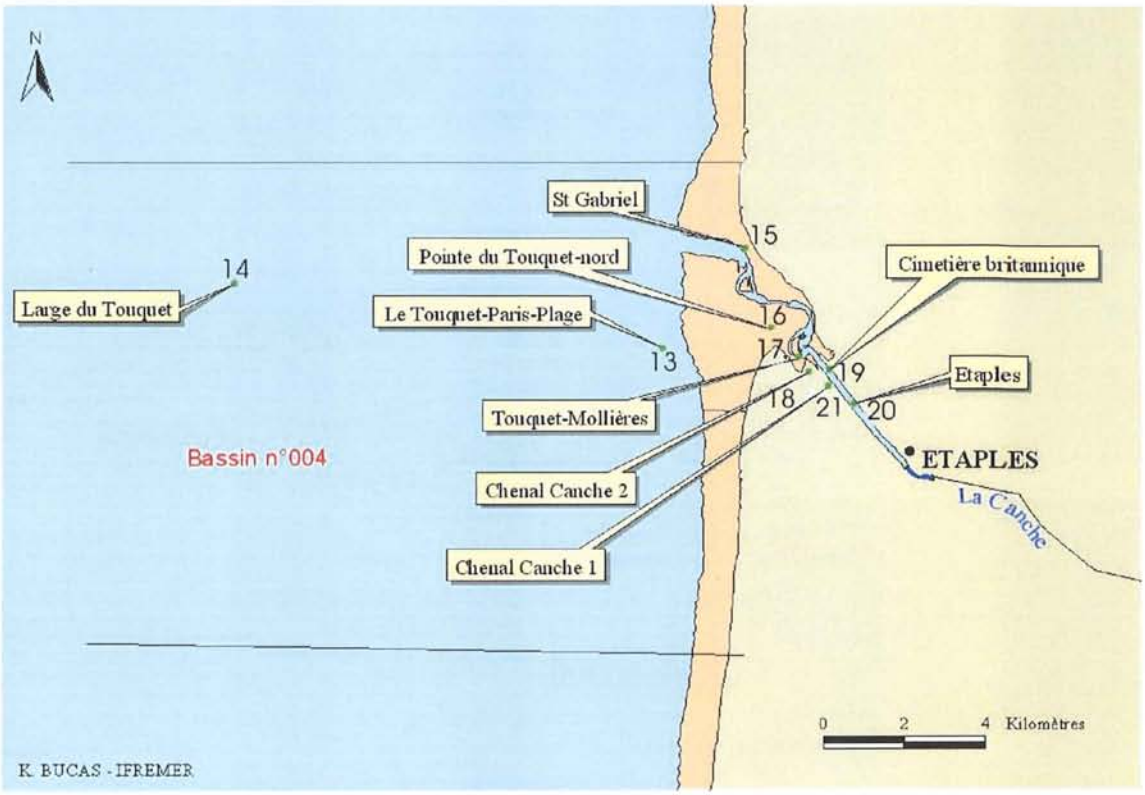


Figure 6 : Bassin 004 (Baie de Canche)

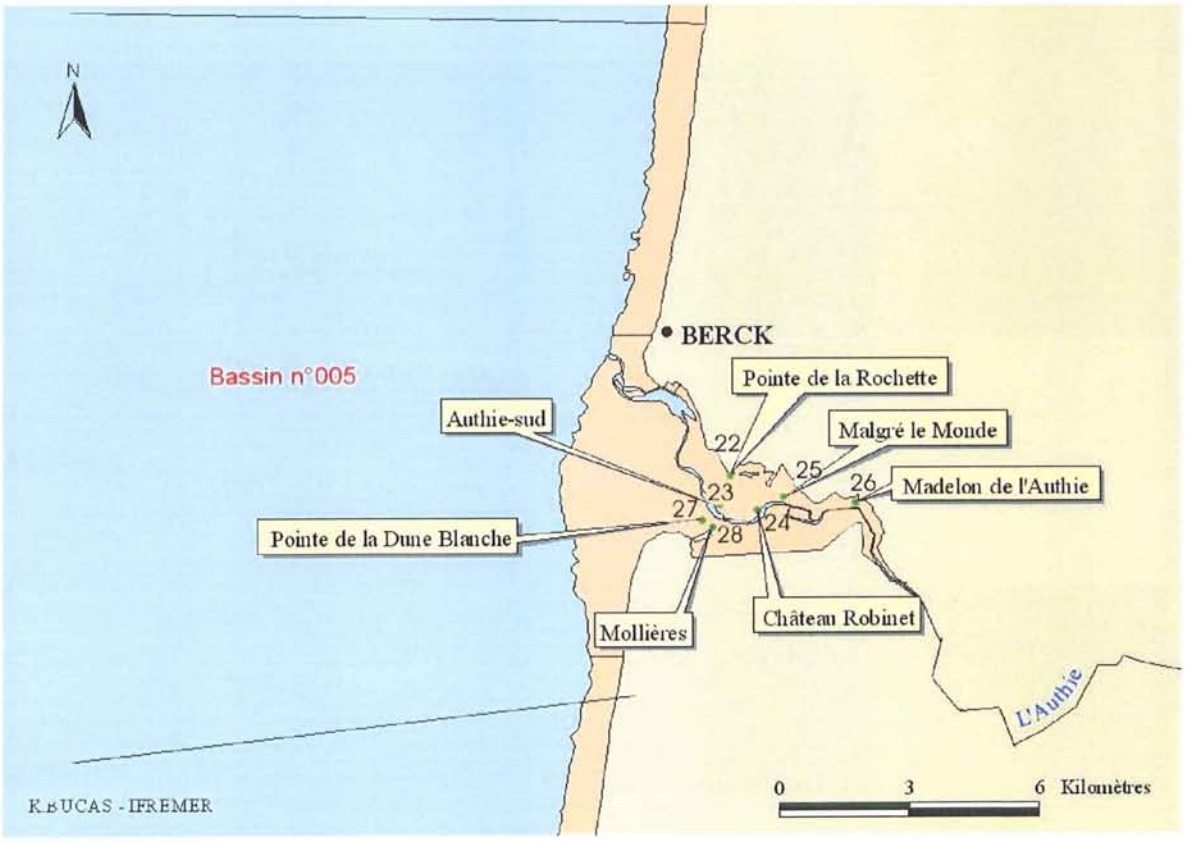


Figure 7 : Bassin 005 (Baie de l'Authie)

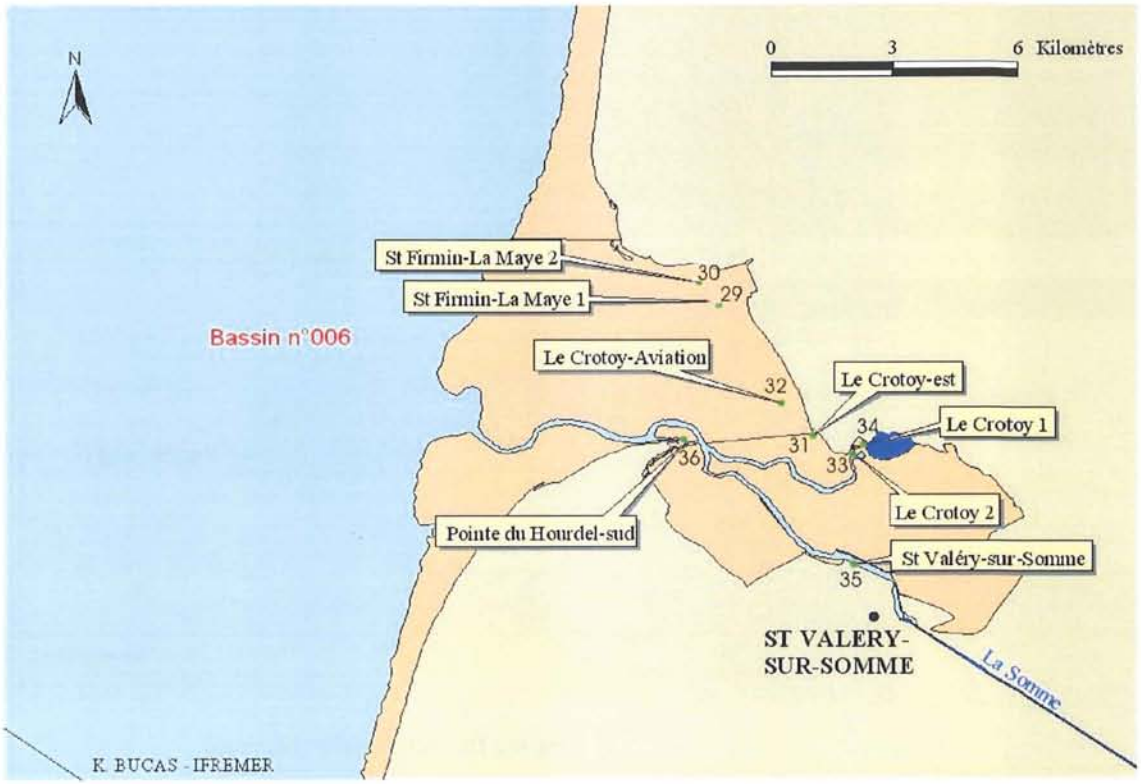


Figure 8 : Bassin 006 (Baie de Somme)

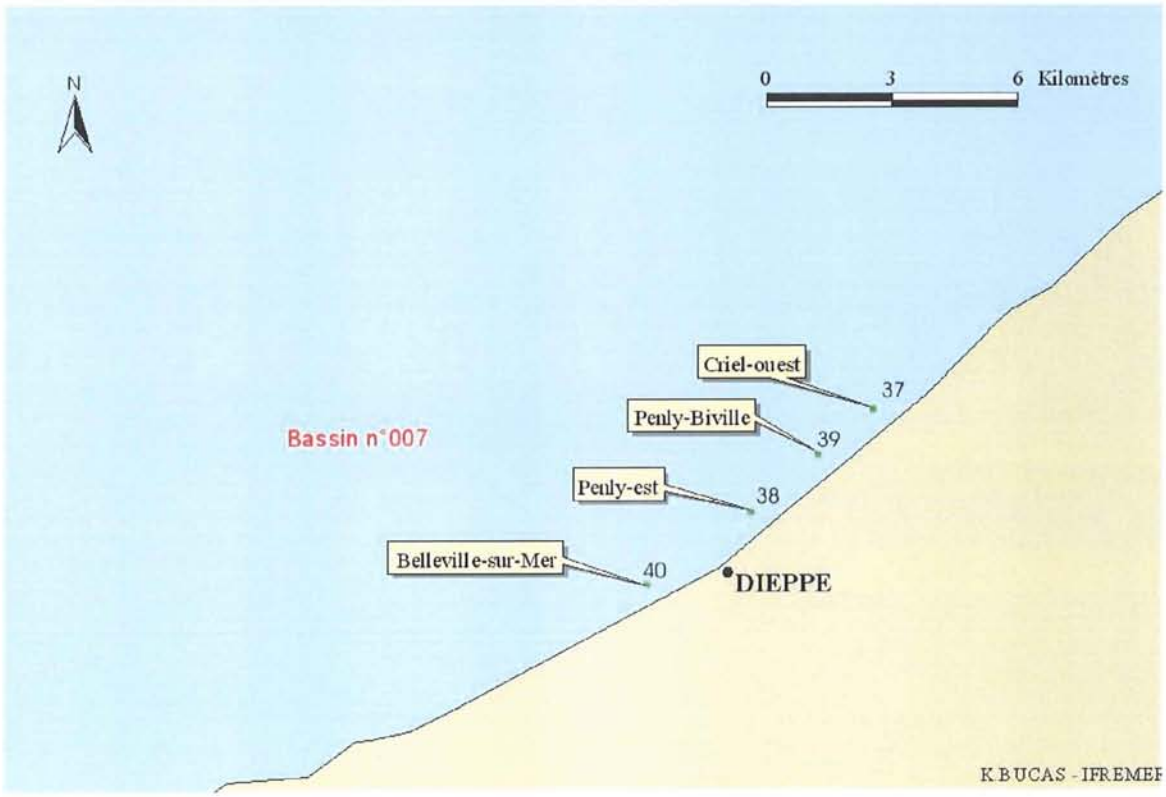


Figure 9 : Bassin 007 (Dieppe)

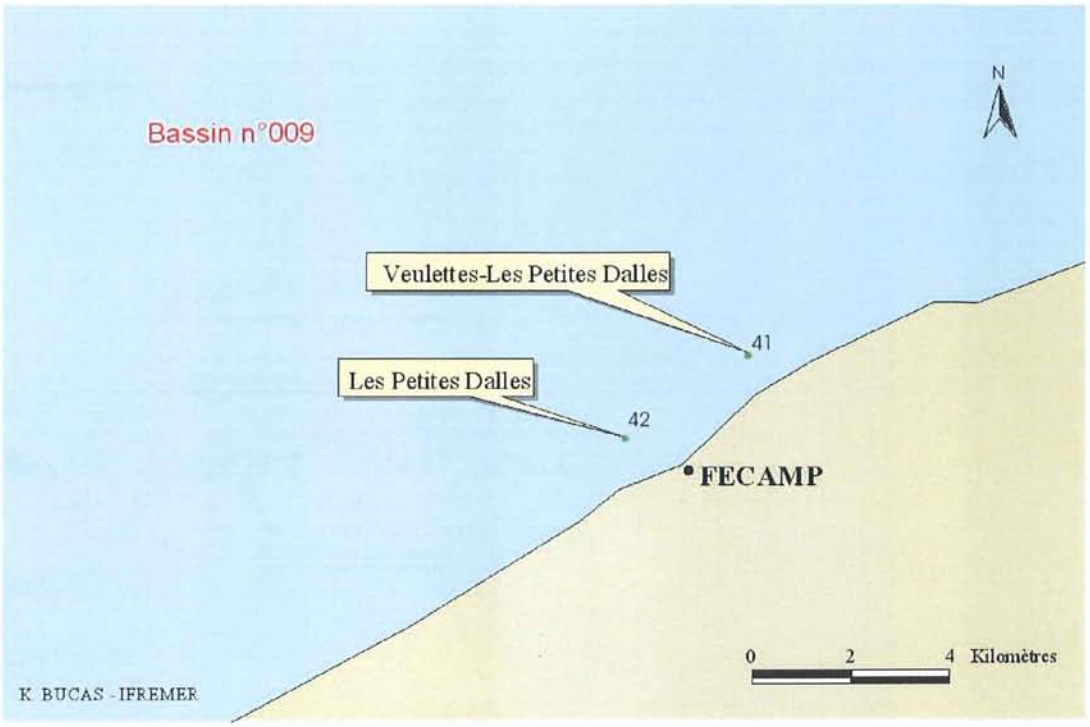


Figure 10 : Bassin 009 (Fécamp)

3.2. Conditionnement des échantillons

Le matériel sédimentaire prévu pour l'analyse granulométrique est stocké à 4 °C dans des piluliers en polystyrène. La préparation granulométrique nécessite l'élimination du matériel grossier du sédiment (coquilles, graviers, etc...) par un tamisage à 2 mm afin d'enlever les éléments pouvant induire une hétérogénéité qui se répercutera sur les résultats.

Les échantillons prévus pour la détection des métaux et des organiques sont congelés dans l'immédiat et lyophilisés au laboratoire. Le matériel destiné au dosage des organiques est stocké dans des barquettes en aluminium calcinées à 450 °C pendant 8 heures. Pour les métaux, l'échantillon est stocké dans des piluliers en polystyrène préalablement lavés à l'acide.
Sources (2) (5)

3.3. Analyses

L'analyse porte donc sur la granulométrie du sédiment, sur les métaux et les composés organiques tels les pesticides, les Hydrocabures Aromatiques Polycycliques (HAP) et les polychloribiphényles (PCB) (ANNEXE C).

Pour le sédiment, deux matrices sont à considérer : la particule sédimentaire et la matière organique liée à cette particule. Leur élimination s'effectue par minéralisation acide (élimination de la matière organique) suivie d'une filtration et d'une centrifugation (élimination des particules). La granulométrie est l'étude de la répartition des particules en fonction de leur dimension. Elle consiste donc en une mesure des dimensions des grains d'un mélange, de leur forme et de leur répartition statistique. Les résultats sont généralement présentés sous forme de classes granulométriques (Tableau 1). La fraction fine est séparée par lavage sur un tamis dont la maille est 50 μm alors que la fraction des sables est séparée à sec sur colonne de tamis à maille carrée (norme AFNOR). Sources (3) (4)

Tableau 1 : Classes granulométriques Source (5)

Fractions	Description
< 63 μm	Silts et argiles
63 à 125 μm	Vase sableuse
125 à 250 μm	Sables fins
250 à 500 μm	Sables moyens
500 μm à 1 mm	Sables grossiers
1 à 2 mm	Graviers
> 2 mm	Cailloutis, Galets

Le type de dosage des métaux est fonction de la nature de l'élément à analyser. La prise d'essai destinée au dosage du mercure est traitée à l'acide nitrique afin de minéraliser l'échantillon. L'analyse se fait par spectrophotométrie d'absorption atomique en vapeur froide et détection fluorimétrique après réduction de Hg^{2+} en Hg° par le chlorure stanneux. L'analyse des autres métaux passe par une dissolution totale de la prise d'essai par les acides nitrique et fluorhydrique. Ils sont alors dosés par spectrophotométrie d'absorption atomique avec four graphite ou flamme en fonction de la concentration. L'analyse est ainsi réalisée par absorption atomique avec flamme. Source (1)

L'analyse du carbone organique s'effectue par oxydation sulfo chromique (norme X31 – 109). L'extraction des pesticides organochlorés, des PCB et des HAP est réalisée par évaporation puis concentration grâce au soxhlet (appareil d'extraction) pendant 16 heures par un mélange

Hexane/Acétone, 50/50 (vol/vol). Pour les organochlorés et les PCB, les extraits sont purifiés par de l'acide sulfurique. L'analyse s'effectue par chromatographie capillaire en phase gazeuse couplée à un détecteur à capture d'électrons. En ce qui concerne le dosage des HAP, les extraits sont purifiés sur colonne de gel de silice puis repris par de l'acétonitrile et analysés par chromatographie liquide haute performance (HPLC) couplée à un détecteur à fluorescence. Source (1)

3.4. Traitement des données

3.4.1. Normalisation des teneurs métalliques dans le sédiment fin

Normalisation par rapport à l'aluminium

La majorité des polluants présents dans le sédiment sont adsorbés à la fraction granulométrique fine. Ainsi les concentrations en éléments toxiques et en sédiments fins sont proportionnelles, et leurs représentations spatiales sont superposables. Une simple mesure des teneurs métalliques dans un sédiment ne permet pas une distinction entre le fond géochimique naturel et la part d'origine anthropique. Le fait de définir les résultats par rapport à un élément normalisateur est un moyen de corriger l'effet de matrice. Le choix de l'aluminium comme paramètre conservatif se justifie pour différentes raisons. Il constitue le troisième élément le plus abondant de la croûte terrestre et présente des proportions relativement constantes. De plus la concentration de cet élément est inversement proportionnelle au diamètre des particules sédimentaires. Cette caractéristique entraîne l'acquisition d'une corrélation positive entre les teneurs en aluminium et celles en éléments traces. La proportion en aluminium est représentatif de la part d'alumino-silicates constituant la fraction particulaire. Enfin, de façon générale les teneurs en aluminium dans le compartiment sédimentaire ne sont pas influencées par les apports anthropiques. La figure 11 représente la corrélation entre la teneur en aluminium du sédiment et sa granulométrie, caractérisée par le pourcentage de fraction fine (<63 μm). Sources (7) (8) (9)

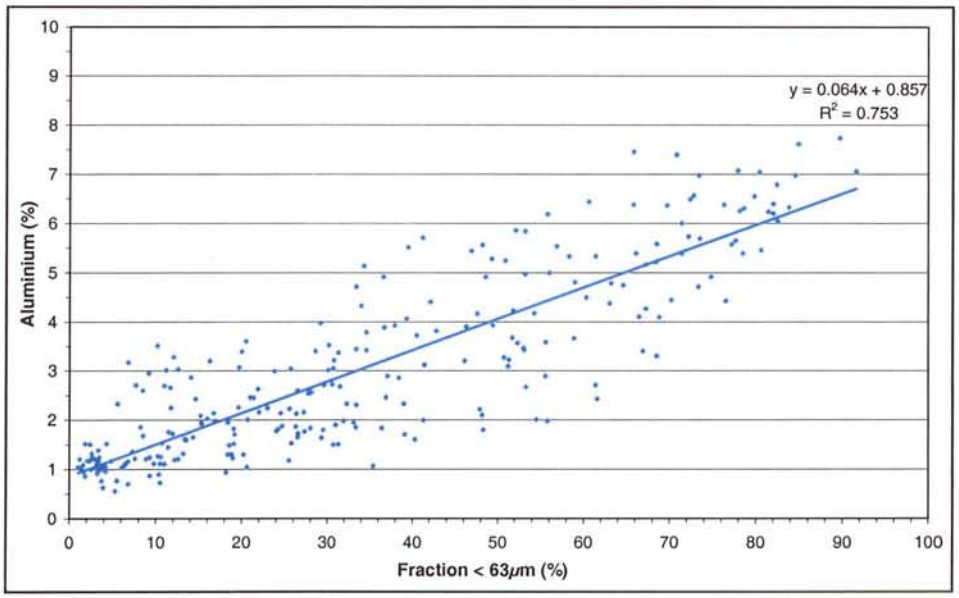


Figure 11 : Corrélation entre l'aluminium (%) et la fraction fine des sédiments (%) sur le littoral français (Manche/Atlantique) Source (9)

Corrélation aluminium/métal

Un graphique de correspondance est réalisé avec les teneurs brutes d'un métal donné en mg/kg en fonction des pourcentages d'aluminium (Al) du sédiment. Afin d'optimiser la corrélation, cette représentation ne considère pas seulement les points de notre étude (Frontière belge - Fécamp) mais tous les points de la façade littorale Manche (Frontière belge - St Brieuc). Une droite de régression linéaire simple est tracée afin de visualiser au mieux la corrélation métal / aluminium (ANNEXE E).

Les points qui semblent contaminés, tels les points susceptibles d'être soumis à des apports anthropiques (au sein des zones de transition) ou situés à l'écart du nuage de points, sont éliminés de la corrélation. Source (9)

La validation de la régression s'effectue visuellement selon la dispersion des points et par un test de signification. Les droites de régression sont validées par le test de signification du coefficient de corrélation de Pearson. La significativité dépend de la valeur de la composante du test, supérieure ou inférieure à une valeur seuil déterminée par la table de Student (ANNEXE F). Source (9)

La corrélation est également validée par l'intervalle de confiance. Celui-ci permet de visualiser la précision du traitement. L'intérêt est de vérifier que la droite de régression se situe à l'intérieur de l'intervalle de confiance calculé pour un seuil de signification donné. En simplifiant la définition mathématique, il est possible d'admettre que l'intervalle de confiance représente la fourchette de valeurs à l'intérieur de laquelle nous avons 95% de chance de trouver la valeur recherchée. L'intervalle de confiance est donc l'ensemble des valeurs raisonnablement compatibles avec le résultat observé (ANNEXE F).

La détermination de la somme des carrés des écarts totaux, de la somme des carrés des erreurs et de la somme des carrés de régression (respectivement SCET, SCEE, SCER) est nécessaire pour le calcul des intervalles de confiance. Graphiquement, l'intervalle se matérialise par une bande d'encadrement de la droite (ANNEXE F). Sources (10) (11)

Valeur de base et Valeur de référence

Les droites de corrélation obtenues pour chaque métal permettent la détermination de la valeur de base et de la valeur de référence de chaque élément sur la façade Manche.

- La valeur de base représente la teneur métallique résiduelle dans un sédiment grossier théorique. Il s'agit d'un sédiment avec une teneur en aluminium correspondant au percentile 2,5 % de la totalité des teneurs en aluminium des façades de littoral Manche/Atlantique.
- La valeur de référence correspond à la teneur métallique maximale d'un sédiment fin théorique. Celui-ci est déterminé par une composition en aluminium égale au percentile 97,5 % de toutes les teneurs en aluminium du littoral. Source (9)

Tableau 2: Calcul des valeurs de base et de référence

Valeur de Base	Valeur de Référence
VB = Sédiment grossier (%Al) x pente + ordonnée à l'origine	VR = Sédiment fin (% Al) x pente + ordonnée à l'origine

Extrapolation des teneurs métalliques dans un sédiment fin et calcul du facteur de contamination

L'extrapolation de toutes les teneurs dans un sédiment fin théorique est nécessaire afin de pouvoir comparer les sédiments de nature différente.

Un nouveau calcul d'équation est effectué pour un métal considéré et pour chaque point. Nous recalculons une nouvelle pente et une nouvelle ordonnée à l'origine pour chaque point et chaque élément en considérant la valeur de base. Nous pouvons ainsi ramener la proportion du métal au sédiment fin.

Tableau 3 : Démarche d'extrapolation des teneurs métalliques dans un sédiment fin

Métal (mg/kg)	Al (%)	Pente	Ordonnée à l'origine	Métal dans le sédiment fin (mg/kg)
Teneur obtenue suite à l'analyse	Pourcentage calculé par rapport à la masse totale de sédiment	$m2 = \frac{[Métal]mg/kg - VB}{[Al]\% - \%Sédiment Grossier}$	p_2=m2 xSédimentgrossier (Al%) + VB	[Métal Sédimentfin]mg/kg =m2xSédimentfin (Al%) + p_2

Le facteur de contamination (FC) est obtenu par le rapport de la teneur de métal extrapolée au sédiment fin sur la teneur métallique de référence VR. On obtient donc un facteur de contamination en un métal considéré pour chaque point. Il peut être déterminé graphiquement à partir de la représentation de la teneur en métal en mg/kg en fonction du pourcentage d'aluminium du sédiment analysé (Figure 12). La démarche consiste à placer le point i d'un point i donné, de teneur en métal (métal i) et de pourcentage en aluminium (Al i %). La valeur de base (VB) du métal correspondant ainsi que la valeur de référence (VR) sont ensuite reportées sur le graphique. La détermination graphique s'effectue par le traçage d'une droite passant par la valeur de base du métal considéré et le point i. Le point i extrapolé apparaît à l'intersection de cette droite et de la teneur en aluminium donnée par la valeur de référence. Le facteur de contamination du point i pour le métal considéré correspond à l'écart observé entre la valeur de référence et le point i extrapolé. Source (9)

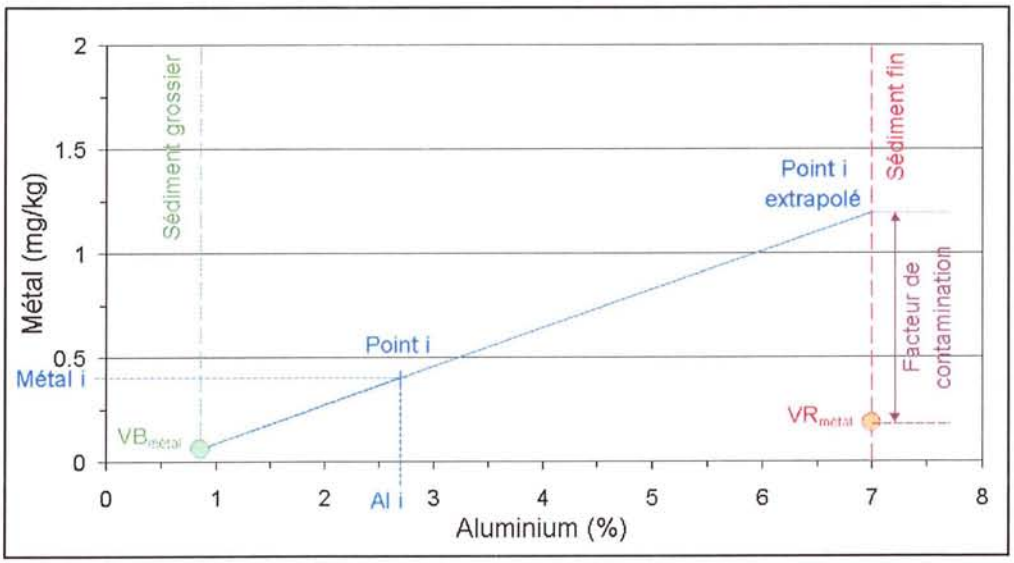


Figure 12: Détermination graphique du facteur de contamination FC
Source (9)

Un exemple de traitement

Le raisonnement de la démarche est repris ci-dessous en traitant l'exemple de l'arsenic (As).

- *1ère étape* : Représentation graphique des teneurs brutes d'arsenic en mg/kg en fonction des pourcentages d'aluminium pour tous les points de la façade littorale (frontière belge - St Brieuc), puis tracé de la droite de régression linéaire du type $y = m_1x + p_1$ soit $y = 2,74x + 0,45$ pour l'arsenic

- *2ème étape* : Calcul des valeurs de base et de référence, VB et VR, de l'arsenic. Sur l'ensemble de la façade Manche, nous considérons les sédiments fins et grossiers théoriques avec des pourcentages respectifs de 3 % et 0,72 % d'aluminium.

VR = % Sed fin x pente m1 + ordonnée origine p1
= 3 x 2,74 + 0,45 = 8,67 mg d'arsenic/kg

VB = % Sed grossier x pente m1 + ordonnée origine p1
= 0,72 x 2,74 + 0,45 = 2,42 mg d'arsenic/kg

Tableau 4 : Données des 1ère et 2e étapes de normalisation des teneurs métalliques dans le sédiment

	1ère étape Pente m_1	1ère étape Ordonnée à l'origine p_1	2e étape Sédiment fin	2e étape VR Arsenic	2e étape Sédiment grossier	2e étape VB Arsenic
Arsenic	2,74	0,45	3	8,67 mg/ kg	0,72	2,42 mg /kg

- *3ème étape* : calcul d'une nouvelle pente m_2 et d'une nouvelle ordonnée à l'origine p_2 pour chaque point et pour chaque métal.

Exemple de calcul pour le Point 1 :

m_2 = ([As]mg/kg – VB As mg/kg) / ([Al]% - %Sédiment grossier)
= (9,9 - 2,42) / (1,8 – 0,72) = 6,92

p_2 = [As]mg/kg – m_2 x [Al]%
= 9,9 - 6,92 x 1,8 = -2,56

- *4ème étape* : calcul de la teneur en arsenic dans le sédiment fin pour chaque point grâce à la nouvelle équation du type $y = m_2 x + p_2$ soit $y = 6,92x - 2,56$, et détermination du facteur de contamination FC.

Exemple de calcul pour le Point 1 :

[As sédiment fin]mg/kg = m2 x [Al]% + p2 = 6,92 x 1,8 – 2,56 = 18,21

FC = [As sédiment fin]mg/kg / VR As mg/kg
= 18,21 / 8,67 = 2,1

Tableau 5 : Données des 3ème et 4ème étapes de normalisation des teneurs métalliques dans le sédiment

Points	Aluminium en %	Arsenic en mg/kg	3e étape Pente m_2	3e étape Ordonnée à l'origine p_2	4e étape Arsenic dans le sédiment fin mg/kg	4e étape FC
1	1,8	9,9	6,92	-2,56	18,21	2,10
2	1,5	6,4	5,10	-1,25	14,05	1,62

Les graphiques de corrélation des éléments métalliques par rapport à l'aluminium ainsi que les paramètres de régression sont présentés en annexe (ANNEXES E, F, G).

Les éléments déclassants

Le calcul des facteurs de contamination (FC) pour chaque élément et pour l'ensemble des points présente plusieurs intérêts. Grâce au FC, il est possible d'attribuer à chaque point l'élément déclassant c'est-à-dire l'élément doté du facteur de contamination le plus élevé. Nous pouvons ainsi comparer les niveaux de contamination de tous les éléments sans la contrainte des différences d'ordre de grandeur. Les éléments déclassants des points de l'ensemble de la zone d'étude sont présentés en annexe (ANNEXE I).

3.4.2. Analyse multivariée : classification hiérarchique

L'examen de la contamination de l'ensemble des points est effectué par le biais d'une analyse spatiale de la zone d'étude. L'objectif est de mesurer la ressemblance entre les différents points de prélèvement. Les mesures d'association constituent l'étape de base. La mesure des ressemblances permet ensuite de regrouper les points en suivant des règles d'agglomération ou de division. Plusieurs indices ont été testés afin d'optimiser la classification en utilisant un indice de similarité qualitatif et deux indices de distance quantitatif et semi-quantitatif. Les indices de distance de Bray – Curtis et Euclidienne ainsi que l'indice de similarité de Sorensen ont été utilisés. Les regroupements se matérialisent par des représentations en dendrogrammes. L'intérêt de ces arbres est qu'ils peuvent donner une idée du nombre de classes existant effectivement pour l'ensemble des points de la zone d'étude (ANNEXE L). Sources (10) (11)

Cette classification est réalisée à l'aide du logiciel COMM développé à la base pour le traitement des données écologiques organisées sous forme de tableaux variables – stations (points).

3.4.3. Statistiques générales par groupe de points

Les statistiques de base (minimum, premier quartile, moyenne, troisième quartile, maximum et écart-type) sont calculées à partir des résultats de concentrations brutes et normalisées en éléments métalliques et de teneurs organiques (ANNEXE L).

A partir des associations de points de mesures de la classification hiérarchique, des caractéristiques de dispersion ont été déterminées afin de comparer la composition en métaux et contaminants organiques des différents groupes. Ces caractéristiques sont présentées sous forme de boîtes à moustache (Box-plot).Ces représentations sont réalisées pour chaque élément et permettent de visualiser la dispersion des valeurs par rapport à la médiane au sein d'un groupe (ANNEXE K). Sources (10) (11)

4. Résultats

4.1. Granulométrie

L'analyse granulométrique (Figures 13 (a) à (g)) met en évidence trois grandes classes de sédiments sur l'ensemble des points de mesures :

- La **Classe A** dont le sédiment présente une proportion importante de sédiments fins. Le pourcentage de fraction fine (<63 μm) est supérieure à 10 %.
- La **Classe B** pour laquelle le sédiment est principalement constitué des sables moyens homogènes. La classe modale est située dans l'intervalle]125 – 250 mm[ou dans une des classes adjacentes.
- La **Classe C** dont le sédiment est constitué en majorité de sables moyens à grossiers. Il se distingue par une distribution bimodale, avec une classe modale principale située majoritairement dans l'intervalle]125 – 250 mm[et une classe secondaire de granulométrie supérieure à 2 mm.

Tableau 6 : Classification des sédiments des différents points de prélèvement

A	B	C
1 Malo - ouest	**2** Mardyck - sédiment	**8** Digue Carnot nord
3 Grand Fort Philippe	**5** Cap Blanc Nez - Escalles	**9** Le Portel
4 Les Hemmes d'Oye	**7** Ambleteuse - La Slack	**10** Cap d'Alprech
6 Strouanne - ouest	**11** Equihen	**13** Le Touquet-Paris-Plage
18 Chenal Canche 2	**12** Hardelot	**14** Large du Touquet
19 Cimetière britannique	**16** Pointe du Touquet - nord	**15** Saint-Gabriel
20 Etaples	**17** Touquet - Mollières	**22** Pointe de La Rochelle
21 Chenal Canche 1	**23** Authie sud - sédiment	**39** Penly - Biville
26 La Madelon de l'Authie	**24** Château Robinet	**40** Belleville-sur-Mer
27 Pointe de la Dune Blanche	**25** Malgré le Monde	**41** Veulettes - Les Petites Dalles
28 Mollières	**30** St. Firmin - La Maye 2	
29 St. Firmin - la Maye 1	**31** Le Crotoy ouest	
33 Le Crotoy 2	**32** Le Crotoy - Aviation	
34 Le Crotoy 1	**35** St. Valéry-sur-Somme	
36 Pointe du Hourdel – sud	**37** Criel - ouest	
42 Les Petites Dalles	**38** Penly - est	

Chaque point de l'étude a été reporté sur une carte des formations sédimentaires superficielles des côtes du Nord – Pas-de-Calais et de Haute Normandie datant de 1995. Une comparaison a donc pu être effectuée entre les classes granulométriques observées sur les cartes et les classes déterminées suite à l'analyse des sédiments. Il apparaît que les résultats sont superposables. La composition granulométrique des sédiments de la plupart des points coïncide donc avec la répartition des formations superficielles identifiées par de précédentes études. Sources (12) (13)

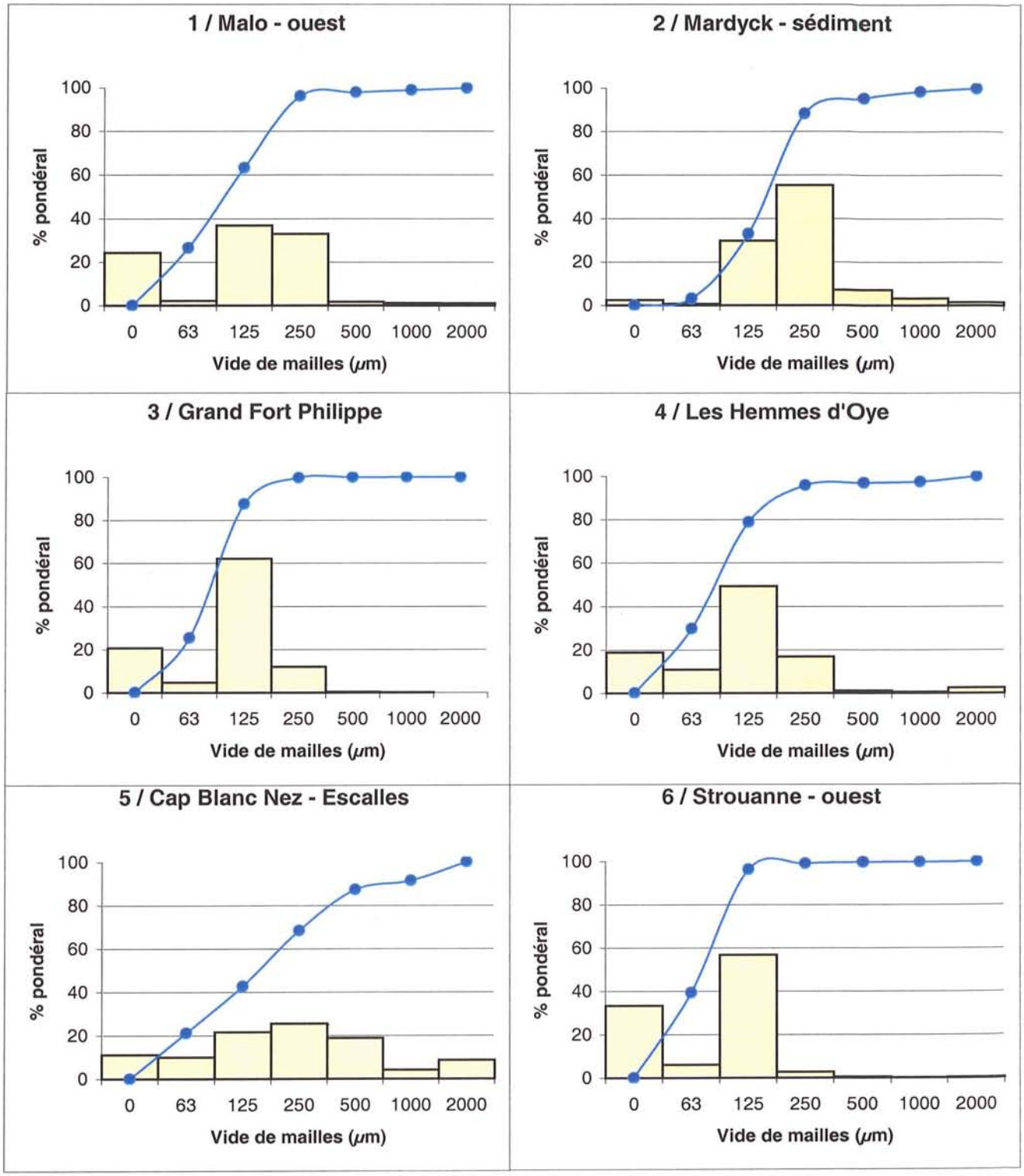


Figure 13(a) : Représentations graphiques de la composition granulométrique des sédiments (Histogrammes de fréquences pondérales et fréquences cumulées)

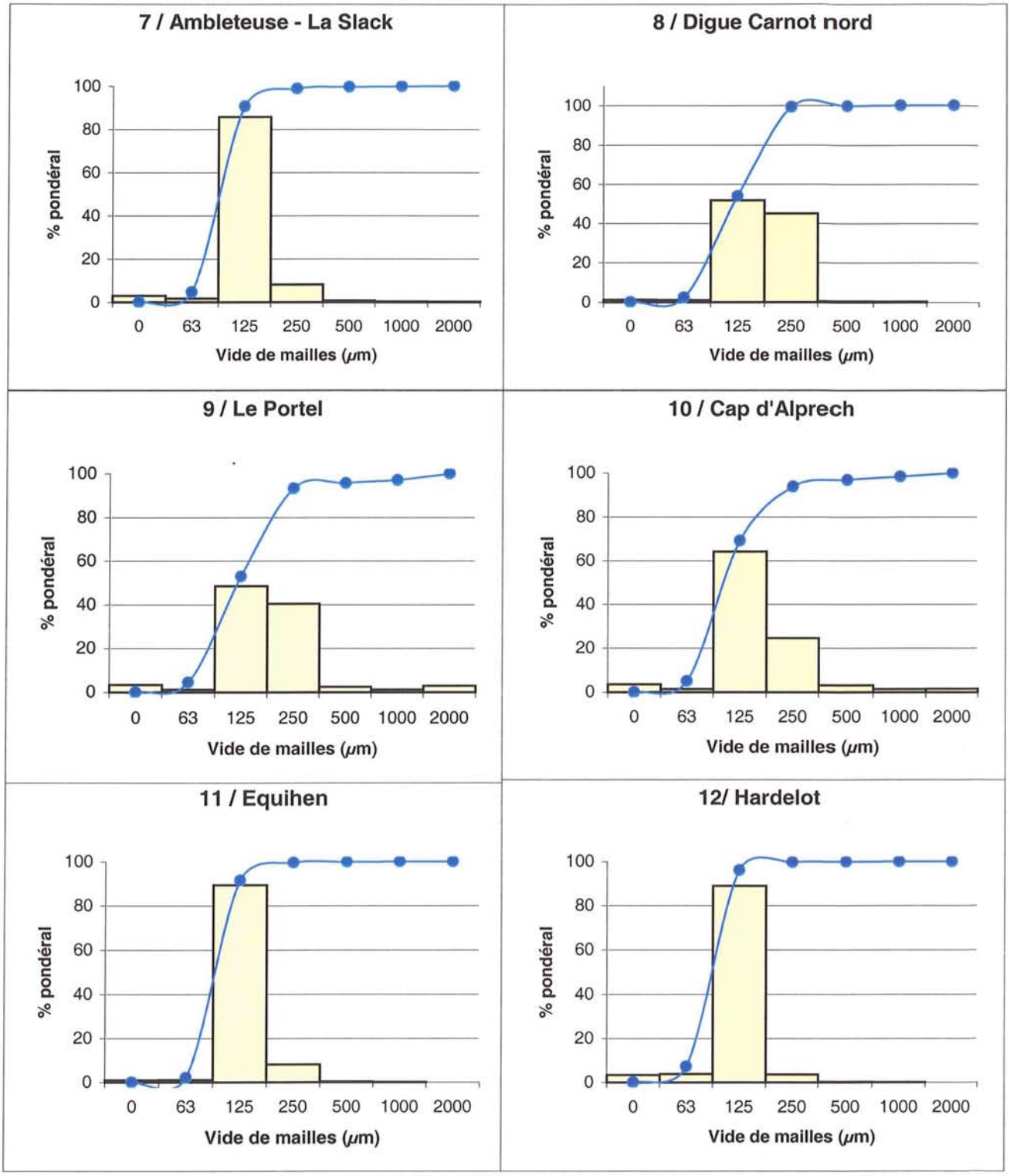


Figure 13(b) : Représentations graphiques de la composition granulométrique des sédiments (Histogrammes de fréquences pondérales et fréquences cumulées)

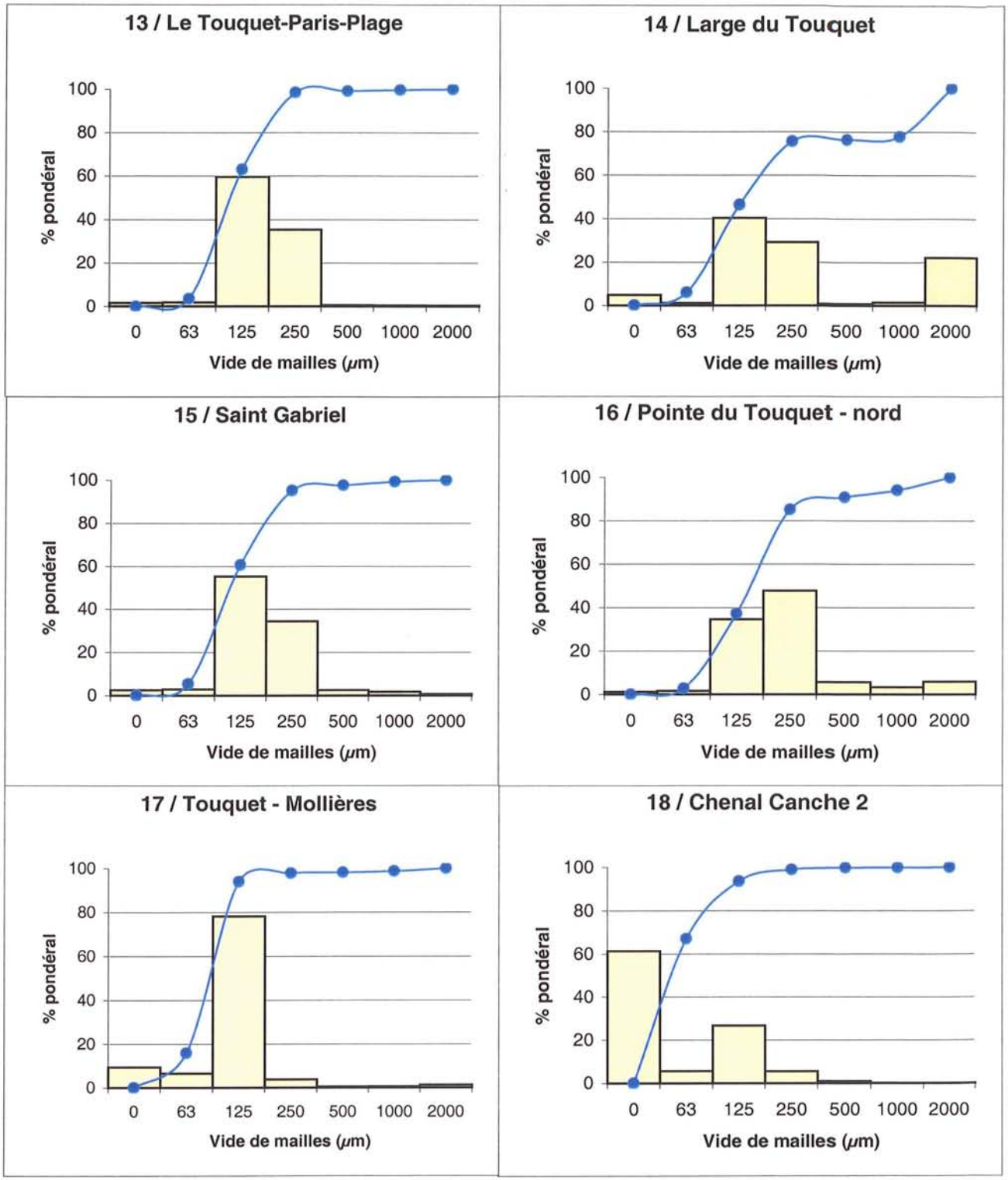


Figure 13(c) : Représentations graphiques de la composition granulométrique des sédiments (Histogrammes de fréquences pondérales et fréquences cumulées)

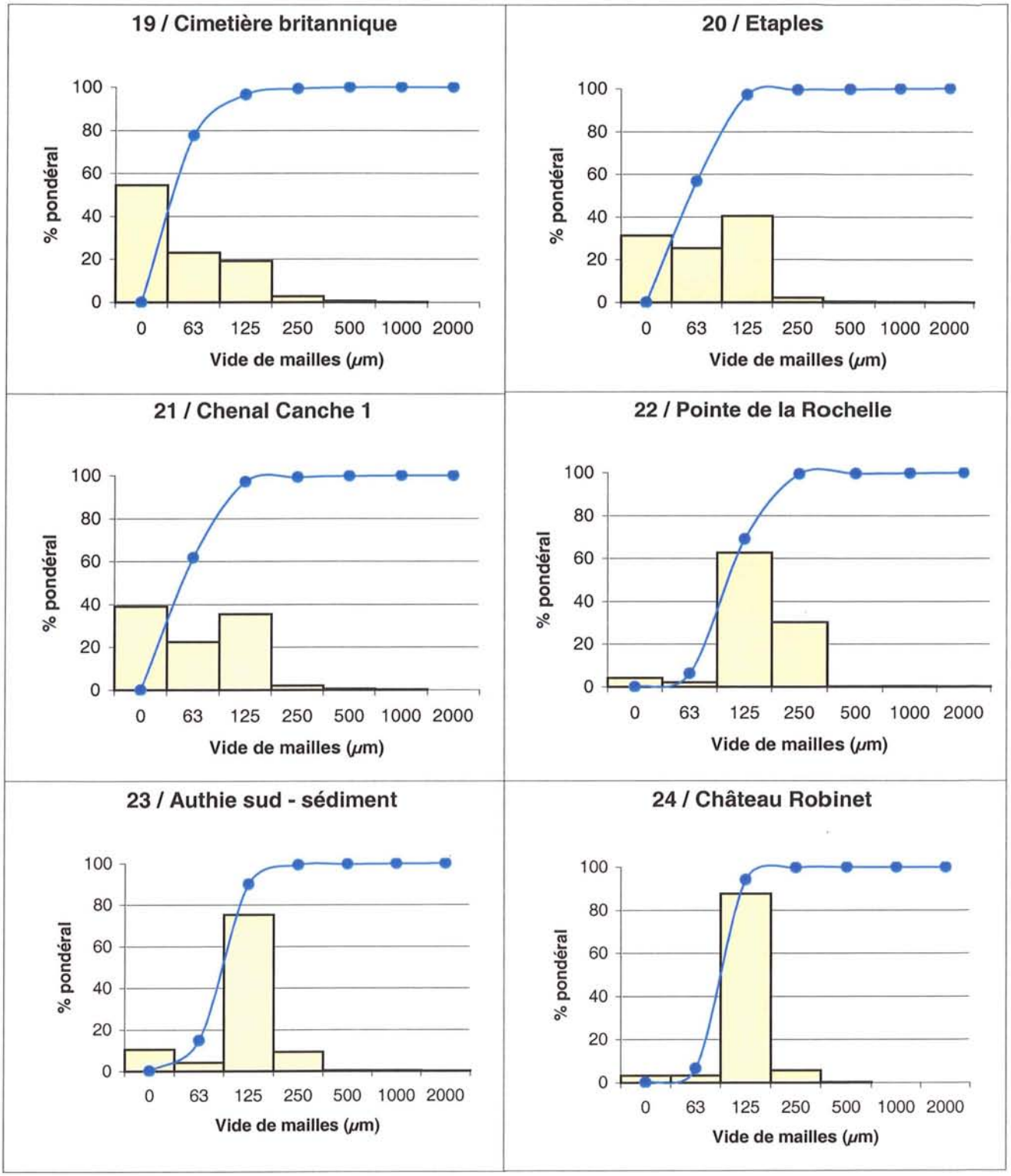


Figure 13(d) : Représentations graphiques de la composition granulométrique des sédiments (Histogrammes de fréquences pondérales et fréquences cumulées)

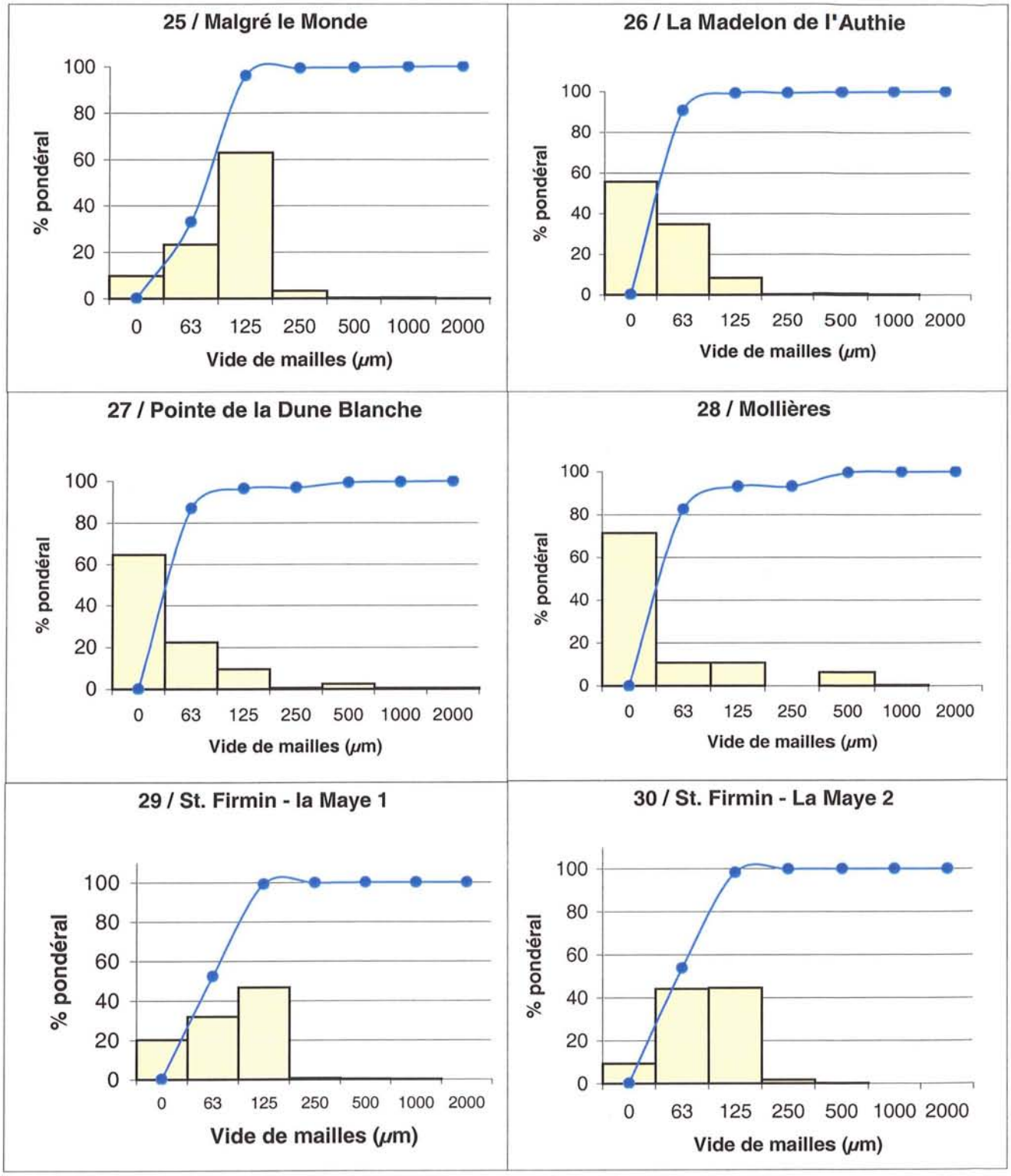


Figure 13(e) : Représentations graphiques de la composition granulométrique des sédiments (Histogrammes de fréquences pondérales et fréquences cumulées)

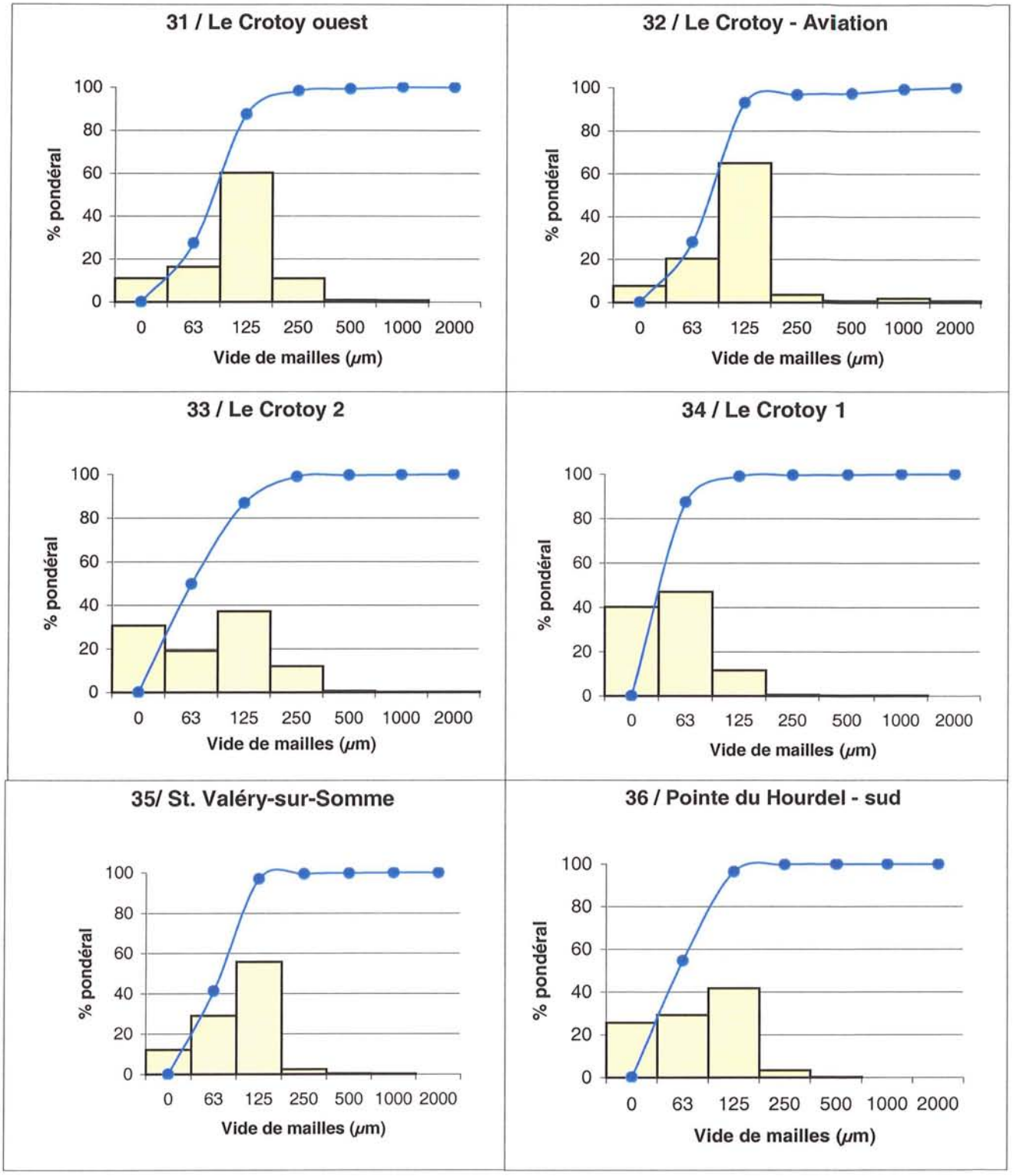


Figure 13(f) : Représentations graphiques de la composition granulométrique des sédiments (Histogrammes de fréquences pondérales et fréquences cumulées)

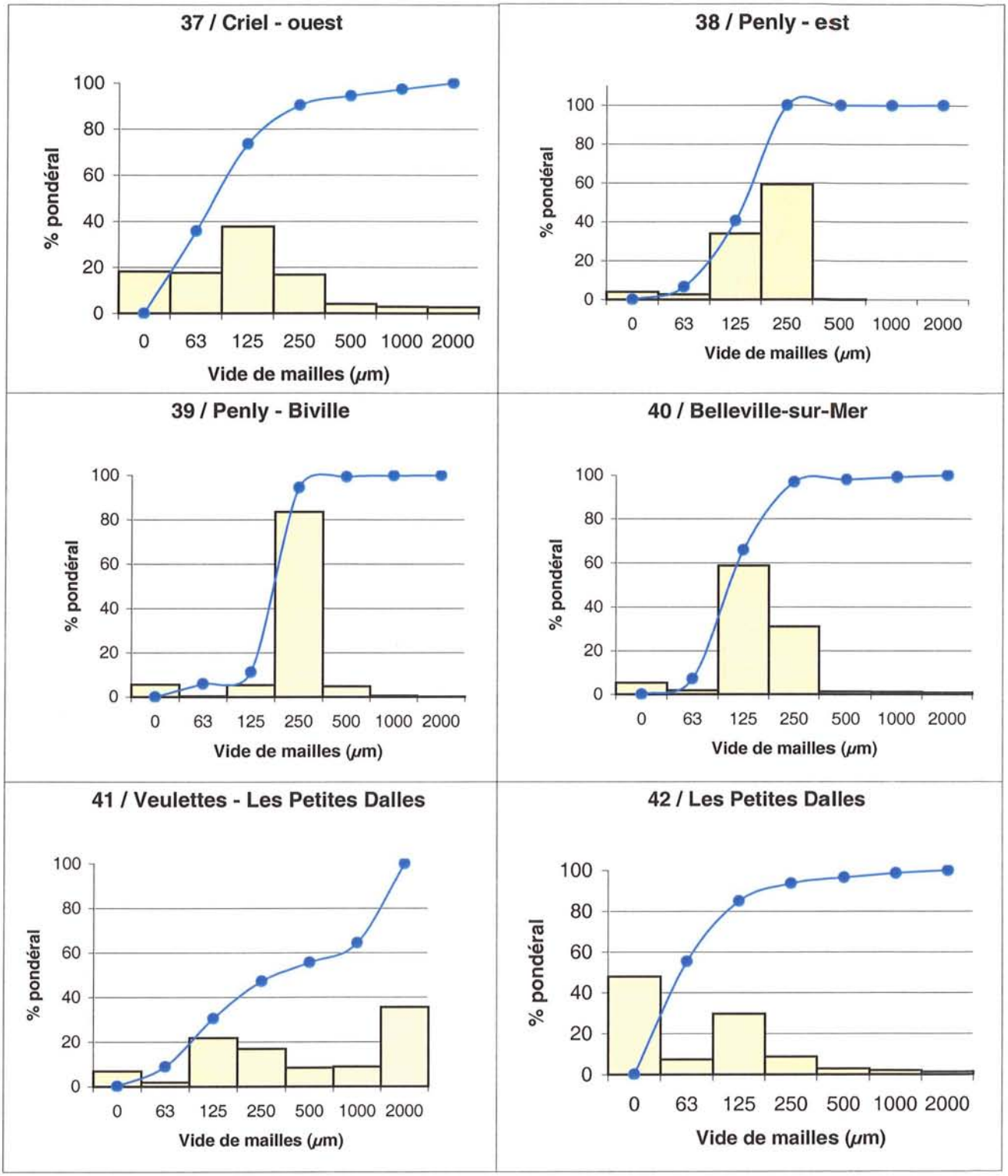


Figure 13(g) : Représentations graphiques de la composition granulométrique des sédiments (Histogrammes de fréquences pondérales et fréquences cumulées)

4.2. Teneurs en composés métalliques

Les résultats sont présentés en ANNEXE D.

Les teneurs métalliques brutes les plus élevées ont été mesurées dans les sédiments des points 5 (Cap Blanc Nez – Escalles), 18 (Chenal Canche 2) , 28 (Mollières) et 42 (Les Petites Dalles). Le point 1 présente des teneurs élevées en mercure (0,1 mg/kg) et en étain total (4,5 mg/kg).

Le point 5 (Cap Blanc Nez – Escalles) se caractérise par la concentration la plus élevée en arsenic (87,7 mg/kg) alors que les teneurs des autres points sont inférieures à 10,0 mg/kg .Les sédiments de ce point abritent également les concentrations les plus élevées en fer (45700,0 mg/kg), en lithium (51,0 mg/kg), en nickel (37,9 mg/kg) et en vanadium (72,6 mg/kg). Ce point se distingue des autres par le fait que leurs teneurs moyennes ne dépassent pas 14000,0 mg/kg pour le fer, 10,0 mg/kg en lithium, 10,0 mg/kg pour le nickel et 30,0 mg/kg pour le vanadium. Les sédiments du point 42 (Les Petites Dalles) présentent des teneurs en chrome à 46,6 mg/kg et en manganèse à 232,0 mg/kg alors que les concentrations moyennes des autres points n'excèdent pas 30,0 mg/kg pour le chrome et 180,0 mg/kg pour le manganèse. Le point 18 montrent les plus importantes concentrations de 1,0 mg/kg en cadmium (moyenne de 0,2 mg/kg pour les autres points), 19,4 mg/kg en cuivre (moy. 10,0 mg/kg), 36,0 mg/kg en plomb (moy. 17,0 mg/kg), 1610,0 mg/kg en titane (moy. 1000,0 mg/kg), 173,0 mg/kg en zinc (moy.70,0 mg/kg) et 27,0 mg/kg en aluminium (moy. 15000,0 mg/kg). Le sédiment du point 28 est le plus contaminé en mercure avec une teneur de 0,21 mg/kg (moy. 0,06 mg/kg).

Les sédiments des points 8 (Digue Carnot nord), 17 (Touquet – Mollières) et 20 (Etaples) abritent les plus fortes concentrations en étain total. Elles sont respectivement de 4,2, 2,3 et 3,0 mg/kg. Les concentrations les plus élevées en cadmium (0,79 et 0,63 mg/kg) sont pour les points 26 (La Madelon de l'Authie) et 33 (Le Crotoy 2). Les fluorures sont majoritairement présents au sein des sites 23 (Authie sud) et 26 (La Madelon de l'Authie) avec des teneurs respectives de 522,0 et 490,0 mg/kg.

Nous constatons que les points de la façade nord, de 1 (Malo – ouest) à 6 (Stouanne – ouest) se distinguent des points de la façade ouest, de 7 (Ambleteuse – La Slack) à 17 (Touquet – Mollières), par des concentrations métalliques brutes plus élevées.

Dans l'estuaire de la Canche, les sédiments des points 16 (Pointe du Touquet – nord) et 17 présentent les plus faibles concentrations. Nous observons un gradient décroissant des concentrations des points 18 (Chenal Canche 2) à 20 (Etaples) en remontant le fleuve côtier. C'est en baie de Somme que nous retrouvons les concentrations les plus élevées. Les points 33 (Le Crotoy 2) à 36 (Pointe du Hourdel – sud) présentent des teneurs plus élevées en métaux que les autres points de l'estuaire. Un gradient décroissant de concentration est observable en s'éloignant du point 33 (Le Crotoy 2). Nous remarquons un gradient croissant de concentration des éléments métalliques des points 22 (Pointe de la Rochelle) à 28 (Mollières), en remontant le cours de l'Authie. Les points numérotés de 38 (Penly – est) à 41 (Veulettes – Les Petites Dalles) présentent des teneurs faibles en éléments métalliques alors que les points 37 (Criel – ouest) et 42 (Les Petites Dalles) se distinguent par des concentrations plus élevées.

Après normalisation des teneurs métalliques, les sédiments des points 5 (Cap Blanc Nez Escalles), 37 (Criel – ouest) et 39 (Penly – Biville) apparaissent comme les plus contaminés. Les sédiments du point 5 abritent la concentration la plus importante en aluminium de 3,0 mg/kg . Les points 8 (Digue Carnot nord) et 17 (Touquet – Mollières) sont les plus contaminés en étain et présentent des teneurs respectives de 33,1 et 35,0 mg/kg (moy.<10,0 mg/kg). Les plus fortes concentrations normalisées en manganèse ont été mesurées pour les sédiments des points 38

(Penly- est) et 40 (Belleville-sur-mer) (693,8 et 568,7 mg/kg). Les points 23 (Authie sud) et 41 (Veulettes – Les Petites Dalles) présentent les teneurs les plus élevées en fluorures.

Certains points se distinguent des autres par la concentration élevée d'un ou de deux éléments. Ainsi le point 15 (St Gabriel) se distingue avec une concentration en cadmium de 2,6 mg/kg, le point 42 (Les Petites Dalles) avec 73,4 mg/kg pour le lithium et le point 41 (Veulettes – Les Petites Dalles) avec 45,4 mg/kg pour le plomb.

Nous remarquons de nouveau l'existence d'un gradient décroissant de concentration dans l'estuaire de la Canche des points 17 (Touquet – Mollières) à 20 (Etaples) pour l'arsenic, le cadmium, le cuivre, le fer, le mercure, le zinc et les fluorures. Les sédiments des points 26 (La Madelon de l'Authie), 27 (Pointe de la Dune Blanche) et 28 (Mollières) possèdent les concentrations les plus élevées de la baie d'Authie. Un gradient décroissant de direction sud-est - nord-ouest vers l'embouchure de l'estuaire est observable. En baie Somme, les points 33 (Le Crotoy 2) à 36 (Pointe du Hourdel – sud) présentent des teneurs plus élevées que les autres points en cadmium, cuivre, lithium, mercure, nickel, plomb, étain et vanadium. Nous observons un gradient décroissant des points 33 (Le Crotoy 2) à 36 (Pointe du Hourdel – sud) pour le plomb ainsi que pour le chrome, l'étain et l'aluminium. Par contre les résultats mettent en évidence un gradient croissant de concentration de ces mêmes points pour le manganèse, le nickel. Les points 38 (Penly – est), 39 (Penly – Biville) et 40 (Belleville-sur-mer) présentent des teneurs relativement importantes en aluminium, lithium et plomb.

4.3. Concentrations en composés organiques

Les résultats sont présentés en ANNEXE D.

Les points les plus contaminés en composés organiques sont, par ordre décroissant de contamination, les points 28 (Mollières), 18 (Chenal Canche 2) et 42 (Les Petites Dalles). Les plus faibles contaminations concernent les points numérotés de 2 (Mardyck) à 14 (Large du Touquet). En revanche aucun contaminant organique n'a été détecté dans les sédiments des points 16 (Pointe du Touquet-nord), 37 (Criel-ouest) et 41 (Veulettes-Les Petites Dalles).

Les plus faibles concentrations en PCB sont inférieures ou égales au seuil de détection de 0,1 µg/kg et caractérisent les points 1 (Malo-ouest) à 14 (Large du Touquet). Les concentrations en CB 35 sont de 0,5 µg/kg pour tous les échantillons de sédiment. La concentration la plus forte en PCB est de 3,6 µg/kg de CB180 pour le point 36 (Pointe du Hourdel - sud).

La majorité des points présentent une teneur en DDD (dichlorodiphényldichloréthane) de 0,1 µg/kg. Néanmoins les sédiments des points 18 (Chenal Canche 2), 33 (Le Crotoy 2), 28 (Mollières) et 35 (St Valéry-sur-Somme) montrent des concentrations respectives de 0,3 µg/kg et 0,2 µg/kg. La plupart des échantillons ont une teneur en DDT (dichlorodiphényltrichloréthane) inférieure au seuil de détection (0,1 µg/kg). Quelques points présentent une concentration supérieure ; le point 28 (Mollières) avec 1 µg/kg), 33 (Le Crotoy 2) avec 0,2 µg/kg, 35 (St Valéry-sur-Somme) avec 0,3 µg/kg, 36 (Pointe du Hourde - sud) avec 0,4 µg/kg et 39 (Penly-Biville) avec 0,8 µg/kg. Les teneurs en SDDT sont de 0,3 µg/kg pour la majorité des échantillons de sédiment. Les points 28 (Mollières) et 33 (Le Crotoy 2) se distinguent avec des teneurs respectives de 1,8 et 0,7 µg/kg. Nous remarquons que les points 36 (Pointe de Hourdel - sud) et 39 (Penly – Biville) présentent les mêmes tendances de concentrations en CB 101, 138, 153, 156 et 180 ainsi qu'en DDT.

Les teneurs mesurées en HCH (hexachlorocyclohexane) alpha sont inférieures au seuil de détection de 0,1 µg/kg sur l'ensemble des sédiments de la zone d'étude. Les teneurs les plus élevées en lindane ont été mesurées dans les sédiments des points 21 (Chenal Canche 1), 28 (Mollières), 35 (St Valéry-sur-Somme) avec 0,2 µg/kg et du point 34 (Le Crotoy 1) avec 0,3

µg/kg. De façon générale les points 33 (Le Crotoy 2) à 36 (Pointe de Hourdel - sud) et 39 (Penly – Biville) présentent les teneurs les plus élevées en PCB et en pesticides.

Les plus fortes concentrations en HAP sont mesurées dans le sédiment du point 18 (Chenal Canche 2) avec des teneurs comprises entre 49,0 µg/kg de dibenzoanthracène et 670,0 µg/kg de fluoranthène. Le point 1 (Malo-ouest) se distingue par des teneurs élevées en HAP de 13,0 µg/kg en dibenzo(a)anthracène à 520,0 µg/kg en fluoranthène. Les points 33 (Le Crotoy 2), 34 (Le Crotoy 1) et 35 (St Valéry-sur-Somme) présentent des concentrations relativement proches en HAP. Il en est de même pour les points 22 (Pointe de la Rochelle), 23 (Authie – sud) et 24 (Château Robinet).

Une observation de l'ensemble des résultats permet de mettre en évidence une faible contamination organique pour les sédiments des points 2 (Mardyck) à 17 (Touquet - Mollières) (HAP<10,0 µg/kg), une contamination moyenne pour les points 19 (Cimetière britannique) à 27 (Pointe de la Dune Blanche) et élevée pour les points 29 (St Firmin – La Maye 1) à 36 (Pointe du Hourdel – sud) (HAP>100,0 µg/kg). Par ailleurs, les sédiments des points 5 (Cap Blanc Nez – Escalles) à 14 (Large du Touquet) présentent des valeurs beaucoup plus faibles pour les HAP (entre 1,0 et 6,0 µg/kg) que les points 1 (Malo – ouest) à 4 (Les Hemmes d'Oye) (>20,0 µg/kg).Nous observons un gradient décroissant de concentration en HAP et PCB des points 18 (Chenal Canche 2) à 20 (Etaples) en remontant le cours de la Canche. En baie d'Authie les concentrations sont beaucoup plus faibles au sein des sédiments des points 22 (Pointe de la Rochelle) à 24 (Château Robinet) que pour les points 26 (La Madelon de l'Authie) à 28 (Mollières). Nous remarquons l'existence d'un gradient décroissant de concentration en HAP et PCB. Ce gradient est orienté sud-est – nord-ouest vers l'embouchure de l'estuaire. En baie de Somme les teneurs en HAP et PCB des sédiments des points 33 (Le Crotoy 2) à 36 (Pointe du Hourdel – sud) sont plus importantes que pour les autres points du même secteur. Nous observons un gradient croissant de concentration des composés organiques vers l'intérieur de l'estuaire.

Les éléments présents en proportion importante au sein des sédiments sont indiqués sur les Figures 14, 15 et 16 pour chaque grand secteur de la zone d'étude. Il s'agit des contaminants dont la concentration est supérieure à la moyenne des concentrations mesurées au sein de tous les échantillons.

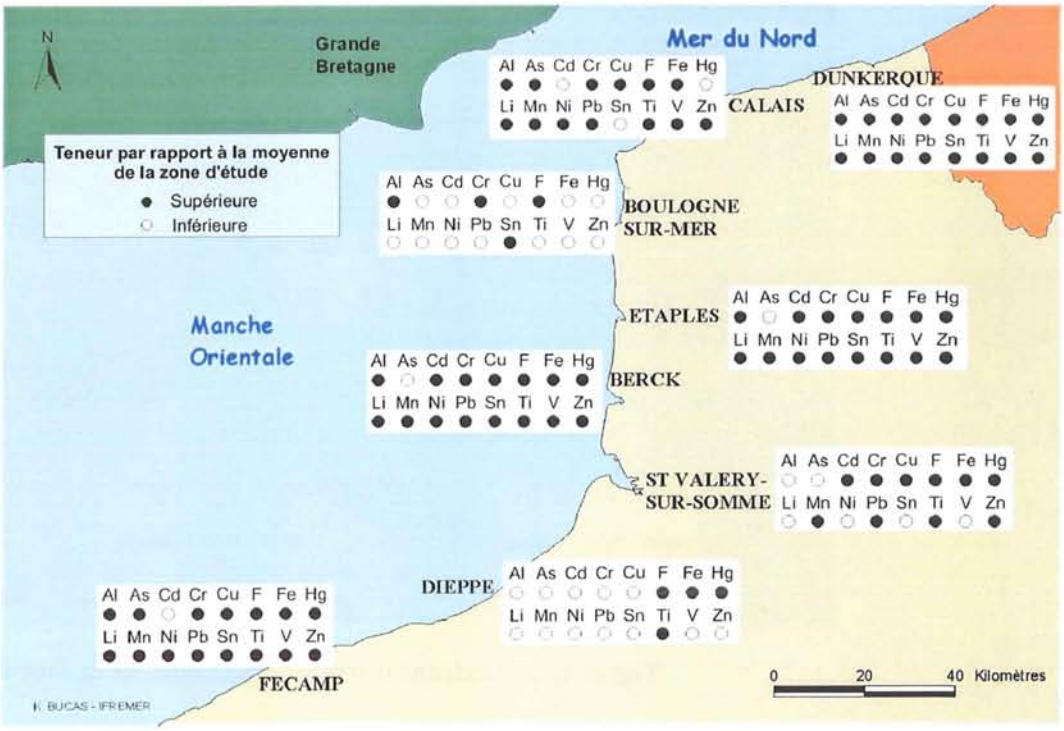


Figure 14 : Principaux éléments métalliques de la zone d'étude (Teneurs brutes)

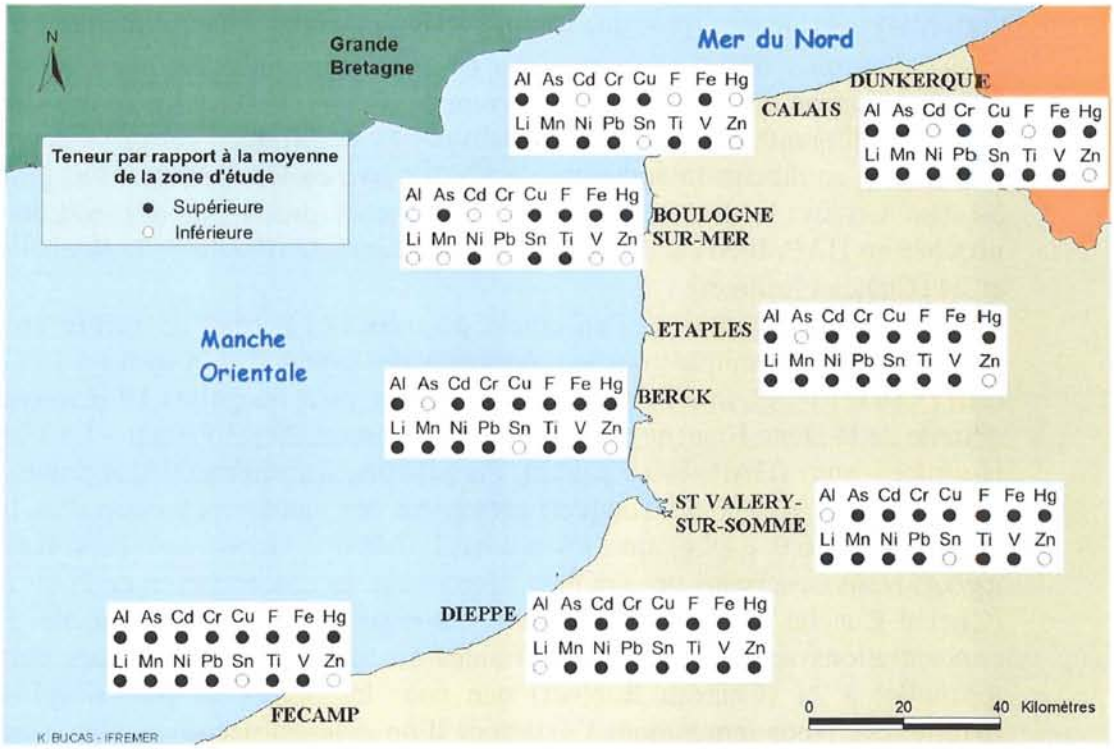


Figure 15 : Principaux éléments métalliques de la zone d'étude (Teneurs normalisées)

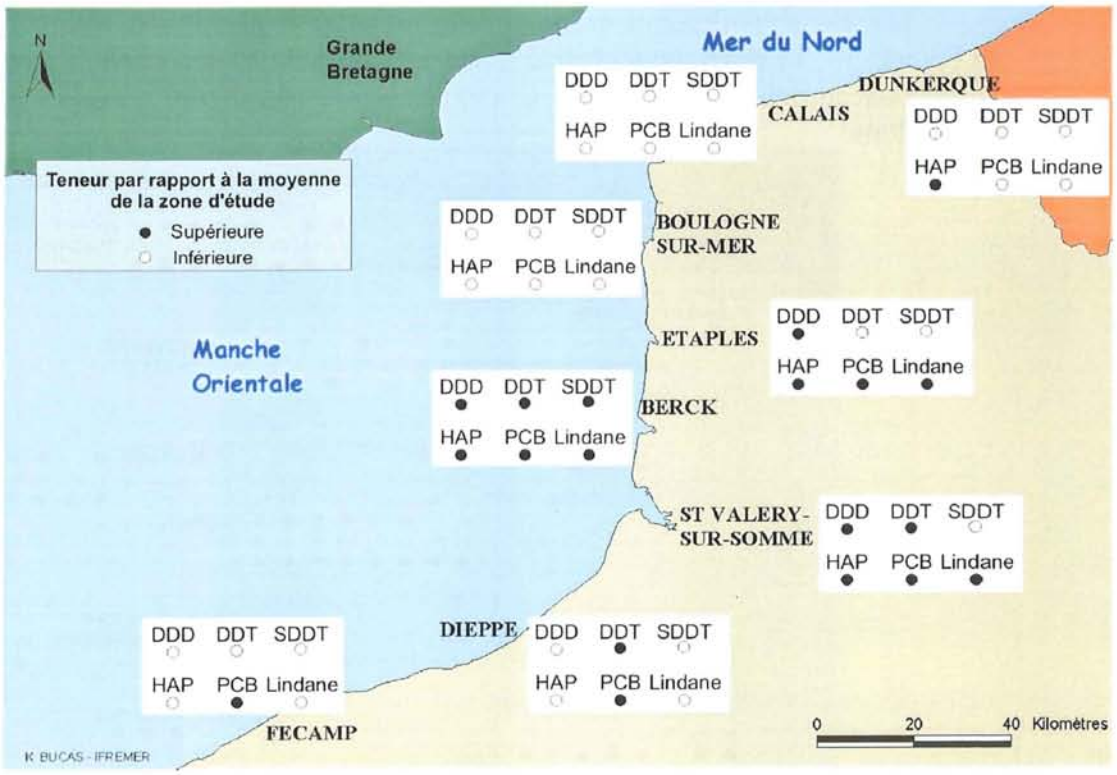


Figure 16 : Principaux composés organiques de la zone d'étude

4.4. Classifications hiérarchiques

Plusieurs classifications ont été testées à partir des indices de Sorensen, Bray-Curtis et les distances Euclidiennes. Ces classifications ont été réalisées avec d'une part, les teneurs métalliques brutes, normalisées et les FC, et d'autre part, les concentrations en composés organiques. Le meilleur regroupement s'appuyant sur les teneurs métalliques utilise les distances Euclidiennes. Par contre, le regroupement par rapport aux composés organiques est plus significatif avec l'indice de Bray-Curtis. L'analyse des teneurs organiques a été réalisée dans un premier temps sur tableau brut dans lequel certains points ne présentaient pas de résultats pour la majorité des composés. Une deuxième analyse a été effectuée en supprimant les points 16 (Pointe du Touquet nord), 37 (Criel – ouest) et 41 (Veulettes – Les Petites Dalles). Cette dernière solution a été retenue car la suppression de ces points entraîne l'apparition d'un regroupement supplémentaire.

4.4.1. Regroupements par rapport aux teneurs métalliques brutes

Les regroupements sont représentés sous forme de dendrogramme (Figure 17(a)). La distribution spatiale des groupes est visible sur les Figures 17(b) à 17 (c).

Le **Groupe n° 1** est constitué des points 4 (Les Hemmes d'Oye), 7 (Ambleteuse – La Slack), 9 (Le Portel), 10 (Cap d'Alprech), 11 (Equihen), 12 (Hardelot), 13 (Le Touquet Paris Plage), 14 (Large su Touquet), 15 (St Gabriel), 16 (Pointe du Touquet – nord), 22 (Pointe de la Rochelle), 23 (Authie sud), 24 (Château Robinet), 38 (Penly – est), 39 (Penly – Biville), 40 (Belleville-sur-mer) et 41(Veulettes – Les Petites Dalles). De manière générale, ce groupe présente des pourcentages relativement faibles en aluminium et en fraction granulométrique fine, même si nous pouvons noter que ce dernier paramètre est exclu de l'analyse hiérarchique. Les points du groupe n° 1 montre les plus faibles concentrations du secteur d'étude. Nous remarquons que ce groupe montre également les plus faibles teneurs en $CaCO_3$, élément constitutif du sédiment. Les points sont localisés essentiellement sur les côtes de la Manche près du secteur de Boulogne-sur-mer mais également en sortie d'estuaire (Canche et Authie) ainsi que sur la zone d'étude du département Haute Normandie.

Le **Groupe n° 2** est composé des points 1 (Malo – ouest), 20 (Etaples) et 8 (Digue Carnot nord). L'étain total apparaît très clairement comme l'élément structurant de ce regroupement. Les trois points présentent des valeurs supérieures ou égales à 3,0 mg/kg en étain total.

Le **Groupe n° 3** rassemble les points 2 (Mardyck), 19 (Cimetière britannique), 21 (Chenal Canche 1), 25 (Malgré le Monde), 29 (St Firmin – La Maye 1), 30 (St Firmin – La Maye 2), 31 (Le Crotoy-ouest), 32 (Le Crotoy – Aviation), 33 (Le Crotoy 2), 34 (Le Crotoy 1), 35 (St Valéry-sur-Somme), 36 (Pointe de Hourdel – sud) et 37 (Criel – ouest). Ce regroupement ne présente pas d'élément structurant proprement dit. Néanmoins nous observons des seuils de présence pour deux éléments, aux environs de 6900,0 – 13000,0 mg/kg pour le fer et de 500,0 – 1000,0 mg/kg pour le titane. Ce groupe semble être constitué à partir des points présentant des teneurs moyennes et intermédiaires en métaux. La situation de ces points est caractéristique puisqu'ils sont majoritairement situés en milieu estuarien et principalement en Baie de Somme.

Le **Groupe n° 4** se compose des points 3 (Grand Fort Philippe), 6 (Strouanne – ouest), 18 (Chenal Canche 2), 26 (La Madelon de l'Authie), 27 (Pointe de la Dune Blanche), 28 (Mollières)

et 42 (Les Petites Dalles). Les points de ce groupe se répartissent plus ou moins le long de la zone d'étude. Les points 3 et 6 se situent sur la façade Mer du nord. Les points 18, 26, 27 et 28 correspondent à des points estuariens de la baie de Canche (18) et de l'Authie. Le chrome et le lithium seraient les éléments structurants de ce regroupement. Les teneurs métalliques sont systématiquement supérieures ou égales à 29,0 mg/kg de chrome et 20,0 mg/kg de lithium. Il est important de préciser que ce groupe contient trois des quatre points considérés comme les plus contaminés en métaux. Ainsi les points 18, 28 et 42 sont déterminants quant à la constitution de ce groupe.

Les points 5 (Cap Blanc Nez – Escalles) et 17 (Touquet – Mollières) sont des **points** à caractéristiques **spécifiques.** Le point 5 (Cap Blanc Nez) entre dans la classe des points les plus contaminés et présente les teneurs les plus élevées pour certains composés. Cette observation est valable pour l'arsenic, le fer, le lithium, le nickel et le vanadium. Les sédiments du point 17 se distinguent par leur teneur en Etain total égale à 2,3 mg/kg.

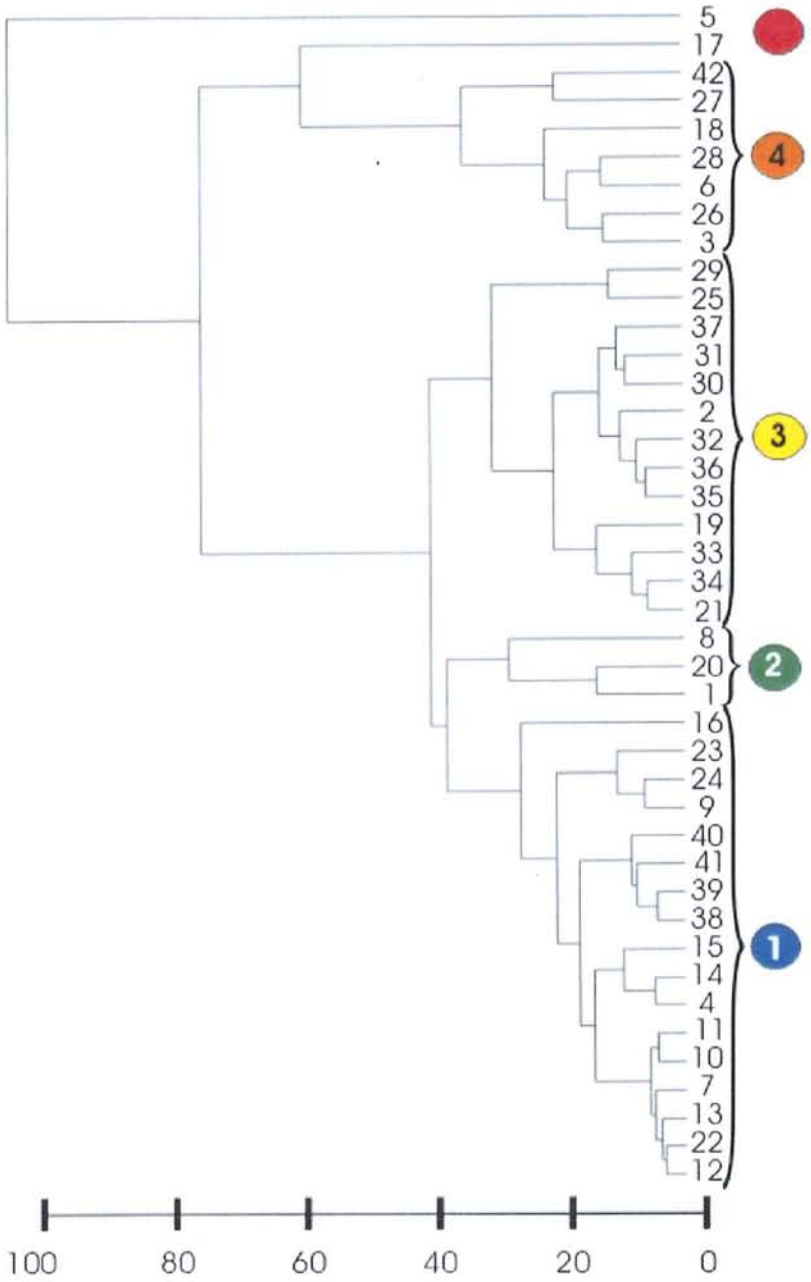


Figure 17(a) : Dendrogramme de distance quantitative (Teneurs métalliques brutes)

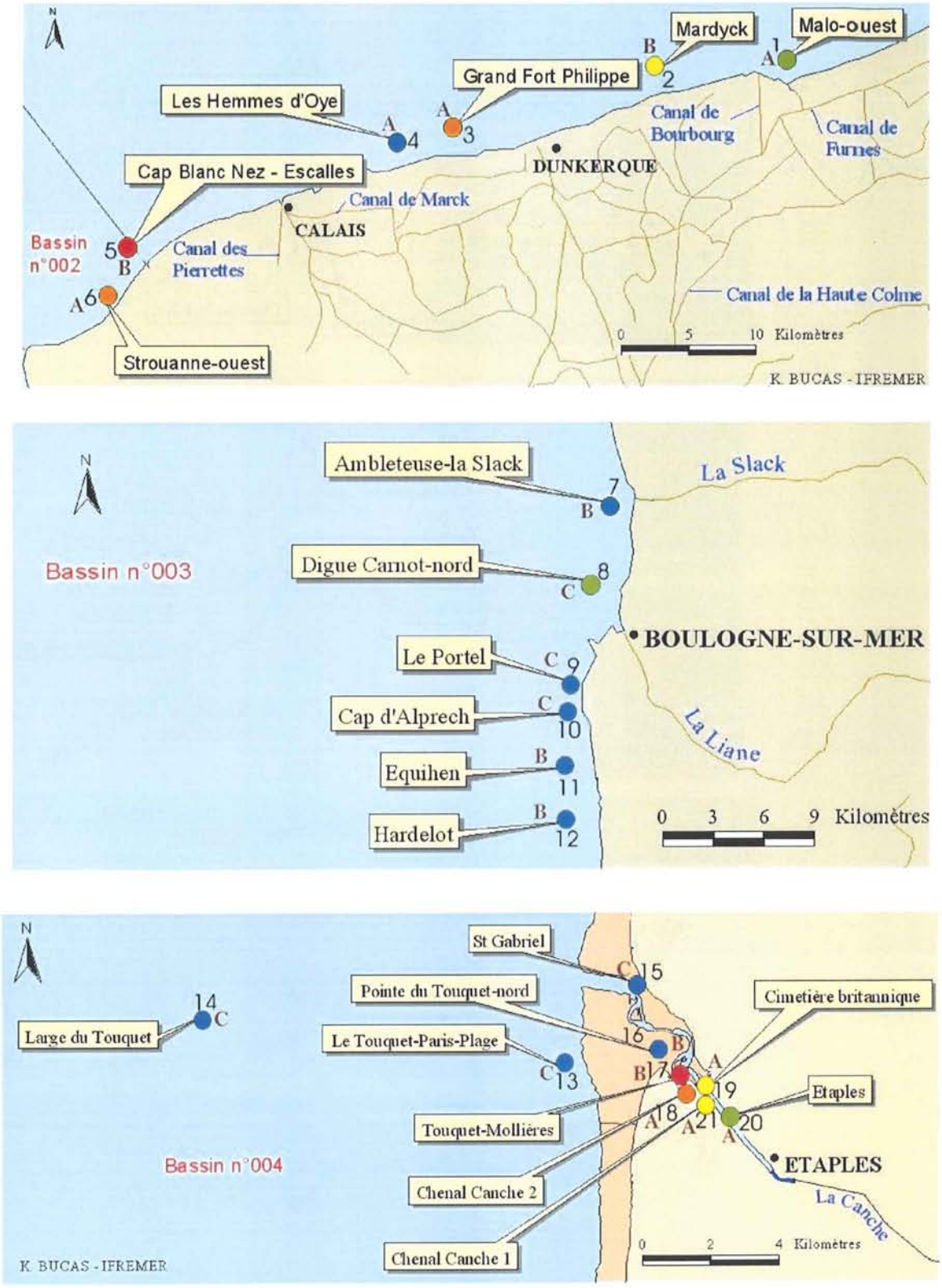


Figure 17(b) : Distribution spatiale des groupes mise en évidence par l'analyse quantitative (Teneurs métalliques brutes)

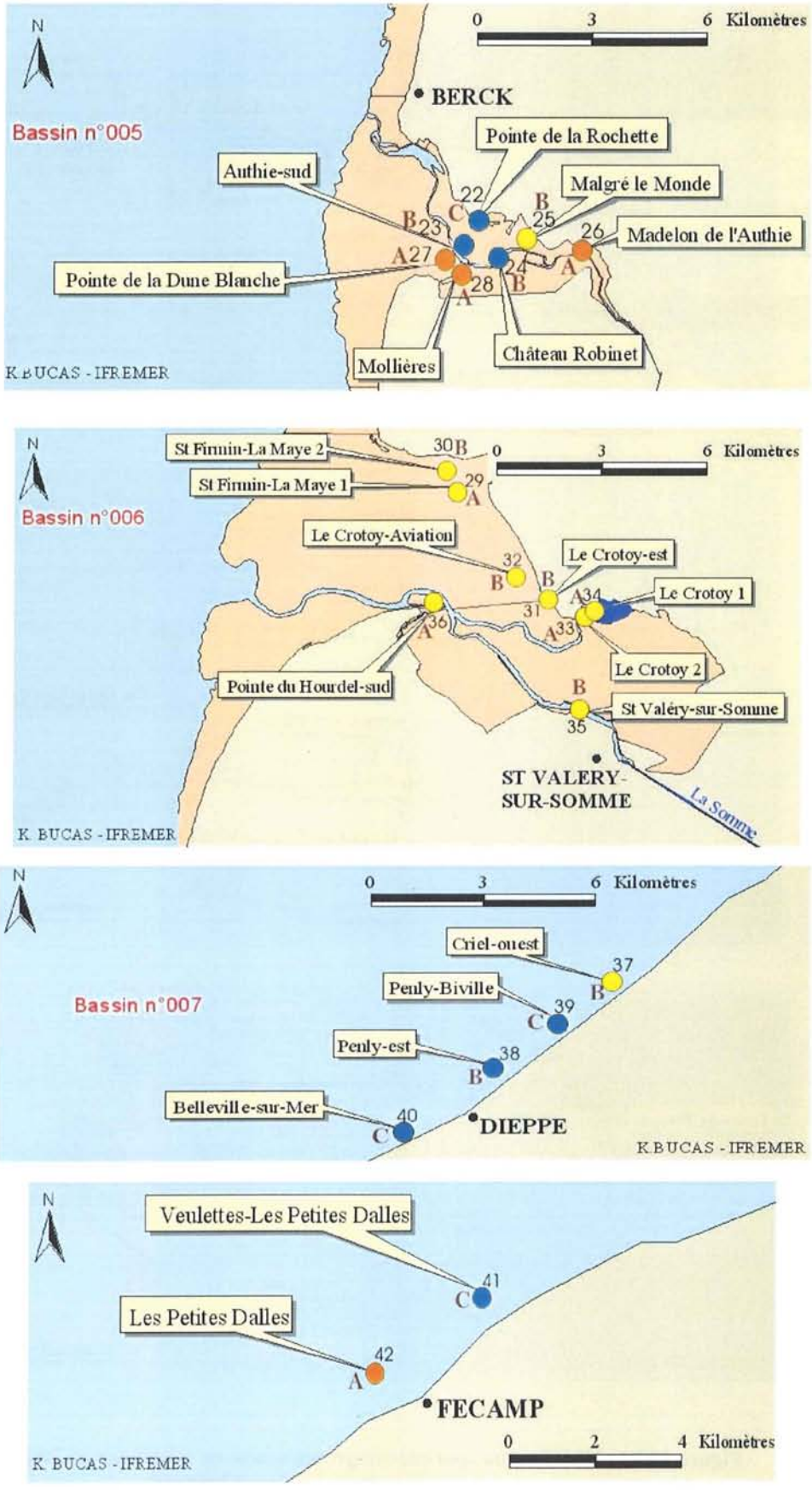


Figure 17(c) : Distribution spatiale des groupes mise en évidence par l'analyse quantitative (Teneurs métalliques brutes)

4.4.2. Regroupements par rapport aux teneurs métalliques normalisées

Les regroupements sont visualisables grâce à la représentation sous forme d'arbre hiérarchique (Figure 18(a)) et à la répartition spatiale (Figures 18(b) et 18(c)).

Le **Groupe n° 1** se compose des points 7 (Ambleteuse – La Slack), 9 (Le Portel),10 (Cap d'Alprech), 11 (Equihen), 12 (Hardelot), 13 (Le Touquet Paris Plage), 14 (Large du Touquet), 15 (St Gabriel), 21 (Chenal Canche 1), 22 (Pointe de la Rochelle), 23 (Authie sud) et 24 (Château Robinet). Ce regroupement n° 1 est caractérisé par les faibles teneurs en arsenic, cadmium, cuivre, fer, manganèse, mercure, nickel, plomb et vanadium. Les sédiments des points 15 et 23 se distinguent avec des charges respectives de 2,6 mg/kg en cadmium et 2227,8 mg/kg en Fluorures.

Le **Groupe n° 2** rassemble les points 1 (Malo – ouest), 3 (Grand Fort Philippe), 6 (Strouanne – ouest), 18 (Chenal Canche 2), 20 (Etaples), 26 (La Madelon de l'Authie), 27 (Pointe de la Dune Blanche), 28 (Mollières) et 42 (Les Petites Dalles). Ce groupe semble être construit sur les teneurs moyennes en aluminium aux environs de 1,5 – 2,4 mg/kg. La structure du regroupement est plus difficilement identifiable que pour les autres groupes en l'absence d'élément représentatif. Néanmoins, ce groupe est marqué par des concentrations moyennes en fer (14900,0 – 20800,0 mg/kg) ainsi que des teneurs relativement élevées en lithium et en manganèse. Le point 42 se distingue par une concentration élevée en lithium de 73,4 mg/kg.

Le **Groupe n° 3** est constitué des points 19 (Cimetière britannique), 24 (Château Robinet), 25 Malgré le Monde), 29 (St Firmin – La Maye 1), 30 (St Firmin – La Maye 2), 31 (Le Crotoy – ouest), 32 (Le Crotoy – Aviation), 33 (Le Crotoy 2), 34 (Le Crotoy 1), 35 (St Valéry-sur-Somme) et 36 (Pointe du Hourdel – sud). L'élément déterminant de regroupement serait l'aluminium représenté par des teneurs comprises entre 1,0 et 1,5 mg/kg de sédiments fins. Les autres contaminants ne présentent pas de particularité significative de distinction. Nous remarquons un regroupement géographique des points 29 à 36 de la Baie de Somme.

Le **Groupe n° 4** est composé des points 38 (Penly – Biville) et 40 (Belleville-sur-mer). L'élément caractéristique du groupe est le manganèse. Les points montrent les plus fortes concentrations de la zone d'étude soient respectivement 693,8 et 568,7 mg/kg. Le regroupement est également géographique puisque les deux points du secteur de Dieppe se juxtaposent.

Le **Groupe n° 5** rassemble les points 8 (Digue Carnot nord) et 17 (Touquet – Mollières). L'étain total constitue l'élément structurant du regroupement. Les concentrations mesurées dans les sédiments des points 8 et 17 sont respectivement de 33,1 et 35,0 mg/kg. Ces teneurs sont nettement supérieures aux autres dont la moyenne est inférieure à 10,0 mg/kg.

Certains **points** présentent des caractéristiques **spécifiques.** Il s'agit des points 5 (Malo – ouest), 16 (Pointe du Touquet nord), 37 (Criel – ouest), 39 (Penly – Biville) et 41 (Veulettes – Les Petites Dalles). Ces points ne sont intégrés dans aucun regroupement. Les sédiments des points 37 et 39 abritent le plus grand nombre de composés en concentration importante. Néanmoins, il existe tout de même une distinction entre les deux points. Le point 39 apparaît comme le plus contaminé. Nous pouvons noter par ailleurs la juxtaposition géographique des points. Le point 5 présente la plus forte teneur en lithium avec 21,3 mg/kg. Les sédiments de ce point abritent également des concentrations importantes en arsenic (87,7 mg/kg), en fer (45700,0

mg/kg) et en nickel (37,9 mg/kg). L'aluminium semble être l'élément déterminant de l'exclusion du point 16 des autres regroupements avec la concentration la plus élevée à 2,7 mg/kg.

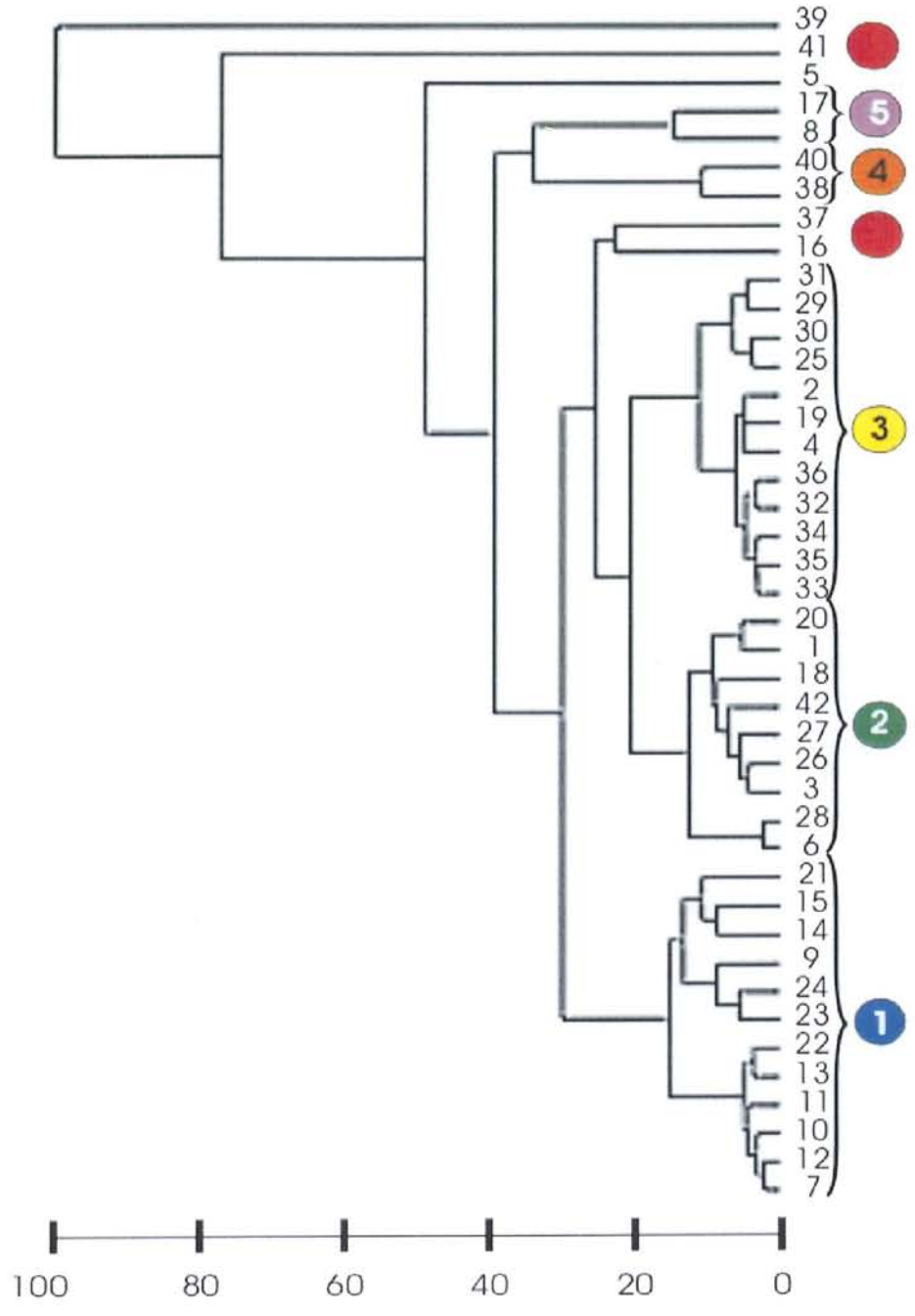


Figure 18(a) : Dendrogramme de distance quantitative (Teneurs métalliques normalisées)

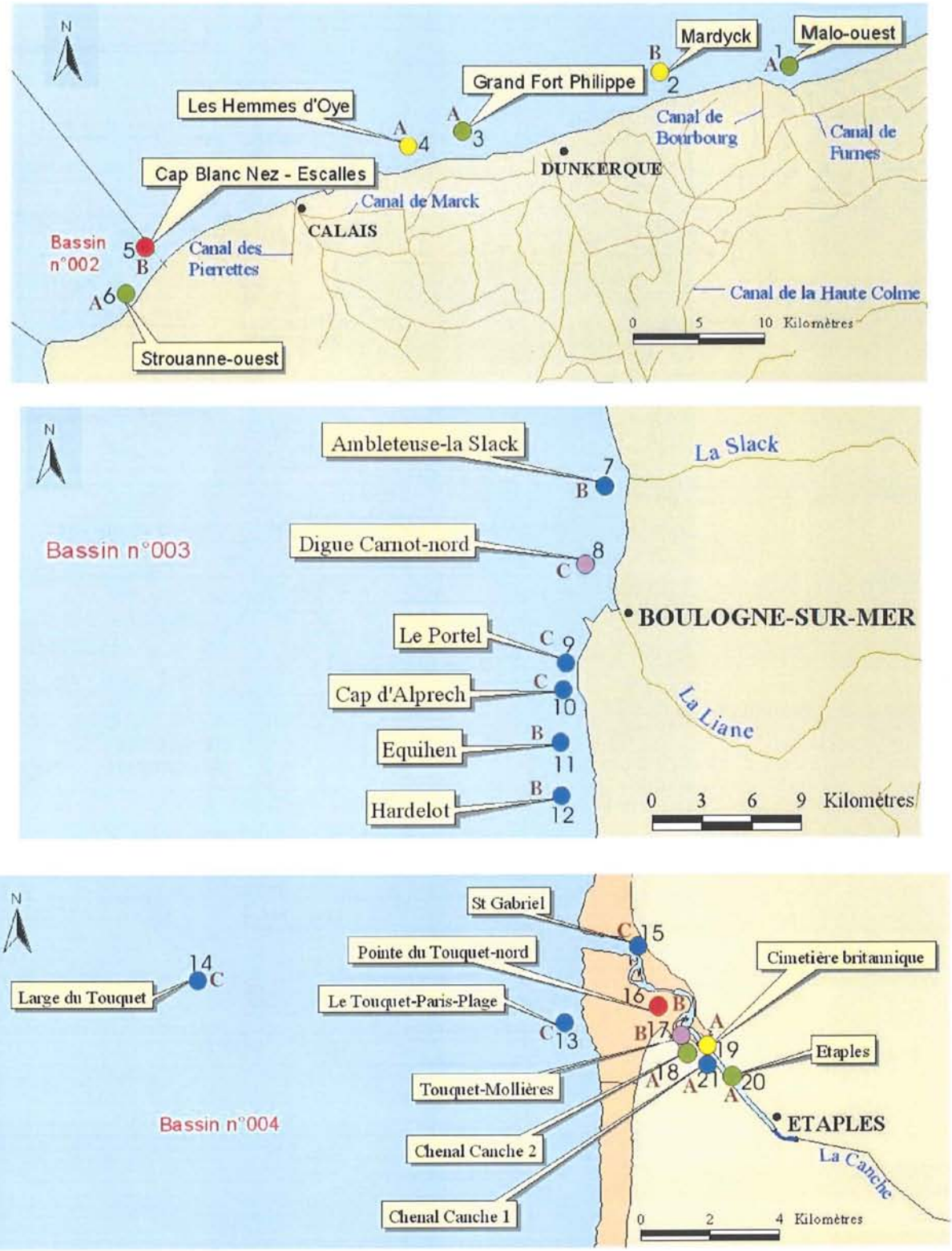


Figure 18(b) :Distribution spatiale des groupes mise en évidence par l'analyse quantitative (Teneurs métalliques normalisées)

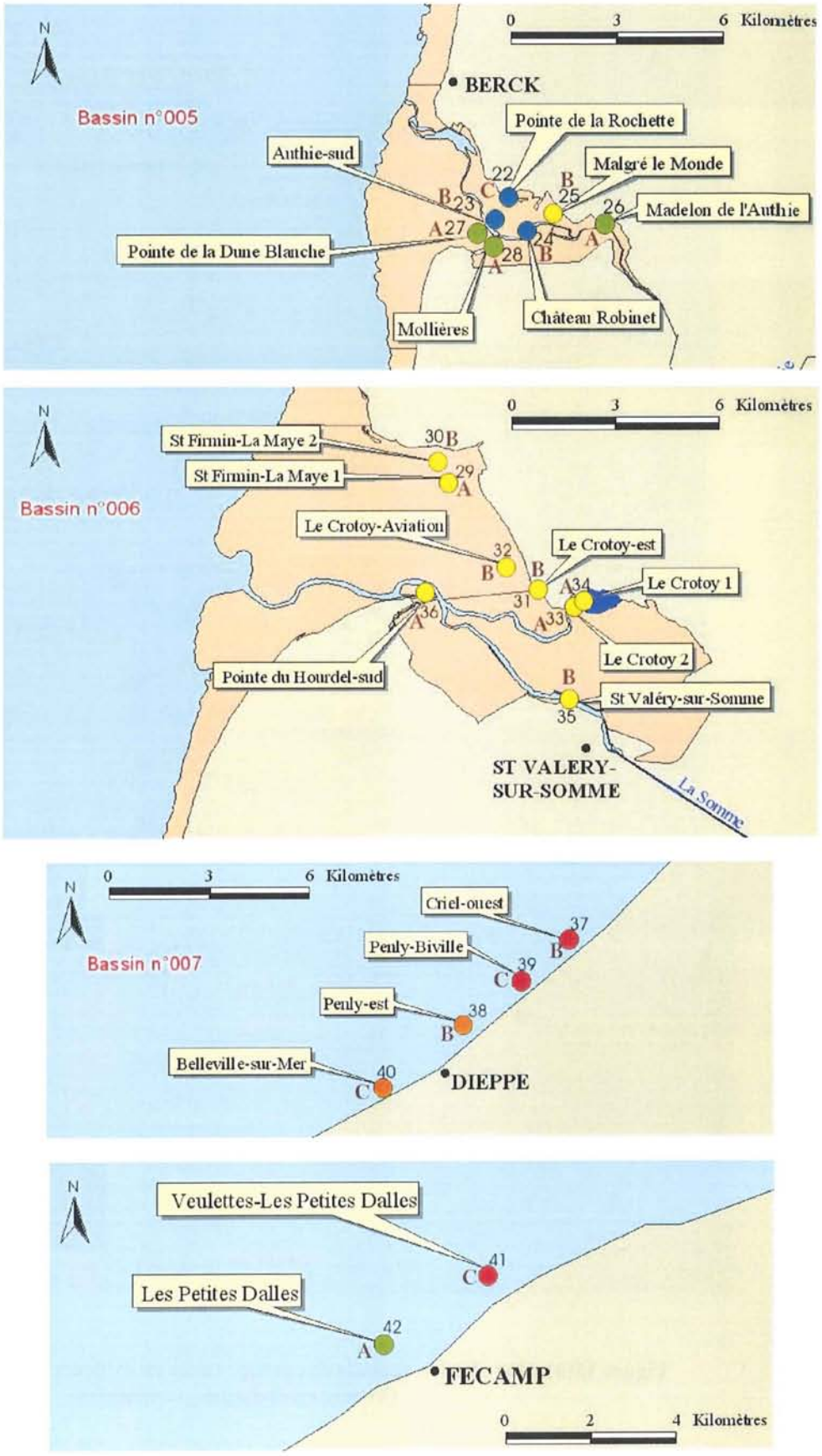


Figure 18(c) : Distribution spatiale des groupes mise en évidence par l'analyse quantitative (Teneurs métalliques normalisées)

4.4.3. Regroupements par rapport aux teneurs en composés organiques

Les regroupements sont identifiés à l'aide de la représentation en dendrogramme (Figure 19(a)). Leur distribution spatiale est présentée par les Figures 19(b) et (c).

Le **Groupe n° 1** est composé des points 8 (Digue Carnot nord), 9 (Le Portel), 10 (Cap d'Alprech), 11 (Equihen), 12 (Hardelot), 13 (Le Touquet Paris Plage) et 14 (Large du Touquet). Il rassemble les points présentant les plus faibles concentrations organiques. Ainsi les teneurs en PCB ne dépassent pas 0,1 μg/kg. Il en est de même pour les pesticides. Les concentrations en HAP de ces échantillons de sédiment sont comprises entre 1,0 et 3,0 μg/kg.
Aucun point de ce regroupement n'est situé en milieu estuarien. Ils se concentrent principalement entre Boulogne-sur-mer et Etaples.

Le **Groupe n° 2** rassemble les points 5 (Cap Blanc Nez – Escalles), 6 (Strouanne – ouest), 7 (Ambleteuse – La Slack), 22 (Pointe de la Rochelle), 23 (Authie sud), 24 (Château Robinet) et 38 (Penly – est). Les points 5, 6 et 7 sont situés au nord de la zone. Les points 22, 23 et 24 se localisent en sortie d'estuaire de l'Authie et le point 38 à proximité de Dieppe. Les éléments structurants du groupe n° 2 sont les HAP avec des teneurs moyennes relativement faibles. Nous pouvons ainsi observer des valeurs comprises pour la majorité entre 5,0 et 10,0 μg/kg. De façon générale, un regroupement par secteur géographique est réalisable et particulièrement identifiable pour les points 22, 23 et 24 qui présentent des concentrations proches en composés organiques.

Le **Groupe n° 3** est constitué des points 2 (Mardyck), 3 (Grand Fort Philippe) et 4 (Les Hemmes d'Oye) du secteur de Dunkerque ; des points 15 (St Gabriel), 17 (Touquet – Mollières) et 20 (Etaples) de la baie de Canche ; du point 25 (Malgré le Monde) en baie d'Authie ; des points 30 (St Firmin – La Maye 2), 31 (Le Crotoy – ouest) et 32 (Le Crotoy – Aviation) de la baie de Somme ; et des points 39 (Penly – Biville) et 40 (Belleville-sur-mer) du secteur de Dieppe. Le facteur déterminant à la formation de ce groupe semble être les valeurs intermédiaires en HAP. Sans être significativement structurant, le paramètre carbone organique est cependant présent au sein de ce groupe de points dans des proportions moyennes de 7,0 à 11,0 μg/kg. Au sein de ce groupe n° 3, le point 39 apparaît comme le plus contaminé en PCB et présente une concentration élevée en DDT de 0,8 μg/kg.

Le **Groupe n° 4** est composé des points 19 (Cimetière britannique) et 21 (Chenal Canche 1) de la baie de Canche, des points 26 (La Madelon de l'Authie), 27 (Pointe de la Dune Blanche) et 28 (Mollières) de la baie d'Authie, des points 29 (St Firmin – La Maye 1), 33 (Le Crotoy 2), 34 (Le Crotoy 1), 35 (St Valéry-sur-Somme) et 36 (Pointe du Hourdel sud) de la baie de Somme et du point 42 (Les Petites Dalles). Tous ces points ont une situation estuarienne. Le groupe se distingue par les teneurs les plus élevées en contaminants organiques, à savoir les PCB (intervalle de valeurs 0,2 - 0,3 μg/kg) , les pesticides (DDD, DDT et Lindane) et les HAP. Les points caractéristiques du regroupement sont le 28 (le plus contaminé) et le 42. Leurs sédiments abritent de fortes concentrations en composés organiques. La contamination en PCB particulièrement est relativement importante pour les points 33 à 36. Nous pouvons remarquer que les teneurs en carbone organique, élément constitutif du sédiment sont assez importantes pour les points 19, 21 (max. 56,0 mg/kg) et 42. Néanmoins le carbone organique n'est pas un élément déterminant pour les autres points. Il est possible de procéder à une sous-classification qui permet un regroupement des points par secteur géographique. Les sédiments des points 19 à 21 montrent des teneurs en PCB comprises entre 0,1 et 0,6 μg/kg. Les concentrations en PCB

permettent également de regrouper les points 26 à 29 (max. 2,7 μ/kg) ainsi que les points 33 à 36 (max. 3,6 μg/kg).

Le **Groupe n° 5** rassemble les points 1 (Malo – ouest) et 18 (Chenal Canche 2). Les points de ce groupe ne sont pas localisés au sein du même bassin. Les HAP construisent de façon significative ce groupe. Le point 18 est le plus contaminé et présente les teneurs les plus élevées. Il présente la concentration la plus forte en DDD (0,3 μg/kg) ainsi qu'en carbone organique (37,0 mg/kg). Le point 1 se place en seconde position de contamination en HAP avec des concentrations relativement élevées en chrysène, pyrène, fluoranthène, benzo(b)fluoranthène et benzo(k)fluoranthène. Il est cependant important de noter que les sédiments du point 18 renferme également des teneurs élevées pour certains PCB.

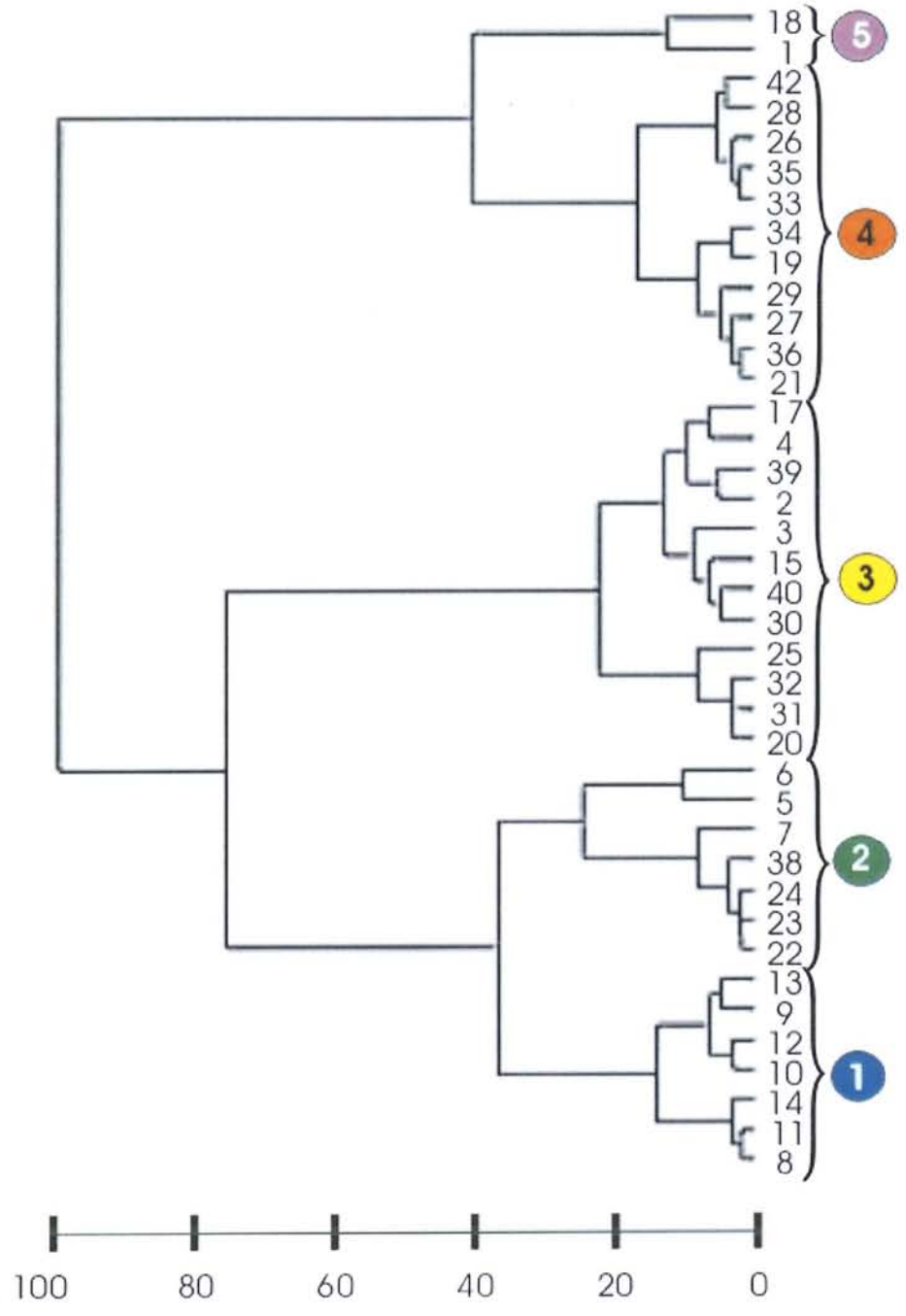


Figure 19(a) : Dendrogramme de distance quantitative (Teneurs en composés organiques)

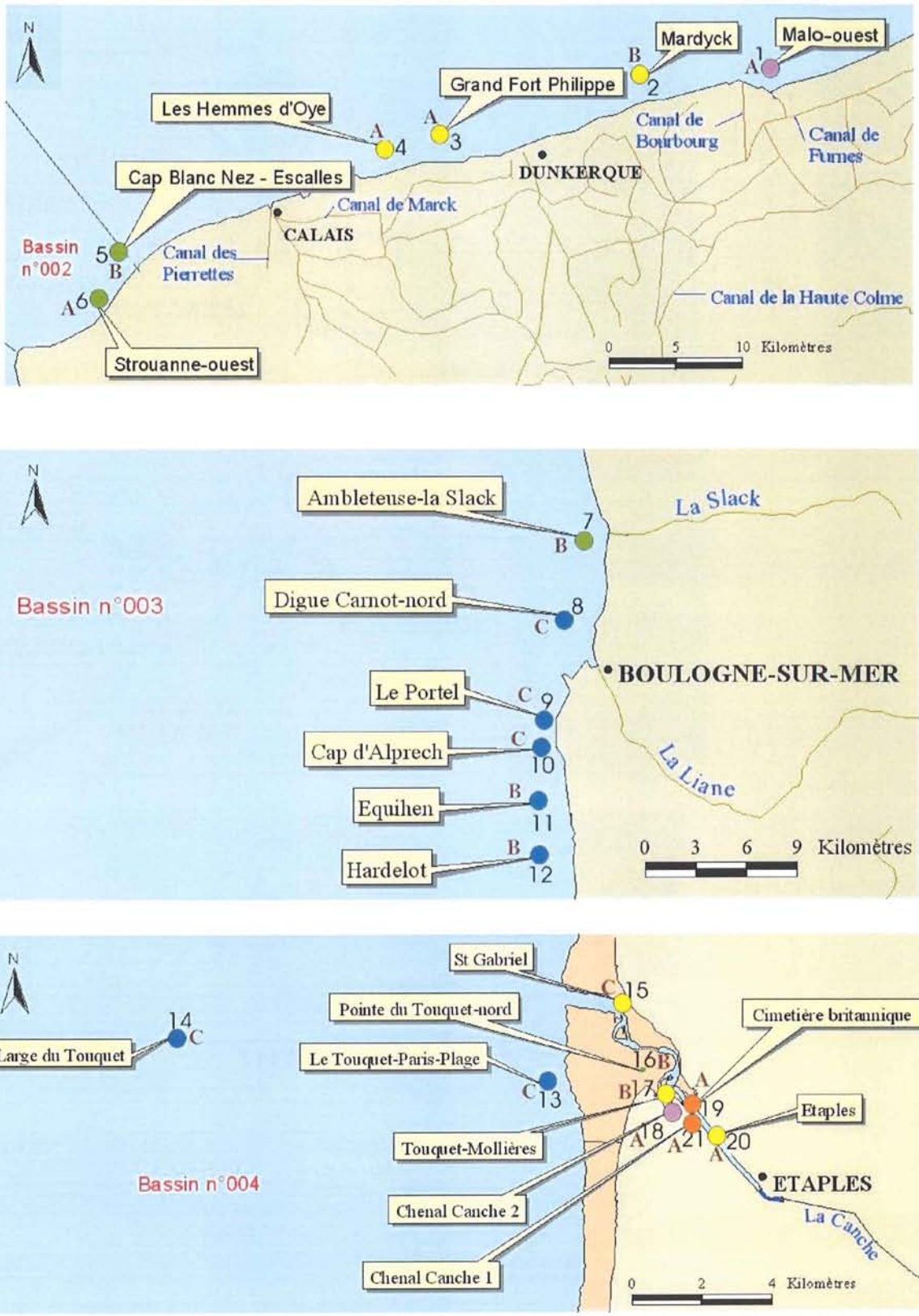


Figure 19(b) :Distribution spatiale des groupes mise en évidence par l'analyse quantitative (Teneurs en composés organiques)

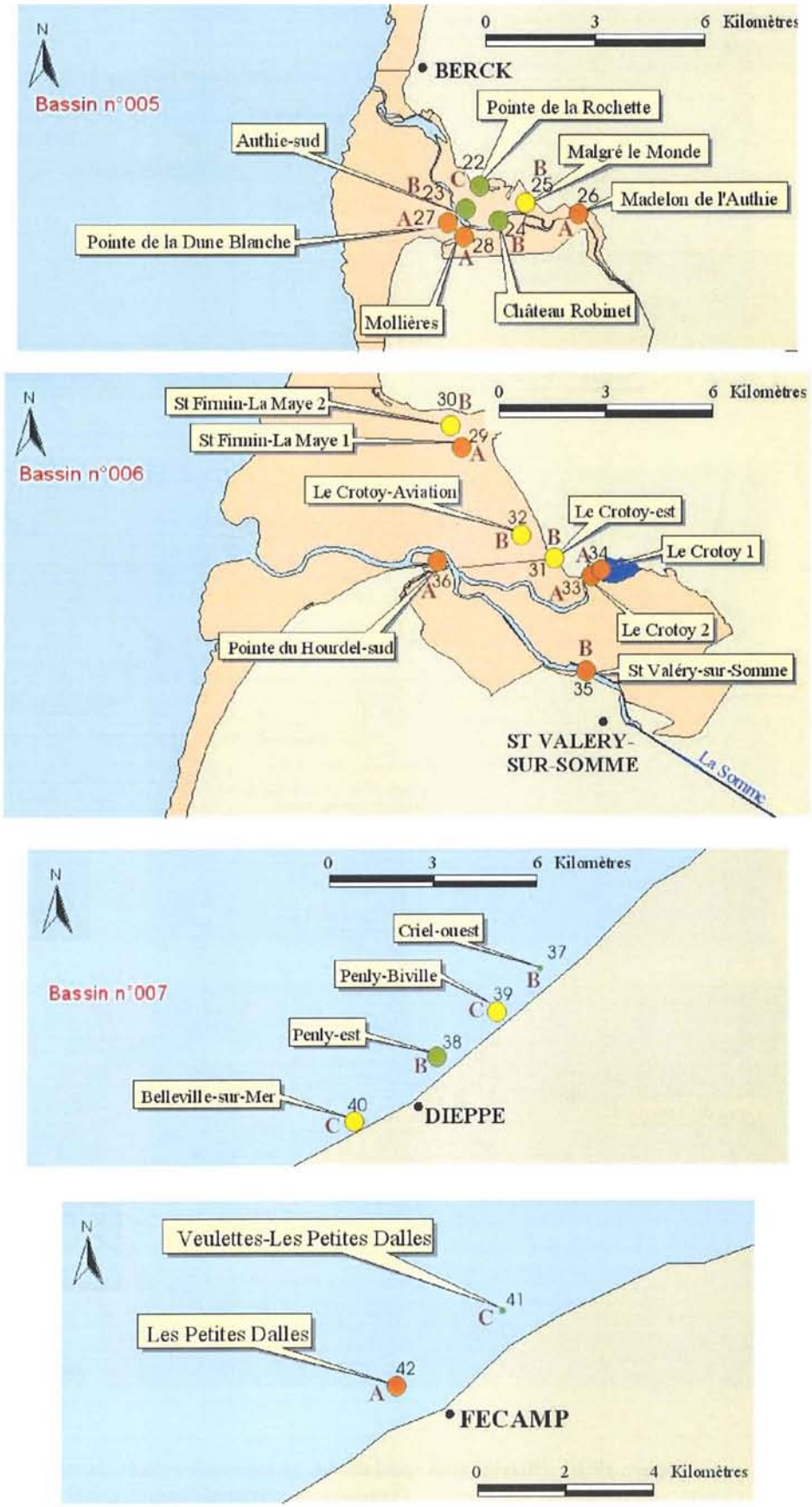


Figure 19(c) : Distribution spatiale des groupes mise en évidence par l'analyse quantitative (Teneurs en composés organiques)

4.5. Analyses statistiques par groupe de points

Les représentations graphiques sont jointes en ANNEXE K.

4.5.1. Teneurs métalliques brutes

Nous remarquons une augmentation des concentrations métalliques du groupe 1 au groupe 5, à l'exception de l'arsenic. Le groupe 5 montre le plus grand intervalle interquartile ($3^{ème}$ quartile – 1^{er} quartile) et donc la plus grande dispersion de valeurs de concentration en aluminium, arsenic, chrome, nickel, lithium, fer et en vanadium. Ce groupe présente une différence de composition par rapport aux groupes 3 et 4. Cette différence est significative pour les teneurs en manganèse, en titane et en carbonate de calcium (appréciation par le niveau de recouvrement des boîtes de dispersion). Le groupe 2 se distingue des autres groupes par les concentrations les plus élevées en étain total. Ce groupe montre les intervalles interquartiles les plus importants et donc la plus grande dispersion de valeurs pour les teneurs en chrome, en manganèse et en carbonate de calcium. Des différences de composition sont également marquées entre les groupes 1 et 4 qui présentent respectivement de faibles et de fortes valeurs médianes de concentrations en élément métalliques. Cette observation n'est pas vérifiée pour l'étain, le mercure, le plomb et le cadmium. Il n'y a pas de différence significative de composition entre les groupes qui présentent des valeurs médianes proches pour les teneurs en arsenic, cuivre, cadmium, plomb, mercure, fer et zinc.

4.5.2. Teneurs métalliques normalisées

Les sédiments des groupes 1, 2, 3 et 6 présentent des compositions proches en fer, cuivre, chrome étain, titane, mercure et nickel puisque les concentrations présentent des valeurs médianes proches. Nous remarquons pour ces mêmes éléments une différence de composition des groupes 4 et 5, avec les teneurs les plus faibles. La boîte de dispersion du groupe 6 possède l'intervalle interquartile le plus important et donc la plus grande variabilité de valeurs de concentrations pour la majorité des éléments.

Les sédiments des différents groupes ne présentent pas de variabilité de composition en zinc. Par ailleurs, nous observons une légère augmentation des teneurs en fluorures du groupe 1 à 6. L'étendue (valeur maximum – valeur minimum) est relativement importante pour les groupes 1, 2, 3 et 6, de même que l'intervalle interquartile pour l'ensemble des groupes.

D'un point de vue spécifique, le groupe 4 se distingue très clairement des autres groupes par ses faibles teneurs en arsenic, aluminium et titane. La boîte de dispersion du groupe 4 présente un faible intervalle interquartile des teneurs en plomb. Ce groupe se distingue des groupes 1, 3 et 5 par des teneurs élevées. Les groupes 1 et 5 sont situés sur la même médiane. Ils sont de même composition et présentent les plus faibles teneurs en plomb. Les groupes 2 et 6 peuvent également être rattachés pour des concentrations relativement élevées.

Les sédiments des groupes 1, 2, 3, 5 et 6 ont la même composition en mercure avec des valeurs médianes relativement élevées alors que le groupe 4 se distingue par de plus faibles teneurs. Les groupes 2 et 3 présentent des intervalles interquartiles très importants de composition en lithium. Enfin le groupe 4 se distingue également des autres par les teneurs les plus élevées en manganèse.

Nous pouvons enfin noter que l'isolement des points 5 (Cap Blanc Nez – Escalles), 39 (Penly – Biville) et 41 (Veulettes – Les Petites Dalles) pour l'ensemble des éléments coïncide avec le résultat de la classification hiérarchique. Le point 5 se détache de la boîte de dispersion

du groupe 6 par de faibles teneurs en cadmium et par la teneur la plus élevée en lithium. Les points 39 et 41 se détachent respectivement par le teneurs les plus élevées et les teneurs les plus faibles en fer, cuivre, chrome, cadmium, zinc, vanadium, titane, nickel et mercure.

4.5.3. Teneurs en composés organiques

Le groupe 5 présente l'intervalle interquartile le plus important pour tous les composés organiques à l'exception du benzo(a)anthracène. Le groupe 4 se distingue des groupes 1, 2 et 3 avec des concentrations plus élevées en composés organiques, en excluant le benzo(g,h,i)pérylène, le benzo(a)pyrène, l'indeno(1,2,3-cd)pyrène et le benzo(a)anthracène. Ce groupe montre également la plus grande étendue en teneurs organiques. Les groupes 1, 2 et 3 se situent sur la même médiane et présentent donc la même composition pour la majorité des composés organiques. Ils se distinguent des groupes 4 et 5 qui présentent les plus fortes teneurs. La composition des groupes en benzo(a)anthracène, fluoranthène et pyrène est identique. Le groupe 5 s'y détache très clairement avec des teneurs très élevées pour les mêmes éléments.

La boîte de dispersion du groupe 4 présente l'intervalle interquartile le plus important et donc la plus grande dispersion de valeurs pour les teneurs en PCB. Cette observation n'est pas valable pour le CB 35 et le CB 105. La composition du groupe 4 en CB 153, CB 101 et CB138 est différente des groupes 1, 2 et 3.

Nous remarquons que les points isolés des boîtes de teneurs organiques sont des points spécifiques de l'analyse multivariée.

La composition du groupe 5 en carbone organique est différente de celle des groupes 1, 2 et 3. Le groupe 4 présente un intervalle interquartile important pour ce même paramètre.

Les sédiments ne présentent pas de variabilité de composition en HCH α entre les groupes. Le groupe 4 montre le plus grand intervalle interquartile et donc une forte variabilité de composition des teneurs en lindane (HCH γ), en DDT et en SDDT. Mais aucune différence de composition entre les groupes n'est observable pour les valeurs en pesticides, toutes situées sur la même médiane.

Les points 39 (Penly – Biville) et 41 (Veulettes – Les Petites Dalles) sont isolés des boîtes de dispersion de teneurs organiques. Ils présentent respectivement les plus fortes et les plus faibles teneurs organiques. Il s'agit de points spécifiques de la classification hiérarchique.

5. Discussion

5.1. Approche méthodologique

5.1.1. Comparaison entre les teneurs brutes et les teneurs normalisées métalliques

La comparaison entre les teneurs brutes et les teneurs normalisées métalliques, témoigne de l'importance de la normalisation des concentrations dans la fraction sédimentaire fine (ANNEXES D, G).

Quatre points entrent dans la classe de contamination élevée lorsque nous considérons les résultats en teneurs métalliques brutes. Il s'agit des points 5 (Cap Blanc Nez – Escalles), 28 (Molières), 18 (Chenal Canche 2) et 42 (Les Petites Dalles), cités par ordre de contamination croissante. Les sédiments de ces points abritent un grand nombre de composés en concentration importante par rapport aux autres points de la zone d'étude. Pour chacun de ces points, le pourcentage en fraction fine est très élevé. Cette observation n'est pas valable pour le point 5 (Cap Blanc Nez – Escalles) même si le pourcentage est supérieur à 10. Ainsi les proportions respectives sont 61,4 %, 71,5 % et 47,9 % pour les points 18 (Chenal Canche 2), 28 (Mollières), 42 (Les Petites Dalles) et 11,2 % pour le point 5. Nous remarquons également que les teneurs en aluminium sont élevées (> 20000,0 mg/kg).

Les résultats en teneurs métalliques normalisées font aboutir l'analyse à une toute autre interprétation. Trois points se distinguent par une contamination métallique élevée. Nous retrouvons le point 5 (Cap Blanc Nez – Escalles) mais pas les points 28 (Mollières), 18 (Chenal Canche 2) et 42 (Les Petites Dalles). Les deux points qui émergent après cette normalisation sont les points 37 (Criel-ouest) et 39 (Penly-Biville). Les sédiments des points 18, 28 et 42 présentent des teneurs métalliques importantes mais sont éliminés du rang de contamination le plus élevé. L'explication semble provenir des proportions en granulométrie fine et en aluminium. La fraction fine, et plus particulièrement la structure en alumino-silicates est considérée comme la principale phase d'adsorption des polluants. Lorsque les teneurs non normalisées sont exploitées, il en ressort une association entre les pourcentages importants en granulométrie fine et les teneurs élevées en contaminants. Cependant la contamination révélée suite à la normalisation est tout autre. Cette méthode met en évidence deux points (27 et 39) très contaminés pour des moyens voire faibles pourcentages en granulométrie fine. Les sédiments des points 27 (Pointe de la Dune Blanche) et 39 (Penly – Biville) ont donc un niveau de contamination d'autant plus fort.

Par ailleurs le point 1 (Malo-ouest) se distingue par des teneurs brutes élevées en mercure (0,1 mg/kg) et en étain (4,5 mg/kg). Les sédiments de ce point conservent leur niveau de contamination avec des proportions normalisées non négligeables pour les mêmes éléments. Il en est de même pour les points 8 (Digue Carnot nord) et 17 (Touquet – Mollières) concernant l'étain.

Par contre d'autres points émergent de la normalisation et présentent des teneurs parmi les plus élevées. Les sédiments du point 15 (St Gabriel) sont chargés en cadmium (2,6 mg/kg). Les points 38 (Penly – est) et 40 (Belleville-sur-mer) présentent les teneurs les plus élevées en manganèse avec des concentrations respectives de 693,8 et 568,7 mg/kg. Les sédiments du point 41 (Veulettes – Les Petites Dalles) se distinguent par les plus fortes concentrations en plomb et en fluorures. Ce dernier élément est également présent en concentration importante dans les sédiments du point 23 (Authie sud).

Le point 5 présente la particularité de conserver les mêmes concentrations pour certains éléments après normalisation. Cette remarque est valable pour tous les composés métalliques à l'exception du lithium et du zinc, pour lesquels les proportions sont amplifiées après normalisation.

La normalisation apparaît comme primordiale pour le traitement des teneurs métalliques dans le sédiment. Néanmoins, il faut relativiser et s'interroger sur la méthode de normalisation employée. La juxtaposition des teneurs métalliques brutes et des teneurs organiques montre les mêmes tendances. Les sédiments des points 18 (Chenal Canche 2), 28 (Mollières) et 42 (Les Petites Dalles) sont les plus contaminés en éléments métalliques. Un regroupement de ces points est donc réalisable par rapport à leur composition en métaux. Ce qui est d'ailleurs confirmé par les classifications hiérarchiques des métaux (et des organiques).

Deux remarques concernant cette étude peuvent donc être formulées. Une normalisation des teneurs organiques aurait peut-être été nécessaire afin de tester le regroupement de points sur la totalité des paramètres (métalliques et organiques). Mais les références scientifiques sur les éléments normalisateurs organiques sont rares. Certaines s'appuient sur la normalisation par rapport au carbone organique. L'autre remarque ne remet pas en cause le principe de normalisation à l'aluminium très utilisé et repose sur le choix de la méthode employée. Ainsi le procédé de cette étude s'appuie sur des estimations de valeurs de base et de référence par calcul et non sur des données mesurées.

5.1.2. Comparaison des classifications hiérarchiques basées sur les teneurs métalliques brutes et normalisées

Certains groupes, de part leur composition et leurs éléments structurants, sont comparables dans chaque classification. Il en est ainsi pour les deux groupes n° 3 des classifications brutes et normalisées. Ils rassemblent tous deux les points de la Baie de Somme autour de valeurs intermédiaires en contaminants.

Une correspondance peut également être effectuée entre les groupes n° 5 normalisé et n° 2 brut pour les points 8 (Digue Carnot nord) et 17 (Touquet – Mollières) regroupés en fonction de l'étain. Le point 5 (Cap Blanc Nez – Escalles) est un point spécifique qui présente des teneurs élevées en nickel, lithium, fer et arsenic. Les deux groupes n° 1 (normalisé et brut) sont de composition similaire pour les points numérotés de 7 (Ambleteuse – La Slack) à 27 (Pointe de la Dune Blanche) pour des teneurs faibles. Le point 42 (Les Petites Dalles) conserve sa distinction pour le lithium (groupes n° 3 brut et n° 2 normalisé).

Les différences observées concernent des points à caractéristiques spécifiques. C'est le cas du point 4 (Les Hemmes d'Oye) qui passe du groupe n° 1 brut des teneurs faibles au groupe n° 3 normalisé avec des valeurs intermédiaires. Les points 38 (Penly – est) et 40 (Belleville-sur-mer) classés dans le groupe n° 1 brut passent au groupe n° 4 normalisé caractérisé par l'étain. Par contre les points 1 (Malo – ouest) et 20 (Etaples) passent du groupe n° 2 brut distingué par l'étain au groupe n° 2 normalisé des teneurs moyennes. Une différence est observable pour les points 35 (St Valéry-sur-Somme) et 41 (Veulettes – Les Petites Dalles) dans le groupe n° 1 brut des valeurs faibles qui deviennent des points à caractéristiques spécifiques en normalisé.

5.2. Origines de contamination

5.2.1. Valeurs de référence

Dans le cadre de la procédure liée à la Directive Cadre Eau (DCE), aucun site de référence n'a été déterminé sur les districts du bassin Artois-Picardie aussi bien au niveau des eaux continentales qu'à celui des eaux de surface côtières et de transition.

A ce jour, il n'existe pas de références en teneurs métalliques et organiques pour les sédiments côtiers de l'interface Manche – Mer du nord. Les seules valeurs seuils existantes sont données par la convention OSPAR et concerne la Mer du nord dans son ensemble. Source (14)

Il existe des valeurs de référence au sein du Bassin Artois – Picardie au-delà desquelles on considère qu'il y a contamination significative. Ces valeurs constituent le « bruit de fond » des concentrations métalliques des sédiments des cours d'eau, notamment en l'absence d'apport anthropique. Mais la dynamique des sédiments côtiers est différente de celle des sédiments des rivières. Ces valeurs ne peuvent donc pas être considérées pour cette étude. Source (15)

Des critères écotoxicologiques ont été définis par la convention OSPAR pour six éléments métalliques. Ils correspondent à des seuils de concentrations à partir desquels une surveillance devient nécessaire. Source (14)

Tableau 7 : Critères d'évaluation écotoxicologiques applicables aux métaux traces, aux PCB, aux HAP et à certains pesticides organochlorés Source (14)

Eléments	Seuils
Métaux	**en mg/kg de sédiments secs**
Arsenic	1 – 10
Cadmium	0,1 – 1
Chrome	10 – 100
Mercure	0,05 – 0,5
Nickel	5 – 50
Plomb	5 - 50
Zinc	50 - 500

Eléments	Seuils
Organiques	**en µg/kg de sédiments secs**
Lindane	0,05 - 0,5
Fluoranthène	0,5 - 5
Pyrène	0,05 - 0,5
Benzo(a)anthracène	0,1 - 1
Chrysène	0,1 - 1
Benzo(a)pyrène	0,1 - 1
ΣPCB	0,001 – 0,01

Par ailleurs un référentiel de qualité des sédiments portuaires a été établi par les ministères chargés de la Mer et de l'Environnement. Ce référentiel en vigueur depuis le 14 juin 2000, ne concerne actuellement que huit métaux lourds, les PCB et leurs congénères et comportent deux niveaux ; le niveau N1 au-dessous duquel l'immersion des produits de dragage peut être envisagée sans étude particulière et au-dessus duquel une étude plus approfondie pourrait être envisagée ; le niveau N2 au-dessus duquel l'immersion des produits de dragage pourrait être interdite sauf si elle constitue la solution la moins dommageable pour l'environnement. Ces niveaux sont présentés dans le tableau 8 et sont exprimés en mg/kg de sédiments secs analysés sur la fraction inférieure à 2 mm. Sources (16) (17)

Tableau 8 : Référentiel de qualité des sédiments portuaires marins et estuariens

Paramètres	Niveau N1	Niveau N2	Paramètres	Niveau N1	Niveau N2
ARSENIC	25	50	PCB TOTAUX	0,5	1
CADMIUM	1,2	204	CB 28	0,025	0,05
CHROME	90	180	CB 52	0,025	0,05
CUIVRE	45	90	CB 101	0,05	0,1
MERCURE	0,4	0,8	CB 118	0,025	0,05
NICKEL	37	74	CB 138	0,05	0,1
PLOMB	100	200	CB 153	0,05	0,1
ZINC	276	552	CB 180	0,025	0,05

En comparant avec les teneurs mesurées dans les sédiments côtiers de notre étude, nous remarquons qu'elles sont inférieures au premier niveau du référentiel de qualité des produits dragués destinés à l'immersion.

5.2.2. Masses d'eau DCE

Les CWSF (Coastal Water Scaldit France) correspondent aux masses d'eau côtières alors que les TWSF (Transitional Water Scaldit France) correspondent aux masses d'eau de transition (Figure 21). Le découpage des eaux côtières et de transition a été réalisé par l'IFREMER suivant un système de la Directive Cadre (système de typologie dit « B »). Les critères de découpage des masses d'eau reposent sur les caractéristiques naturelles que sont le renouvellement des eaux (courants résiduels), le mélange des eaux (indice de stratification), l'exposition à la houle, l'influence des grands panaches fluviaux, la nature du substrat. Source (18)

Les masses d'eau existantes sont les suivantes :

CWSF1 : frontière belge – jetée de Malo,
CWSF2 : jetée de Malo – Cap Gris Nez,
CWSF3 : Sud du Cap Gris Nez – embouchure de la Slack,
CWSF4 : Slack – Warenne,
CWSF5 : Warenne – falaise morte d'Ault,
TWSFDK : port de Dunkerque,
TWSFCL : port de Calais,
TWSFBL : port de Boulogne-sur-mer,
TWSF1 : estuaire de la Somme.

La situation des points de prélèvement au sein des masses d'eau DCE est présenté dans le tableau de la page suivante (Tableau 9).

Tableau 9 : Situation des points de prélèvement au sein des masses d'eau DCE

Masses d'eau	Stations	Sites	Bassins
CWSF1 frontière belge – jetée de Malo	**1** Malo ouest	**01**	**001**
CWSF2 jetée de Malo – Cap Gris Nez	**2** Mardyck **3** Grand Fort Philippe **4** LesHemmes d'Oye **5** Cap Blanc Nez Escalles **6** Strouanne - ouest		**002**
CWSF4 Slack – Warenne	**7** Ambleteuse - La Slack **9** Le Portel	**02**	**003**
TWSFBL	**8** Digue Carnot nord		
CWSF5 Warenne – falaise morte d'Ault	**10** Cap d'Alprech **11** Equihen **12** Hardelot **14** Large du Touquet **13** Le Touquet- Paris-Plage **15** Saint-Gabriel **16** Pointe du Touquet – nord **17** Touquet – Mollières **18** Chenal Canche 2		**004**
	19 Cimetière britannique **20** Etaples **21** Chenal Canche 1 **22** Pointe de La Rochelle **23** Authie sud – sédiment **24** Château Robinet **25** Malgré le Monde **26** La Madelon de l'Authie **27** Pointe de la Dune Blanche **28** Mollières	**03**	**005**
TWSF1	**29** St. Firmin - la Maye 1 **30** St. Firmin - La Maye 2 **31** Le Crotoy ouest **32** Le Crotoy - Aviation **33** Le Crotoy 2 **34** Le Crotoy 1 **35** St. Valéry-sur-Somme **36** Pointe du Hourdel – sud		**006**
	37 Criel - ouest **38** Penly - est **39** Penly - Biville	**04**	**007**
	41 Veulettes - Les Petites Dalles **42** Les Petites Dalles		**009**

Les rejets industriels peuvent s'effectuer directement en mer ou par l'intermédiaire de voies d'eau naturelles ou artificielles. La figure suivante schématise le raccordement aux masses d'eaux littorales des principaux écoulements naturels chargés en contaminants. Source (19)

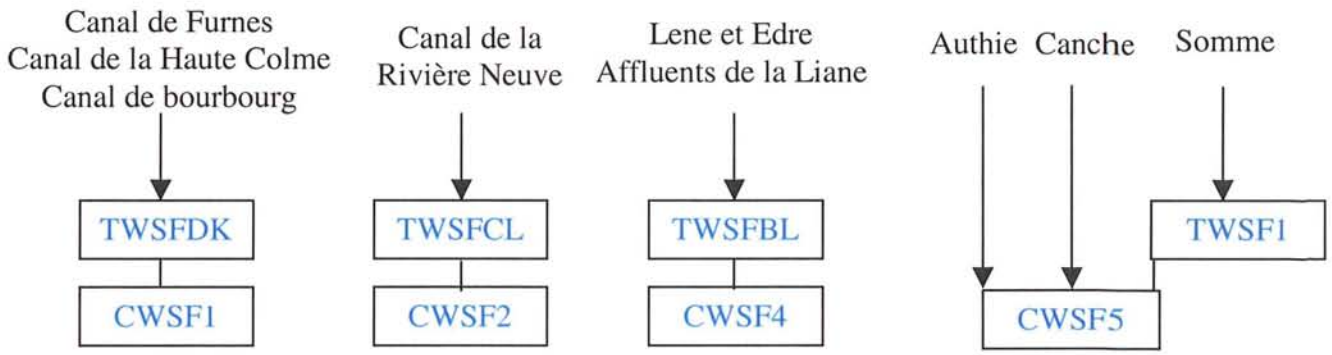


Figure 20 : Raccordement des voies d'eau réceptrices de rejets industriels aux masses d'eau DCE
Source (19)

Les informations recueillies sur les rejets industriels ne concernent que la région Nord - Pas-de-Calais. Des données concernant les activités anthropiques des départements de Picardie et de Haute Normandie, ainsi que la zone de clapage du port de Dunkerque sont en cours de transmission afin de couvrir l'ensemble de la zone d'étude.

Les données recueillies concernent la période 1990 - 1998 car les sédiments peuvent conserver des traces de contamination sur de longues années. Les activités et la composition des rejets de chaque structure industrielle sont détaillés dans en annexe (ANNEXE M).

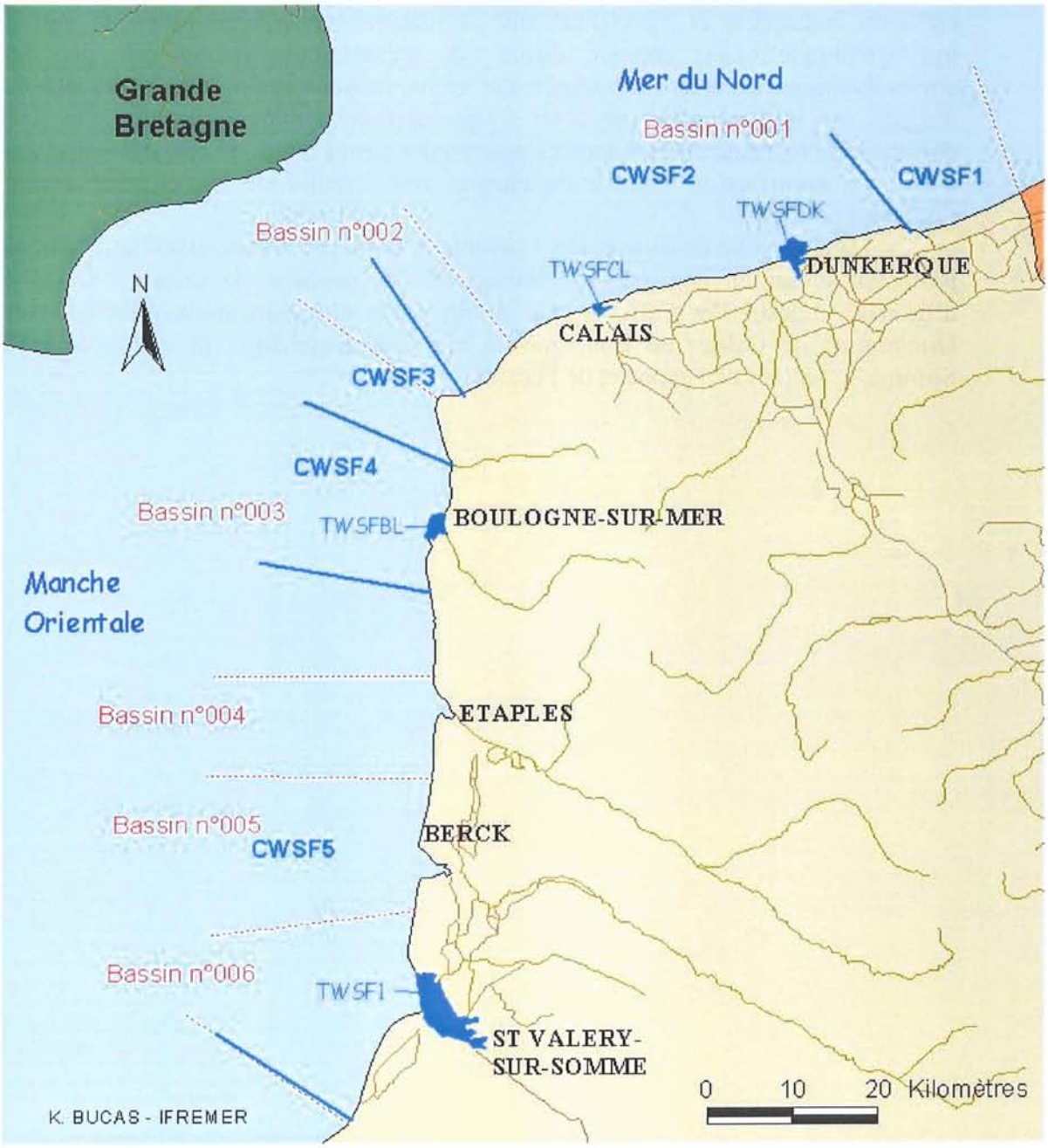


Figure 21 : Masses d'eau côtières et de transition DCE

5.2.3. Apports à la mer

L'étude des apports à la mer nécessite une distinction selon leur origine. Nous pouvons ainsi distinguer les apports directs à la côte, qui constituent des sources ponctuelles, et les apports diffus en mer, plus difficilement identifiables.

Les apports ponctuels correspondent d'une part aux rejets directs, c'est-à-dire les effluents industriels et égouts urbains, et d'autre part aux écoulements naturels du réseau hydrographique. Les apports diffus se matérialisent notamment par les retombées atmosphériques, les activités portuaires et les immersions de produits de dragage. L'opération de dragage est souvent assimilée à un simple déplacement de matériaux. Les anciennes zones d'immersion représentent des sources potentielles permanentes de contaminants. Source (19)

La contribution relative de chaque voie dépend de la délimitation régionale et de l'élément considéré.

Dans le cadre de cette étude, l'inventaire des rejets repose essentiellement sur les origines ponctuelles tout en considérant l'immersion des produits de dragage. L'analyse des rejets d'activités industrielles s'effectue par grands pôles ou régions industriels, à savoir la région de Dunkerque, de Calais, de Boulogne-sur-Mer principalement la vallée de l'Aa, la baie de Somme, le secteur de Dieppe et de Fécamp.

Les principales activités identifiées comme source potentielle de contamination sont localisées sur la Figure 22.

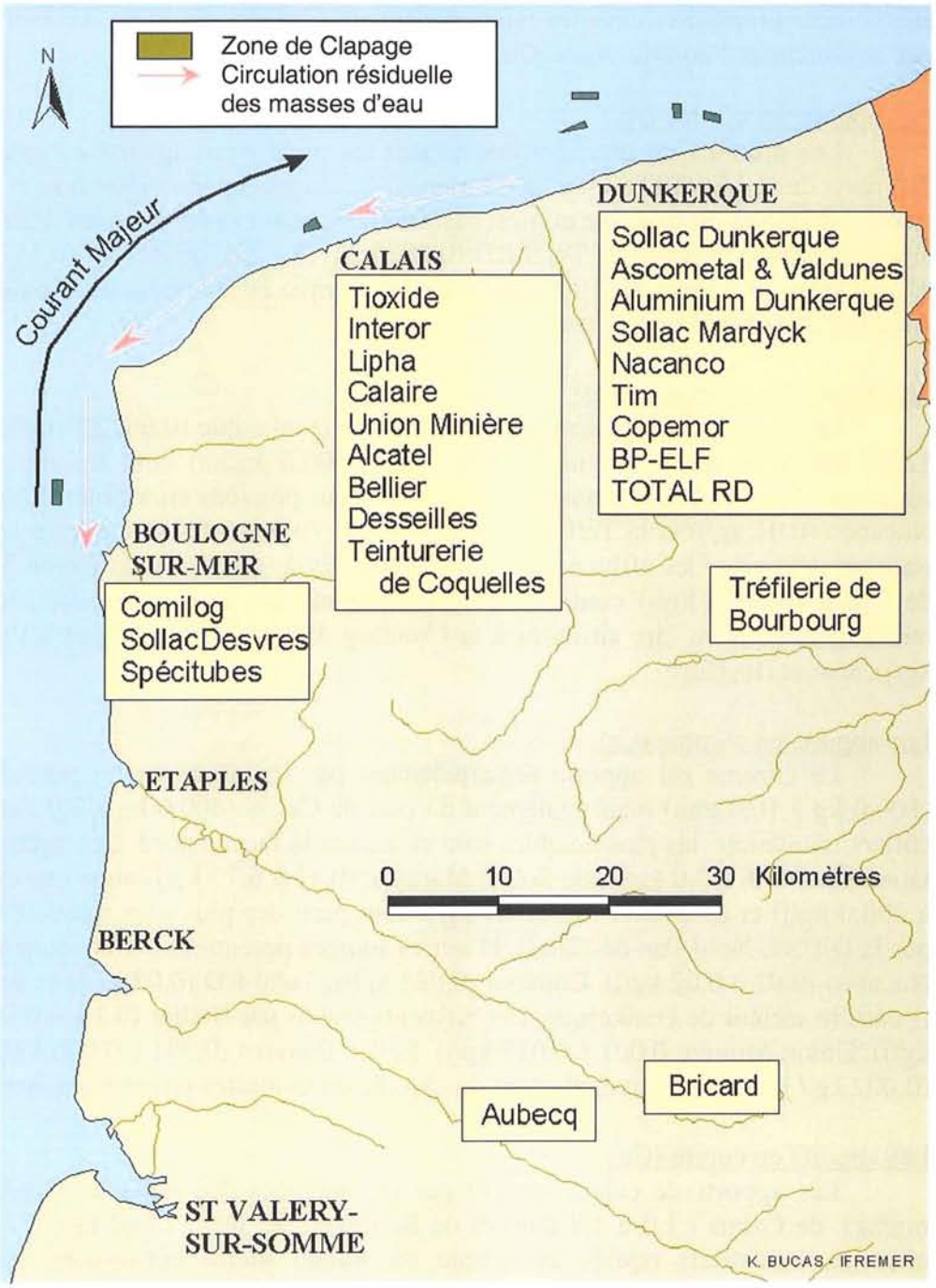


Figure 22 : Principales activités anthropiques à l'origine de rejets en mer

Les apports en micropolluants métalliques

Les apports en aluminium (Al)

Les rejets industriels apparaissent comme l'origine principale de l'aluminium trouvé dans les sédiments. Les apports côters identifiés se situent sur la façade ouest. Il est majoritairement présent dans les effluents de Tioxide (1500,0 à 4500,0 kg/j). L'aluminium est également contenu en moindre proportion dans les rejets de Bricard (0,032 kg/j) et de Aubecq (0,04 kg/j) apportés par la Canche et l'Authie. Source (20)

Les apports en arsenic (As)

Les produits de dragages constituent les principaux apports en arsenic. Ils proviennent des ports de Calais (800,0 kg à 2,0 t/an) et de Boulogne-sur-mer (800,0 kg à 7,0 t/an). La part des rejets industriels est moindre et n'est représentée que sur la façade nord. Parmi les flux identifiés, nous pouvons citer ceux de Total RD (0,002 à 0,123 kg/j), de BP-Elf (0,16 kg/j) et d'Ascométal et Valdunes (0,2 kg/j) dans le secteur de Dunkerque et les rejets de Tioxide (0,05 à 0,09 kg/j) dans le Calaisis. Sources (16) (20)

Les apports en cadmium (Cd)

Les apports par les dragages des ports de Dunkerque (0,6 à 2,5 mg/kg), de Calais (30,0 à 128,0 kg/an) et de Boulogne-sur-mer (4,0 à 300,0 kg/an) sont les plus importants pour le cadmium. Parmi les flux industriels identifiés, nous pouvons citer Sollac Dunkerque (0,047 kg/j), Nacanco (0,01 kg/j) et la Tréfilerie de Bourbourg (0,013 à 0,045 kg/j) sur le Dunkerquois. Nous pouvons noter que les effluents de Tioxide (0,0079 à 0,04 kg/j), de Union Minière (0,86 kg/j) et de Lipha (0,0079 kg/j) contiennent du cadmium. Sur la façade ouest, les apports d'origine industrielle peuvent être attribués à la Comilog (0,006 à 0,25 kg/j) et à l'usine Aubecq (0,003 kg/j). Sources (16) (20)

Les apports en chrome (Cr)

Le chrome est apporté principalement par les dragages du port de Boulogne-sur-mer (100,0 kg à 16,0 t/an) mais également du port de Calais (400,0 kg à 2,0 t/an). Parmi les apports côtiers industriels, les plus notables sont situés sur la façade nord. Les rejets en chrome de Sollac Dunkerque (1,6 à 3,0 kg/j), de Sollac Mardyck (0,11 à 6,75 kg/j) ainsi que ceux de Tioxide (80,0 à 300,0 kg/j) et de Bellier (0,1 à 4,0 kg/j) font parti des plus gros rejets en toxiques inventoriés par la DRIRE Nord-Pas-de-Calais. D'autres sources potentielles sont constituées par les rejets de Nacanco (0,01 à 0,02 kg/j), Copenor (0,023 kg/j), Total RD (0,02 kg/j) et de Ascométal (0,4 kg / j) dans le secteur de Dunkerque. Les effluents rejetés par Bellier (0,1 à 4,0 kg/j), Desseilles (0,19 kg/j), Union Minière 0,001 à 0,017 kg/j), Sollac Desvres (0,001 à 0,006 kg/j) et ceux de Aubecq (0,002 kg / j) contiennent également du chrome en moindres proportions. Sources (16) (20)

Les apports en cuivre (Cu)

Les apports de cuivre se font par les dragages des ports de Dunkerque (14,0 à 126,0 mg/kg), de Calais (1,0 à 4,8 t/an) et de Boulogne-sur-mer (280,0 kg à 3,0 t/j). Néanmoins les effluents industriels rejetés au niveau du milieu marin constituent également une source importante en cuivre. Les apports côtiers majeurs sont attribués à Tioxide (0,7 à 2,0 kg/j), à Sollac Dunkerque (0,9 kg/j) et à Ascométal (0,7 kg/j) de la façade nord. Les rejets de Nacanco (0,01 kg/j), de la Tréfilerie de Bourbourg (0,0015 kg/j) ainsi que ceux des entreprises calaisiennes Interor (0,08 à 1,0 kg/j), Desseilles (0,09 kg/j), Alcatel (0,04 kg/j), Calaire (0,2 kg/j) et Union Minière (0,002 à 0,007 kg/j) constituent un apport anthropique de cuivre. Les effluents de Bricard (0,003 à 0,025 kg/j) et de Aubecq (0,005 kg/j) contiennent également du cuivre. Sources (16) (20)

Les apports en fer (Fe)

Les apports côtiers en fer sont nombreux et répartis sur toute la zone d'étude. Les flux identifiés sont principalement d'origine industrielle. Ainsi sur la façade nord, les rejets de Sollac Dunkerque (11,0 à 295,6 kg/j), de Sollac Mardyck (10,0 à 13,0 kg/j), d'Ascométal (23,8 kg/j), de Tioxide (500,0 à 27540,0 kg/j) et d'Union Minière (0,02 à 9,3 kg/j) font parti des plus gros rejets en toxiques identifiés par la DRIRE. La façade ouest est également concernée par les rejets de Comilog (1,5 à 13,0 kg/j). nous pouvons noter que les effluents de Nacanco (0,04 à 0,163 kg/j), de TIM (0,02 à 0,25 kg/j), de la Tréfilerie de Bourbourg (0,02 à 0,05 kg/j) du secteur de Dunkerque contiennent également du fer. D'autres sources potentielles ont pu être identifiées dans le Calaisis avec les entreprises Alcatel (0,03 kg/j) et Bellier (0,3 kg/j) ainsi que dans le Boulonnais avec Sollac Desvres (0,07 à 0,2 kg/j) et Spécitubes (0,004 à 0,2 kg/j) et dans le secteur de l'Authie avec l'entreprise Aubecq (0,07 kg/j). Source (20)

Les apports en fluorures (F)

Les produits de dragages ne sont pas mis en cause car ils ne font pas l'objet d'une analyse des fluorures. Les apports s'effectuent majoritairement sur la façade nord par les importants rejets de Sollac Dunkerque (67,0 à 122,7 kg/j), d'Aluminium Dunkerque (0,29 à 17,25 kg/j) et ceux de l'entreprise calaisienne Union Minière (3,0 à 5,0 kg/j). Sur cette même façade, les effluents de la Tréfilerie de Bourbourg contiennent également des fluorures (0,1 kg/j). Les flux rejetés par la Comilog (64,0 kg/j) et par Spécitubes (0,00002 à 0,03 kg/j) en moindres proportions, ont été identifiés comme une source en fluorures sur la façade ouest. Source (20)

Les apports en mercure (Hg)

Le mercure est apporté en quantité importante par les rejets de Sollac Dunkerque (0,02 à 0,4 kg/j). Les flux de l'entreprise Total RD constitue une autre source en mercure (0,001 à 0,006 kg/j) pour les côtes de la façade nord. Il existe également des apports industriels notables dans le Calaisis. Ils concernent les entreprises Tioxide (0,0006 à 0,01 kg/j), Calaire (0,002 à 0,004 kg/j), Union Minière (0,01 à 0,15 kg/j) et la Teinturerie de Coquelles (0,02 kg/j). Mais les produits de dragage des ports de Dunkerque (0,15 à 0,25 mg/kg), Calais (15,0 à 430,0 kg/an) et de Boulogne-sur-mer (3,0 à 145,0 kg/an) constituent l'essentiel des apports en mercure au milieu marin régional. Sources (16) (20)

Les apports en manganèse (Mn)

Cet élément ne fait pas l'objet d'une mesure systématique dans les sédiments portuaires dragués. Les rejets industriels apparaissent donc comme la principale origine des apports en manganèse. Les flux les plus importants concernent Sollac Dunkerque (12,0 à 25,0 kg/j) et Tioxide (130,0 à 600,0 kg/j) sur la façade nord et la Comilog (20,0 à 149,0 kg/j) sur la façade ouest. Nous pouvons noter que les effluents de la Tréfilerie de Bourbourg (0,02 kg/j) contiennent également du manganèse. Source (20)

Les apports en nickel (Ni)

Les dragages portuaires constituent les flux majeurs de nickel vers le milieu marin avec les produits des ports de Calais (100,0 kg à 3,0 t/an) et de Boulogne-sur-mer (500,0 kg à 9,0 t/an). La part apportée par les rejets industriels est également importante. Ainsi les plus gros rejets ont été attribués à Sollac Dunkerque (1,16 kg/j), BP – Elf (0,79 kg/j) sur le secteur de Dunkerque, et à Tioxide (1,5 à 15,0 kg/j) dans le secteur de Calais. Le nickel est aussi présent dans les effluents de Nacanco (0,002 à 0,02 kg/j), de Ascométal (0,9 kg/j), de Tim (0,15 à 0,24 kg/j), de Interor (0,05 kg/j), de Lipha (6,21 kg/j) et d'Union Minière (0,077 kg/j). Des sources

industrielles ont également pu être identifiées sur la façade ouest par les rejets de Spécitubes (0,001 à 0,007 kg/j), de Bricard (0,007 à 0,053 kg/j) et de Aubecq (0,01 kg/j). Sources (16) (20)

Les apports en plomb (Pb)

Les apports d'origine industrielle sont relativement importants sur la façade nord de la zone d'étude. Sur le secteur de Dunkerque, les rejets de Sollac Dunkerque (1,1 à 1,4 kg/j), Sollac Mardyck (1,5 kg/j) et de la Tréfilerie de Bourbourg (0,01 à 1,4 kg/j) ont été classés parmi les plus gros rejets du Nord-Pas-de-Calais. Les flux moyens identifiés sont localisés sur Calais avec Tioxide (0,8 à 2,34 kg/j) et Union Minière (8,33 kg/j) ainsi que sur Boulogne-sur-mer par la Comilog (0,1 à 2,2 kg/j). Le plomb est par ailleurs présent au sein des effluents d'Alcatel (0,0009 kg/j), Ascométal (0,5 kg/j), Spécitubes (0,002 kg/j) et Aubecq (0,004 kg/j). Les dragages portuaires restent les flux majeurs vers le milieu marin par les ports de Dunkerque (115,0 à 1054,0 mg/kg), de Calais (2,0 à 3,5 t/an) et de Boulogne-sur-mer (500,0 kg à 7,0 t/an). Sources (16) (20)

Les apports en étain total (Sn)

Les apports en étain se font par les dragages des sédiments portuaires de Calais (100,0 kg à 2,0 t/an) et de Boulogne-sur-mer (800,0 kg à 7,0 t/an). Des sources industrielles ont également pu être identifiées et concernent les entreprises Tioxide de Calais (0,07 à 0,6 kg/j) ainsi que Nacanco (0,01 à 0,05 k/j) et Sollac Mardyck (0,015 à 0,03 kg/j) du Dunkerquois. Sources (16) (20)

Les apports en titane (Ti)

La source en titane provient exclusivement des rejets industriels. Le flux majeur identifié est celui de Tioxide (1300,0 à 5760,0 kg/j). Les effluents de Spécitubes, rejetés dans un affluent de la Liane, contiennent également du titane (0,001 à 0,008 kg/j). Les rejets de dragage ne constituent pas une source. Mais il est important de préciser que cet élément ne fait pas l'objet d'une étude systématique au sein des produits immergés. Source (20)

Les apports en vanadium (V)

Les rejets industriels apparaissent comme l'origine principale de vanadium retrouvé en mer. Il est contenu dans les effluents de l'entreprise calaisienne Tioxide (241,0 à 960,0 kg/j). Le vanadium appartient à la classe des éléments qui ne sont pas systématiquement mesurés au sein des produits de dragages et des rejets industriels. Source (20)

Les apports en zinc (Zn)

Le zinc est apporté majoritairement par les dragages des ports de Dunkerque (14,0 à 126,0 mg/kg), de Boulogne-sur-mer (100,0 kg à 28,0 t/an) et particulièrement de Calais (8,0 à 51,0 t/an). Par ailleurs, les sources industrielles identifiées sont nombreuses. Les plus gros rejets en zinc ont été attribués à l'entreprise calaisienne Tioxide (21,0 à 66,0 kg/j). Sur la façade nord, les effluents de BP – Elf (3,35 à 9,5 kg/j), de Sollac Dunkerque (3,0 à 36,0 kg/j), de Sollac Mardyck (0,49 kg/j), de Tim (0,1 à 1,5 kg/j), de Calaire (0,5 à 2,24 kg/j) et de Bellier (0,79 à 7,9 kg/j) font également parti des rejets les plus importants en zinc de la région. D'autres sources industrielles ont été identifiées et sont constituées par les entreprises Copenor (0,21 à 0,57 kg/j), Nacanco ((0,017 à 0,1 kg/j), Total RD (0,8 à 1,13 kg/j), Ascométal (0,01 kg/j) et la Tréfilerie de Bourbourg (0,01 kg/j) du Dunkerquois. Les apports concernent aussi les entreprises Desseilles (1,7 kg/j), Alcatel (0,03 kg/j), Union Minière (0,1 à 0,119 kg/j) et la Teinturerie de Coquelles (0,23 kg/j) du Calaisis. Les apports côtiers d'origine industrielle de la façade ouest correspondent aux rejets importants de la Comilog (28 kg/j) mais également ceux de Sollac Desvres (0,017 à 0,12 kg/j), de Bricard (0,007 à 0,053 kg/j) et d'Aubecq (0,04 kg/j) en moindres proportions.
Sources (16) (20)

Les apports en micropolluants organiques

Les apports en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) se font par les dragages des ports de Dunkerque (8428,0 µg/kg), de Calais (160,0 à 1500,0 µg/kg) et de Boulogne-sur-mer (100,0 à 900,0 µg/kg). Les polychlorobiphényles (PCB) sont également apportés par les dragages portuaires de Dunkerque (10,0 à 789,0 µg/kg), de Calais (10,0 à 162,0 µg/kg) et de Boulogne-sur-mer (1,0 à 22,0 g/kg). La part d'origine purement industrielle est inconnu puisque ces composés ne faisaient pas l'objet de mesures systématiques entre 1990 et 1998. Les pesticides proviendraient des activités agricoles apportés à la mer par les écoulements naturels, mais dans des proportions inconnues dans le cadre de l'étude. Sources (16) (20)

5.2.4. Sources de contamination en métaux

Façade nord

✓ Secteur de Dunkerque – Gravelines (Figure 4)

Les sédiments du secteur Dunkerque – Gravelines abritent des teneurs importantes en éléments métalliques. Le mercure et le cadmium sont les éléments déclassants respectifs des points 1 (Malo – ouest), 2 (Mardyck) et 3 (Grand Fort Philippe), et du point 4 (Les Hemmes d'Oye). Le point 1 est également déclassé par l'étain (ANNEXE I).

Le point 1 se distingue par des concentrations importantes en mercure (0,2 mg/kg), en étain (9,3 mg/kg) et en zinc (214,2 mg/kg). Le point 3 présente les teneurs les plus élevées du secteur en chrome (43,3 mg/kg de), en lithium (57,4 mg/kg), en titane (1593,4 mg/kg) et en vanadium (64,2 mg/kg). Le point 2 présente des teneurs moindres que les points 1 et 3 alors que sa situation géographique le place dans l'axe direct des rejets de Sollac Mardyck, Nacanco, BP Elf et Copenor (Figure 22). Cette observation confirmerait l'existence d'une circulation résiduelle des masses d'eau (Figure 22) dépendantes des conditions marégraphiques et météorologiques (Source (21)). Les teneurs en manganèse sont supérieures ou égales à 100,0 mg/kg pour tous les points du secteur. Le point 4 renferme les plus faibles teneurs métalliques de la zone à l'exception du cadmium (1,3 mg/kg).

Aucune source de lithium n'a été identifiée. Il est possible que les points 3 et 4 soient sous l'influence des apports en vanadium et titane du Calaisis par les courants induits par le phénomène de marée (sud-ouest - nord-est) et du Dunkerquois par le flux moyen annuel orienté de la Manche vers la Mer du Nord (Figure 22) (Source (21)). Il semblerait que les rejets de Sollac Dunkerque constitue la principale source industrielle des apports en étain (0,02, à 0,04 kg/j), en chrome (1,6 à 3,0 kg/j), en fer (11,0 à 295,6 kg/j), en plomb (1,1 à 1,4 kg/j), en zinc (3,0 à 36,0 kg/j), en mercure (0,02 à 0,4 kg/j) et particulièrement en manganèse (12,0 à 25,0 kg/j). La contamination des sédiments de la côte dunkerquoise peut également être rattachée aux rejets de Sollac Mardyck (0,015 à 0,03 kg/j) en étain (0,015 à 0,03 kg/j), en chrome (0,11 à 6,75 kg/j), en fer (10,0 à 13,0 kg/j), en zinc (0,49 kg/j) et en plomb (1,5 kg/j). Les flux rejetés par Ascométal constituent une autre source majeure d'apports en fer (23,8 kg/j) mais également en arsenic (0,2 kg/j) pour les points étudiés. Les effluents de la Tréfilerie de Bourbourg (0,045 à 0,013 kg/j) et de Nacanco (0,01 kg/j) constituent les seules sources identifiées d'apports en cadmium. La Tréfilerie participerait également aux apports côtiers de plomb (0,01 à 4,05 kg/j) et de manganèse (0,02 kg/j). Les rejets de l'entreprise Tim dans la Haute Colme (0,1 et 1,5 kg/j)

seraient une source potentielle de contamination en zinc des sédiments du point 4. Les rejets entreprises BP - Elf (0,19 kg/j) et Total RD (0,002 à 0,123) participeraient aux apports en arsenic au milieu marin. Les mêmes effluents ont été identifiés comme des sources potentielles d'apports respectifs en zinc (9,5 et 3,35 kg/j) et en mercure (0,001 à 0,006 kg/j).

Par ailleurs, la plupart des contaminants des sédiments étudiés proviendraient principalement des zones de clapage du port de Dunkerque. Ainsi les teneurs des sédiments dragués sont relativement importantes en cadmium (0,6 à 2,5 mg/kg), en mercure (0,15 à 0,25 mg/kg), étain (0,15 à 0,27 mg/kg), en zinc (14,0 à 126,0 mg/kg), en cuivre (14,0 à 126,0 mg/kg) et très élevées en plomb (115,0 à 1054,0 mg/kg). Il semblerait que le point 4 soit soumis aux apports en cadmium de la zone de clapage de Dunkerque provoqué par une dérive nord-sud créée par la marée (Source (21)). Il peut également être sous l'influence des apports de la zone d'immersion de Calais (0,4 à 2,0 mg/kg de sédiments dragués) en considérant le courant majeur de direction sud-ouest – nord-est de cette zone maritime (Figure 22) (Source (21)).

Les points 1, 2, 3 et 4 abritent des proportions importantes en vanadium dont l'origine directe n'a pas été identifiée. Nous pouvons envisager la possibilité d'apports par la circulation résiduelle des masses d'eau orientée sud – nord (Figure 22) des rejets de Tioxide du Calaisis (Source (21)). Les points 1 et 3 sont apparemment plus soumis à l'influence des activités anthropiques que les points 2 et 4 qui présentent des teneurs plus faibles en métaux. Dans ce cas la situation géographique des points 1 et 3 plus proches des activités portuaires et industrielles expliquerait les différences de concentration. La granulométrie peut également être mise en cause dans la mesure où le pourcentage de fraction fine est plus important au sein des sédiments 1 et 3. Une proportion plus importante de polluants peut être fixée.

✓ Secteur de Calais (Figure 4)

Une attention particulière est portée au point 5 (Cap Blanc Nez – Escalles) du bassin 002. En effet, ce point est le point le plus contaminé de la façade nord en éléments métalliques traces et conservent un niveau élevé de contamination après extrapolation au sédiment fin. Il présente la plus forte concentration en arsenic (87,7 mg/kg), en aluminium (30000,0 mg/kg), en chrome (45,0 mg/kg), en fer (45700,0 mg/kg), en lithium (123,0 mg/kg), en nickel (37,9 mg/kg) et en vanadium (72,6 mg/kg) de la zone d'étude. Les sédiments du point 5 renferment également des teneurs importantes en plomb (25,2 mg/kg), en titane (916,0 mg/kg), en zinc (130,7 mg/kg). Les éléments déclassants qui se détachent sont l'arsenic et le lithium (ANNEXE I).

Les apports au point 5 proviendraient des rejets de la zone industrielle de Calais et majoritairement des dragages portuaires pour certains éléments. Un apport diffus est envisageable. Il serait influencé par des circulations résiduelles des masses d'eau de direction nord-est – sud-ouest induites par le phénomène de marée et par le flux moyen annuel orienté nord-sud (Figure 22) (Source (21)).

Aucune source potentielle de lithium n'a été identifiée. L'origine de contamination pourrait être attribuée aux flux journaliers de Tioxide pour l'arsenic (0,002 à 0,128 mg/kg), l'aluminium (1500,0 à 4500,0 kg/j), le chrome (80,0 à 300,0 kg/j), le fer (5000,0 à 27640,0 kg/j), le nickel (1,5 à 15,0 kg/j) et le vanadium (241,0 à 960,0 kg/j) ainsi que pour le plomb (0,8 et 2,34 kg/j), le titane (1300,0 à 5760,0 kg/j), le zinc (21,0 à 66,0 kg/j). Les effluents d'Union Minière constituent une autre source potentielle de contamination en chrome (0,001 à 0,0017 kg/j), en fer (0,02 à 9,3 kg/j), en nickel (0,077 kg/j) ainsi qu'en plomb (8,33 kg/j)et en zinc (0,1 à 0,119 kg/j). Cette source est caractérisée comme potentielle dans la mesure car le rejet est effectué indirectement par épandage à proximité du canal de Marck. Par ailleurs certaines usines textiles du Calaisis pourraient constituer des sources potentielles de contamination et particulièrement en chrome (0,1 à 4 kg/j), en fer (0,3 kg/j) et en zinc (7,9 kg/j) pour Bellier en chrome (0,19 kg/j) et

en zinc (0,23 kg/j) pour les entreprises respectives Desseilles et Teinturerie de Coquelles. Les industries pharmaceutiques Lipha (6,21 kg/j) et Interor (0,05 kg/j) du secteur de Calais constitueraient également des sources potentielles en nickel. L'entreprise Calaire ne serait potentiellement mise en cause que pour un apport en zinc (0,5 à 2,24 kg/j) par le canal de Calais.

Les quantités d'arsenic rejetées par Tioxide semblent trop faibles et le point de rejet est trop éloigné du point 5 pour permettre une telle concentration dans les sédiments. La source principale serait constituée par la zone de clapage du port de Calais (800,0 kg à 2,0 t/an) située à proximité du point 5. Les rejets de dragages apparaissent aussi comme une source importante d'apport en chrome (400,0 kg à 2,0 t/ an), en nickel (200,0 kg à 2,0 t/an), en plomb (2,0 à 3,5 t/an) et une source majeure d'apport en zinc (8,0 et 51,0 t/an).

L'aluminium a été choisi comme élément normalisateur notamment par la faible influence anthropique. Mais l'environnement industriel local est particulier dans la mesure où les rejets en aluminium de l'usine ont été répertoriés par la DRIRE parmi les plus gros rejets en toxiques du Nord – Pas-de-Calais. Les niveaux écotoxicologiques considérés comme préoccupants sont compris entre 1,0 et 10,0 mg/kg dans le sédiment pour l'arsenic, entre 5,0 et 50,0 mg/kg et entre 50,0 et 500,0 mg/kg pour le zinc. La faune du compartiment sédimentaire est donc soumise à un risque de contamination.. La dynamique sédimentaire est très instable. Une remise en suspension représenterait un danger potentiel pour l'environnement biotique de la colonne d'eau.

Nous pouvons considérer que les points 5 et 6 (Strouanne – ouest) sont soumis aux mêmes apports dans la mesure où ils sont géographiquement proches. La contamination des sédiments du point 6 en manganèse (198,0 mg/kg) et en fluorures (608,7 mg/kg) proviendrait respectivement des rejets de Tioxide (130,0 à 600,0 mg/kg) et d'Union Minière (3,0 à 5,0 kg/j).

Façade ouest (Figure 5)

Les point 7 (Ambleteuse – La Slack) à 12 (Hardelot) du bassin 003 présentent les plus faibles teneurs en éléments métalliques. Mais en l'absence de références sur le fond géochimique des sédiments, il est difficile d'évaluer la part d'origine anthropique. Le cadmium constitue l'élément déclassant des points 7, 11 (Equihen) et 12. Le point 11 se distingue également par un important facteur de contamination en zinc (240,5 mg/kg). Les sédiments du point 8 (Digue Carnot nord) sont déclassés par l'étain (33,0 mg/kg) alors que les points 9 (Le Portel) et 10 (Cap d'Alprech) le sont respectivement par les fluorures (1094,0 mg/kg) et le mercure (0,03 mg/kg).

Aucune source anthropique directe d'étain n'a été identifiée dans le Boulonnais. Les rejets de l'usine Comilog constitueraient une source de contamination des sédiments principalement en manganèse (20,0 à 149,0 kg/j), en fer (1,5 à 13,0 kg/j), en plomb (0,1 à 2,2 kg/j) en cadmium (0,006 et 0,25 mg/kg), et en fluorures (64,0 kg/j). Mais il ne s'agit que d'une supposition concernant l'apport en fluorures, en l'absence de données antérieures à 1998. Les rejets de Specitubes pourraient apparaître comme une source potentielle de contamination mais les flux de fluorures (0,01 à 0,03 kg/j) restent relativement faibles. Les rejets de Sollac Desvres et de Tim constitueraient respectivement des sources importantes en zinc (0,017 à 0,12 kg/j) et en nickel pourraient (0,15 à 0,64 kg/j). La zone de clapage de Boulogne-sur-mer constituerait une source importante en cadmium (4,0 à 300,0 kg/j) et en zinc (100,0 kg à 28,0 t/an). Le mercure des sédiments du point 10 proviendrait principalement des produits de dragage immergés (3,0 à 145,0 kg/an). Les rejets de dragages semblent constituer également la source majeure de contamination en cuivre (280,0 kg à 3,0 t/an), chrome (100,0 kg à 16,0 t/an), nickel (500,0 kg à 9,0 t/an), plomb (500,0 kg à 7,0 t/an), en étain (800,0 kg à 7,0 t/an) et arsenic (100,0

kg à 3,0 t/an). Il faut alors envisager un apport diffus généré par la circulation résiduelle des masses d'eau créée par les conditions marégraphiques (Figure 22) (Source (21)).

Les apports au point 7 d'origine industrielle seraient engendrés par le flux moyen annuel orienté sud-nord. Par contre les apports aux points 11 et 12 seraient influencés par un courant de direction nord-sud induit par le phénomène de marée (Figure 22) (Source (21)). Le courant majeur de direction sud-ouest – nord-est permettrait un apport diffus au point 7 de la zone d'immersion. Le point 11 serait sous l'influence d'un courant sud-est – nord-ouest.

Le point 14 (Large du Touquet) est le point le plus éloigné de la côte. Il se distingue par les teneurs les plus élevées de la façade ouest en arsenic (13,2 mg/kg), chrome (29,2 mg/kg), fer (14074,4), manganèse (62,4 mg/kg) et titane (1702,2 mg/kg), en ne considérant pas les concentrations des points estuariens. Les deux éléments déclassants sont le lithium et l'arsenic mais les facteurs de contamination ne sont pas significativement différents pour l'ensemble des éléments métalliques. Un apport diffus de la zone de clapage située plus au nord est envisageable mais la situation des produits de dragage immergés semble relativement éloignée du point 14.

Les estuaires

L'estuaire de la Canche (Figure 6) contient le point 18 (Chenal Canche 2) qui appartient à la classe de contamination la plus élevée de la zone d'étude. Les teneurs les plus élevées des sédiments des points 15 (St Gabriel) à 21 (Chenal Canche 1) concernent l'aluminium, l'arsenic, le cadmium, le chrome et l'étain. Le cadmium constitue l'élément déclassant du secteur de la Canche. Le mercure et l'étain sont également déclassants pour les points 17 (Touquet – Mollières), 19 (Cimetière britannique) et 20 (Etaples).

La seule source industrielle susceptible d'influencer la contamination du point 18 serait le rejet de l'entreprise Bricard. Les effluents sont composés d'aluminium, de chrome, de cuivre (0,003 à 0,025 kg/j), de fer (0,004 à 0,2 kg/j), de nickel (0,007 à 0,053) et de zinc (0,007 à 0,053 kg/j). Mais ces flux d'éléments ne semblent pas assez importants pour expliquer les teneurs élevées des sédiments du point 18. Des rejets d'activités anthropiques à proximité du point 18 auraient pu justifier le gradient décroissant de concentration métallique des points 18 à 20. Une autre hypothèse porte sur la différence de fixation des polluants au sein des sédiments de l'estuaire. En effet, nous remarquons que les proportions en fraction fine sont moins importantes au point 18. Ainsi le gradient décroissant des concentrations métalliques est à mettre en relation avec le gradient décroissant du pourcentage de sédiments fins des points 18 à 20 (de 61,4 % à 39,1 %).

Les sédiments de l'estuaire de l'Authie (Figure 7) montre un gradient croissant de concentration en métaux de direction nord-ouest – sud-est. Les concentrations les plus élevées des sédiments des points 26 (La Madelon de l'Authie), 27 (Pointe de la Dune Blanche) et 28 (Mollières) sont expliquées par les fortes proportions de fraction fine (de 55,8 % à 71,8 %). Ainsi les sédiments de ces points ont une plus grande capacité de fixation des polluants que les sédiments des points 22 (Pointe de la Rochelle) à 25 (Malgré le Monde) d'un pourcentage de fraction fine inférieure à 10 %. Les éléments déclassants déterminés sont le lithium pour le point 22, les fluorures pour le point 23, le mercure pour les points 27 et 28, et le cadmium pour les points 24 à 27. Le point 28 appartient à la classe de contamination la plus élevée de la zone d'étude avant extrapolation au sédiment et conserve des teneurs métalliques non négligeables après normalisation. La seule source d'apports identifiée correspond aux rejets de l'entreprise Aubecq composés d'aluminium (0,04 kg/j), de fer (0,07 kg/j), de nickel (0,01 kg/j) et de zinc (0,04 kg/j), de cadmium (0,003 kg/j), de chrome (0,002 kg/j), de cuivre (0,005 kg/j) et de plomb

(0,004 kg/j. Mais ces flux semblent relativement faibles pour constituer la contamination des sédiments de l'estuaire.

Le mercure constitue l'élément déclassant des points 29 (St Firmin – la Maye 1), 31 (Le Crotoy ouest), 34 (Le Crotoy 1), 35 (St Valéry-sur-Somme) et 36 (Pointe du Hourdel sud) de l'Estuaire de la Somme (Figure8). Les points 32 (Le Crotoy – Aviation) et 33 (Le Crotoy 2) se distinguent par le facteur de contamination le plus élevé en cadmium alors que le point 30 (St Firmin – La Maye 2) se distingue par les fluorures. Un gradient décroissant des teneurs métalliques a été mis en évidence autour du point 33. Nous supposons l'existence d'une activité anthropique générant des rejets chargés en métaux à proximité de ce point. La granulométrie fine justifie la contamination plus importante des points 33 à 36 par rapport aux autres points. La fixation des polluants est moindre pour les points 29 à 32 qui présentent une plus faible proportion de sédiments fins.

Le point 37 (Criel - ouest) présente la contamination métallique la plus élevée du secteur de Dieppe (Figure 9). Ces teneurs élevées sont liées au pourcentage de fraction fine qui constitue le sédiment. L'extrapolation des teneurs au sédiment fin fait ressortir les points 37 et 39 (Penly - Biville) comme les points les plus contaminés de la zone d'étude. Les points 38 (Penly – est) et 40 (Belleville-sur-mer) sont les plus contaminés en manganèse. Nous supposons l'existence d'apports anthropiques dans le proche environnement ou un fond géochimique relativement élevé pour expliquer de telles concentrations. Tous les points du secteur sont très proches géographiquement mais chacun possède un élément déclassant différent. Ainsi les points 37, 38 et 40 sont respectivement déclassés par le mercure, le manganèse et les fluorures. Le point 39 se distingue un facteur de contamination très élevé en zinc. Nous pouvons envisager des apports anthropiques importants au niveau du point 37 avec une diffusion de contaminants vers les autres points. Cette hypothèse peut être formulée dans la mesure où les dix premiers éléments déclassants sont identiques pour l'ensemble des points.

Le cadmium et le mercure déclassent les sédiments respectifs des points 41 (Veulettes – Les Petites Dalles) et 42 (Les Petites Dalles) du secteur de Fécamp (Figure 10). Le point 41 présente des teneurs moyennes en éléments métalliques. Le point 42 se distingue par des teneurs brutes très élevées. Néanmoins les sédiments de ce point n'apparaissent contaminés qu'en lithium après extrapolation au sédiment fin. Les sources potentielles sont en cours d'identification mais il semblerait que les rejets en contaminants ne proviennent pas d'activité anthropique localisée sur le littoral de la zone.

5.2.5. Sources de composés organiques

Façade nord (Figure 4)

Les teneurs sédimentaires en polychlorobiphényles (PCB) sont inférieures ou égales au seuil de détection de 0,1 μg/kg. Il en est de même pour les pesticides. Il est impossible de déterminer la part anthropique de contamination en l'absence de référence sur le fond géochimique. Néanmoins il est important de préciser que des seuils écotoxicologiques ont été fixés de 0,001 à 0,01 μg/kg. La présence de ces substances, même à l'état de traces constitue un risque potentiel de contamination pour l'environnement proche.

La source principale de contamination des points 1 (Malo – ouest) et 2 (Mardyck) serait constituée par les produits de dragage immergés de Dunkerque (10,0 et 580,0 μg/kg). Les points

3 (Grand Fort Philippe) et 4 (Les Hemmes d'Oye) pourraient être soumis aux apports des zones d'immersion des ports de Dunkerque et de Calais (10,0 à 162,0 µg/kg). Le point 3 se distingue par des concentrations plus élevées en CB 38 (0,2 µg/kg) et CB 153 (0,3 µg/kg). Cette contamination plus importante au niveau du point 3 renforce l'hypothèse de la double influence des zones d'immersion des ports de Calais et de Dunkerque.

Les points de ce secteur sont très contaminés en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Les sédiments du point 1 sont les plus chargés avec un maximum de 520,0 µg/kg de fluoranthène. Une remise en suspension des sédiments de ce point représente une risque de contamination de la faune locale dans la mesure où les critères écotoxicologiques sont de 0,05 à 1,0 mg/kg. Les rejets de dragage de Dunkerque (8428,0 µg/kg) sont de nouveau mis en cause pour expliquer les teneurs en HAP des sédiments des points 1 et 2. Les points 3 et 4 seraient influencés par les apports diffus de la zone de clapage de Calais (200,0 à 900,0 mg/kg). Les points 5 (Cap Blanc Nez – Escalles) et 6 (Strouanne – ouest) présentent des teneurs beaucoup moins élevées en HAP. La seule source de contamination identifiée reste la zone de clapage de Calais.

Façade ouest (Figure 5)

Les sédiments des points 7 (Ambleteuse – La Slack) à 12 (Hardelot) abritent également les teneurs les plus faibles en HAP. Le point 7 est le plus affecté. Les teneurs en PCB et en pesticides restent inférieures ou égales au seuil de détection comme pour les sédiments de la façade nord. Les contaminants proviendraient de la zone d'immersion des produits de dragage du port de Boulogne-sur-mer (1,0 à 22,0 g/kg en PCB et 100,0 à 900,0 µg/kg en HAP). Un apport diffus par une circulation résiduelle des masses d'eau de direction sud-ouest – nord-est est donc envisagé (Figure 22) (Source (21)). Le point 14 situé le plus au large présentent des résultats en composés organiques inférieurs au seuil de détection. Il s'agit donc du point le moins soumis aux apports de contaminants de part sa situation géographique.

Les estuaires

Les sédiments du point 18 (Chenal Canche 2) de l'estuaire de la Canche (Figure6) se distinguent également par des concentrations élevées en PCB et HAP. Ce point présente les plus fortes teneurs en PCB du secteur de la Canche. Il existe un gradient décroissant des concentrations en HAP des points 18 à 20 (Etaples) comme pour les teneurs métalliques. La composition en granulométrie fine expliquerait l'origine de ce gradient. Les contaminants organiques adoptent le même comportement que les métaux en se fixant préférentiellement au matériel particulaire fin. Il existe donc une relation linéaire entre le pourcentage de fraction fine et les concentrations en composés organiques.

Le point 28 (Mollières) de l'estuaire de l'Authie (Figure7) est le point est le plus affecté de la zone en composés organiques. Les sédiments de la baie de l'Authie présentent d'importantes concentrations en PCB. Les teneurs les plus importantes ont été mesurées au sein des sédiments des points 26 (La Madelon de l'Authie), 27 (Pointe de la Dune Blanche) et 28. Nous remarquons un gradient croissant de concentration en HAP des points 22 (Pointe de la Rochette) à 28 de direction nord-ouest – sud-est comme pour les teneurs en métaux. De nouveau la fixation des composés organiques est plus importante lorsque les proportions de fraction fine sont élevées. Les concentrations élevées en pesticides (lindane et SDDT) mettent en évidence une influence des activités agricoles plus marquée qu'au niveau des façades nord et ouest.

Un gradient décroissant de concentration organique similaire à celui des teneurs métalliques a été mis en évidence dans l'estuaire de la Somme (Figure 8). Il concerne les

concentrations en HAP. Les teneurs mesurées en PCB dans les sédiments sont les plus élevées de toute la zone d'étude mais elles ne présentent pas de gradient au niveau des différents points de l'estuaire. La contamination importante en lindane et SDDT met en évidence une influence agricole marquée.

Les concentrations organiques des sédiments des points 37 (Criel – ouest) à 40 (Belleville-sur-mer) du secteur de Dieppe (Figure 9) sont plus faibles qu'en milieu estuarien avec des valeurs inférieures ou égales à 15,0 μg/kg pour les HAP. Ces plus faibles teneurs peuvent être mises en relation avec des apports moindres en contaminants sur cette zone. Par ailleurs les valeurs semblent être corrélées avec le pourcentage de fraction fine inférieur à 10 % qui justifierait une fixation moindre. Des apports agricoles sont également envisageables et expliqueraient la présence de DDT au sein des sédiments analysés.

Le point 42 (Les Petites Dalles) du secteur de Fécamp (Figure 10) est l'un des points les plus contaminés en composés organiques. Une influence agricole se fait également sentir avec une teneur en DDT égale à 0,2 μg/kg.

Les sédiments de la façade nord se distinguent par une dominance des éléments métalliques alors que ceux de la façade ouest sont à dominante organique. Les estuaires sont les zones de niveau de contamination le plus élevé. Cette contamination est à mettre en relation avec la prépondérance des sédiments fins. Les pesticides se retrouvent au cœur des sédiments des régions les plus soumises aux apports agricoles. Ainsi ce type de composé est mesuré dans les sédiments de la façade ouest mais sont pratiquement absents de la façade nord qui se distingue plus par son caractère industriel.

Par ailleurs les niveaux de contamination des sédiments sont plus faibles que ceux mis en évidence par les précédentes campagnes de mesures. Les campagnes HYDROBIOS, réalisées entre 1980 et 1984, avaient pour objectif l'identification des zones littorales contaminées entre la frontière belge et la baie de Somme. Les teneurs métalliques brutes mesurées étaient beaucoup plus importantes. La contamination détectée par le biais du RNO 1998 est moindre dans la mesure où les concentrations de certains éléments ont diminué d'un facteur 100. Par contre les teneurs en polychlorobiphényles (PCB) sont comparables. Le niveau de contamination en éléments métalliques des sédiments côtiers a donc diminué sur la dizaine d'années qui sépare les deux campagnes de prélèvements. Source (4)

Tableau 10 : Comparaison des teneurs métalliques et organiques mesurées dans les sédiments en 1980 et 1998. Source (4)

Campagnes de mesures	RNOSED 1998	HYDROBIOS 1980 - 1984
Cadmium	Max. 1 mg / kg	] 2 – 10 mg / kg [
Cuivre	Max. 19,4 mg / kg	] 30 – 300 mg / kg [
Mercure	Max. 0,21 mg / kg	] 0,35 – 2,5 mg / kg [
Plomb	Max. 36 mg / kg	] 70 – 500 mg / kg [
Zinc	Max. 173 mg / kg	] 150 – 600 mg / kg [
Σ PCB	Max. 13,3 μg/kg	] 2 – 13 μg / kg [

Conclusions et perspectives

L'état de la qualité des sédiments de la zone d'étude apparaît meilleur que par le passé. Cependant des niveaux de contamination sont difficilement attribuables en l'absence de référence sur le fond géochimique. Par ailleurs, la normalisation des teneurs métalliques est importante dans la mesure où elle permet une mise en évidence des points les plus contaminés. Il semble donc qu'une normalisation des teneurs en composés organiques aurait été nécessaire pour conforter les conclusions de l'étude.

Les estuaires abritent les sédiments les plus contaminés en composés métalliques et organiques. Les teneurs les plus élevées sont également mesurées dans les sédiments des points situés à proximité de déversements directs de résidus industriels en mer ou soumis aux apports diffus des zones de clapage. Le littoral est bordé par un fleuve côtier (Source (21)) qui avance vers le nord en plaquant les rejets des cours d'eau ou des concentrations industrialo-portuaires vers la côte. Mais cette réflexion est à nuancer étant donné les teneurs métalliques relativement importantes mesurées au sein des sédiments du point le plus éloigné de la côte (14 Large du Touquet).

Les gradients de concentration des différents éléments mis en évidence sont directement liés au pourcentage de sédiments fins, mais ne renseignent pas sur les origines précises des sources de contamination. Des informations sur les rejets effectués au niveau de l'estuaire de la Somme ainsi que dans les secteurs de Dieppe et de Fécamp auraient été nécessaires à l'identification des sources de contamination. Ces données sont actuellement en cours de transmission. Il en est de même concernant les résultats d'analyse des sédiments dragués du port de Dunkerque sur la période 1990 – 1998. Nous pouvons supposer que les teneurs en contaminants des sédiments de la façade ouest seront d'autant plus faibles lors de la prochaine campagne dans la mesure où les principales activités industrielles identifiées comme source potentielle ont cessé en 1998 (Bricard) et 2003 (Comilog).

Au début des années 1990, de nombreux composés n'étaient pas systématiquement mesurés ou certaines données industrielles n'étaient pas transmises. Aujourd'hui il semblerait qu'il y ait une amélioration en terme de transparence et de communication sur les rejets industriels. Ensuite seuls les apports d'origine industrielle et des zones d'immersion de produits de dragages ont été pris en compte dans cette étude. Mais il est important de préciser que les retombées atmosphériques constituent également un apport en contaminants loin d'être négligeable.

La discrétion de certains contaminants chimiques leur a valu d'être quelque peu "oubliés" des grandes conventions internationales de protection des mers. Depuis 2000, la directive Cadre Eau (Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil, du 23 octobre 2000) a fixé une liste de 33 substances polluantes prioritaires (ANNEXE O). Le RNO s'inscrit dans le cadre de la DCE qui a déterminé l'échéance de 2005 pour l'établissement d'un bilan de la qualité des écosystèmes aquatiques européens. L'analyse d'autres éléments traces est envisageable pour les prochaines campagnes. Les cyanures sont exclus de la liste prioritaire mais pourraient faire l'objet d'un dosage étant donné l'importance des rejets directs en mer.

Enfin le constat de la contamination soulève la question des effets sur l'environnement biotique et les ressources écologiques. Mais l'impact écologique principal des polluants associés aux sédiments reste actuellement en grande partie inconnu.

Bibliographie

1. **D.CLAISSE**, 1996. RNO 1995. Surveillance du Milieu Marin. Travaux du RNO. IFREMER et Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. 52p

2. **D.CLAISSE**, 1999. RNO 1998. Surveillance du Milieu Marin. Travaux du RNO. IFREMER et Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. 52p

3. **P.LESUEUR**, 1999. Sables, chenaux, vasières, Dynamique des sédiments et évolution morphologique, Programme scientifique Seine-Aval. IFREMER. 39p.

4. **G.BARBIER et al.**,1986. Le Littoral de la Région Nord – Pas de Calais Qualité du milieu marin. Rapports scientifiques et Techniques n° 3. IFREMER. 152p

5. **D.CLAISSE**, Campagnes RNOSED Protocole de prélèvements complémentaires de sédiments par les laboratoires côtiers de la DEL. (Comm. Pers)

6. http//www.eman-rese.ca

7. **WGMS**, 2003. Report of the Working Group on Marine Sediments in Relation to Pollution, International Council for the Exploration of the Sea. 115 p.

8. **B.HITIER et S.PIERRU**,1993. Métaux lourds et communautés animales benthiques dans le port de Calais, Rapport de stage DESS USTL, 107 p.

9. **C.FISSON**, 2004. Rapport de stage DESS, IFREMER.

10. **L.LEGENDRE et P.LEGENDRE**, 1984. Ecologie Numérique. Tome 2. La structure des données écologiques. 335p

11. **S.FRONTIER, D.DAVOULT, V.GENTILHOMME, Y.LAGADEUC**, 2001. Statistiques pour les sciences de la vie et de l'environnement. Dunod. 377p.

12. **C.AUGRIS, P.CLAUBAUT, S.DEWEZ , JP. AUFFRET, C.BECK**, 1995. Le domaine marin côtier du Nord Pas-de-Calais. Carte des formations superficielles. 1/100000. USTL et IFREMER.

13. **C.AUGRIS, P.CLABAUT, JF. BOURILLET**, 1993. Carte morpho-sédimentaire du domaine marin côtier entre Dieppe et le Tréport Seine-Maritime. 1/20000. IFREMER.

14. **OSPAR,** 2000. Commission for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic. Quality Status Report 2000 Region II Greater North Sea. 136 p.

15. **AGENCE DE L'EAU ARTOIS – PICARDIE**, 1997. La qualité des sédiments des cours d'eau, Etude 1991 – 1996. Annuaire de la qualité des sédiments en métaux lourds. 212p

16. **SMBC** Service Maritime des ports de Boulogne-sur-mer et de Calais. Rapport sur les déblais de dragages immergés en 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997 et 1998.

17. **C.ALZIEU**, 1999. Dragages et environnement marin, Etat des connaissances, IFREMER. 223 p.

18. **DCE,** 2004. Directive Cadre Eau, Etat des lieux (version 2) des districts hydrographiques, Escaut, Somme et Côtiers Manche Mer du Nord – Meuse (Partie Sambre).

19. **M.CHAUSSEPIED, O.ARNAL, H.GROSSEL**, 1989. Le Littoral de la Région Nord – Pas de Calais Apports à la mer. Rapports scientifiques et Techniques n° 15. IFREMER. 151p

20. **DRIRE Nord Pas-de-Calais**, L' Industrie au regard de l'Environnement, Editions 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996 et 1997

21. **JM.BRYLINSKI.**, 1993. Ecohydrodynamique pélagique en Manche Orientale. Station Marine de Wimereux – URA 1363. Université des Sciences et Technologies de Lille. 80p.

22. **J.F.CHIFFOLEAU**, 2001. La contamination métallique. Programme scientifique Seine-Aval. IFREMER. 39p.

23. **J.L.GONZALEZ**, 1999. Le cadmium, Comportement d'un contaminant métallique en estuaire. Programme scientifique Seine-Aval. IFREMER. 31p.

24. **D.COSSA**, 1999. La dynamique du mercure. Programme scientifique Seine-Aval. IFREMER. 24p.

25. **D.BOUST**, 1999. Fer et manganèse, Réactivités et recyclages. Programme scientifique Seine-Aval. IFREMER. 39p.

26. **J.TRONCZYNSKI,** 1999. Les contaminants organiques qui laissent des traces, Sources, transport et devenir. Programme scientifique Seine-Aval. IFREMER. 39p

27. **N.FOURCROY**, 1993. Inventaire et impact des rejets industriels sur le littoral Nord Pas-de-Calais. Rapport de stage DEUST ULCO. IFREMER. 69 p.

28. http://www.ifremer.fr/envlit/documentation/dossiers/dragages/drag-331.htm#haut

29. **D.CLAISSE**, 2000. RNO 2001. Surveillance du Milieu Marin. Travaux du RNO. IFREMER et Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. 52p

30. http://www.rnde.tm.fr/francais/sy/mate/dppr/ORIGINE_ET_EFFETS_DES_POLLU2.HTM

ANNEXES

ANNEXE A : Conventions et Conseils Internationaux

CIEM

Le CIEM, Conseil International pour l'Exploration de la Mer (ou ICES - International Council for the Exploration of the Sea), s'intéresse aux enquêtes scientifiques sur les facteurs biologiques et océanographiques qui interviennent dans l'Atlantique Nord. Fondé au début du siècle, il constitue un siège important pour l'échange et l'analyse d'information scientifique, la promotion de la recherche en matière de gestion des ressources et la consultation sur la gestion des pêches dans l'Atlantique Nord et les mers limitrophes.

Convention de Barcelone

Les parties signataires de la convention prennent, individuellement ou conjointement, toutes les mesures nécessaires pour protéger et améliorer le milieu marin dans la zone de la mer Méditerranée et pour prévenir, réduire et combattre la pollution dans cette zone. Quatre formes de pollution demandent une attention particulière des parties signataires :

- la pollution due aux opérations d'immersion effectuées par les navires et les aéronefs ;
- la pollution par les navires ;
- la pollution résultant de l'exploration et de l'exploitation du plateau continental, du fond de la mer et de son sous-sol ;
- la pollution d'origine tellurique.

OSPAR

La Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du nord-est ("Convention OSPAR") est entrée en vigueur le 25 mars 1998 et remplace les Conventions d'Oslo et de Paris. Mais les accords adoptés par les anciennes Conventions continueront à être applicables et conservent le même caractère juridique, à moins qu'ils ne soient abrogés par les nouvelles mesures adoptées en vertu de la Convention OSPAR de 1992. La Convention a été signée et ratifiée par toutes les Parties contractantes à la Convention d'Oslo et à la Convention de Paris (Belgique, la Commission des Communautés Européennes, Danemark, Finlande, France, Allemagne, Islande, Irlande, Pays-Bas, Norvège, Portugal, Espagne, Suède, Royaume-Uni de Grande Bretagne et d'Irlande du Nord), et par le Luxembourg et la Suisse.

ANNEXE B : Identification et localisation des points de mesure du RNOSED 1998

N°	Libellé site	Code site	Libellé bassin	Code bassin	Libellé point	Code point	Coordonnées	
1	Dunkerque et Calais	01	Dunkerque - Calais	001	Malo - ouest	547	510379N	0022270E
2	Dunkerque et Calais	01	Dunkerque - Calais	001	Mardyck - sédiment	548	510358N	0021487E
3	Dunkerque et Calais	01	Dunkerque - Calais	001	Grand Fort Philippe	549	510128N	0020221E
4	Dunkerque et Calais	01	Dunkerque - Calais	001	Les Hemmes d'Oye	550	510068N	0015877E
5	Dunkerque et Calais	01	Baie de Wissant	002	Cap Blanc Nez - Escalles	501	505642N	0014127E
6	Dunkerque et Calais	01	Baie de Wissant	002	Strouanne - ouest	502	505446N	0013991E
7	Boulogne et Canche	02	Boulonnais	003	Ambleteuse - La Slack	501	504801N	0013539E
8	Boulogne et Canche	02	Boulonnais	003	Digue Carnot nord	502	504543N	0013470E
9	Boulogne et Canche	02	Boulonnais	003	Le Portel	503	504223N	0013343E
10	Boulogne et Canche	02	Boulonnais	003	Cap d'Alprech	504	504114N	0013326E
11	Boulogne et Canche	02	Boulonnais	003	Equihen	505	503940N	0013329E
12	Boulogne et Canche	02	Boulonnais	003	Hardelot	506	503773N	0013353E
13	Boulogne et Canche	02	Baie de Canche	004	Le Touquet-Paris-Plage	501	503235N	0013318E
14	Boulogne et Canche	02	Baie de Canche	004	Large du Touquet	502	503316N	0012423E
15	Boulogne et Canche	02	Baie de Canche	004	Saint-Gabriel	503	503369N	0013488E
16	Boulogne et Canche	02	Baie de Canche	004	Pointe du Touquet - nord	504	503265N	0013543E
17	Boulogne et Canche	02	Baie de Canche	004	Touquet - Mollières	505	503225N	0013600E
18	Boulogne et Canche	02	Baie de Canche	004	Chenal Canche 2	506	503205N	0013621E
19	Boulogne et Canche	02	Baie de Canche	004	Cimetière britannique	508	503209N	0013664E
20	Boulogne et Canche	02	Baie de Canche	004	Etaples	509	503162N	0013716E
21	Boulogne et Canche	02	Baie de Canche	004	Chenal Canche 1	520	503186N	0013663E
22	Authie et Somme	03	Baie d'Authie	005	Pointe de La Rochette	501	502260N	0013517E
23	Authie et Somme	03	Baie d'Authie	005	Authie sud - sédiment	502	502223N	0013497E
24	Authie et Somme	03	Baie d'Authie	005	Château Robinet	503	502218N	0013568E

25	Authie et Somme	03	Baie d'Authie	005	Malgré le Monde	504	502234N	0013621E
26	Authie et Somme	03	Baie d'Authie	005	La Madelon de l'Authie	505	502228N	0013761E
27	Authie et Somme	03	Baie d'Authie	005	Pointe de la Dune Blanche	506	502205N	0013463E
28	Authie et Somme	03	Baie d'Authie	005	Mollières	507	502196N	0013483E
29	Authie et Somme	03	Baie de Somme	006	St, Firmin - la Maye 1	501	501491N	0013512E
30	Authie et Somme	03	Baie de Somme	006	St, Firmin - La Maye 2	502	501520N	0013472E
31	Authie et Somme	03	Baie de Somme	006	Le Crotoy ouest	503	501315N	0013711E
32	Authie et Somme	03	Baie de Somme	006	Le Crotoy - Aviation	504	501359N	0013644E
33	Authie et Somme	03	Baie de Somme	006	Le Crotoy 2	505	501290N	0013793E
34	Authie et Somme	03	Baie de Somme	006	Le Crotoy 1	506	501303N	0013814E
35	Authie et Somme	03	Baie de Somme	006	St, Valéry-sur-Somme	507	501141N	0013797E
36	Authie et Somme	03	Baie de Somme	006	Pointe du Hourdel - sud	508	501309N	0013442E
37	Dieppe et Fécamp	04	Le Tréport - Dieppe	007	Criel - ouest	513	500074N	0011557E
38	Dieppe et Fécamp	04	Le Tréport - Dieppe	007	Penly - est	514	495937N	0011316E
39	Dieppe et Fécamp	04	Le Tréport - Dieppe	007	Penly - Biville	515	500014N	0011448E
40	Dieppe et Fécamp	04	Le Tréport - Dieppe	007	Belleville-sur-Mer	516	495841N	0011111E
41	Dieppe et Fécamp	04	Fécamp - Etretat	009	Veulettes - Les Petites Dalles	501	495083N	0003227E
42	Dieppe et Fécamp	04	Fécamp - Etretat	009	Les Petites Dalles	502	494989N	0003023E

ANNEXE C : Caractéristiques des paramètres

PARAMETRES	CARACTERISTIQUES
LES METAUX	
Aluminium (Al)	Troisième métal en abondance dans la croûte terrestre, il est couramment sous forme de silicates d'aluminium seul ou mélangé avec d'autre métaux, mais jamais à l'état de corps pur. L'aluminium est utilisé dans les transports, les emballages, le bâtiment et l'industrie. Les eaux de surface en sont faiblement composées puisque ce métal est généralement lié au sédiment. L'aluminium sous sa forme métallique est insoluble, mais les sels d'aluminium sont solubles. Il n'a pas été formellement prouvé que l'aluminium constitue un danger pour la santé humaine, mais il peut être toxique pour le poisson. Il s'agit d'un constituant majeur du compartiment sédimentaire. La teneur en aluminium permet une évaluation de l'abondance des minéraux les plus riches en fer et en manganèse. Les fortes concentrations révèlent une abondance de particules fines (sédiments vaseux), riches en éléments traces. Les plus faibles révèlent des sédiments pauvres en argiles donc en éléments traces. Sources (22) (25) (28)
Fer (Fe)	Le fer a pour origine naturelle l'altération de la roche mère et pour origine anthropique les rejets industriels, urbains et agricoles. Après émission vers la colonne d'eau, il retourne à la phase particulaire par adsorption et surtout par précipitation sous forme d'oxydes et d'hydroxydes. De ce fait ils peuvent entraîner avec eux des contaminants métalliques. Source (25)
Lithium (Li)	Il constitue le plus léger des métaux avec une densité égale à la moitié de celle de l'eau. Le lithium est un élément modérément abondant et il est présent dans la croûte terrestre de l'ordre de 65 ppm (parties par million). Le lithium est surtout présent dans les minéraux ferromagnésiens. Il est utilisé industriellement en tant qu'épaississant de lubrifiant principalement. D'autres applications importantes dans les piles alcalines. Source (28)
Manganèse (Mn)	Cet élément présente les mêmes caractéristiques que le fer. Source (25)
LES ELEMENTS TRACES METALLIQUES	Le terme « métal lourd » désigne l'élément du tableau périodique de masse volumique supérieure à 4,5 g/cm³. Comme certains non métaux répondent à cette définition, le terme est remplacé par « élément trace métallique ou ETM ». Ceux-ci sont présents le plus souvent dans l'environnement sous forme de traces : mercure, plomb, cadmium, cuivre, arsenic, nickel, zinc, cobalt, manganèse. Les plus toxiques d'entre eux sont le plomb, le cadmium et le mercure. Source (22)

Arsenic (As)	Il est présent naturellement dans les sols à l'état de traces. Les apports au milieu marin sont d'origine anthropique. L'arsenic constitue un déchet majeur de l'industrie des métaux non ferreux. Dans les sédiments côtiers, les concentrations sont le plus souvent comprises entre 10 et 15 μg / g de sédiment sec. Les zones contaminées peuvent abriter des teneurs jusqu'à 100 fois plus élevées. La toxicité de cet élément dépend essentiellement des formes chimiques présentes dans le milieu ou accumulées dans le réseau trophique. Les ions arsénites et arséniates sont les formes les plus dangereuses pour les espèces marines et pour le consommateur de produits marins. Une synergie avec d'autres contaminants peut se présenter. Au niveau sublétal des concentrations de 0,05 à 1,2 μg / l peuvent provoquer des effets physiologiques pour les larves de crustacés (respiration, stimulation enzymatique) et des inhibitions de croissance pour le phytoplancton. Sources (22) (28)
Chrome (Cr)	Il est essentiellement extrait de la chromite (contenant de 40 à 60% de chrome et riche en fer). La sidérurgie et la métallurgie, les réfractaires et la chimie constituent les principaux secteurs d'utilisation. Cet élément atteint l'océan sous forme particulaire et insoluble. Peu de données sont disponibles sur la toxicité sublétale des différentes formes d'oxydation du chrome. Dans les sédiments, le seuil sans effet (Treshold Effect Level) est estimé à 52,3 μg / g. Source (22) (28)
Cuivre (Cu)	Il présente des effets toxiques à partir d'un certain seuil de concentration (oligo-élément). L'oxyde CuO utilisé comme substance active des peintures antisalissures marines (antifouling) est une source prépondérante d'introduction dans les zones portuaires. Une de ses caractéristiques est la formation de complexes avec des bases fortes telles que carbonates, nitrates, sulfates et chlorures. Il est introduit sous forme particulaire au milieu marin. Son adsorption rapide sur les sédiments riches en ligands, tels qu'hydroxydes de fer et de manganèse expliquent des niveaux élevés de présence dans les secteurs sous influence des apports. Sources (22) (28)
Mercure (Hg)	Le mercure est le plus toxique des métaux traces. Il se retrouve naturellement dans l'environnement sous forme de sulfure. Le cycle de transfert passe par une volatilisation, déposition sèche et pluie, et sédimentation. Les apports anthropiques sont principalement atmosphériques. Dans l'océan, il est essentiellement présent sous forme de méthylmercure, composé facilement assimilable par les organismes aquatiques. Il peut ainsi se concentrer, entre autres, dans les poissons piscivores et éventuellement présenter un risque pour la santé humaine lorsque ces organismes sont consommés fréquemment. Les sédiments côtiers constituent un réservoir important de mercure du milieu marin avec des teneurs moyennes vingt fois plus élevées que dans les sédiments océaniques profonds. Les variations de teneurs en mercure des sédiments en fonction de leur enfouissement, dépendent de leur granulométrie et de leur teneur en matière organique. L'ensemble du littoral français présente des concentrations moyennes de 0,04 à 1,2 μg/g exprimées par rapport au poids sec ; le bruit de fond géochimique

	étant voisin de 0,1 μg / g. Les seuils létaux ou sublétaux rapportés pour le mercure en milieu marin sont de l'ordre de 1000 ng/l. Ces teneurs sont largement supérieures aux concentrations mesurées dans le milieu. Sources (22) (24) (28)
Nickel (Ni)	Le nickel fait l'objet de peu d'études et n'est pas considéré par les conventions internationales malgré sa toxicité potentielle. Il est majoritairement introduit sous forme particulaire au milieu océanique. Cet élément présente une affinité pour les oxyhydroxydes de fer ou de manganèse et peut précipiter sous forme de sulfures. Les concentrations des sédiments côtiers varient selon les apports anthropiques et la couverture géologique du bassin versant. Les teneurs sont également fonction des caractéristiques granulométriques du sédiment ainsi que des conditions hydrodynamiques et biologiques du secteur. Les teneurs moyennes sont estimées à 55 $mg.kg^{-1}$. Pour les principaux ports français les sédiments dragués présentent des teneurs moyennes de l'ordre de 20 à 25 mg/kg sec, mais peuvent atteindre des valeurs maximales de 250 mg/kg sec en zone fortement polluée. La toxicité du nickel pour les organismes marins est considérée comme faible. Sources (22) (28) (29)
Plomb (Pb)	Il s'agit d'un métal toxique utilisé dans la fabrication des accumulateurs et comme antidétonant dans les carburants. Les apports anthropiques majeurs, en dehors des rejets industriels bien identifiés, sont atmosphériques.Le plomb est présent dans l'eau de mer essentiellement sous forme de carbonates $PbCO_3$ (40 à 80 %) ou de chlorures $PbCl_2$ (1 à 40 %) et $PbCl^+$ (2 à 19 %). Il possède une forte affinité pour la matière particulaire. La contamination sédimentaire décroît généralement de la surface vers les horizons profonds, témoignant ainsi des effets de l'ère industrielle. Certaines zones sous fortes influence anthropique peuvent dépasser 150 μg/g en milieu côtier. Dans les chenaux d'accès et les zones portuaires les teneurs moyennes sont de l'ordre de 60 μg/g en Mer du Nord-Manche. Des effet sublétaux sont observés pour des teneurs comprises entre 0,5 μg/l (croissance du phytoplancton) et 500 μg/l (apparition d'anomalies dans le développement embryonnaire des bivalves). Il s'agit d'un métal cumulatif (bioconcentration). Sources (22) (28)
Vanadium (V)	Comme le nickel, le vanadium est peu étudié malgré sa toxicité potentielle et est absent des conventions internationales. Le vanadium naturel de l'océan a pour origine principale l'activité volcanique et l'érosion de la croûte terrestre. Les voies fluviales et atmosphériques sont prépondérantes dans les apports anthropiques. Les apports atmosphériques proviennent de la combustion des matières fossiles. Il est retrouvé à hautes concentrations dans les effluents des industries produisant de l'oxyde de titane. Les teneurs en vanadium dissous de l'océan varient entre 1 et 3 μg/l. Les rares études menées en milieu côtier révèlent des concentrations très variables (de 0,61 μg/l à 7,1 μg/l dans la Mer Noire près des côtes). Source (29)

Zinc (Zn)	Les usages du zinc sont voisins de ceux du cadmium. Il est en outre utilisé dans les peintures antirouille et l'industrie pharmaceutique. Il se retrouve ainsi dans les zones portuaires par dissolution des masses de zinc pur fixées sur les parties immergées des bateaux (rôle anti-corrosif). Les sels de zinc sont moins toxiques que ceux du cuivre ou du cadmium. Les crustacés et les poissons présentent une faible sensibilité à la présence de zinc. Les données de surveillance dans les sédiments de la baie de Seine (RNO, 1995), dévoilent des valeurs comprises entre 15 et 70 mg/kg. Sources (22) (28)
LES MINERAUX LOURDS	
Titane (Ti)	Le titane est le neuvième élément le plus abondant dans la croûte terrestre et il est rencontré dans de nombreuses roches et sédiments. Néanmoins cet élément n'est pas rencontré sous forme pur dans la nature. Les apports à la mer sont d'origine industrielle. Il a la propriété de s'accumuler dans les tissus vivants qui contiennent du silicium, mais il ne possède aucun rôle biologique connu. Sources (22) (28)
Etain (Sn)	L'étain est utilisé dans de nombreux procédés industriels chimiques. En milieu aquatique il est présent sous forme dissoute et particulaire. Sources (22) (28)
LES INORGANIQUES MAJEURS	
Carbonate de calcium ($CaCO_3$)	Il provient naturellement de l'écorce terrestre et de la minéralisation de squelette de microorganismes. Sa production synthétique est moindre. Il est utilisé dans l'industrie (papetière), production de chaux, sidérurgie, agriculture. Les sédiments carbonatés peuvent provenir du remaniement par les vagues de roches calcaires pré-existantes. Les sédiments calcaires littoraux comprennent donc des constructions autochtones massives (récifs) ou réduites (stromatolites), des accumulations d'éléments brisés provenant de restes d'organismes ou de roches calcaires érodées, des vases calcaires formées des particules fines d'origine détritique, chimique ou biochimique, des précipitations carbonatées localisées autour de particules quelconques (oolites). Le carbonate de calcium est sous forme d'aragonite, de calcite, de calcite magnésienne (contenant une quantité variable de MgCO3) et de dolomite (Ca,Mg) CO3. Source (22)

<table>
<tr><td>Fluorures
(F)</td><td>Les sels de fluor sont trouvés naturellement dans le minerai de cryolithe, et utilisés dans l'industrie. Comme la plupart des métalloïdes, le fluor n'est jamais rencontré sous sa forme moléculaire libre. Les sources industrielles de pollution par le fluor comprennent les activités de fabrication de fluor et de sels de fluor, de cryolite artificielle, d'aluminium (production primaire par procédé électrolytique), et les activités de traitement de surfaces. Des concentrations en fluorures de l'ordre de 1,5 à 2 mg/l sont sans effet sur la faune et la flore aquatiques. Source (30)</td></tr>
<tr><td>LES COMPOSES ORGANIQUES</td><td></td></tr>
<tr><td>PCB</td><td>Les polychlorobiphényles ou PCB appartiennent à une famille de 209 congénères produits artificiellement par chloration du biphényle. Ils sont désignés par CB suivi d'un numéro correspondant à leur structure selon la nomenclature. Les PCB sont physiquement et chimiquement très stables. Ces caractéristiques ainsi que leur qualité d'isolant électrique ont conduit à leur grande utilisation dans l'industrie, mais sont, en contrepartie, responsables de la persistance de ces composés dans l'environnement. Ils sont utilisés dans l'industrie, dans les transformateurs, comme isolant diélectrique et fluide caloporteur. Ces composés sont très rémanents car semi-volatils, hydrophobes et persistants. Leur faible solubilité explique leur tendance à se lier aux particules de l'air et de l'eau. Les congénères analysés sont présentés dans le tableau suivant :
<table>
<tr><th>Désignation</th><th>Descriptif</th></tr>
<tr><td>CB28</td><td>2,4,4' - Tri chlorobiphényle</td></tr>
<tr><td>CB31</td><td>congénère de PCB 31</td></tr>
<tr><td>CB35</td><td>congénère de PCB 35</td></tr>
<tr><td>CB52</td><td>2,2',5,5' - Tétrachlorobiphényle</td></tr>
<tr><td>CB101</td><td>2,2',4,5,5' - Pentachlorobiphényle</td></tr>
<tr><td>CB105</td><td>2,3,3',4,4' - Pentachlorobiphényle</td></tr>
<tr><td>CB118</td><td>2,3',4,4',5' - Pentachlorobiphényle</td></tr>
<tr><td>CB138</td><td>2,2',3,4,4',5 - Hexachlorobiphényle</td></tr>
<tr><td>CB153</td><td>2,2',4,4',5,5' - Hexachlorobiphényle</td></tr>
<tr><td>CB156</td><td>2,3,3',4,4',5 - Hexachlorobiphényle</td></tr>
<tr><td>CB180</td><td>2,2',3,4,4',5,5' - Heptachlorobiphényle</td></tr>
</table>
Dans le sédiment superficiel de la zone centrale de la Mer du Nord, les niveaux de PCB sont extrêmement faibles (<0,1 ng/g). Les concentrations augmentent dans les prélèvements de sédiments plus côtiers et atteignent quelques nanogrammes par gramme à proximité des embouchures des rivières ou de zones de dépôt de dragages. Les PCB ne présentent de toxicité aiguë. La toxicité est défini par le concept de toxicité équivalente dioxine et des facteurs d'équivalent toxique. Cette approche permet le calcul de la toxicité en prenant en compte les contributions des différents congénères.. Ils peuvent se concentrer dans les poissons, les mollusques et les crustacés dont la consommation peut ainsi nuire à la santé humaine ou à la faune. Les PCB sont considérés cancérigènes chez l'humain. Source (28)</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td>DDT</td><td>Le DDT (dichlorodiphényltrichloréthane) est insecticide puissant à large spectre employé dans la lutte anti-paludique dont l'utilisation date des années 40. Il se retrouve dans l'environnement par dispersion atmosphérique, érosion du sol par le vent et l'eau, et adsorption aux particules des cours d'eau. Le DDT est très persistant dans l'environnement ; il se concentre dans les poissons, les mollusques et les crustacés dont la consommation peut ainsi nuire à la santé humaine ou à la faune. Il est considéré comme cancérigène chez l'humain. Le DDE (dichlorodiphényldichloréthylène) et le DDD (dichlorodiphényldichloréthane) sont les métabolites (produits de dégradation) du DDT, et sont plus toxiques et plus persistants que le parent. Ils présentent une toxicité pour les poissons et pour l'homme à fortes doses. L'interdiction d'utilisation de cet insecticide date de 1972. Le SDDT correspond à la somme des métabolites. Source (26)</td></tr>
<tr><td>HCH</td><td>L'hexachlorocyclohexane (HCH) est une substance synthétique qui existe sous huit formes chimiques appelées isomères. La désignation de ces isomères est fonction de la position des atomes d'hydrogène dans la structure chimique. Le γ-HCH ou Lindane à l'isomère gamma du HCH à 99,5 %, et c'est le seul isomère actif du HCH qui ait des propriétés pesticides. La fixation sur les sédiments est généralement faible. Le α-HCH est un composé chloré de synthèse constituant la part la plus importante des isomères formés lors de la synthèse du HCH, qui ne doit apparaître pour plus de 1% dans la formulation du lindane. C'est donc un sous-produit du lindane sans activité insecticide. Ces derniers sont toxiques pour de nombreuses espèces de poissons et de mollusques. Source (26)</td></tr>
<tr><td>HAP</td><td>Il s'agit de molécules constituées de plusieurs noyaux aromatiques ayant en commun plus d'un atome de carbone. Cette classe de composés chimiques entrent dans la composition des pétroles bruts. Elle est libérée dans l'environnement principalement à la suite de la combustion incomplète de carburants organiques (combustible fossile, bois, coke, etc.). Ceux-ci existent à l'état naturel. Les molécules de HAP analysés dans cette étude sont présentés dans le tableau suivant.
<table>
<tr><th>Code</th><th>Désignation</th></tr>
<tr><td>BZAANT</td><td>benzo(a)anthracène</td></tr>
<tr><td>BZAPYR</td><td>benzo(a)pyrène</td></tr>
<tr><td>BZBFLU</td><td>benzo(b)fluoranthène</td></tr>
<tr><td>BZGHIPER</td><td>benzo(g,h,i)pérylène</td></tr>
<tr><td>BZKFLU</td><td>benzo(k)fluoranthène</td></tr>
<tr><td>CHRYSEN</td><td>Chrysène</td></tr>
<tr><td>DBZAHANT</td><td>dibenzo(a,h)anthracène</td></tr>
<tr><td>FLUORAN</td><td>Fluoranthène</td></tr>
<tr><td>IND123PY</td><td>indeno(1,2,3-cd) pyrène</td></tr>
<tr><td>PYRENE</td><td>pyrène</td></tr>
</table>
Les HAP les plus préoccuppants sont ceux de masse moléculaire élevée. Ceux-ci sont persistants, peu solubles dans l'eau et tendent, dans l'air et l'eau, à se lier aux particules.Leur persistance dans l'environnement est moindre que celle des</td></tr>
</table>

	PCB dans la mesure où ils sont sensibles à la lumière. En raison de leur caractère lipophile, les HAP sont concentrés dans les sédiments et les organismes vivants tels les poissons, les mollusques et les crustacés dont la consommation peut nuire à la santé humaine. Les niveaux rencontrés dépendant de la nature et des sources de contamination. Dans les zones portuaires, les concentrations sont fréquemment supérieures au μg / g. Des teneurs en HAP totaux comprises entre 1 ng/g et 20,8 μg/g ont été rencontrées dans les sédiments de la Méditerranée occidentale. Le benzo(a)pyrène constitue le composé le plus toxique de cette famille et est reconnu cancérigène depuis de nombreuses années.La toxicité aiguë varie dans de très grandes proportions, mais les risques écotoxicologiques les plus importants se situent au niveau des effets cancérogènes et mutagènes. Source (26)

ANNEXE D : Teneurs brutes métalliques et organiques mesurées au sein des sédiments

Teneurs métalliques

N°	sedim	AL	AS	CD	CR	CU	FE	LI	MN	HG	NI	PB	SN	TI	V	ZN	CACO3	F
1	*24,2*	18000	9,9	0,21	25	6,8	10300	20	150	0,1	7,1	17	4,5	753	34,3	59,5	14,5	247
2	*2,4*	15000	6,4	0,16	18	3,7	8120	17	108	0,03	5,4	13	0,5	501	24,3	34,1	10,8	165
3	*20,7*	20000	6,3	0,23	29	5,6	10700	23	140	0,06	7,8	16	0,7	991	41,9	56,1	15,2	287
4	*18,8*	13000	4,1	0,37	14	2,4	5950	12	94,8	0,02	3,8	9	0,5	547	18,8	29,4	10,5	150
5	*11,2*	30000	87,7	0,12	45	6,6	45700	51	44,1	0,03	37,9	19	0,5	916	72,6	69,6	2,3	204
6	*33,4*	23000	6,2	0,1	28	3,6	13600	28	165	0,01	9,2	8,7	0,2	1060	44,4	38,8	16,4	474
7	*3,0*	12000	2,9	0,15	8,5	1,8	4320	9,5	62,6	0,01	2,9	7,5	0,4	297	9,5	22,3	6,6	147
8	*1,3*	10000	1,8	0,1	6,7	1,3	2550	8,3	54,5	0,01	1,5	5,5	4,2	342	6,9	15,8	6,3	298
9	*3,3*	9470	2,2	0,1	6,7	1,5	3070	9,5	49	0,01	2,4	5,9	0,2	251	8,4	18,9	6,7	262
10	*3,5*	12400	4	0,16	12	2,4	4630	13	72,8	0,03	3,7	8,4	0,5	424	15,5	30,8	6,9	81
11	*1,0*	10400	2	0,1	9,2	2,5	2660	13	51,5	0,01	3,5	8,5	0,6	395	14,9	30,2	5,2	96
12	*3,4*	11700	2,8	0,15	8,4	1,9	3950	11	65,9	0,01	3	6,9	0,3	425	9,8	22,3	8,7	64
13	*1,6*	10800	2,8	0,1	12	2,5	3840	9,6	64,7	0,01	3,3	6,7	0,4	365	9,6	19,3	6,8	32
14	*4,8*	11600	4,5	0,1	14,3	1,5	6930	12	83,4	0,01	3,7	8,3	0,2	506	16,3	20,5	8,4	144
15	*2,5*	9900	3,1	0,36	8,8	1,6	4110	8,8	69,6	0,01	2,4	5,1	0,2	394	8,4	18	8,5	49
16	*1,2*	12000	4,1	0,31	12	2,5	5050	7,2	86,3	0,01	3,3	5,3	0,5	345	8,2	17,7	14,3	81
17	*9,3*	8600	3	0,25	8,1	1,2	3220	11	79	0,02	1,9	8,8	2,3	447	13	27,1	8,1	204
18	*61,4*	27000	8	1	45	19,4	18300	29	214	0,14	13,3	36	1,9	1610	53,5	173	22,1	385
19	*54,5*	20000	5,2	0,44	31	7,9	12900	19	171	0,06	8,9	15	1	1140	34,1	65,1	21,9	208
20	*31,3*	15000	4	0,3	21	4	7800	12	125	0,04	4,5	9,9	3	817	19	35,4	14,5	139
21	*39,1*	17000	5,4	0,36	27	6	10500	17	146	0,04	7,2	13	0,8	1050	27,8	51,8	16,8	238
22	*4,2*	9480	1,9	0,1	8,9	1,5	3360	9,5	70,6	0,01	2	5,7	0,2	352	8,5	17	7,1	64
23	*10,5*	11100	2,2	0,14	12,3	2,2	5310	12	88,9	0,02	3,1	7,5	0,4	540	13,6	26,5	10,1	522

N°	sedim	AL	AS	CD	CR	CU	FE	LI	MN	HG	NI	PB	SN	TI	V	ZN	CACO3	F
24	*3,2*	11000	2	0,13	11,4	1,5	4720	10	72,9	0,01	2,5	6,2	0,2	384	9,9	21,1	9,7	309
25	*9,8*	11100	2,4	0,2	13,3	2,1	6870	11	96,7	0,02	3,2	7	0,2	569	14,1	26,7	11,5	440
26	55,8	19700	5	0,79	29,5	9,1	13000	19	204	0,08	8,4	17	0,7	1370	32,3	70,5	19	490
27	64,6	15400	5,6	0,4	25,6	6,1	11600	20	119	0,07	7,7	16	0,9	1020	33,7	60,8	21,6	465
28	71,5	23700	6,4	0,34	40,5	10,6	15400	29	183	0,21	11,2	30	1,8	1400	47,3	92,9	20,3	384
29	*20,2*	12900	4,7	0,18	19	3,1	9650	13	130	0,03	5,1	9,9	0,2	858	22,1	46,1	18,9	288
30	9,3	12300	4,2	0,13	16	2,1	9420	11	122	0,02	3,8	7,9	0,3	819	17,7	27,7	15,5	447
31	11,0	11000	3,2	0,14	14,6	2,6	6680	11	94,1	0,03	3,3	8,5	0,2	542	14,6	29,3	14,6	259
32	*7,6*	12100	3,6	0,15	16,2	2,1	8990	11	116	0,02	4,1	8,1	0,4	843	18,7	31,6	13,3	205
33	*30,7*	14900	4,4	0,63	23,9	8,6	11200	16	127	0,06	6,1	15	0,8	849	28,1	61,6	20	420
34	*40,3*	16000	5	0,31	24,4	6,4	11200	18	150	0,06	7	15	0,6	1010	29,7	58,9	17,8	302
35	*12,2*	11800	4,3	0,27	20,5	6,1	11200	13	134	0,05	5,3	12	0,4	698	24,8	52	15,9	317
36	*25,5*	11700	3,9	0,21	17,8	3,7	9760	12	133	0,04	5,3	9,8	0,2	678	22,6	41	20,4	261
37	*18,2*	9300	4,3	0,21	21,6	4,7	10200	14	89,2	0,06	5,5	13	0,7	1010	28	47,5	20,1	273
38	*3,9*	6190	3,3	0,12	14,9	2,4	9580	9,9	61,6	0,02	3,8	8,6	0,3	567	18,1	28,1	7,3	163
39	*5,5*	7600	4	0,16	17	2,5	11300	11	69,2	0,04	4	10	0,4	686	22	34,3	7,6	222
40	*5,3*	5490	3	0,1	12,5	2,4	9020	8,4	52,4	0,02	3,2	7,4	1,1	804	17,4	27,2	5,2	94
41	*6,8*	6920	2,6	0,1	12,7	2,8	7300	11	101	0,03	3	9,2	0,2	738	16,9	30	11,6	126
42	*47,9*	22100	8,6	0,22	46,6	10	17200	30	232	0,16	12,3	30	1,7	1510	51,5	92,1	21	484

Teneurs organiques

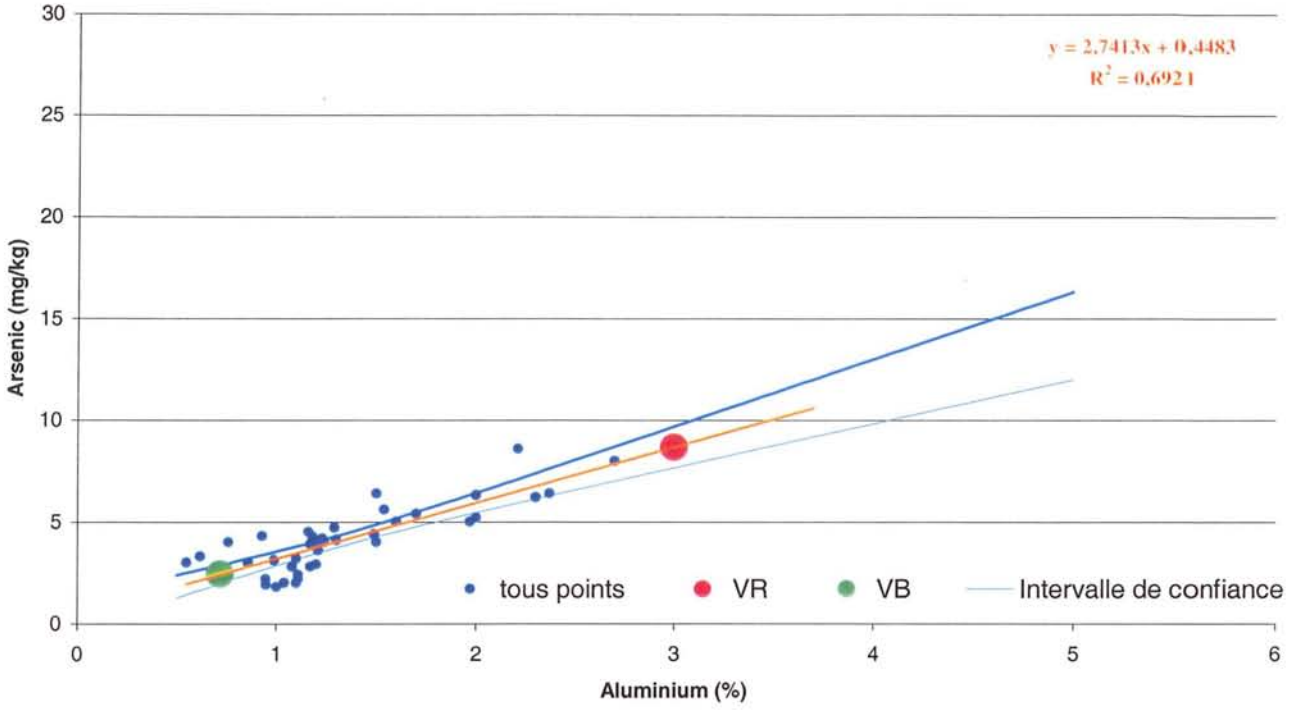
N°	CORG	CB101	CB105	CB118	CB138	CB153	CB156	CB180	CB28	CB31	CB35	CB52
1	14	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
2	9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
3	10	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
4	7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
5	26	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
6	14	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
7	4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
8	1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
9	3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
10	8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
11	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
12	7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
13	4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
14	4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
15	9	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
16	9											
17	7	0,15	0,1	0,1	0,3	0,25	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
18	37	0,6	0,4	0,7	1,1	1,1	0,1	0,6	0,3	0,1	0,5	0,4
19	56	0,3	0,1	0,3	0,6	0,6	0,1	0,2	0,1	0,1	0,5	0,1
20	10	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
21	22	0,2	0,1	0,1	0,5	0,4	0,1	0,2	0,1	0,1	0,5	0,1
22	5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
23	7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
24	5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1

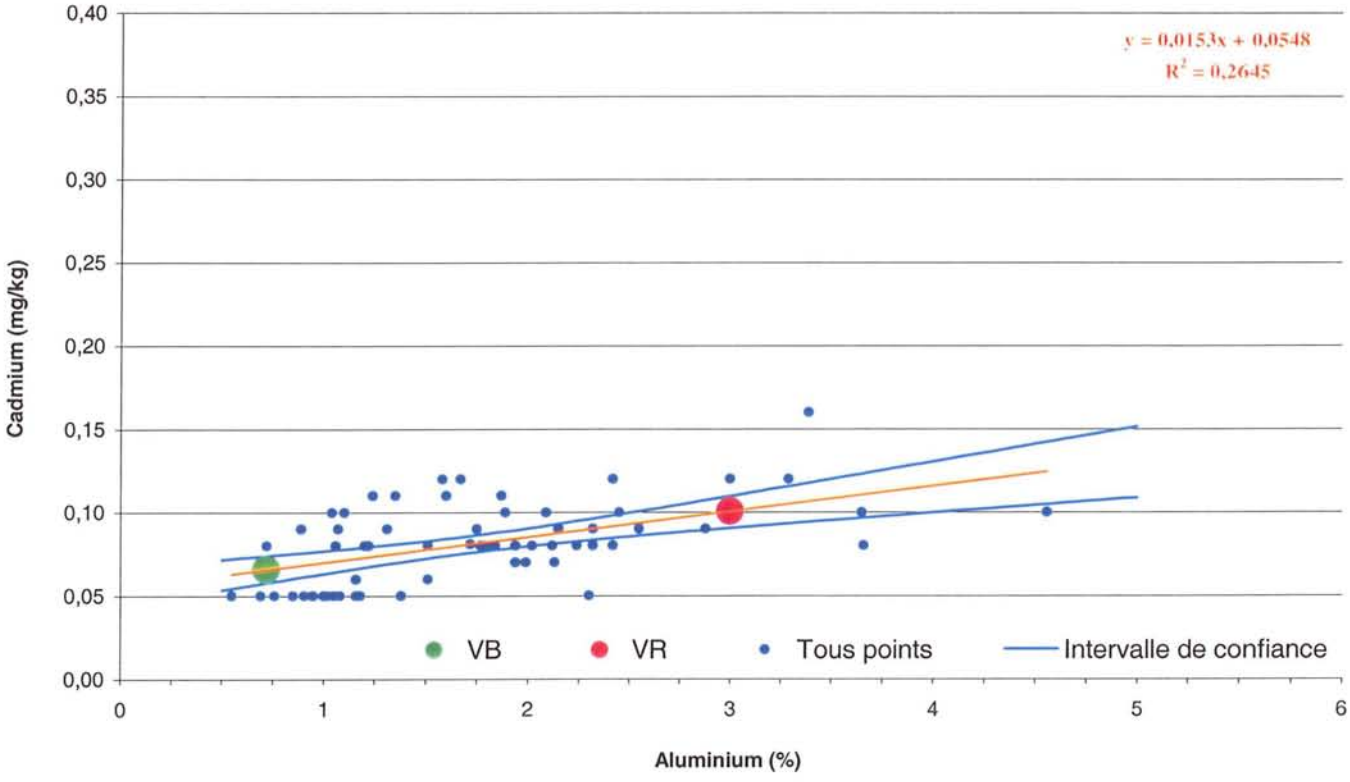
N°	CORG	CB101	CB105	CB118	CB138	CB153	CB156	CB180	CB28	CB31	CB35	CB52
25	8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
26	3,3	0,5	0,2	0,5	0,8	0,8	0,1	0,3	0,2	0,1	0,5	0,3
27	4,9	0,3	0,2	0,5	0,6	0,7	0,1	0,2	0,3	0,1	0,5	0,2
28	4,2	1,4	1,1	2,2	2,8	2,7	0,2	1,3	0,5	0,3	0,5	0,8
29	21	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,5	0,1
30	9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
31	11	0,2	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
32	10	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
33	24	0,65	0,2	0,8	1	1,2	0,1	0,7	0,3	0,1	0,5	0,4
34	34	1,1	0,2	0,5	0,8	0,9	0,1	0,3	0,4	0,2	0,5	0,4
35	13	0,5	0,1	0,3	0,5	0,6	0,1	0,2	0,1	0,1	0,5	0,3
36	16	1	0,2	0,5	2,1	3,1	0,2	3,6	0,1	0,1	0,5	0,3
37	21											
38	7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
39	9	0,8	0,2	0,7	1,5	1,6	0,2	1,4				0,2
40	4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
41	14											
42	51	1,6	0,6	1,9	2,8	2,4	0,1	1	1	0,5	0,5	0,9

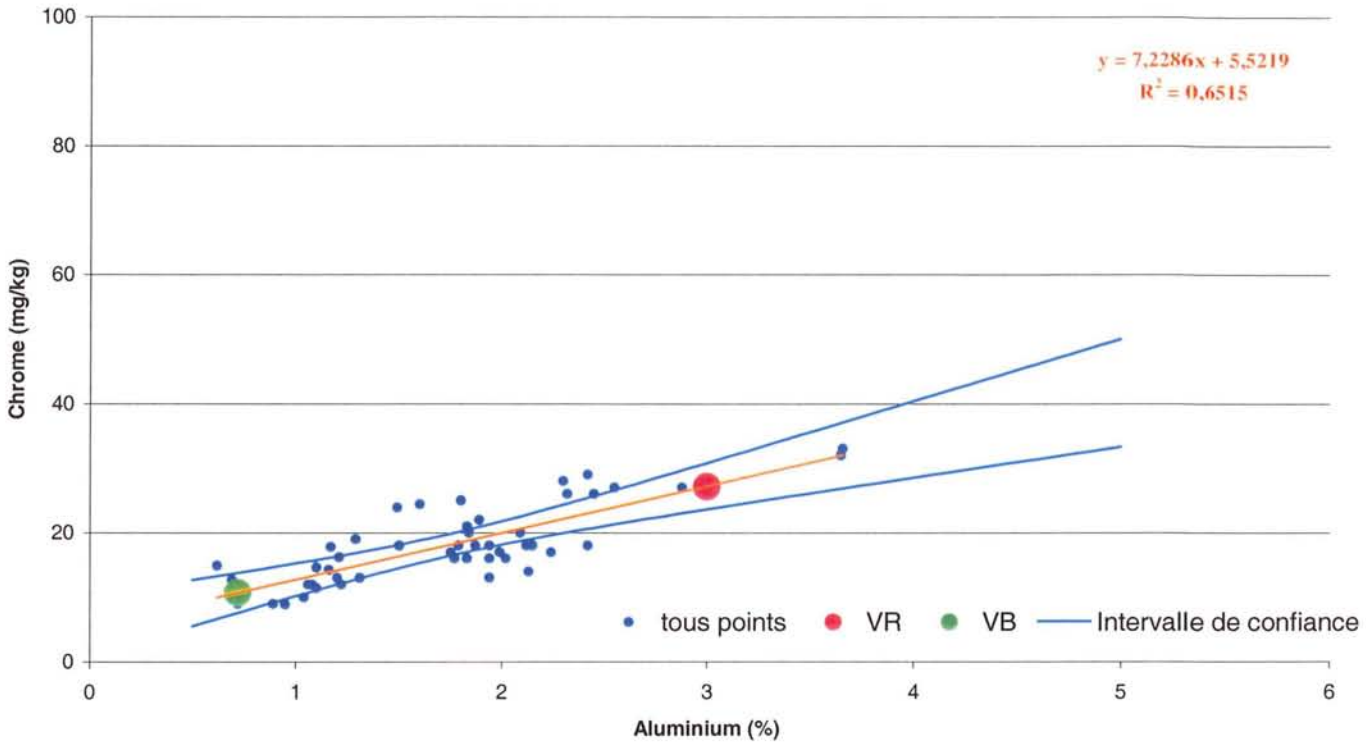
N°	DDD	DDT	SDDT	HCH	HCH	CHRYSEN	PYRENE	FLUORAN	BZAANT	BZAPYR	BZBFLU	BZGHIPER	BZKFLU	DBZAHANT	IND123PY
1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	190	300	520	180	14	120	44	75	13	71
2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	4,4	7,8	18	4,4	9	9,9	7,9	5,3	1	9,1
3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	9,1	9,6	27	9	20	25	21	12	1,3	20
4	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	9,1	12,5	21	8,3	2	11	4,6	5,5	1,3	7,3
5	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	2,3	1,5	6	1	1,3	1,9	9,3	1	2	2
6	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	2	2,5	4,1	1,5	1,7	2,9	1,7	1,2	1	2
7	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	5,9	3,5	5,4	3,2	4	5,3	3,8	2,8	1	4,7
8	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	1,4	2,1	3	1	1	1,7	1	1	1	1,1
10	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	1,5	2,2	2,8	1,1	1	1,8	1	1	1	1
11	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	1	1	1,3	1	1	1	1	1	1	1
12	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	1,3	2	2,7	1	1,2	2,2	1,7	1	1	2
13	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	1,5	4,3	3,2	1,3	1,4	2	1,6	1	1	1,7
14	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	7,3	16	41	8,6	16	17	13	8	1	11
16															
17	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	11	16,5	24	8,1	8,9	10,5	6,1	13	5,1	1
18	0,3	0,1		0,1	0,1	340	400	670	212	235	430	280	190	49	260
19	0,1	0,1		0,1	0,1	57	81	110	53	65	77	63	36	11	53
20	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	15	35	37	13	35	21	15	10	3,2	14
21	0,1	0,1		0,1	0,2	48	79	106	47	49	50	40	25	4,4	36
22	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	4,4	7	10	4,1	5,3	6,1	5,1	2,8	1	4,9
23	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	5	9,1	10	4,4	4,9	6,3	4,5	3	1	4,8
24	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	5,1	7,8	9	5,5	6,3	6,1	5,3	3,2	1	4,4
25	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	31	42	52	29	29	27	21	14	2,7	18
26	0,1	0,1		0,1	0,1	76	130	140	73	81	89	63	45	13	68

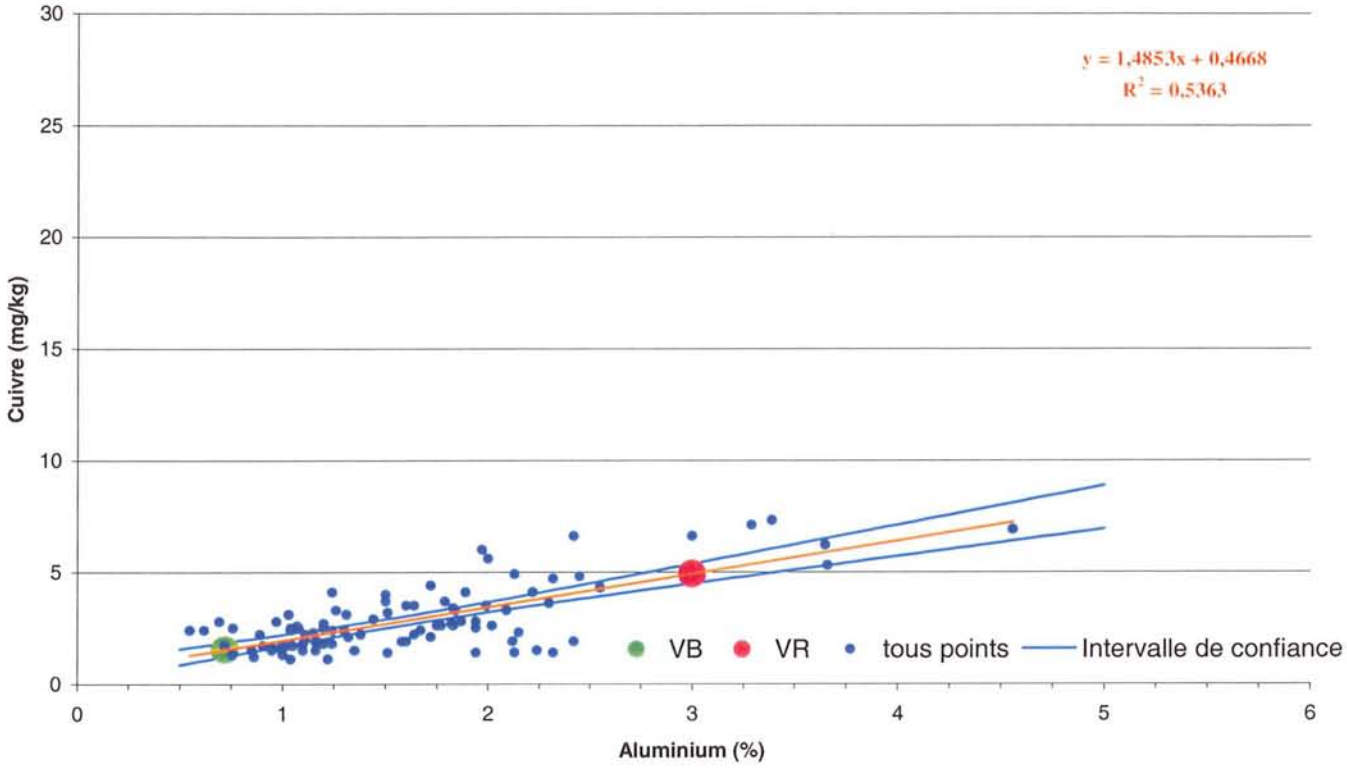
N°	DDD	DDT	SDDT	HCH	HCH	CHRYSEN	PYRENE	FLUORAN	BZAANT	BZAPYR	BZBFLU	BZGHIPER	BZKFLU	DBZAHANT	IND123PY
27	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	52	92	98	50	60	61	45	31	8,2	47
28	0,2	1	1,8	0,1	0,2	98	140	190	85	92	115	74	55	11	79
29	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	43	65	86	45	48	37	34	20	4,6	26
30	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	11	18	22	11	13	10	10,5	5,4	1	7,9
31	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	21 34	34	38	18	21	23	16	11	2,8	17
32	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	17	30	32	17	19	18	14	9,5	2,3	14
33	0,3	0,2	0,7	0,1	0,1	83	120	170	84	88	85	68	43	9,8	56
34	0,1	0,1	0,3	0,1	0,3	63	94	130	59	69	68	56	35	6,2	47
35	0,2	0,3		0,1	0,2	75	110	160	78	76	72	55	38	9,8	49
36	0,1	0,4		0,1	0,1	45	80	91	49	49 .	52	39	27	7,8	40
37															
38	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	7,3	7,4	8,7	5,4	6,1	7,4	5,9	3,8	1	6,2
39		0,8				7,1	13	13	6,7	8,1	9,9	8,7	4,8	1,2	8,6
40	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	12	16	16	11	15	15	13	7,5	2,1	13
41															
42	0,1	0,2		0,1	0,1	83	130	140	71	100	120	98	59	16	100

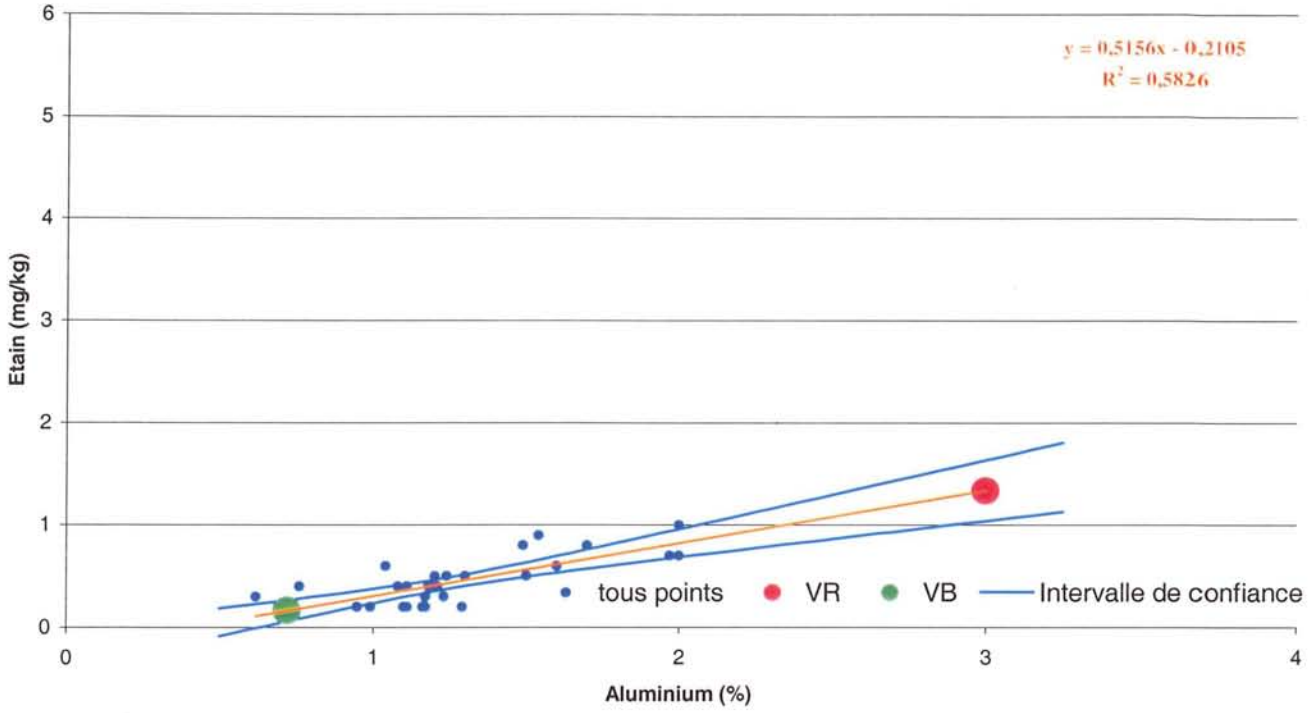
ANNEXE E : Corrélation aluminium / élément métallique

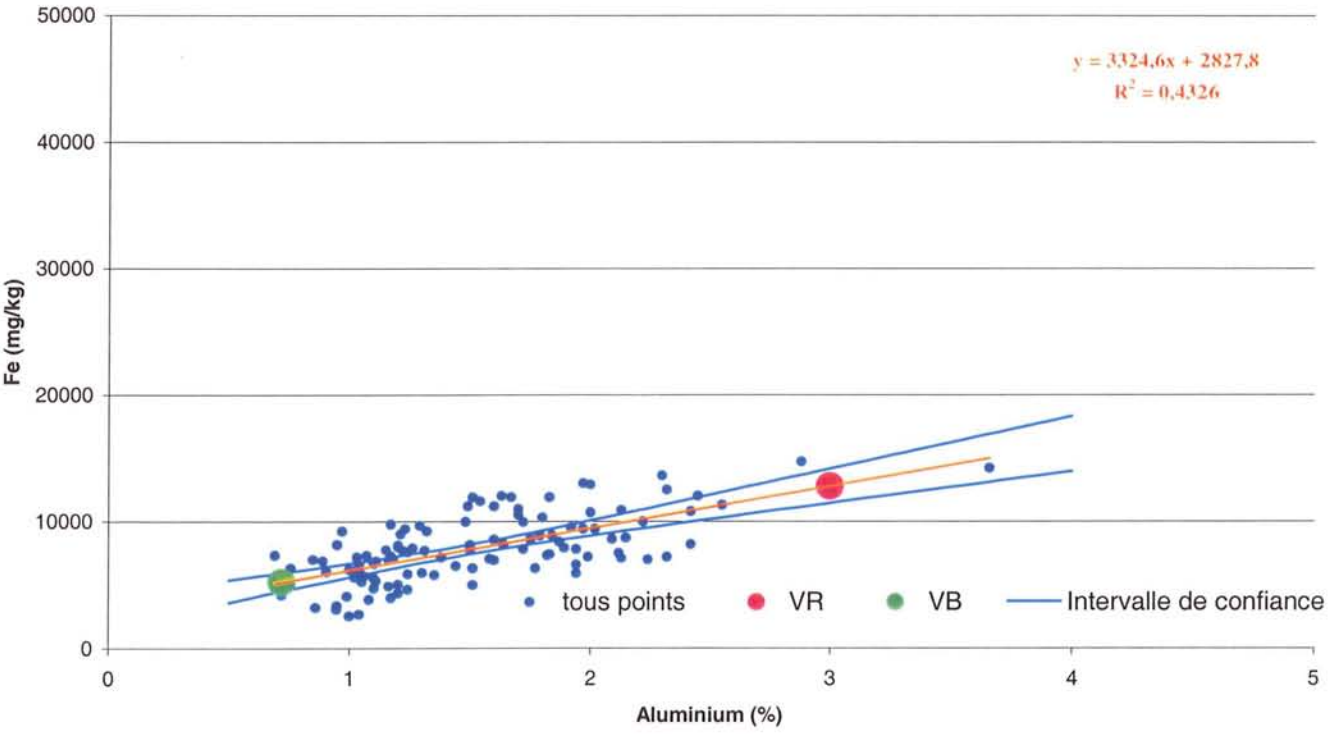


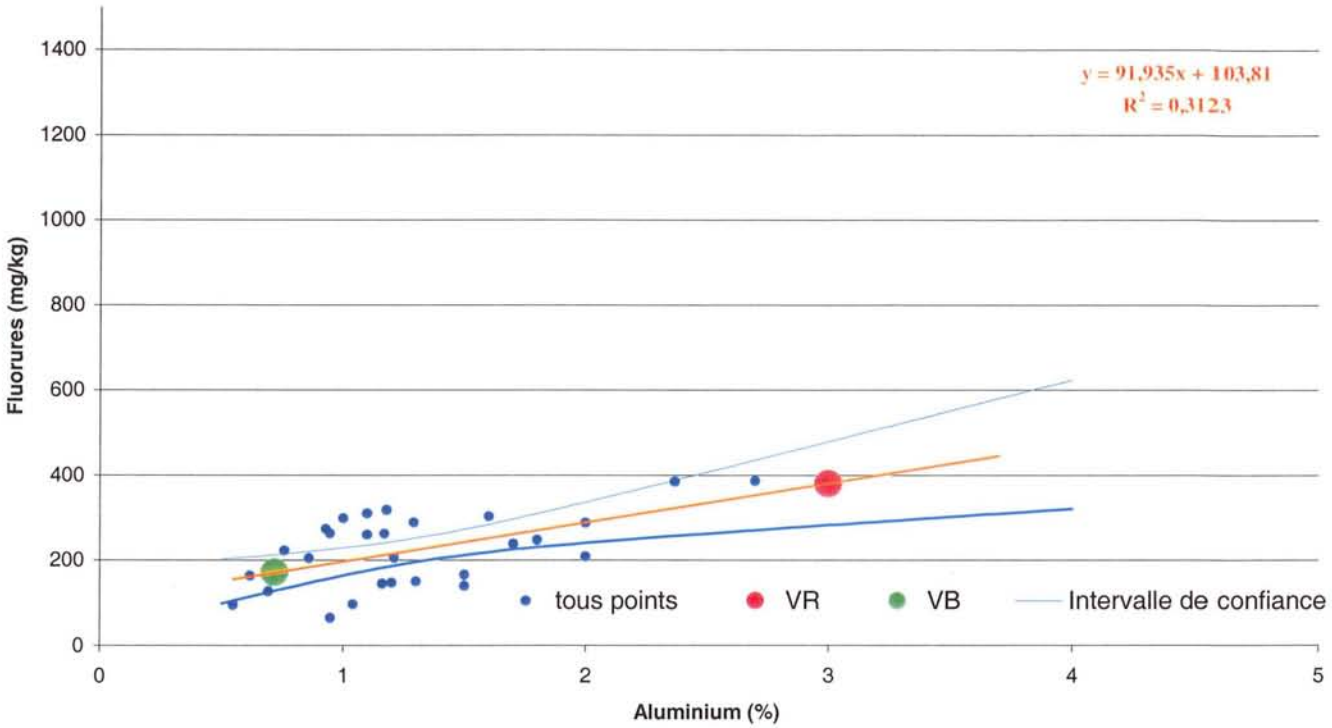


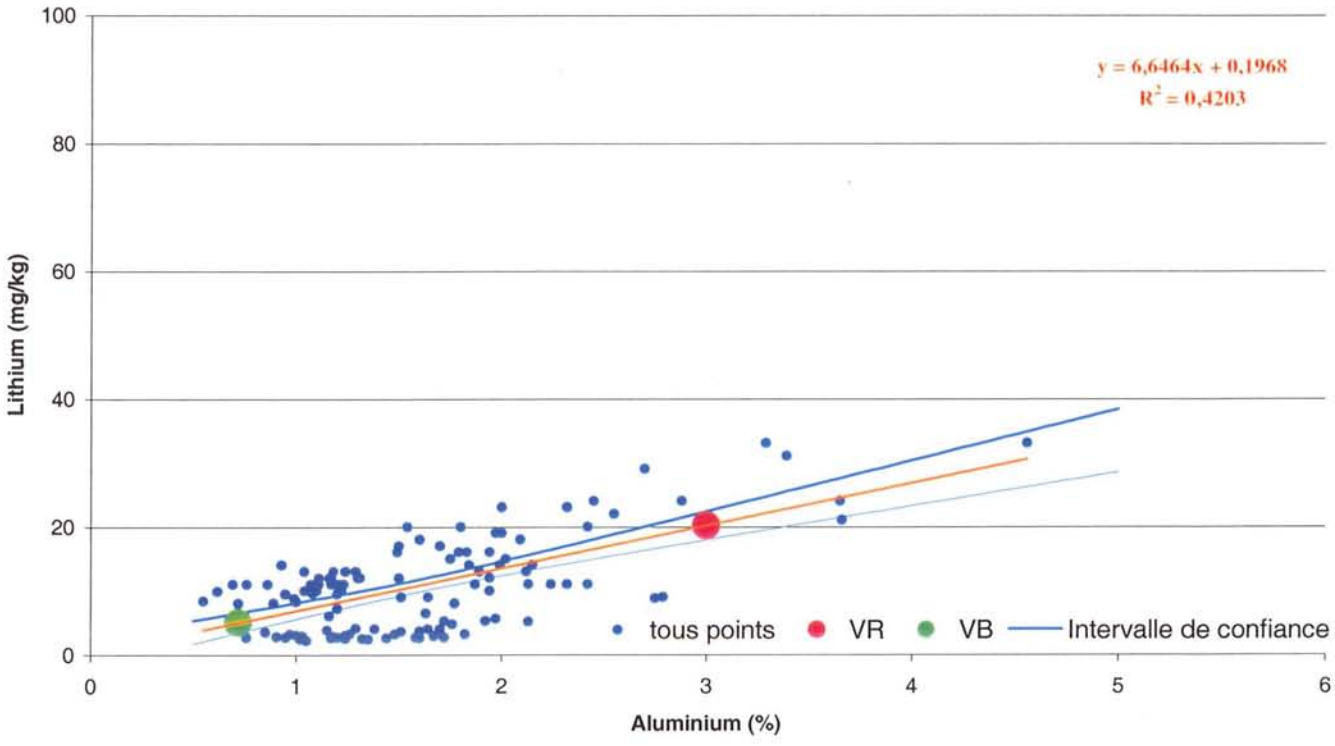

y = 7,2286x + 5,5219
R² = 0,6515
Chrome (mg/kg)
Aluminium (%)
tous points
VR
VB
Intervalle de confiance

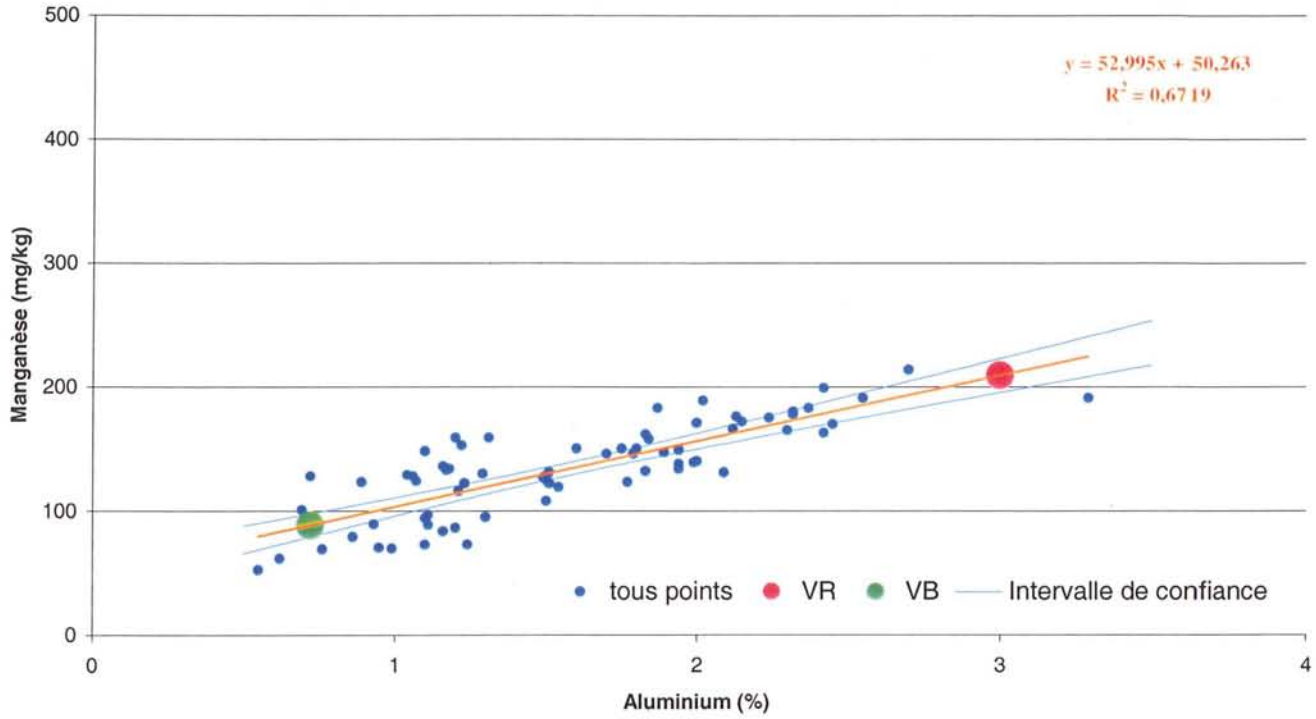

y = 1,4853x + 0,4668
R² = 0,5363
Cuivre (mg/kg)
Aluminium (%)
VB
VR
tous points
Intervalle de confiance

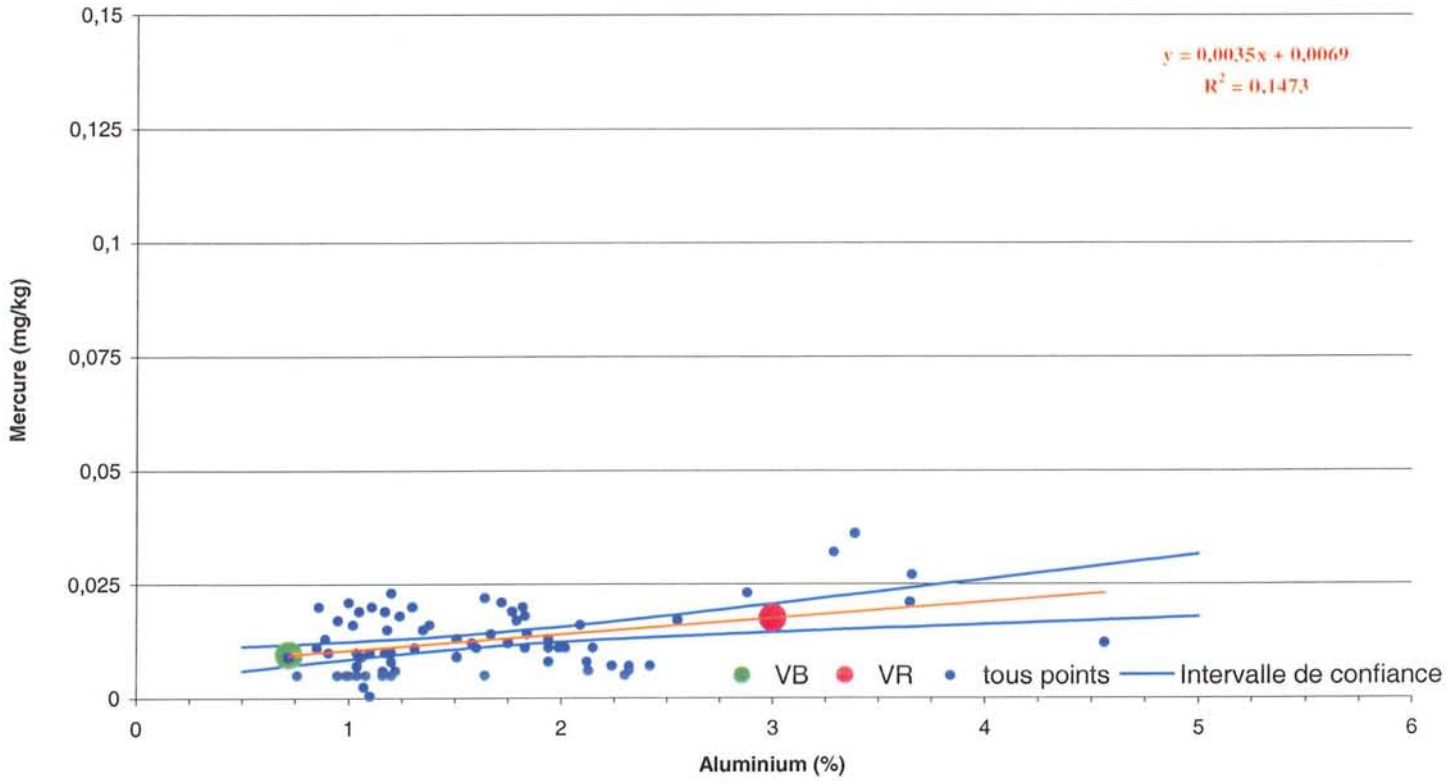

y = 0,5156x - 0,2105
R² = 0,5826
Etain (mg/kg)
Aluminium (%)
tous points
VR
VB
Intervalle de confiance

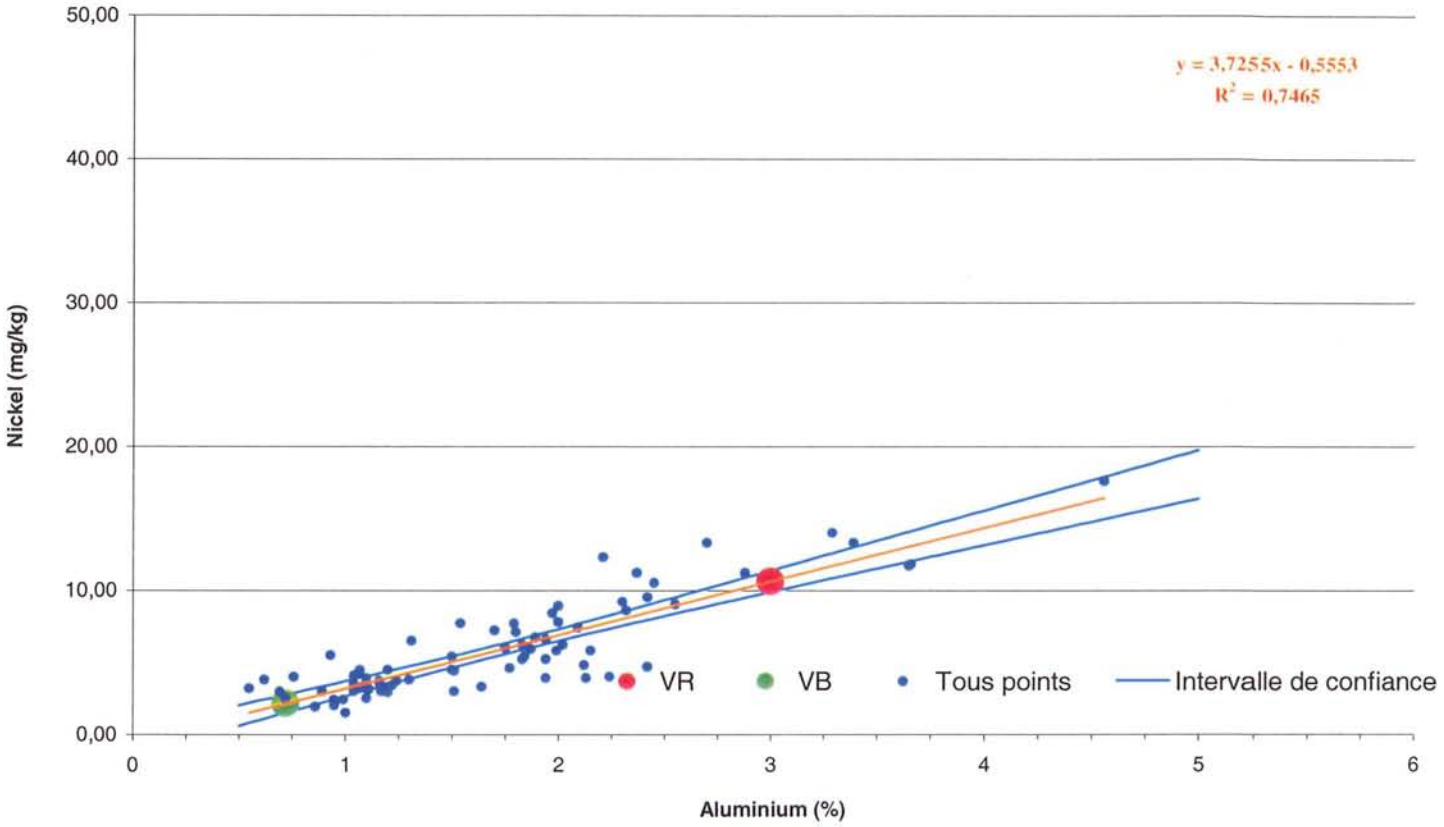

y = 3324,6x + 2827,8
R² = 0,4326
Fe (mg/kg)
Aluminium (%)
tous points
VR
VB
Intervalle de confiance

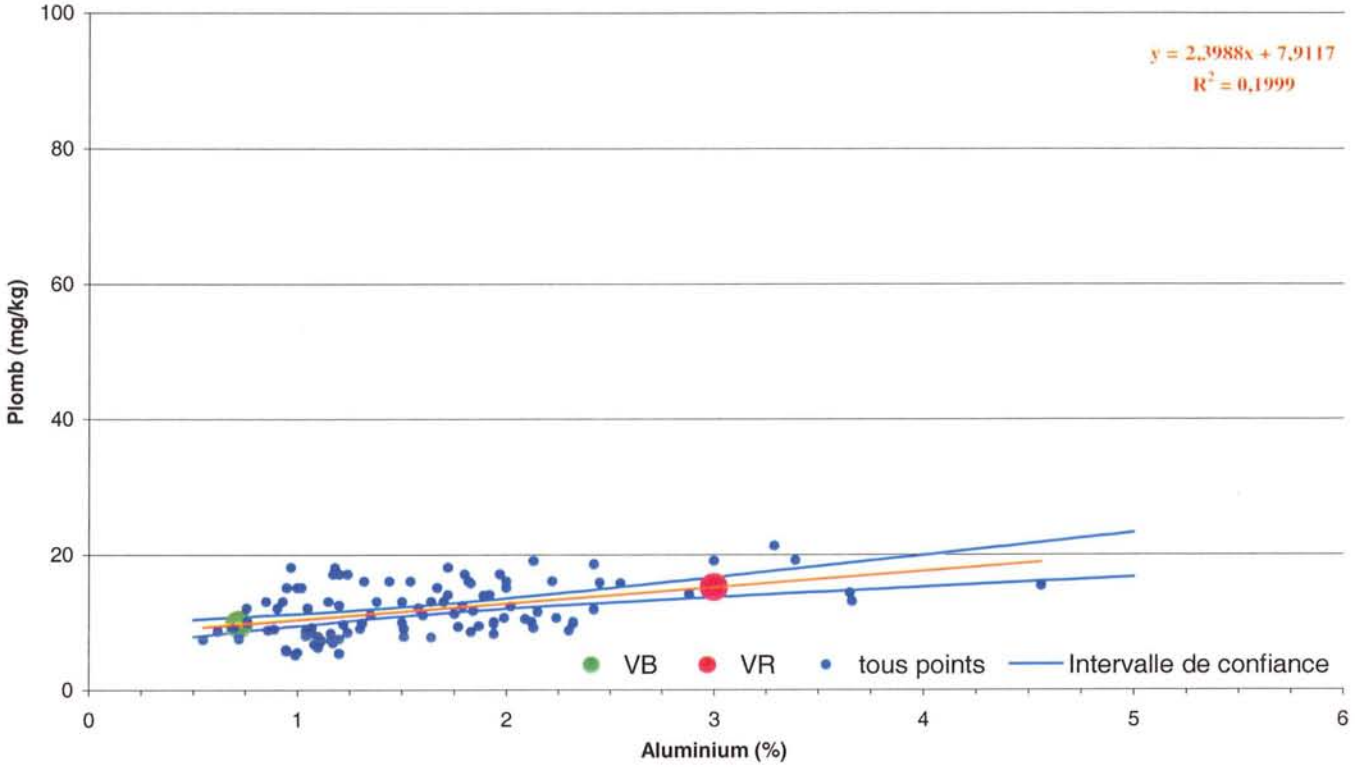

y = 91,935x + 103,81
R² = 0,3123
Fluorures (mg/kg)
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
1
2
3
4
5
Aluminium (%)
tous points
VR
VB
Intervalle de confiance

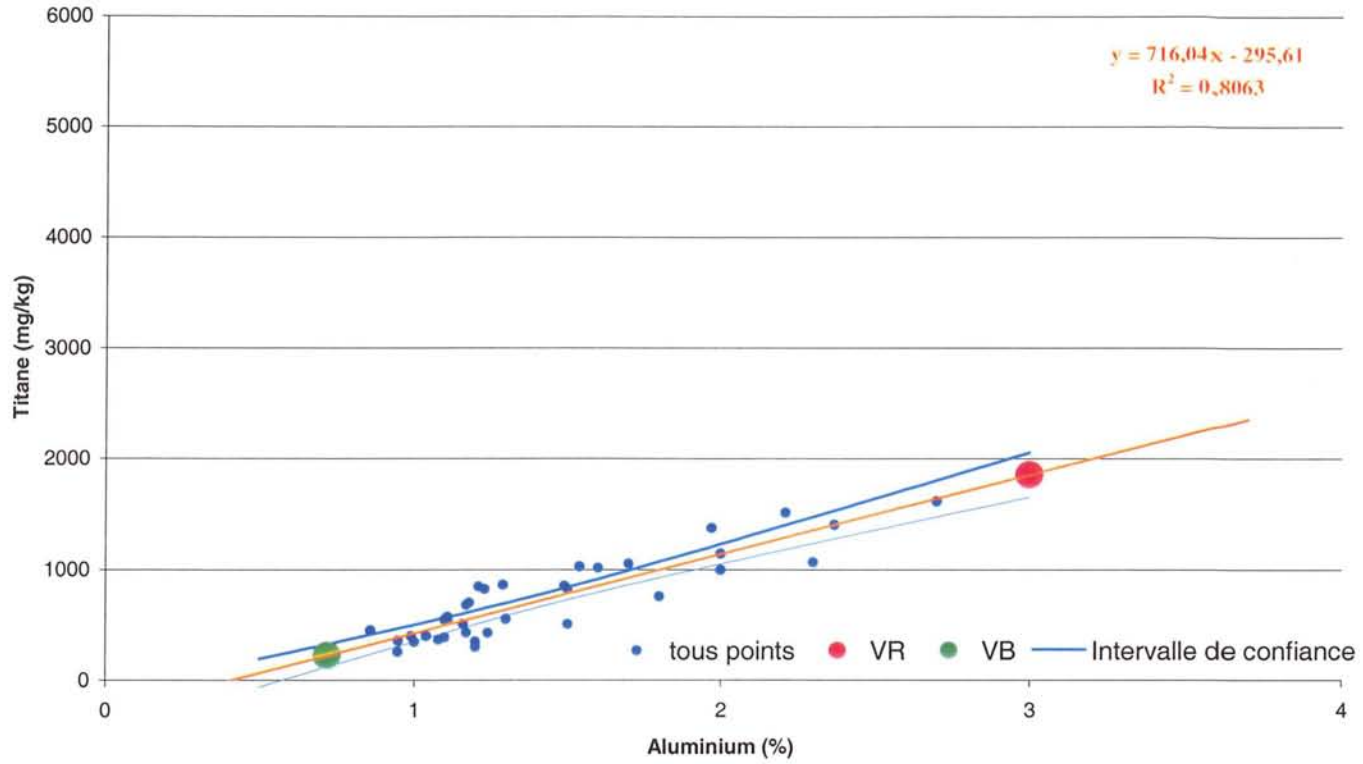

y = 6,6464x + 0,1968
R² = 0,4203
Lithium (mg/kg)
100
80
60
40
20
0
0
1
2
3
4
5
6
Aluminium (%)
tous points
VR
VB
Intervalle de confiance

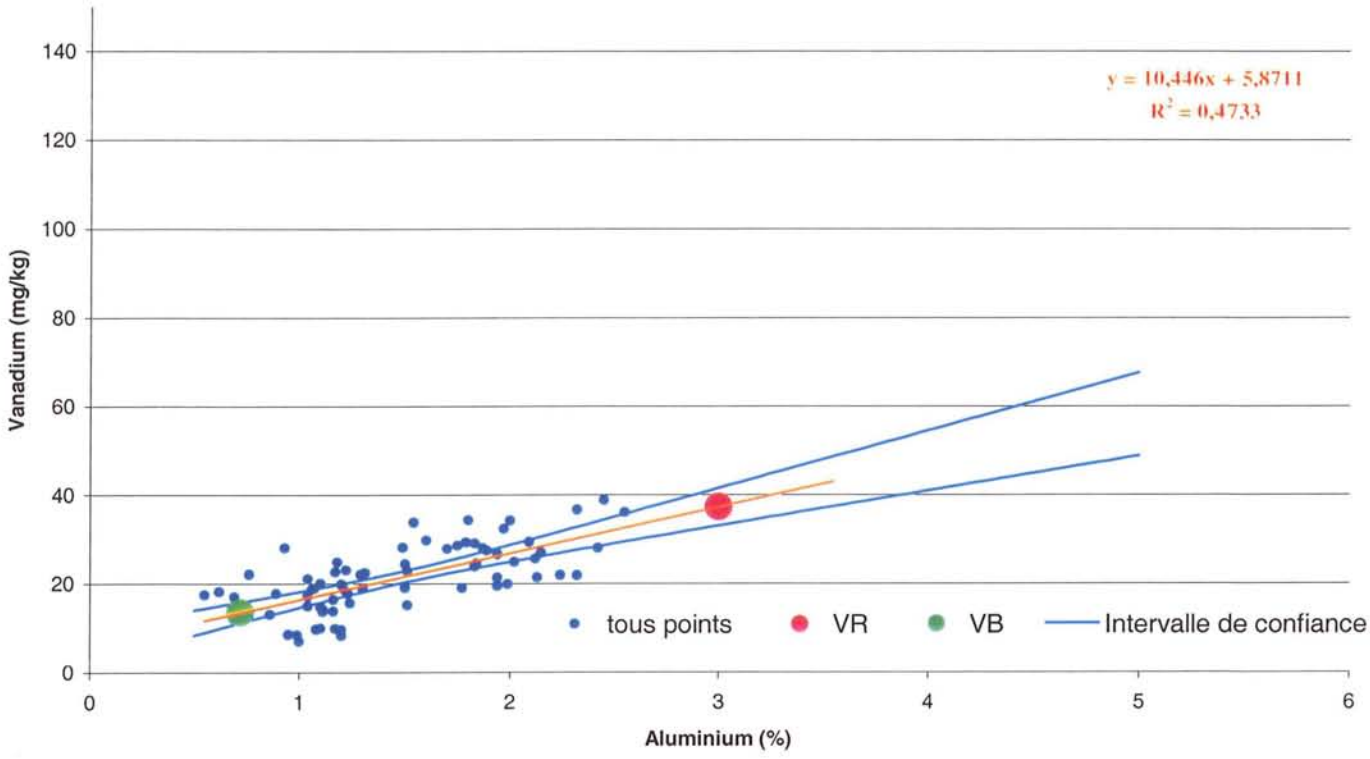

y = 52,995x + 50,263
R² = 0,6719
Manganèse (mg/kg)
500
400
300
200
100
0
0
1
2
3
4
Aluminium (%)
tous points
VR
VB
Intervalle de confiance

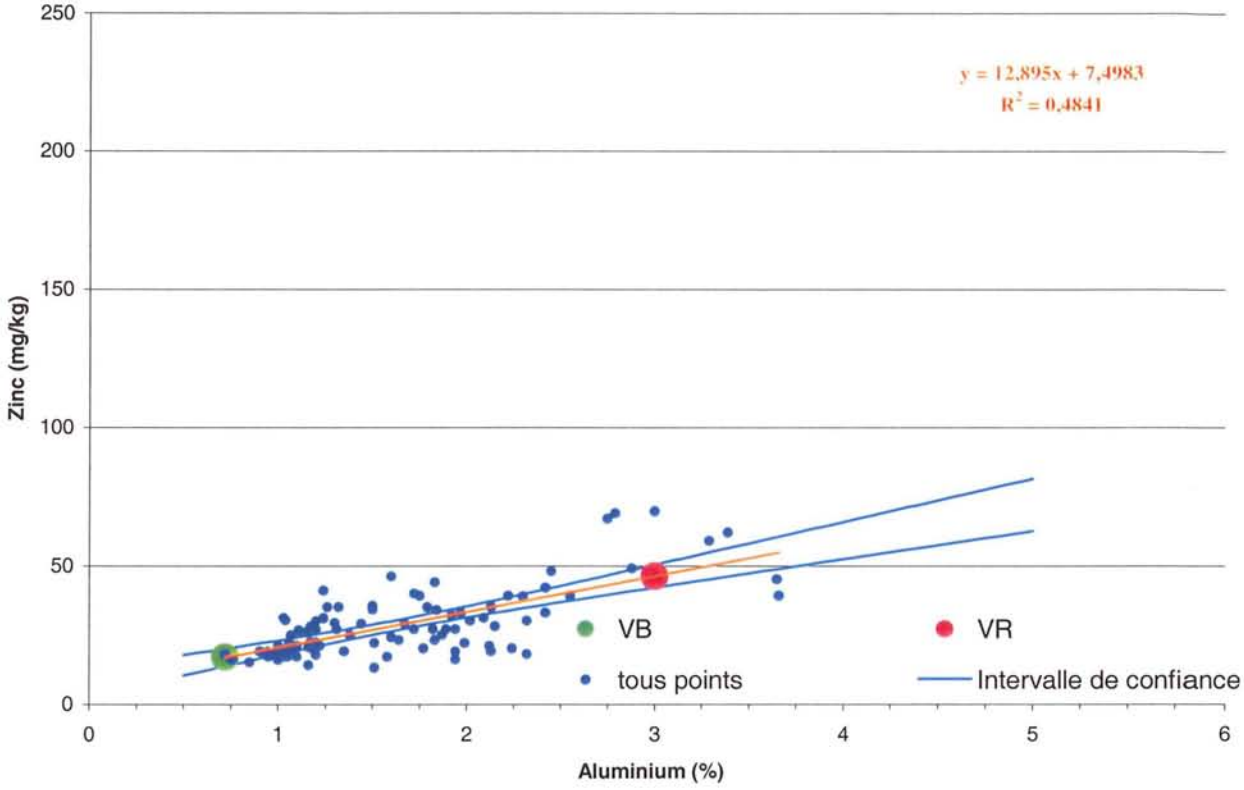

y = 0,0035x + 0,0069
R² = 0,1473
Mercure (mg/kg)
0,15
0,125
0,1
0,075
0,05
0,025
0
0
1
2
3
4
5
6
Aluminium (%)
VB
VR
tous points
Intervalle de confiance


y = 3,7255x - 0,5553
R² = 0,7465
Nickel (mg/kg)
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
0
1
2
3
4
5
6
Aluminium (%)
VR
VB
Tous points
Intervalle de confiance


y = 2,3988x + 7,9117
R² = 0,1999
Plomb (mg/kg)
100
80
60
40
20
0
0
1
2
3
4
5
6
Aluminium (%)
VB
VR
tous points
Intervalle de confiance


y = 716,04x - 295,61
R² = 0,8063
Titane (mg/kg)
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
0
1
2
3
4
Aluminium (%)
tous points
VR
VB
Intervalle de confiance


y = 10,446x + 5,8711
R² = 0,4733
Vanadium (mg/kg)
140
120
100
80
60
40
20
0
0
1
2
3
4
5
6
Aluminium (%)
tous points
VR
VB
Intervalle de confiance


y = 12,895x + 7,4983
R² = 0,4841
250
200
150
100
50
0
Zinc (mg/kg)
0
1
2
3
4
5
6
Aluminium (%)
VB
VR
tous points
Intervalle de confiance

ANNEXE F :Paramètres de régression

PARAMETRES DE BASE

Plusieurs paramètres de base ont été calculés :

- la pente (métal/aluminium),
- l'ordonnée à l'origine (métal/aluminium),
- le nombre de valeurs,
- le coefficient de corrélation r (métal ; aluminium) ; r = √(coeff détermination), dans le cas d'une régression linéaire la relation est d'autant plus linéaire que r se rapproche de ±1.

TEST DE SIGNIFICATION DE L'EQUATION

Les droites de régression sont validées à l'aide d'un test de signification du coefficient de corrélation de Pearson.

Les hypothèses suivantes sont posées $H_0 : r = 0$; $H_1 : r \neq 0$

Si H_0 vraie, la variable auxiliaire $t_{\square}$ associée à la valeur calculée t_r suit une loi de Student à $\square = n - 2$. ν constitue le nombre de degrés de liberté (ddl) c'est-à-dire le nombre de comparaisons indépendantes qu'il est possible d'effectuer.

Pour cette étude statistique, nous considérons que la droite de régression testée n'est pas significative si H_0 est acceptée. La décision statistique est donc la suivante

Si tr<valeur seuil : droite non significative

Si tr>valeur seuil : droite significative

La valeur seuil $t_{\square}$ provient de la table de Student à $\square = n - 2$ degrés de liberté.

Le test se calcule par la formule suivante : $t_r^2 = [r^2(n-2)] / (1-r^2)$

L'INTERVALLE DE CONFIANCE

Une bande de confiance est calculée en utilisant les quantiles de la loi de Student afin d'approuver la signification de la droite de régression.

Pour déterminer l'intervalle de confiance d'une droite de régression, un calcul doit être réalisé en tout point Xi afin de couvrir toute l'étendue de la droite de régression. Ainsi, pour tout point Xi correspond une borne supérieure et une borne inférieure :

$X_{inf} = Y_{i\ estimé} - t_{\square}\sqrt{(Var)}$ et $X_{sup} = Y_{i\ estimé} + t_{\square}\sqrt{(Var)}$

Avec : $t_{\square}$ valeur seuil lue dans la table de Student à $\square = n - 2$ ddl

α est le seuil de probabilité choisi pour construire l'intervalle de confiance, fixé à 0,05 pour un intervalle de confiance à 95%.

$Y_{i\ estimé}$ = pente . X_i + ordonnée origine

Var = [SCEE/(n-2) . 1/n] + [$(Xi - moyX)^2$ / (n-2).VarX)]

Le calcul de l'intervalle de confiance nécessite la détermination des paramètres de dispersion :

SCET : Dispersion totale : la somme des carrés des écarts à la moyenne, SCET = $\sum Yi^2 - [(\sum Yi)^2/n)$ avec n = nombre de valeurs et Yi = teneur métallique

SCER : Dispersion intergroupe : l'écart entre les moyennes des différents groupes par rapport à la moyenne ; SCER = $pente^2$.(n-1).variancex

SCEE : Dispersion intragroupe : la somme des carrés des écarts à la moyenne propre ; mesure la quantité de variabilité qui n'a pas été expliquée par l'estimation, soit la dispersion des valeurs observées de part et d'autre de la droite de régression.

SCEE = SCET - SCER (disp. expliquée par la régression = disp. résiduelle – disp totale).

RESULTATS

Eléments	Arsenic	Cadmium	Chrome	Cuivre	Etain	Fer	Fluorures	Lithium
Pente	2,74	0,02	7,23	1,49	0,52	3324,61	91,93	6,65
Ordonnée à l'origine	0,45	0,05	5,52	0,47	-0,21	2827,83	103,81	0,20
Coeff de corrélation	0,83	0,51	0,81	0,73	0,76	0,66	0,56	0,65
n	40	67	48	99	31	108	28	121
(somme yi)²	26699,560	29,48	760558,410	78176,160	179,560	7,28684E+11	38900169,00	1693902,25
somme yi^2	771,560	0,48	17570,970	994,780	7,420	7475171700	1585173,00	19745,77
variance x	0,25	0,66	0,46	0,51	0,12	0,27	0,27	0,46
SCET	104,07	0,04	1726,00	205,12	1,63	728095987,96	195881,25	5746,58
SCER	72,02	0,01	1124,42	110,00	0,95	314999128,02	61179,88	2415,54
SCEE	32,05	0,03	601,58	95,12	0,68	413096859,95	134701,37	3331,04
Test de signification de l'équation								
tr	9,24	4,83	9,27	10,59	6,36	8,99	3,44	9,29
α	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
ν	38	65	46	97	29	106	26	119
valeur seuil	2,02	2,00	2,01	1,98	2,05	1,98	2,06	1,98
P(tr) selon Student	2,92E-11	8,53E-06	4,25E-12	7,13E-18	5,94E-07	1,05E-14	1,99E-03	9,02E-16
règle de décision	droite de régression significative	droite de régression significative	droite de régression significative	droite de régression significative	droite de régression significative	droite de régression significative	droite de régression significative	droite de régression significative
VB & VR								
Sédiment grossier	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
Sédiment fin	3	3	3	3	3	3	3	3

Eléments	Manganèse	Mercure	Nickel	Plomb	Titane	Vanadium	Zinc
Pente	52,99	0,00	3,73	2,40	716,04	10,45	12,90
Ordonnée à l'origine	50,26	0,01	-0,56	7,91	-295,61	5,87	7,50
Coeff de corrélation	0,82	0,38	0,86	0,45	0,90	0,69	0,70
n	70	75	77	103	36	72	93
(somme yi)²	88313006,25	0,903	201960,360	1475982,010	681314404,00	2318615,29	7195269,760
somme yi^2	1357066,57	0,016	3466,980	15821,110	23675768,00	36278,09	91145,420
variance x	0,33	0,57	0,60	0,51	0,21	0,25	0,44
SCET	95452,20	0,00	844,12	1491,19	4750367,89	4075,10	13776,93
SCER	64131,10	0,00	630,17	298,14	3830149,29	1928,65	6668,73
SCEE	31321,09	0,00	213,95	1193,05	920218,60	2146,45	7108,20
Test de signification de l'équation							
tr	11,80	3,55	14,86	5,02	11,90	7,93	9,24
α	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
v	68	73	75	101	34	70	91
valeur seuil	2,00	1,99	1,99	1,98	2,03	1,99	1,99
P(tr) selon Student	4,10E-18	6,74E-04	4,69E-24	2,19E-06	1,14E-13	2,45E-11	9,94E-15
règle de décision	droite de régression significative	droite de régression significative	droite de régression significative	droite de régression significative	droite de régression significative	droite de régression significative	droite de régression significative
VB & VR							
Sédiment grossier	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
Sédiment fin	3	3	3	3	3	3	3

ANNEXE G : Teneurs métalliques normalisées

N°	sedim	AL	AS	CD	CR	CU	FE	LI	MN	HG	NI	PB	SN	TI	V	ZN	F
1	*24,2*	1,8	18,2	0,4	40,9	12,6	15942,7	50,6	218,4	0,201	12,6	25,2	9,3	1345,3	57,5	214,2	332,6
2	*2,4*	1,5	14,0	0,3	32,0	7,9	13694,0	43,7	145,7	0,069	11,7	19,5	1,2	1041,5	45,3	127,5	155,4
3	*20,7*	2	9,3	0,4	43,3	8,8	14980,0	57,4	180,3	0,099	12,2	21,0	1,1	1593,4	64,2	169,2	378,4
4	*18,8*	1,3	9,0	1,3	23,6	4,9	8085,1	32,3	113,5	0,051	8,7	7,1	1,5	1505,6	34,7	126,0	91,4
5	*11,2*	3	87,7	0,1	45,0	6,6	45700,0	121,3	44,1	0,030	37,9	19,0	0,5	916,0	72,6	130,7	204,0
6	*33,4*	2,3	7,9	0,0	35,7	4,5	17312,0	68,8	198,9	0,003	12,3	8,3	0,2	1432,2	58,1	85,1	608,7
7	*3,0*	1,2	4,7	0,5	0,2	2,8	939,2	26,6	-34,2	0,012	5,8	-0,5	1,3	586,0	-5,1	72,5	60,7
8	*1,3*	1	-2,6	-0,1	-22,1	-0,4	-16532,5	23,9	-187,8	-0,027	-3,0	-24,1	33,1	1213,8	-39,5	-12,7	1212,3
9	*3,3*	0,947	0,2	-0,1	-29,7	1,2	-16388,7	26,6	-307,5	-0,036	4,9	-27,9	0,6	531,9	-36,7	59,0	1094,0
10	*3,5*	1,24	9,3	0,5	16,3	5,3	2627,8	34,6	19,9	0,099	9,0	4,2	1,6	1114,6	22,6	153,7	-220,2
11	*1,0*	1,04	-0,6	0,3	-0,1	8,4	-13029,5	34,6	-174,6	-0,022	11,9	1,5	3,3	1467,2	24,1	240,5	-357,3
12	*3,4*	1,17	4,3	0,5	-1,1	3,4	-1221,0	30,1	-25,7	0,012	6,5	-4,2	0,9	1258,9	-4,8	76,5	-367,1
13	*1,6*	1,08	4,8	0,0	18,8	7,6	-3528,2	26,9	-61,8	-0,019	9,6	-9,0	1,7	1138,6	-10,6	47,8	-704,0
14	*4,8*	1,16	13,2	0,0	29,2	1,3	14074,4	32,3	62,4	-0,014	10,3	2,7	0,4	1702,2	28,5	56,2	35,3
15	*2,5*	1,7	9,4	2,6	48,6	2,1	-4164,8	25,0	-70,5	-0,028	4,4	-28,7	0,5	1689,7	-28,8	32,3	-851,8
16	*1,2*	2,7	8,8	1,2	50,2	6,1	4406,7	21,4	78,4	-0,012	7,7	-11,0	1,8	814,0	-11,3	21,8	-252,8
17	*9,3*	0,86	11,8	3,1	-32,0	-3,9	-27375,1	30,1	-65,0	0,181	-1,6	-4,0	35,0	3917,7	7,0	489,2	723,7
18	*61,4*	1,2	10,4	1,1	16,8	22,1	20281,6	71,1	233,0	0,160	15,0	40,0	2,2	1820,6	59,6	406,9	417,6
19	*54,5*	0,99	8,1	0,7	-5,5	12,9	18898,8	48,3	235,5	0,099	14,2	19,2	1,7	1858,8	50,3	204,4	237,7
20	*31,3*	2	7,4	0,8	46,8	8,7	12758,6	32,3	195,3	0,099	9,1	10,4	8,5	1965,2	29,8	136,0	79,4
21	*39,1*	1,5	7,0	0,8	40,8	11,9	17502,0	43,7	222,4	0,080	13,9	17,5	1,6	2151,1	46,9	195,4	328,2
22	*4,2*	0,948	-2,8	-0,1	-7,5	1,2	-13393,9	26,6	-89,8	-0,035	0,9	-29,7	0,6	1540,5	-35,5	9,9	-890,0
23	*10,5*	1,11	1,1	0,5	19,9	5,4	5738,7	32,3	91,2	0,071	7,8	-2,9	1,6	2091,0	14,6	144,8	2227,8
24	*3,2*	1,1	-0,1	0,5	14,8	1,3	2212,3	27,8	-4,7	0,013	4,4	-11,0	0,4	1204,3	-7,6	71,6	1004,0
25	*9,8*	1,11	2,3	0,9	25,8	4,8	14858,7	30,1	136,8	0,071	8,4	-5,8	0,4	2260,6	17,5	147,6	1748,4
26	55,8	1,97	7,1	1,4	45,0	15,3	19409,4	48,3	299,2	0,159	13,6	23,1	1,1	2317,6	47,9	230,7	753,7
27	64,6	1,54	11,3	1,0	52,1	14,2	22956,8	50,6	173,4	0,140	17,6	27,3	2,2	2444,5	69,9	287,9	990,2
28	71,5	2,37	7,9	0,4	51,9	14,1	19286,3	71,1	219,1	0,210	14,7	37,8	2,4	1850,6	60,2	245,3	465,7
29	*20,2*	1,18	11,7	0,5	59,2	7,8	22935,4	34,6	254,7	0,092	14,0	10,7	0,3	2772,2	48,2	280,8	642,0
30	9,3	1,17	9,9	0,4	46,6	4,1	23991,1	30,1	238,5	0,056	9,6	1,9	0,8	2898,1	32,7	124,7	1408,3
31	11,0	1,6	9,1	0,5	46,2	7,9	13972,3	30,1	122,5	0,133	9,2	2,8	0,4	2152,3	20,6	188,4	704,0
32	*7,6*	1,29	11,5	0,5	43,8	4,2	22756,4	30,1	216,8	0,058	11,3	2,5	1,3	3119,1	38,1	171,4	332,8

33	*30,7*	1,49	8,3	1,7	49,7	22,5	22924,0	41,5	202,7	0,138	13,9	25,5	2,1	2082,6	56,9	311,7	910,3
34	*40,3*	1,23	10,4	0,7	34,3	14,1	20711,2	46,0	248,0	0,178	14,8	23,5	1,3	2266,9	55,6	257,6	512,0
N°	sedim	AL	AS	CD	CR	CU	FE	LI	MN	HG	NI	PB	SN	TI	V	ZN	F
35	*12,2*	1,21	7,9	1,1	36,2	24,2	34853,9	34,6	314,3	0,287	17,9	21,3	1,3	2589,4	69,9	417,8	898,6
36	*25,5*	1,1	7,1	0,8	34,0	12,5	28216,4	32,3	314,3	0,164	18,2	10,5	0,4	2540,8	60,0	297,5	631,1
37	*18,2*	0,93	22,8	1,6	128,8	35,9	59273,3	36,9	96,9	0,558	38,7	46,1	6,0	8797,7	172,0	875,5	1288,3
38	*3,9*	0,619	-17,4	-1,2	-83,5	-18,0	-93167,3	27,6	693,8	-0,228	-35,6	33,1	-3,0	-7614,5	-92,9	-357,9	328,1
39	*5,5*	0,76	92,4	5,4	368,3	56,5	351693,5	30,1	-1007,1	1,749	108,9	30,2	13,8	26785,0	504,0	82655,6	3133,9
40	*5,3*	0,549	-5,3	0,3	-12,9	-10,0	-45424,5	24,1	568,7	-0,131	-12,2	39,5	-12,4	-7567,4	-40,0	-212,0	1183,4
41	*6,8*	0,692	-12,1	1,3	-150,0	-101,4	-164024	30,1	-936,0	-1,661	-69,0	45,4	-3,0	-41964,5	-272,3	-904,4	3753,1
42	*47,9*	2,21	11,9	0,3	65,6	14,5	23551,0	73,4	308,1	0,240	17,7	40,8	2,5	2194,0	71,7	267,7	650,5

ANNEXE H : Facteurs de contamination

N°	AL	AS	CD	CR	CU	FE	LI	MN	HG	NI	PB	SN	TI	V	ZN	F
1	1,8	2,1	3,7	1,5	2,6	1,2	2,5	1,0	11,4	1,2	1,7	7,0	0,7	1,5	2,7	0,9
2	1,5	1,6	3,4	1,2	1,6	1,1	2,2	0,7	4,0	1,1	1,3	0,9	0,6	1,2	1,6	0,4
3	2	1,1	3,6	1,6	1,8	1,2	2,9	0,9	5,7	1,2	1,4	0,8	0,9	1,7	2,1	1,0
4	1,3	1,0	12,5	0,9	1,0	0,6	1,6	0,5	2,9	0,8	0,5	1,1	0,8	0,9	1,6	0,2
5	3	10,1	1,2	1,7	1,3	3,6	6,0	0,2	1,7	3,6	1,3	0,4	0,5	2,0	1,6	0,5
6	2,3	0,9	0,4	1,3	0,9	1,4	3,4	1,0	0,2	1,2	0,5	0,2	0,8	1,6	1,1	1,6
7	1,2	0,5	4,6	0,0	0,6	0,1	1,3	-0,2	0,7	0,5	0,0	1,0	0,3	-0,1	0,9	0,2
8	1	-0,3	-0,6	-0,8	-0,1	-1,3	1,2	-0,9	-1,5	-0,3	-1,6	24,7	0,7	-1,1	-0,2	3,2
9	0,947	0,0	-0,9	-1,1	0,2	-1,3	1,3	-1,5	-2,0	0,5	-1,8	0,4	0,3	-1,0	0,7	2,9
10	1,24	1,1	4,8	0,6	1,1	0,2	1,7	0,1	5,7	0,8	0,3	1,2	0,6	0,6	1,9	-0,6
11	1,04	-0,1	3,1	0,0	1,7	-1,0	1,7	-0,8	-1,3	1,1	0,1	2,5	0,8	0,6	3,0	-0,9
12	1,17	0,5	4,9	0,0	0,7	-0,1	1,5	-0,1	0,7	0,6	-0,3	0,6	0,7	-0,1	1,0	-1,0
13	1,08	0,6	-0,3	0,7	1,6	-0,3	1,3	-0,3	-1,1	0,9	-0,6	1,3	0,6	-0,3	0,6	-1,9
14	1,16	1,5	-0,2	1,1	0,3	1,1	1,6	0,3	-0,8	1,0	0,2	0,3	0,9	0,8	0,7	0,1
15	1,7	1,1	25,3	1,8	0,4	-0,3	1,2	-0,3	-1,6	0,4	-1,9	0,4	0,9	-0,8	0,4	-2,2
16	2,7	1,0	12,2	1,8	1,2	0,3	1,1	0,4	-0,7	0,7	-0,7	1,3	0,4	-0,3	0,3	-0,7
17	0,86	1,4	30,5	-1,2	-0,8	-2,1	1,5	-0,3	10,3	-0,1	-0,3	26,2	2,1	0,2	6,1	1,9
18	1,2	1,2	11,3	0,6	4,5	1,6	3,5	1,1	9,1	1,4	2,6	1,6	1,0	1,6	5,1	1,1
19	0,99	0,9	7,3	-0,2	2,6	1,5	2,4	1,1	5,7	1,3	1,3	1,2	1,0	1,4	2,6	0,6
20	2	0,8	7,5	1,7	1,8	1,0	1,6	0,9	5,6	0,9	0,7	6,3	1,1	0,8	1,7	0,2
21	1,5	0,8	7,5	1,5	2,4	1,4	2,2	1,1	4,6	1,3	1,2	1,2	1,2	1,3	2,4	0,9
22	0,948	-0,3	-0,9	-0,3	0,2	-1,0	1,3	-0,4	-2,0	0,1	-2,0	0,4	0,8	-1,0	0,1	-2,3
23	1,11	0,1	5,0	0,7	1,1	0,4	1,6	0,4	4,0	0,7	-0,2	1,2	1,1	0,4	1,8	5,9
24	1,1	0,0	4,5	0,5	0,3	0,2	1,4	0,0	0,7	0,4	-0,7	0,3	0,7	-0,2	0,9	2,6

N°	AL	AS	CD	CR	CU	FE	LI	MN	HG	NI	PB	SN	TI	V	ZN	F
25	1,11	0,3	8,4	0,9	1,0	1,2	1,5	0,7	4,0	0,8	-0,4	0,3	1,2	0,5	1,8	4,6
26	1,97	0,8	13,8	1,7	3,1	1,5	2,4	1,4	9,1	1,3	1,5	0,9	1,3	1,3	2,9	2,0
27	1,54	1,3	9,9	1,9	2,9	1,8	2,5	0,8	8,0	1,7	1,8	1,7	1,3	1,9	3,6	2,6
28	2,37	0,9	4,4	1,9	2,9	1,5	3,5	1,0	12,0	1,4	2,5	1,8	1,0	1,6	3,1	1,2
29	1,18	1,4	5,2	2,2	1,6	1,8	1,7	1,2	5,2	1,3	0,7	0,2	1,5	1,3	3,5	1,7
30	1,17	1,1	3,5	1,7	0,8	1,9	1,5	1,1	3,2	0,9	0,1	0,6	1,6	0,9	1,6	3,7
31	1,6	1,0	5,1	1,7	1,6	1,1	1,5	0,6	7,6	0,9	0,2	0,3	1,2	0,6	2,4	1,9
32	1,29	1,3	4,5	1,6	0,8	1,8	1,5	1,0	3,3	1,1	0,2	1,0	1,7	1,0	2,1	0,9
33	1,49	1,0	17,3	1,8	4,6	1,8	2,1	1,0	7,9	1,3	1,7	1,5	1,1	1,5	3,9	2,4
34	1,23	1,2	6,9	1,3	2,9	1,6	2,3	1,2	10,1	1,4	1,6	1,0	1,2	1,5	3,2	1,3
35	1,21	0,9	10,7	1,3	4,9	2,7	1,7	1,5	16,3	1,7	1,4	1,0	1,4	1,9	5,2	2,4
36	1,1	0,8	7,9	1,2	2,5	2,2	1,6	1,5	9,4	1,7	0,7	0,3	1,4	1,6	3,7	1,7
37	0,93	2,6	16,2	4,7	7,3	4,6	1,8	0,5	31,8	3,6	3,1	4,5	4,7	4,6	11,0	3,4
38	0,619	-2,0	-11,5	-3,1	-3,6	-7,3	1,4	3,3	-13,0	-3,4	2,2	-2,2	-4,1	-2,5	-4,5	0,9
39	0,76	10,7	54,0	13,5	11,5	27,5	1,5	-4,8	99,7	10,3	2,0	10,3	14,5	13,5	1034,3	8,3
40	0,549	-0,6	2,7	-0,5	-2,0	-3,5	1,2	2,7	-7,4	-1,1	2,6	-9,3	-4,1	-1,1	-2,7	3,1
41	0,692	-1,4	13,4	-5,5	-20,6	-12,8	1,5	-4,5	-94,7	-6,5	3,0	-2,3	-22,7	-7,3	-11,3	9,9
42	2,21	1,4	3,0	2,4	2,9	1,8	3,6	1,5	13,7	1,7	2,7	1,9	1,2	1,9	3,3	1,7

ANNEXE I : Eléments déclassants

Stations	1	Stations	2	Stations	3	Stations	4	Stations	5	Stations	6	Stations	7
HG	11,4	HG	4,0	HG	5,7	CD	12,5	AS	10,1	LI	3,4	CD	4,6
SN	7,0	CD	3,4	CD	3,6	HG	2,9	LI	6,0	AL	2,3	LI	1,3
CD	3,7	LI	2,2	LI	2,9	LI	1,6	FE	3,6	F	1,6	AL	1,2
ZN	2,7	AS	1,6	ZN	2,1	ZN	1,6	NI	3,6	V	1,6	SN	1,0
CU	2,6	CU	1,6	AL	2	AL	1,3	AL	3	FE	1,4	ZN	0,9
LI	2,5	ZN	1,6	CU	1,8	SN	1,1	V	2,0	CR	1,3	HG	0,7
AS	2,1	AL	1,5	V	1,7	AS	1,0	HG	1,7	NI	1,2	CU	0,6
AL	1,8	PB	1,3	CR	1,6	CU	1,0	CR	1,7	ZN	1,1	NI	0,5
PB	1,7	V	1,2	PB	1,4	V	0,9	ZN	1,6	MN	1,0	AS	0,5
V	1,5	CR	1,2	FE	1,2	CR	0,9	CU	1,3	CU	0,9	TI	0,3
CR	1,5	NI	1,1	NI	1,2	NI	0,8	PB	1,3	AS	0,9	F	0,2
FE	1,2	FE	1,1	AS	1,1	TI	0,8	CD	1,2	TI	0,8	FE	0,1
NI	1,2	SN	0,9	F	1,0	FE	0,6	F	0,5	PB	0,5	CR	0,0
MN	1,0	MN	0,7	MN	0,9	MN	0,5	TI	0,5	CD	0,4	PB	0,0
F	0,9	TI	0,6	TI	0,9	PB	0,5	SN	0,4	HG	0,2	V	-0,1
TI	0,7	F	0,4	SN	0,8	F	0,2	MN	0,2	SN	0,2	MN	-0,2

Stations	8	Stations	9	Stations	10	Stations	11	Stations	12	Stations	13	Stations	14
SN	24,7	F	2,9	HG	5,7	CD	3,1	CD	4,9	CU	1,6	LI	1,6
F	3,2	LI	1,3	CD	4,8	ZN	3,0	LI	1,5	LI	1,3	AS	1,5
LI	1,2	AL	0,947	ZN	1,9	SN	2,5	AL	1,17	SN	1,3	AL	1,16
AL	1	ZN	0,7	LI	1,7	LI	1,7	ZN	1,0	AL	1,08	FE	1,1
TI	0,7	NI	0,5	AL	1,24	CU	1,7	HG	0,7	NI	0,9	CR	1,1
CU	-0,1	SN	0,4	SN	1,2	NI	1,1	CU	0,7	CR	0,7	NI	1,0
ZN	-0,2	TI	0,3	CU	1,1	AL	1,04	TI	0,7	TI	0,6	TI	0,9
NI	-0,3	CU	0,2	AS	1,1	TI	0,8	SN	0,6	ZN	0,6	V	0,8
AS	-0,3	AS	0,0	NI	0,8	V	0,6	NI	0,6	AS	0,6	ZN	0,7
CD	-0,6	CD	-0,9	V	0,6	PB	0,1	AS	0,5	FE	-0,3	MN	0,3
CR	-0,8	V	-1,0	TI	0,6	CR	0,0	CR	0,0	V	-0,3	CU	0,3
MN	-0,9	CR	-1,1	CR	0,6	AS	-0,1	FE	-0,1	MN	-0,3	SN	0,3
V	-1,1	FE	-1,3	PB	0,3	MN	-0,8	MN	-0,1	CD	-0,3	PB	0,2
FE	-1,3	MN	-1,5	FE	0,2	F	-0,9	V	-0,1	PB	-0,6	F	0,1
HG	-1,5	PB	-1,8	MN	0,1	FE	-1,0	PB	-0,3	HG	-1,1	CD	-0,2
PB	-1,6	HG	-2,0	F	-0,6	HG	-1,3	F	-1,0	F	-1,9	HG	-0,8

Stations	15	Stations	16	Stations	17	Stations	18	Stations	19	Stations	20	Stations	21
CD	25,3	CD	12,2	CD	30,5	CD	11,3	CD	7,3	CD	7,5	CD	7,5
CR	1,8	AL	2,7	SN	26,2	HG	9,1	HG	5,7	SN	6,3	HG	4,6
AL	1,7	CR	1,8	HG	10,3	ZN	5,1	CU	2,6	HG	5,6	ZN	2,4
LI	1,2	SN	1,3	ZN	6,1	CU	4,5	ZN	2,6	AL	2	CU	2,4
AS	1,1	CU	1,2	TI	2,1	LI	3,5	LI	2,4	CU	1,8	LI	2,2
TI	0,9	LI	1,1	F	1,9	PB	2,6	FE	1,5	CR	1,7	AL	1,5
CU	0,4	AS	1,0	LI	1,5	SN	1,6	V	1,4	ZN	1,7	CR	1,5
NI	0,4	NI	0,7	AS	1,4	V	1,6	NI	1,3	LI	1,6	FE	1,4
ZN	0,4	TI	0,4	AL	0,86	FE	1,6	PB	1,3	TI	1,1	NI	1,3
SN	0,4	MN	0,4	V	0,2	NI	1,4	SN	1,2	FE	1,0	V	1,3
FE	-0,3	FE	0,3	NI	-0,1	AL	1,2	MN	1,1	MN	0,9	SN	1,2
MN	-0,3	ZN	0,3	PB	-0,3	AS	1,2	TI	1,0	NI	0,9	TI	1,2
V	-0,8	V	-0,3	MN	-0,3	MN	1,1	AL	0,99	AS	0,8	PB	1,2
HG	-1,6	F	-0,7	CU	-0,8	F	1,1	AS	0,9	V	0,8	MN	1,1
PB	-1,9	HG	-0,7	CR	-1,2	TI	1,0	F	0,6	PB	0,7	F	0,9
F	-2,2	PB	-0,7	FE	-2,1	CR	0,6	CR	-0,2	F	0,2	AS	0,8

Stations	22	Stations	23	Stations	24	Stations	25	Stations	26	Stations	27	Stations	28
LI	1,3	F	5,9	CD	4,5	CD	8,4	CD	13,8	CD	9,9	HG	12,0
AL	0,948	CD	5,0	F	2,6	F	4,6	HG	9,1	HG	8,0	CD	4,4
TI	0,8	HG	4,0	LI	1,4	HG	4,0	CU	3,1	ZN	3,6	LI	3,5
SN	0,4	ZN	1,8	AL	1,1	ZN	1,8	ZN	2,9	CU	2,9	ZN	3,1
CU	0,2	LI	1,6	ZN	0,9	LI	1,5	LI	2,4	F	2,6	CU	2,9
ZN	0,1	SN	1,2	HG	0,7	TI	1,2	F	2,0	LI	2,5	PB	2,5
NI	0,1	TI	1,1	TI	0,7	FE	1,2	AL	1,97	CR	1,9	AL	2,37
CR	-0,3	AL	1,11	CR	0,5	AL	1,11	CR	1,7	V	1,9	CR	1,9
AS	-0,3	CU	1,1	NI	0,4	CU	1,0	PB	1,5	PB	1,8	SN	1,8
MN	-0,4	NI	0,7	SN	0,3	CR	0,9	FE	1,5	FE	1,8	V	1,6
CD	-0,9	CR	0,7	CU	0,3	NI	0,8	MN	1,4	NI	1,7	FE	1,5
V	-1,0	FE	0,4	FE	0,2	MN	0,7	V	1,3	SN	1,7	NI	1,4
FE	-1,0	MN	0,4	AS	0,0	V	0,5	NI	1,3	AL	1,54	F	1,2
PB	-2,0	V	0,4	MN	0,0	SN	0,3	TI	1,3	TI	1,3	MN	1,0
HG	-2,0	AS	0,1	V	-0,2	AS	0,3	SN	0,9	AS	1,3	TI	1,0
F	-2,3	PB	-0,2	PB	-0,7	PB	-0,4	AS	0,8	MN	0,8	AS	0,9

Stations	29	Stations	30	Stations	31	Stations	32	Stations	33	Stations	34	Stations	35
HG	5,2	F	3,7	HG	7,6	CD	4,5	CD	17,3	HG	10,1	HG	16,3
CD	5,2	CD	3,5	CD	5,1	HG	3,3	HG	7,9	CD	6,9	CD	10,7
ZN	3,5	HG	3,2	ZN	2,4	ZN	2,1	CU	4,6	ZN	3,2	ZN	5,2
CR	2,2	FE	1,9	F	1,9	FE	1,8	ZN	3,9	CU	2,9	CU	4,9
FE	1,8	CR	1,7	CR	1,7	TI	1,7	F	2,4	LI	2,3	FE	2,7
LI	1,7	TI	1,6	CU	1,6	CR	1,6	LI	2,1	FE	1,6	F	2,4
F	1,7	ZN	1,6	AL	1,6	LI	1,5	CR	1,8	PB	1,6	V	1,9
CU	1,6	LI	1,5	LI	1,5	AS	1,3	FE	1,8	V	1,5	LI	1,7
TI	1,5	AL	1,17	TI	1,2	AL	1,29	PB	1,7	NI	1,4	NI	1,7
AS	1,4	AS	1,1	FE	1,1	NI	1,1	SN	1,5	F	1,3	MN	1,5
NI	1,3	MN	1,1	AS	1,0	MN	1,0	V	1,5	CR	1,3	PB	1,4
V	1,3	NI	0,9	NI	0,9	V	1,0	AL	1,49	AL	1,23	TI	1,4
MN	1,2	V	0,9	MN	0,6	SN	1,0	NI	1,3	TI	1,2	CR	1,3
AL	1,18	CU	0,8	V	0,6	F	0,9	TI	1,1	AS	1,2	AL	1,21
PB	0,7	SN	0,6	SN	0,3	CU	0,8	MN	1,0	MN	1,2	SN	1,0
SN	0,2	PB	0,1	PB	0,2	PB	0,2	AS	1,0	SN	1,0	AS	0,9

Stations	36	Stations	37	Stations	38	Stations	39	Stations	40	Stations	41	Stations	42
HG	9,4	HG	31,8	MN	3,3	ZN	1034,3	F	3,1	CD	13,4	HG	13,7
CD	7,9	CD	16,2	PB	2,2	HG	99,7	CD	2,7	F	9,9	LI	3,6
ZN	3,7	ZN	11,0	LI	1,4	CD	54,0	MN	2,7	PB	3,0	ZN	3,3
CU	2,5	CU	7,3	F	0,9	FE	27,5	PB	2,6	LI	1,5	CD	3,0
FE	2,2	TI	4,7	AL	0,619	TI	14,5	LI	1,2	AL	0,692	CU	2,9
NI	1,7	CR	4,7	AS	-2,0	V	13,5	AL	0,549	AS	-1,4	PB	2,7
F	1,7	FE	4,6	SN	-2,2	CR	13,5	CR	-0,5	SN	-2,3	CR	2,4
V	1,6	V	4,6	V	-2,5	CU	11,5	AS	-0,6	MN	-4,5	AL	2,21
LI	1,6	SN	4,5	CR	-3,1	AS	10,7	V	-1,1	CR	-5,5	V	1,9
MN	1,5	NI	3,6	NI	-3,4	SN	10,3	NI	-1,1	NI	-6,5	SN	1,9
TI	1,4	F	3,4	CU	-3,6	NI	10,3	CU	-2,0	V	-7,3	FE	1,8
CR	1,2	PB	3,1	TI	-4,1	F	8,3	ZN	-2,7	ZN	-11,3	F	1,7
AL	1,1	AS	2,6	ZN	-4,5	PB	2,0	FE	-3,5	FE	-12,8	NI	1,7
AS	0,8	LI	1,8	FE	-7,3	LI	1,5	TI	-4,1	CU	-20,6	MN	1,5
PB	0,7	AL	0,93	CD	-11,5	AL	0,76	HG	-7,4	TI	-22,7	AS	1,4
SN	0,3	MN	0,5	HG	-13,0	MN	-4,8	SN	-9,3	HG	-94,7	TI	1,2

ANNEXE J : Statistiques de base

Statistiques générales sur les teneurs métalliques brutes

Eléments	Al	As	Cd	Cu	Cr	Fe
Min	5940	1,80	0,10	1,20	6,70	2550
1st Qu.	10500	2,93	0,12	2,10	12	4802,50
Mean	13777,38	6,21	0,24	4,27	19,26	9313,33
Median	12000	4,05	0,17	2,55	16,1	9005
3rd Qu.	15850	5,15	0,31	6,08	24,85	11200
Max	30000	87,70	1	19,40	46,6	45700
Std Dev.	5221	13	0,19	3,51	10,63	6987

Eléments	Hg	Li	Mn	Ni	Pb	Sn
Min	0,010	7,20	44,10	1,50	5,10	0,20
1st Qu.	0,010	11	69,85	3,20	7,50	0,23
Mean	0,041	15,25	108,19	5,87	11,60	0,84
Median	0,030	12	95,75	3,90	8,90	0,50
3rd Qu.	0,058	17,75	133,75	7,08	14,50	0,80
Max	0,210	51	232	37,90	36	4,50
Std Dev.	0,043	8,25	47,39	5,80	6,83	1

Eléments	Ti	V	Zn	F	$CaCO_3$
Min	251	6,90	15,80	32	2,30
1st Qu.	430,50	13,73	26,55	144,75	7,73
Mean	733,88	23,40	42,35	249,76	12,86
Median	692	18,75	31,20	242,50	12,45
3rd Qu.	972,25	29,30	55,08	315	17,55
Max	1610	72,60	173	522	22,10
Std Dev.	345,62	14,55	28,65	138,37	5,65

Statistiques générales sur les teneurs métalliques normalisées

Métaux	Al	As	Cd	Cu	Cr	Fe
Min	0,55	-17,40	-1,16	-101,38	-149,98	-164024,03
1st Qu.	1,05	4,43	0,32	2,94	3,80	-680,91
Mean	1,38	10,42	0,78	6,33	30,13	12340,33
Median	1,20	8,21	0,50	7,12	34,13	14466,56
3rd Qu.	1,59	11,04	1,06	12,82	46,46	22245,09
Max	3	92,37	5,44	56,48	368,32	351693,45
Std Dev.	0,55	19,43	1,03	20,66	68,78	64689,97

Métaux	Hg	Li	Mn	Ni	Pb	Sn
Min	-1,660	21,40	-1007,06	-68,96	-29,74	-12,36
1st Qu.	-0,008	30,06	-20,43	6,84	-2,28	0,49
Mean	0,079	39,76	82,92	10,43	10,92	3,05
Median	0,070	32,34	141,24	10,79	10,43	1,30
3rd Qu.	0,154	45,45	230,37	14,14	24,77	2,14
Max	1,749	121,26	693,83	108,89	46,13	35
Std Dev.	0,396	18,81	301,87	22,70	20,26	7,89

Métaux	Ti	V	Zn	F
Min	-41964.47	-272,26	-904,40	-890,02
1st Qu.	1206.66	-5,02	71,83	107,37
Mean	1091.07	32,29	2108,21	616,24
Median	1761.42	33,65	150,65	488,85
3rd Qu.	2265.32	57,99	254,53	970,24
Max	26785.04	504,05	82655,55	3753,07
Std Dev.	8209.25	98,35	12734,31	914,20

Statistiques générales sur les teneurs organiques

PCB	CORG	CB 101	CB 105	CB 118	CB 138	CB 153
Min	1	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
1st Qu.	4,95	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Mean	12,83	0,31	0,16	0,30	0,48	0,51
Median	9	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
3rd Qu.	14	0,30	0,10	0,30	0,55	0,60
Max	56	1,60	1,10	2,20	2,80	3,10
Std Dev.	12,71	0,38	0,18	0,46	0,70	0,75

PCB	CB 156	CB 180	CB 28	CB 31	CB 35	CB 52
Min	0,10	0,10	0,10	0,10	0,5	0,10
1st Qu.	0,10	0,10	0,10	0,10	0,5	0,10
Mean	0,11	0,33	0,16	0,12	0,5	0,18
Median	0,10	0,10	0,10	0,10	0,5	0,10
3rd Qu.	0,10	0,20	0,10	0,10	0,5	0,15
Max	0,20	3,60	1	0,50	0,5	0,90
Std Dev.	0,03	0,63	0,17	0,07	0	0,18

Pesticides	DDD	DDT	SDDT	HCH α	HCH γ
Min	0,10	0,10	0,30	0,10	0,10
1st Qu.	0,10	0,10	0,30	0,10	0,10
Mean	0,12	0,16	0,36	0,10	0,11
Median	0,10	0,10	0,30	0,10	0,10
3rd Qu.	0,10	0,10	0,30	0,10	0,10
Max	0,30	1	1,8	0,10	0,30
Std Dev.	0,049	0,19	0,28	0	0,04

HAP	CHRYSEN	PYRENE	FLUORAN	BZAANT	BZAPYR	BZBFLU
Min	1	1	1	1	1	1
1st Qu.	4,40	5,65	7,35	3,65	3	5,70
Mean	37,15	54,46	77,44	32,37	32,29	41,54
Median	11	16	24	9	14	15
3rd Qu.	50	80,50	102	49,50	49	56,50
Max	340	400	670	212	235	430
Std Dev.	63,15	83,02	134,99	47,29	45,10	73,40

HAP	BZGHIPER	BZKFLU	DBZAHANT	IND123PY
Min	1	1	1	1
1st Qu.	4,55	2,8	1	3,20
Mean	29,58	20,76	5,23	28,48
Median	13	8	2	11
3rd Qu.	42	29	7	43,5
Max	280	190	49	260
Std Dev.	48,32	33,67	8,36	45,98

ANNEXE K : Analyse multivariée : Classification hiérarchique

✓ Les indices

Le calcul de coefficients de distance et de similarité permet de quantifier le degré d'association de deux stations, ou encore le niveau de similitude entre deux sites compte tenu de leur contamination. Le choix d'un indice approprié est fondamental, car toute analyse ultérieure se fera sur la matrice d'association qui en résulte.

- Indice de similarité binaire asymétrique

Cette catégorie est destinée à comparer des objets sur la base de présence-absence de descripteurs. L'indice de similarité qualitatif est basé sur la présence ou l'absence de contaminants. Le coefficient choisi, l'indice de Sorensen est le plus couramment utilisé. Le coefficient de Sorensen (1948) est un coefficient binaire excluant les double zéros qui donne un poids deux fois plus élevées à la double présence. Les mesures de coefficient de distance accordent une valeur maximale à deux objets différents et une valeur nulle à deux objets identiques.

- Indice de similarité quantitatif asymétrique

Parmi les coefficients de distance semi-métriques, la distance de Bray & Curtis, prend en compte les variations de teneurs en contaminants des prélèvements. Le plus courant des indices de distance métriques est la distance euclidienne. Elle se calcule par la formule de Pythagore qui définit entre les points une relation d'espace euclidien à n dimension.

✓ L'algorithme de regroupement

Le calcul de regroupement des stations suit la méthode des liens flexibles avec l'algorithme de Lance et Williams (1967) affecté des paramètres de regroupement $\alpha = 0{,}625$; $\beta = -0{,}25$; $\gamma = 0$. Il s'agit d'un algorithme ascendant (ou encore agglomératif) qui procède à la construction des classes par agglomérations successives des stations deux à deux, et qui fournit une hiérarchie de partitions des stations.

L'algorithme se présente sous la forme d'arbres appelés également dendrogrammes. L'intérêt de ces arbres est qu'ils peuvent donner une idée du nombre de classes existant effectivement dans la population.

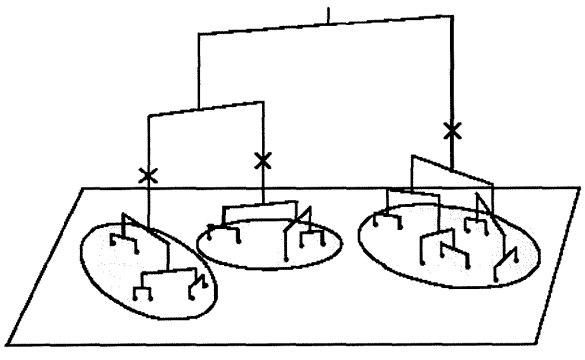
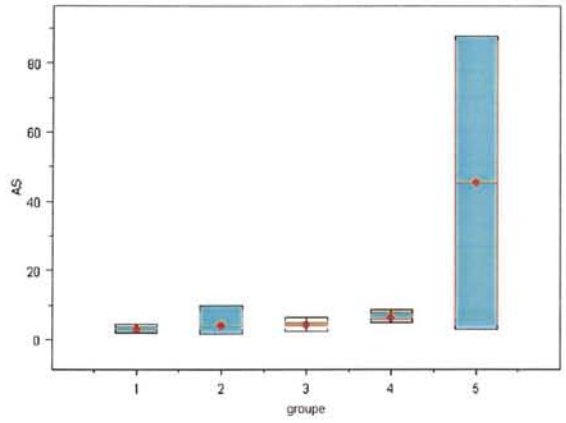


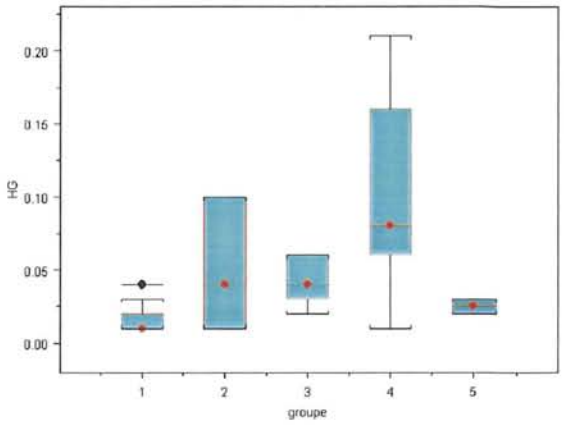
Figure 1: Dendrogramme ou arbre hiérarchique

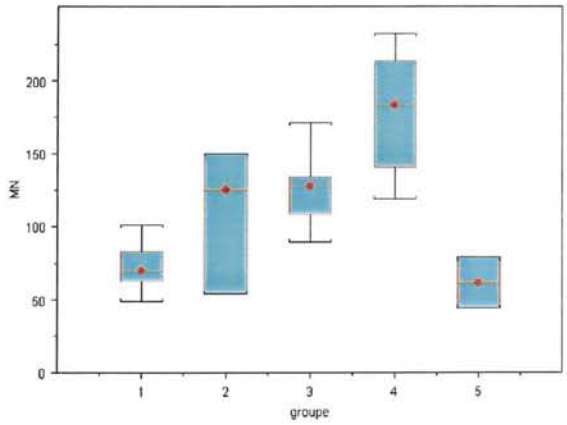
Chaque coupure d'un arbre fournit une partition. Une coupure réalisée assez bas dans l'arbre tend à augmenter le nombre de classes alors qu'une séparation dans les hauteurs conduit à diminuer le nombre de classes et à les rendre d'autant moins homogènes.

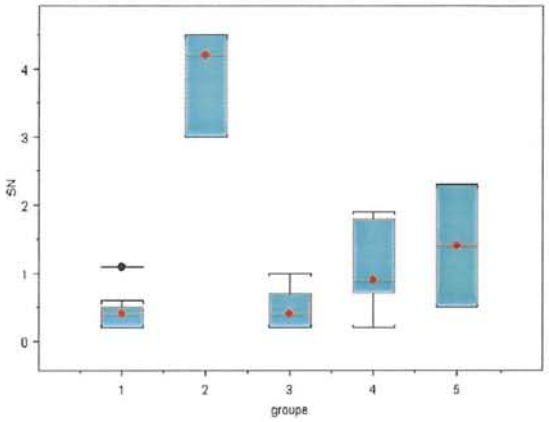
ANNEXE L : Caractéristiques de dispersion : Boîtes à moustaches

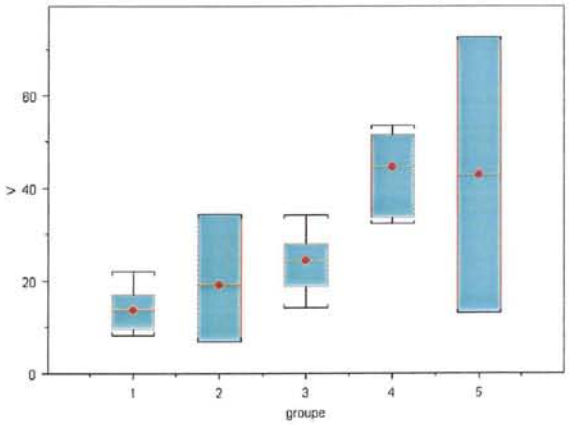
Teneurs métalliques brutes

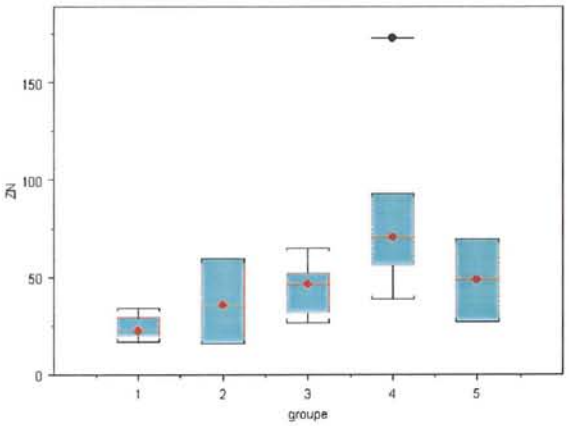




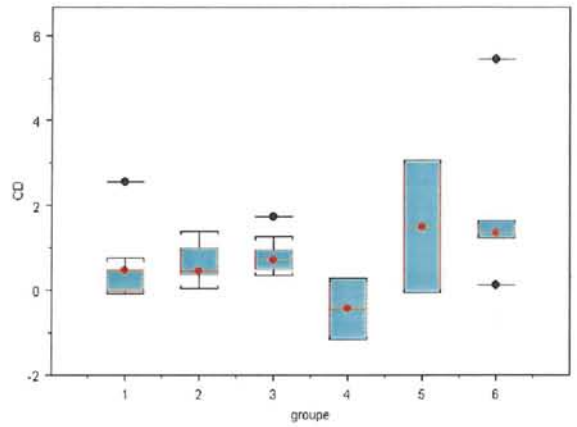


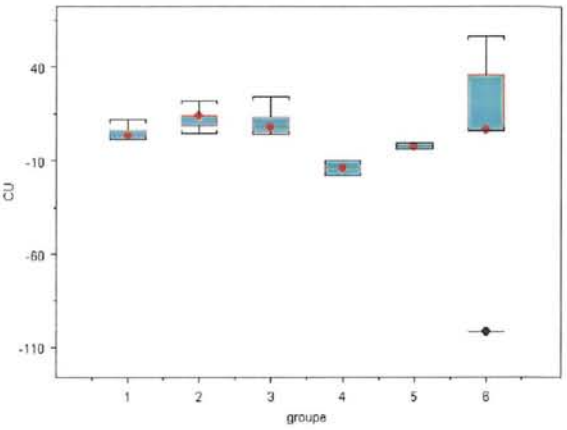


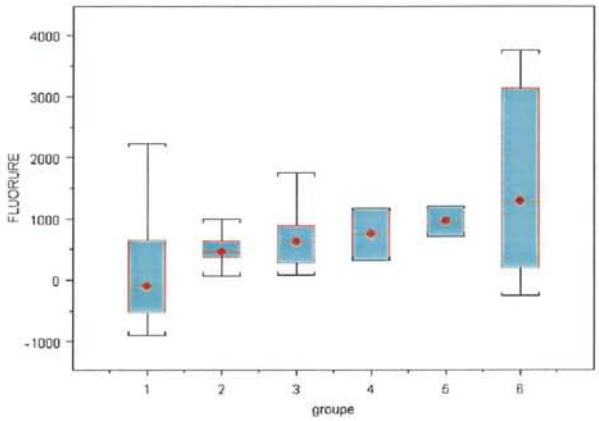


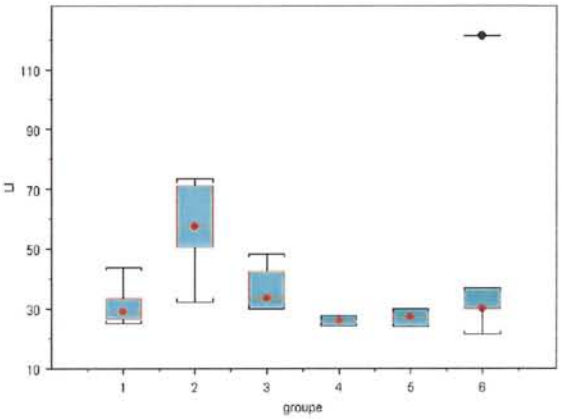


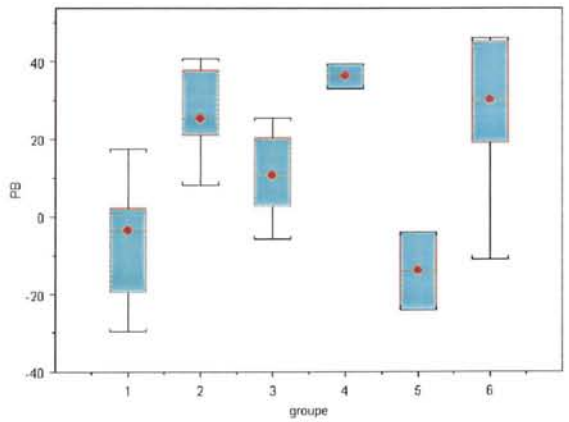
Teneurs métalliques normalisées

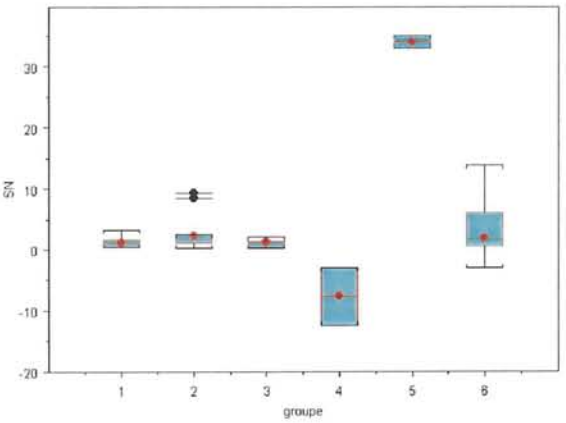




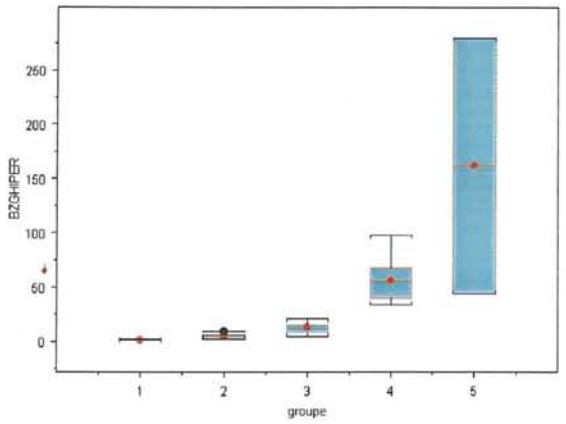


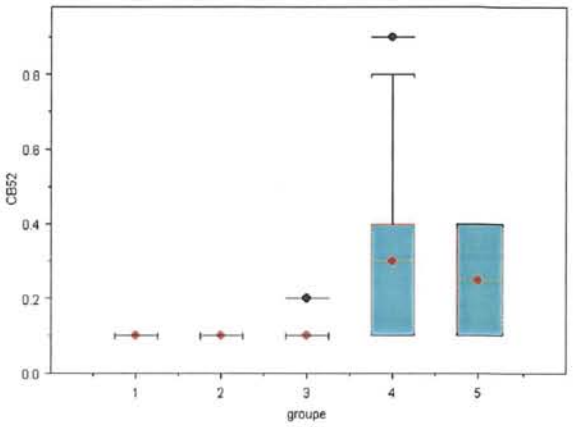


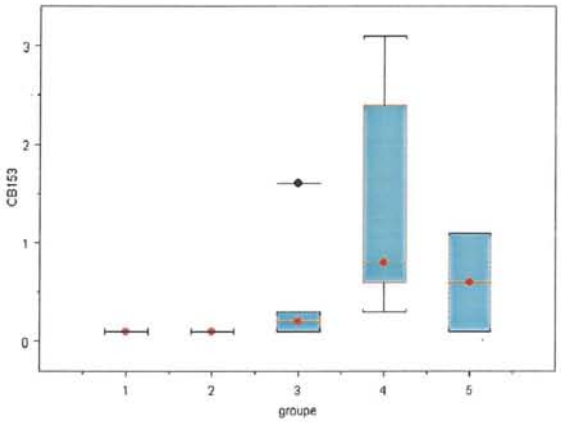


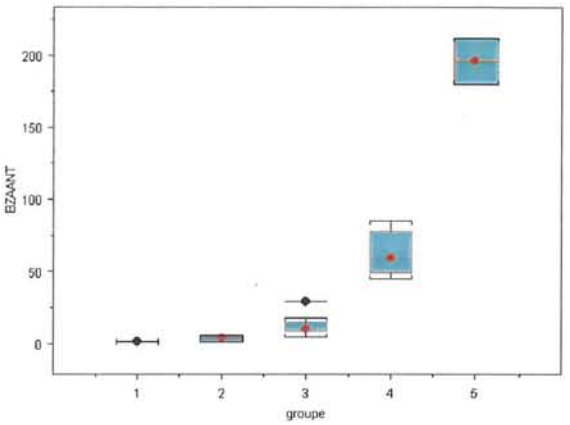


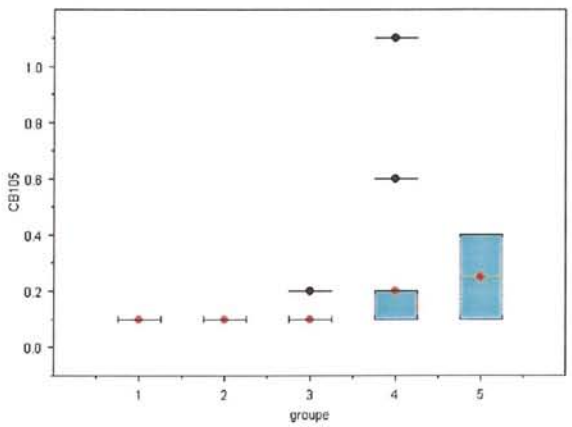
Teneurs organiques

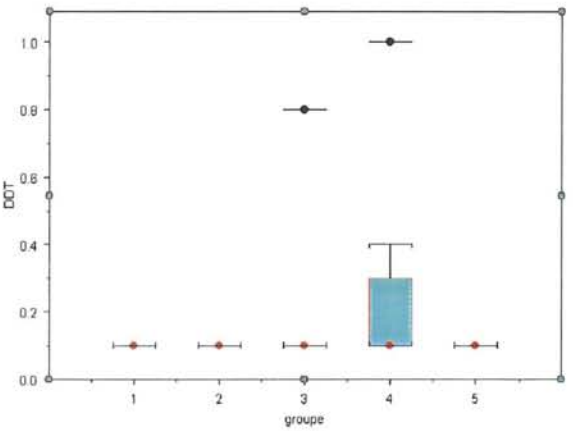












Annexe M : Rejets des principales activités industrielles du Pas-de-Calais

Les entreprises citées dans cette étude présentent des caractéristiques déterminantes dans la recherche de sources de contamination, à savoir :

- l'implantation à proximité de la mer ou d'une voie d'eau débouchant sur la mer,
- des rejets d'effluents liquides antérieurs à 1998, de composition potentiellement toxique,
- le classement des rejets parmi les plus toxiques dans les bilans annuels de la DRIRE,

Les rejets directs à la mer

Secteur de Dunkerque – Gravelines

✓ **Aluminium Dunkerque** (Branche d'activité : métallurgie des métaux non ferreux)

Située à Gravelines, cette fabrication d'aluminium de première fusion rejette ses effluents liquides épurés biologiquement en mer du nord, par le bassin de l'Atlantique.
Sources (20) (27)

En kg/an

Années	1993	1994	1995	1997
F	0,29	17,25	7,85	8,9

✓ **Sollac Dunkerque** (Branche d'activité : métallurgie – sidérurgie)

Cette usine de production d'acier (cokéfaction, haut-fourneaux) effectue des rejets directement en mer du nord par le bassin à flot de Dunkerque Est, après recyclage et épuration biologique.
Sources (19) (20) (27)

En kg/an

Années	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Métox	70,5	72	67		68,5			
Cd		0,047						
Cr	2,4	2,2	2,3	2,29	2,98	1,92	1,69	2
Cu								0,9
Fe	69,8				43,21	22	11	295,6
F	122,7	127	102	77,64	99	78	67	
Hg	0,2	0,427					0,02	0,023
Mn					21,42		12,7	25,13
Ni						1,16		
Pb	1,1	1,4						
Zn							3	36

Pas de données ou paramètre non mesuré
Les plus gros rejets répertoriés dans les IRE du Nord Pas de Calais
Données recalculées à partir des résultats d'autocontrôle en kg/tonne de Titane

✓ **Nacanco** (Branche d'activité : traitement de surface)

Localisée à Gravelines, Nacanco est une entreprise de fabrication d'emballages métalliques légers qui applique un traitement physico-chimique à ses effluents liquides. Le milieu récepteur des ses rejets est la mer du nord.
Source (20)

En kg/an

Années	1992	1993	1994	1995	1997
Cd	<0,01			0,003	0,004
Cr	<0,01(6)			0,01	0
Cu	<0,01			0,01	0,008
Fe	0,04		0,11	0,11	0,168
Ni				0,02	0,002
Sn	0,05	0,06	0,051	0,038	0,022
Zn	0,1		0,1	0,06	0,017

✓ **Sollac Mardyck** (Branche d'activité : traitement de surface)

L'entreprise s'occupe de la fabrication de tôles minces et de fer blanc pour le laminage et le revêtement de sols. Les effluents subissent un traitement physico-chimique et sont rejetés à la mer du nord par le bassin à flot de Dunkerque Est.
Sources (19) (20)

En kg/an

Années	1991	1992	1993	1994	1995	1997	1998
Cr	6,75 (6)	0,34(6)	0,51 (6)	0,14 (6)	0,11 (6)	0,13 (6)	0,08
Fe	13,7	30,7	15	23	9,45	18,6	25,05
Pb		1,5					
Sn						0,03	
Zn							0,49

✓ **Copenor** (Branche d'activité : chimie – parachimie)

Il s'agit d'une fabrique de polyéthylène qui rejette en mer du nord par le bassin de Mardyck après un traitement physico-chimique de ses effluents.
Source (20)

En kg/an

Années	1993	1994	1995	1997
Cr				0,023 (6)
Zn	1,17	0,21	0,57	0,382

✓ **BP – Elf** (Branche d'activité : chimie)

Spécialisée dans le raffinage de lubrifiants, BP – Elf réalise un traitement physico-chimique de ses effluents liquides avant de les rejeter en mer du nord par le bassin portuaire darse VI de Dunkerque.
Sources (19) (20) (27)

En kg/an

Années	1995	1997	1998
As		0,19	
Ni	0,79		
Zn		9,5	3,35

✓ **Total RD** (Branche d'activité : chimie)

Cette entreprise, implantée à Loon-Plage, pratique le Raffinage de pétrole et rejette en mer par le bassin de Mardyck.
Sources (19) (20) (27)

En kg/an

Année	1998
As	0,002
Cr	0,02
Hg	0,001
Zn	0,8

Secteur de Calais

✓ **Interor** (Branche d'activité : chimie – parachimie)

Cette industrie calaisienne de chimie fine rejette en mer du nord après traitement physico-chimique et biologique.
Sources (20) (27)

En kg/an

Années	1992	1993	1994	1995	1997	1998
metox						0,339
Cu	1	0,15	0,086			
Ni						0,05

✓ **Lipha** (Branche d'activité : chimie – parachimie)

Axée sur la chimie pharmaceutique, l'entreprise Lipha traite ses effluents liquides en interne par couplage de traitement physico-chimique et biologique, et en externe par la station d'épuration de Calais avec rejet en mer du Nord.
Sources (20) (27)

En kg/an

Année	1998
Cd	0,0079
Ni	6,21

✓ **Tioxide** (Branche d'activité : chimie – parachimie)

L'entreprise Tioxide est chargé de la production de pigments de dioxyde de titane (TiO_2). Les rejets d'effluents sont effectués directement en mer du nord par le biais d'une canalisation d'une longueur de 1300m (à partir de la ligne des dunes), dont l'orifice est situé entre 10 et 15 m de profondeur (travaux de 2002 : nouvelles conditions de rejets).
Sources (19) (20) (27)

En kg/an

Années	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Al		4500	4200		2774,91	1746	1594	1516
As					0,093	0,052	0,06	0,05
Cd					0,042	0,052	0,015	0,0079
Cr	387,19	372	346	348	220	72	79	81
Cu	0,77	0,8		0,86	1,32	2,26	1,25	0,84
Fe	27640	24845	23934	20369	12474	5297	5443	5576
Hg					0,003	0,01	0,0006	0,002
Ni	10,9	4,9			2,46	15,5	1,47	6,21
Mn	612	500	519	462	272	136	149	156
Pb	1,14	0,8			2,34	0,69	1,24	0,804
Sn					0,52	0,073	0,62	0,623
Ti	5760	5285	6100		2832	1561	1407	1301
Va	960,7				576,63	119,3	253,48	241,24
Zn	66	21	23	32,5	30,5	54	44	58

✓ **Bellier** (Branche d'activité : industrie textile)

Spécialisée dans la teinture de dentelle, cette entreprise effectue des rejets qui ne subissent aucun traitement interne. Les effluents sont envoyés à la station d'épuration de Calais puis rejetés en mer du nord. Il s'agit donc d'une source potentielle de contamination dans la mesure où aucun traitement spécifique n'est mis en place.
Sources (20) (27)

En kg/an

Années	1992	1993	1997	1998
Cr		0,1	4	1,4
Fe		0,3		
Zn	7,9			0,79

✓ **Desseilles** (Branche d'activité : industrie textile)

Cette entreprise est spécialisée dans la fabrication de la dentelle et envoie ses effluents à la station d'épuration de Calais. Elle constitue une source potentielle de contamination dans la mesure où aucun traitement spécifique n'est assuré. Le rejet se fait ensuite dans la Mer du Nord.
Sources (20) (27)

En kg/an

Année	1993
Cr	0,19
Cu	0,09
Zn	1,7

✓ **Alcatel** (Branche d'activité : traitement de surface)

L'entreprise est chargée de la fabrication de câbles électriques. Les effluents liquides sont rejetés directement à la mer sans traitement interne ou externe.
Sources (20) (27)

En kg/an

Année	1995
Cu	0,04
Fe	0,03
Pb	0,0009
Zn	0,03

Secteur de Boulogne-sur-mer

✓ **Comilog (SFPO)** (Branche d'activité : métallurgie – sidérurgie)

Usine de fabrication de ferro-manganèse, elle est dotée d'un système de décyanuation qui traite les effluent s qui sont ensuite directement rejetés en Manche.
Sources (19) (20) (27)

En kg/an

Années	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Cd	0,338	0,026	0,006	0,008	0,0147	0,021	0,887	0,25	0,41
Fe	13,74	12	5	2,3	1,44	0,787	2,01	2,74	1,46
F									64
Mn	101,7	105	49	58	30,37	19,8	186,19	173	419
Pb	0,112	2,1	0,1	0,1	0,1024	0,064	1,966	1,66	3,1
Zn		28							

Les rejets indirects

Secteur de Dunkerque - Gravelines

✓ **Ascométal et Valdunes** (Branche d'activité : métallurgie- sidérurgie)

Située à Leffrinckoucke, cette entreprise rejette à la mer du Nord par le canal de Furnes après décantation de ses effluents.
Sources (20) (27)

En kg/an

Année	1991
As	0,2
Cr	0,4
Cu	0,7
Ni	0,9
Pb	0,5
Zn	1,5

✓ **Tim** (Branche d'activité : traitement de surface)

Localisée à Quaedrype, Tim est une entreprise de carrosserie et de construction mécanique. Ses effluents liquides subissent une neutralisation et une décantation avant d'être rejetés dans le canal de la Haute Colme.
Sources (20) (27)

En kg/an

Années	1995	1997
Fe	0,25	0,02
Ni	0,64	0,15
Zn	1,5	0,12

Vallée de l'Aa

✓ **Tréfilerie de Bourbourg** (Branche d'activité : traitement de surface)

Le Canal de Bourbourg constitue le milieu récepteur des rejets de l'entreprise, après traitement physico-chimique des effluents.
Source (20) (27)

En kg/an

Années	1991	1992	1994	1995	1997	1998
metox					0,136	
Cd					0,045	0,013
Cu					0,0015	
Fe	0,05				0,02	
F	0,1					
Mn			0,02			
Pb	0,03	0,05		4,05	0,012	
Zn	0,01				0,09	

Secteur de Calais

✓ **Calaire** (Branche d'activité : chimie – parachimie)

L'entreprise est spécialisée dans les intermédiaires et les produits actifs de la chimie fine pharmaceutique. Les effluents sont rejetés à la mer du nord via de la canal de la rivière neuve, après décyanuration. En externe il y a passage à la SEU de Calais.
Sources (19) (20) (27)

En kg/an

Années	1995	1998
Cu		0,2
Hg	0,003	0,002
Zn	2,24	0,5

✓ **Union Minière (Vieille Montagne)** (Branche d'activité : métallurgie des métaux non ferreux)

L'activité de cette industrie est basée sur l'exploitation et le grillage de minerais de zinc. Les effluents subissent un traitement physico-chimique et sont ensuite épandus dans la nappe des sables, à proximité du canal de Marck.
Sources(19) (20) (27)

En kg/an

Années	1991	1992	1993	1994	1995	1997	1998
Cd		0,018		0,02	0,046	0,12	0,053
Cr	0,001						
Cu	0,002				0,049		
Fe	0,06	0,02	0,02	0,0278		9,3	0,039
F	5,1	5	5,2	4,57	5		2,99
Hg	0,15					0,011	0,04
Ni					0,077		
Pb					8,33		
Zn		0,1		0,119			

✓ **Teinturerie de Coquelles** (Branche d'activité : industrie textile)

Spécialisée dans la teinture de dentelle, ses effluents sont rejetés dans le canal des Pierrettes après décantation interne.
Sources (20) (27

En kg/an

Année	1993
Hg	0,02
Zn	0,23

Secteur de Boulogne-sur-mer

✓ **Sollac Desvres** (Branche d'activité : traitement de surface)

La Lene constitue le milieu récepteur des effluents qui ont subi en interne un déshuilage et un traitement physico-chimique.
Source (20) (27)

En kg/an

Années	1991	1992	1993	1994	1995	1997
Cr	0,0011	0,001(6)	0,0084	0,0046	0,0072	0,006
Fe	0,106	0,2	0,18	0,152	0,108	0,074
Zn	0,017					0,12

✓ **Specitubes** (Branche d'activité : traitement de surface)

L'entreprise est implantée à Samer et rejette dans l'Edre après traitement physico-chimique.
Sources (20) (27)

En kg/an

Années	1991	1992	1993	1994	1995	1997
Cr	0,00038	0,0002	0,0001	0,00008	0,00003	0,00007
Fe	0,004	0,003	0,0017	0,0003	0,00062	0,0009
F	0,03	0,00002	0,01	0,02	0,01	0,012
Ni	0,007		0,0013	0,0018	0,00059	0,001
Pb	0,002					
Ti	0,0001	0,008	0,0012	0,0007	0,00056	0,0003

Secteur de la Canche

✓ **Bricard** (Branche d'activité : traitement de surface)

Il s'agit d'une entreprise de fabrication d'articles de serrurerie, localisée à Frévent. La Canche est le milieu récepteur de ses effluents liquides après décantation.
Sources (20) (27)

En kg/an

Années	1991	1992	1993	1994	1995	1998
métox					0,32	Fermeture
Al	0,032	0,076				
Cr	0,003 (6)	0,003(6)	0,006 (6)		0,006	
Cu	0,003	0,023			0,025	
Fe	0,013	0,035	0,004	0,0047	0,24	
Ni	0,143	0,145			0,033	
Zn	0,007	0,053			0,016	

Secteur de l'Authie

✓ **Aubecq** (Branche d'activité : traitement de surface)

L'entreprise Aubecq, implantée à Auxi le Château, est chargée de la fabrication d'articles automobiles et ménagers. L'Authie reçoit les effluents ayant subi une décantation.
Sources (20) (27)

En kg/an

9Année	1998
Al	0,04
Cd	0,003
Cr	0,002
Cu	0,005
Fe	0,07
Ni	0,01
Pb	0,004
Zn	0,04

ANNEXE N : Résultats d'analyse des produits de dragage destinés à l'immersion

Port de Boulogne-sur-mer (1990 – 1998)

Source (16)

Paramètres	Concentration* en mg / kg de sédiments secs	Poids*
ARSENIC	1,5 à 20	800 kg à 2 t /an
CADMIUM	0,5 à 7	4 à 300 kg /an
CHROME	20 à 150	100 kg à 16 t /an
CUIVRE	8 à 40	280 kg à 3 t /an
ETAIN		800 kg à 7 t /an
MERCURE	0,1 à 19	3 à 145 kg /an
NICKEL	5 à 25	500 kg à 9 t /an
PLOMB	17 à 80	500 kg à 7 t /an
ZINC	40 à 740	100 kg à 28 t /an
HAP	100 à 900 µg / kg	-
PCB	1 à 22 g / kg	-

*(minimum à maximum)

Port de Calais (1990 à 1998)

Source (16)

Paramètres	Concentration* en mg / kg de sédiments secs	Poids*
ARSENIC	6 à 13	800 kg à2 t / an
CADMIUM	0,4 à 2	30 à 128 kg / an
CHROME	32 à 100	400 kg à 2 t / an
CUIVRE	10 à 47	1 à 4,8 t / an
ETAIN	0,8 7	100 kg à 2 t / an
MERCURE	0,1 à 4,5	15 à 430 kg /an
NICKEL	5 à 25	100 kg à 3 t /an
PLOMB	17 à 80	2 à 3,5 t / an
ZINC	60 à 560	8 à 51 t / an
HAP	160 à 1500 µg / kg	-
PCB	10 à 162 µg / kg	-

*(minimum à maximum)

Port de Dunkerque (1989)

Source (19)

Paramètres	Concentration *en mg / kg de sédiments secs
CADMIUM	0,6 à 2,5
CUIVRE	14 à 126
MERCURE	0,15 à 0,25
PLOMB	115 à 1054
ZINC	14 à 126
HAP	8428 µg / kg
PCB	10 à 789 µg / kg

*(minimum à maximum)

Annexe P : Organismes et services (ou personnes) consultés

AEAP Agence de l'Eau du bassin Artois-Picardie
764, bd Lahure, 59508 DOUAI
Tél : 03.27.99.90.00
Service Mission Industrie, Mr Hubert Verhaege Tél : 03.27.99.90.00,
Mail : H.Verhaege@eau-artois-picardie.fr

Agence de l'Eau du bassin Artois-Picardie
Tel : 03.21.30.95.75
Mr Lemaire, Mail : L.Lemaire@eau-artois-picardie.fr

DRIRE Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l' Environnement
Subdivision littoral Nord
Route de Bourbourg, 59820 GRAVELINES
Tel : 03.28.23.81.60
Mr Balenquin

Subdivision littoral Pas-de-Calais
Bd Raymond Splingard, 62230 OUTREAU
Tel : 03.21.10.14.80
Mr Le François

DRIRE Picardie
Mail : drire-picardie@industrie.gouv.fr
Mr Leroy, Tel : 03.22.33.66.40, mathieu.leroy@industrie.gouv.fr

DRIRE Haute-Normandie
Division environnement industriel et sous-sols
Mme Le Du, Tel : 02.35.52.32.30, Mail : helene.le-du@industrie.gouv.fr

Subdivision Rouen-Dieppe
Mr Toubeau, Tel : 02.32.91.97.61, Mail : jean-marc.toubeau@industrie.gouv.fr

Subdivision Fécamp
Mr Cardon, Tel : 02.35.19.32.71, Mail : bruno.cardon@industrie.gouv.fr

IFREMER Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
Centre de Boulogne-sur-mer
150, quai Gambetta, 62200 BOULOGNE-SUR-MER
Tel : 03.21.31.61.48

PAD Port Autonome de Dunkerque, Service Maritime du Nord
Terre-Plein Guillain, 59386 DUNKERQUE
Tel : 03.28.29.70.70
Service Management de l'environnement, Mr Grégoire
Tel : 03.28.28.75.22
Mail : pgregoire@portdedunkerque.fr

SMBC Service Maritime des ports de Boulogne-sur-mer et Calais
96, quai Gambetta, 62200 BOULOGNE-SUR-MER
Tel : 03.21.30.10.00
Mr Basin

ANNEXE O : Liste des 33 substances prioritaires dans le domaine de l'eau

FR Journal officiel des Communautés européennes 15.12.2001 L 331/4

Nom de la substance prioritaire	Identifiée en tant que substance dangereuse prioritaire
Alachlore	
Anthracène	(X) (***)
Atrazine	(X) (***)
Benzène	
Diphényléthers bromés (**)	X (****)
Cadmium et ses composés	X
C_{10-13}-chloroalcanes (**)	X
Chlorfenvinphos	
Chlorpyrifos	(X) (***)
1,2-Dichloroéthane	
Dichlorométhane	
Di(2-éthylhexyl)phtalate (DEHP)	(X) (***)
Diuron	(X) (***)
Endosulfan	(X) (***)
(alpha-endosulfan)	
Fluoranthène (*****)	
Hexachlorobenzène	X
Hexachlorobutadiène	X
Hexachlorocyclohexane	X
(gamma-isomère, Lindane)	
Isoproturon	(X) (***)
Plomb et ses composés	(X) (***)
Mercure et ses composés	X
Naphtalène	(X) (***)
Nickel et ses composés	

Nom de la substance prioritaire	Identifiée en tant que substance dangereuse prioritaire
Nonylphénols	X
(4-(para)-nonylphénol)	
Octylphénols	(X) (***)
(para-tert-octylphénol)	
Pentachlorobenzène	X
Pentachlorophénol	(X) (***)
Hydrocarbures aromatiques polycycliques	X
(Benzo(a)pyrène),	
(Benzo(b)fluoranthène),	
(Benzo(g,h,i)perylène),	
(Benzo(k)fluoranthène),	
(Indeno(1,2,3-cd)pyrène)	
Simazine	(X) (***)
Composés du tributylétain	X
(Tributylétin-cation)	
Trichlorobenzène	(X) (***)
(1,2,4-Trichlorobenzène)	
Trichlorométhane (Chloroforme)	
Trifluraline	(X) (***)

(*) Lorsqu'un groupe de substances est retenu, un représentant typique de ce groupe est mentionné à titre de paramètre indicatif (entre parenthèses et sans numéro). Les contrôles sont ciblés sur ces substances types, sans exclure la possibilité de rajouter d'autres représentants, si nécessaire.

(**) Ces groupes de substances englobent généralement un très grand nombre de composés. Pour le moment, il n'est pas possible de fournir des paramètres indicatifs appropriés.

(***) Cette substance prioritaire est soumise à révision pour sa possible identification comme "substance dangereuse prioritaire". La Commission adresse au Parlement européen et au Conseil une proposition en vue de la classification définitive de cette substance, au plus tard 12 mois après l'adoption de la présente liste. Cette révision n'affecte pas le calendrier prévu à l'article 16 de la directive 2000/60/CE pour les propositions de la Commission relatives aux contrôles.

(****) Uniquement pentabromodiphényléther (numéro CAS 32534-81-9).

(*****) Le fluoranthène figure dans la liste en tant qu'indicateur d'autres hydrocarbures aromatiques polycycliques plus dangereux.