

Aménagement industriel du littoral et surveillance de l'environnement : la centrale nucléaire de Gravelines (1975 à 1989)

Centrale nucléaire
Environnement
Impact
Littoral
Sud de la Mer du Nord

Nuclear power plant
Environment
Impact
Coastal zone
South of North Sea

Geneviève LE FEVRE-LEHOERFF^a et Daniel WOEHLING^b

^a Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER),
Centre de Brest, B.P. 70, 29280 Plouzané, France.

^b IFREMER, Centre de Nantes, B.P. 1049, 44037 Nantes, France.

RÉSUMÉ

Les études d'impact destinées à mettre en évidence les effets de la construction puis du fonctionnement de la centrale de Gravelines (Nord) prennent en compte les différentes sources de stress ou contraintes : l'échauffement au rejet ($\Delta T = + 11^\circ\text{C}$), la chloration des circuits (0,8 ppm) et les effets mécaniques (débit 240 m³/s). Deux modes d'action ont été distingués : l'impact de transit et l'impact dans le milieu récepteur. Les effets ont été mesurés dans les compartiments eau, sédiment et matière vivante (espèces benthiques et pélagiques).

Le bilan comporte l'acquisition de la connaissance du milieu hors impact ou état de référence par les séries chronologiques 1975-1989 de mesures physiques, chimiques et biologiques. L'évaluation de l'impact montre la prépondérance de l'impact de transit mesurable par rapport à l'impact dans le milieu récepteur, difficilement quantifiable.

La surveillance future s'oriente vers le suivi des paramètres sensibles et la détection des principaux risques quantitatifs et qualitatifs : températures excessives, déficit en biomasses, prolifération de certaines espèces, déséquilibre entre espèces, apparition d'espèces toxiques, modification sédimentologique.

Oceanologica Acta, 1991. Actes du Colloque International sur l'environnement des Mers épicontinentales, Lille, 20-22 mars 1990, vol. sp. n° 11, 299-311.

ABSTRACT

Industrial development. Ecological and environmental monitoring :
the case of the Gravelines nuclear power plant (1975-1989 period)

Studies have been conducted at Gravelines (France) to estimate the effects of construction and then, the operation of a nuclear power plant. These studies take into account diverse sources of stress : the thermal impact ($\Delta T = + 11^\circ\text{C}$), the chlorination procedures (0.8 ppm) and the mechanical effects (flow rate 240 m³/s). Distinction has been made between impacts occurring within the cooling system and impacts within the thermal plume. The ecological monitoring has been particularly concerned with water, sediment and organic matter, benthic and pelagic organisms.

Results of these field studies include a baseline information in terms of physical, chemical and biological measurements and describe a "reference state" with chronological series.

Study has displayed the predominant effect of entrainment in the cooling system on biomass as compared to the thermal effect observed within the plume.

It is planned that this study will continue to include a monitoring of sensitive parameters such as : elevated temperatures, biomass deficit, abnormal bloom developments, eutrophication, dominance of some species, occurrence of toxic species and alteration of sedimentary process along the coast.

Oceanologica Acta, 1991. Proceedings of the International Colloquium on the environment of epicontinental seas, Lille, 20-22 March, 1990, vol. sp. n° 11, 299-311

INTRODUCTION

Les études écologiques destinées à appréhender les conséquences de l'implantation des centrales nucléaires littorales sur les milieux et leurs ressources constituent un exemple original. Le choix du littoral de la Manche a été déterminé de manière à disposer toute l'année d'un refroidissement suffisant des condenseurs, assuré par un débit élevé d'eau de mer dans une région soumise aux forts courants et aux marées. La température de l'eau côtière à Gravelines au pompage varie de 1 à 3° en hiver à 20-21° en été. Quatre centrales, Gravelines, Penly, Paluel et Flamanville sont en activité sur le littoral de la Manche. Le cas de la centrale de Gravelines, située dans la partie méridionale du bassin sud de la Mer du Nord (fig. 1), est intéressant à plus d'un titre. Il s'agit de l'unité la plus ancienne et dont le suivi est toujours assuré, permettant de disposer de séries chronologiques de plus de quinze années. Par ailleurs, son système de refroidissement en circuit ouvert par un canal débouchant sur l'estran simule les conditions d'impact maximal, dans une zone côtière à faible bathymétrie, et d'autant plus qu'elle est située dans une région riche où la production est quantitativement importante et économiquement intéressante, en particulier pour les poissons plats (soles). La centrale de Gravelines comporte six unités de 910 MW. La puissance maximale a été atteinte en 1986. Le refroidissement des condenseurs

est assuré par une circulation d'eau de mer d'un débit de 240 m³ par seconde. L'eau rejetée est alors échauffée de 11°C. Afin d'éviter la fixation d'animaux dans les circuits intérieurs, l'eau est chlorée en continu à 0,8 ppm quand la température au point de pompage est supérieure à 10°C.

L'objectif final des études menées depuis 1975 dans l'environnement côtier est la détection des impacts liés au fonctionnement de la centrale. Pour atteindre cet objectif on peut distinguer, de 1975 à 1990, trois périodes pendant lesquelles les stratégies d'études ont été différentes, afin de tenir compte d'une part des modifications du milieu, pendant la construction puis le fonctionnement de la centrale, et d'autre part des connaissances acquises progressivement. La période 1975-1979 représente la phase de récoltes de données sur l'environnement du site et les peuplements animaux et végétaux pendant la construction de la centrale. Les études sont descriptives, pluridisciplinaires et exhaustives. La seconde période, de 1979 à 1986, correspond à la mise en service de la centrale, en un premier temps sans échauffement, puis avec une augmentation progressive de la puissance électrique. Pendant cette période, la stratégie est complexe, associant les études spatiales et temporelles. La troisième période, depuis 1986, est la phase de surveillance pour une production électrique maximale. Il s'agit désormais d'observer les phénomènes majeurs de modification de l'environnement avec un nombre optimal de stations et de

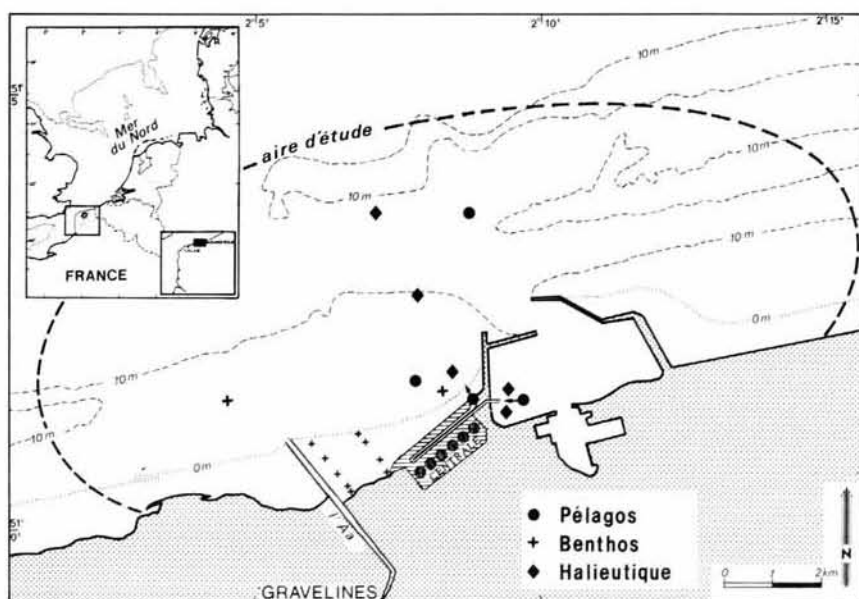


Figure 1

Le site de la centrale de Gravelines. Pendant les premières années, l'aire d'étude, délimitée par une ligne pointillée, comprenait de très nombreuses stations. Les plus caractéristiques ont été conservées en surveillance (pélagos, benthos, halieutique).

Site of nuclear power plant of Gravelines. In first time study area is delimited by broken line containing many sampling stations. The most important points are studied in surveillance (pelagos, benthos, fishing stations).

Tableau 1

Stratégie d'échantillonnage.

Sampling strategy.

Base de données	Nombre de paramètres ou espèces	Nombre de missions par an	Nombre de stations explorées
Météorologie	6	12	15
Hydrobiologie	10	12	15
Microbiologie	15	12	15
Phytoplancton	200	12	15
Zooplancton	300	12	12
Poissons	20	6	7
Benthos	400	6	60

paramètres choisis comme indicateurs de l'impact de la centrale. Cette démarche est illustrée par un nombre restreint d'exemples choisis dans l'ensemble des résultats.

MÉTHODOLOGIES

Les stratégies d'échantillonnage

Elles sont déterminées par la situation géographique et par les objectifs de l'étude. Le site de Gravelines, entre Calais et Dunkerque, est situé sur une côte basse et sableuse. Aucun grand fleuve n'arrive à la côte ; l'Aa est une petite rivière canalisée dont le débit irrégulier est connu. La zone côtière est soumise aux marées semi-diurnes. Les ouvrages construits de 1973 à 1980, six unités nucléaires et les aménagements des canaux d'entrée et de rejet ont modifié le littoral et par conséquent la stratégie d'étude (points de prélèvement).

Le premier aspect de la stratégie d'échantillonnage est la pluridisciplinarité. Les données concernent le climat, la pluviosité, le débit des rivières, les courants, les marées, les vents, la bathymétrie, la nature des fonds, la transparence de l'eau, l'hydrologie, l'étude des populations benthiques, pélagiques et halieutiques. Parallèlement, les caractéristiques du fonctionnement de la centrale depuis 1980 sont connues : puissance électrique, débit du rejet, chloration du circuit.

Le deuxième aspect de la stratégie d'échantillonnage concerne les problèmes de variabilité spatiale et temporelle. Au début des études la densité des points de prélèvements et la périodicité des missions ont été très élevées (tab. 1).

Deux types de prélèvements ont permis de cerner la variabilité spatio-temporelle du site : ce sont d'une part la méthode des prélèvements repliqués (repliquats), de deux à six par échantillon, et d'autre part l'étude de la variation pendant le cycle de marée. La capacité technique à détecter l'impact a conduit à privilégier la stratégie basée sur les comparaisons spatiales (Chardy et Menesguen, 1984).

Les méthodes d'investigation

INVESTIGATION SUR LE TERRAIN

Ce sont celles utilisées couramment en océanographie (UNESCO, 1966 *a* ; *b* ; 1978 ; 1979 ; 1981 ; Aminot et Chaussepied, 1983), adaptées à la zone d'étude (Belsher *et al.*, 1986). Les techniques de prélèvements utilisent les bouteilles Niskin, les bouteilles stériles pour la microbiologie, les filets à plancton WP2 (UNESCO, 1968), Bongo (Smith et Richardson, 1977 ; Mac Gowan et Brown, 1966), les dragues, la benne Mac Intyre, le chalut CP3, le Push net de Riley.

La température, paramètre le plus étudié, a été mesurée soit par sonde ou thermomètre à renversement au cours des missions, soit, à partir de 1980, par des thermistances immergées (EDF) en un réseau de points fixes, en continu sur onze niveaux. L'utilisation de thermographies aériennes (IGN-EDF) et de photographies en infra-rouges a contribué également à définir l'évolution du panache du rejet (Darras *et al.*, 1986 ; Donnars *et al.*, communication à ce même congrès, Grossel *et al.*, poster à ce même congrès). Un autre type de photographies (IGN) a été utilisé pour suivre les modifications sédimentaires du littoral (plages et dunes).

LES INVESTIGATIONS AU LABORATOIRE

Elles concernent :

- un inventaire, une liste taxonomique, abondance et diversité ;
- une description des structures, répartition spatiale, analyse de population, succession, analyse factorielle ;
- la physiologie et l'éthologie, les cycles de reproduction, nombre de générations, la fertilité, le sex-ratio, le comportement, le taux de mortalité des espèces soumises à l'impact ;
- une approche déterministe, comportant des corrélations, une modélisation, une analyse statistique des sources de variations, une analyse des recrutements.

RÉSULTATS

Ils concernent deux types d'études, l'état de référence et l'étude d'impact.

L'état de référence

DÉFINITION

L'état de référence ou niveau de base est un état où sont décrites d'une part les structures stables et robustes du milieu et d'autre part les variations spatiales et temporelles saisonnières, annuelles ou pluriannuelles qui ne sont pas attribuables à la centrale. Le niveau de base est calculé sur la totalité des données recueillies avant fonctionnement à laquelle s'ajoutent celles collectées depuis, dans une zone non impactée. Cette méthode permet de connaître les différentes sources de variations. Leur connaissance évite d'attribuer, à tort, au fonctionnement de la centrale, des événements aperiodiques, remarquables ou rares, par exemple les échauffements d'origine météorologiques (étés chauds de 1976 et 1989). Les premières estimations des sources de variations spatio-temporelles du site ont été réalisées en 1979 (Laurec *et al.*, 1981). L'état de référence tel qu'il vient d'être défini est amélioré chaque année par les nouvelles données hors impact intégrant les variations à long terme et comporte une notion «dynamique». Il est différent de l'état zéro ou état initial (notion statique) avant aménagement et calculé avec les données portant sur un nombre très limité d'années.

CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉTAT DE RÉFÉRENCE

Le bilan des connaissances représente 2 000 paramètres. Le site de Gravelines se rattache aux secteurs côtiers du sud de la Mer du Nord et le biotope est en continuité avec le littoral des côtes belges et hollandaises, avec lequel il partage les traits essentiels : dominance des substrats sablo-vaseux, abondance des hauts fonds proches de la côte, faible profondeur générale, hydrodynamisme important, continentalité et faible inertie. Les courants de marée sont alternatifs, parallèles à la côte, et atteignent 2,7 noeuds. Le courant résiduel est orienté Nord-Nord Est vers la Mer du Nord. Ces conditions engendrent la formation de structures spatiales bien délimitées dans le benthos subtidal sous forme d'unités de peuplements, principalement celle des sables à *Ophelia borealis*, le peuplement des substrats hétérogènes envasés et le peuplement à *Abra alba* (Souplet et Dewarumez, 1980 ; Souplet *et al.*, 1980 ; Dewarumez *et al.*, 1976 ; Dewarumez, 1979). Les unités de peuplement et les structures spatiales ont également été décrites dans la zone intertidale depuis 1975 (Grégoire, 1976). Les estrans sablo-vaseux présentent une faible pente et sont donc très sensibles aux effets de la houle, du vent, des ouvrages (digues) construits sur le littoral et des rejets divers (dessalure de la rivière Aa, rejet de la centrale). L'évolution à long terme des peuplements riches en annélides et mollusques a été analysée pendant l'étude d'impact (Dewarumez, 1983).

Dans les conditions naturelles hors impact, le milieu pélagique présente peu de structures spatiales stables. Les gradients côte-large sont faibles et classiques, à savoir des valeurs plus élevées de sels nutritifs aux stations côtières ainsi qu'une production primaire plus forte (Bougard, 1977 ; Gossel, 1981). Aucun gradient constant n'apparaît dans la répartition des biomasses zooplanctoniques globales, mais on observe une différence côte-large pour les valeurs d'abondance des espèces avec un maximum côtier des mysidacés, des *Oikopleura dioica*, des *Acartia* et des larves de *Lanice conchilega*, ce qui correspond au maximum d'espèces euryhalines, herbivores et des larves du benthos des sables côtiers. Les caractéristiques écologiques des espèces ont été déterminées (Toularastel *et al.*, 1977 ; Le Fèvre-Lehoërff et Quintin, 1981).

Les sources de variations définissant le mieux le milieu pélagique du site concernent les fluctuations temporelles. La faible inertie de la masse d'eau favorise l'évolution rapide des populations bactériennes (Delesmont et Delattre, 1982) et les successions des espèces planctoniques de manière contrastée au cours des saisons (Crassous *et al.*, 1981 ; Ryckaert *et al.*, 1983 ; Le Fèvre-Lehoërff et Quintin, 1981 ; Le Fèvre-Lehoërff *et al.*, 1983). Elle conditionne la période de ponte des espèces, en particulier les pontes des poissons communs à Gravelines, le sprat et la sole (Woehrling *et al.*, 1981). Cette dernière est l'espèce commerciale la plus importante sur tout le secteur côtier, le site étant inclus dans la fraction méridionale d'une vaste frayère et nourricerie en continuité avec l'aire de reproduction de la sole en Mer du Nord (Woehrling, 1984 ; 1985 a ; 1985 b ; Woehrling *et al.*, 1981).

Les séries chronologiques pour l'ensemble des espèces permettent de distinguer les caractères constants pour toutes les années, par exemple la période de ponte en fonction de la température et les fluctuations naturelles.

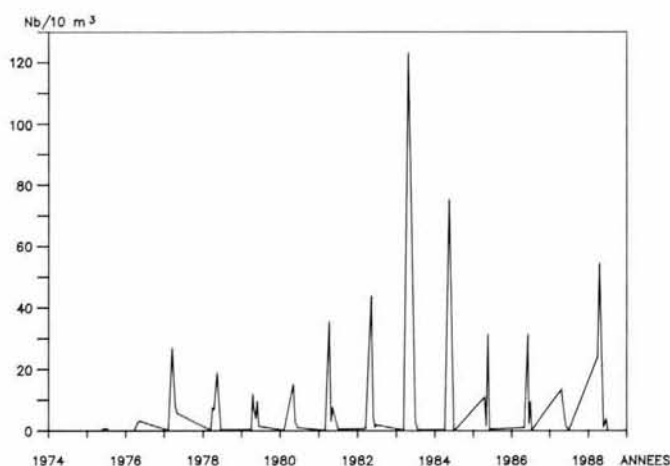


Figure 2

Densités d'oeufs de soles *Solea vulgaris* Quensel échantillonnés de 1975 à 1988 au droit de la centrale nucléaire de Gravelines (N/10 m³ effectifs au point de référence).

Density of sole eggs *Solea vulgaris* Quensel sampled from 1975 to 1988 in front of the Gravelines nuclear power plant. (Number/ 10 m³ abundance at reference point).

Les résultats obtenus en séries chronologiques à long terme sont illustrés par deux exemples choisis parmi les données pélagiques : la variation d'abondance des oeufs de soles (fig. 2) et la variation de la température de l'eau (fig. 3 a). A partir de l'ensemble des données des séries chronologiques, on a pu établir pour chaque paramètre une année moyenne. L'année moyenne des températures, représentée en figure 3 b, a été calculée sur les 2 384 mesures. La moyenne mensuelle générale est notée par un trait horizontal, et la moyenne mensuelle de chaque année par une barre verticale, première année à gauche, année la plus récente à droite. Il n'apparaît pas de dérive climatique générale sur la période considérée. Les valeurs sont portées dans le tableau 2.

Sont portées dans le tableau les moyennes mensuelles calculées par année et sur l'ensemble de la période 1975-1988, ainsi que le nombre total d'observations correspondantes.

Un autre type de moyenne, caractéristique du site pour chaque paramètre, a été calculé. C'est la moyenne toutes mesures confondues, tous les points et toutes les saisons moyennées (tab. 3). Elle est peu utilisée ; elle permet la comparaison éventuelle de sites éloignés : Gravelines et Flamanville par exemple.

L'étude d'impact

Elle a débuté en 1979, au moment de la mise en service des pompes de circulation d'eau, avant celle des réacteurs. De 1980 à 1986, les six réacteurs ont produit successivement et simultanément une puissance électrique croissante jusqu'à un maximum de 5 500 mégawatts. On peut considérer que, pour un mégawatt électrique produit, deux mégawatts sont dissipés en mer sous forme de chaleur. De 1987 à 1989, une stabilisation de l'échauffement dans le canal de rejet se produit, de + 8°5 à + 9°C (Delesmont, 1990).

DÉFINITION

Il y a plusieurs manières de définir les études d'impact, selon que l'on s'intéresse aux sources de stress, au mode d'action ou aux effets dans les compartiments impactés.

Les sources de stress

- Le changement apporté au linéaire côtier et la morphologie littorale.
- Les principaux rejets : rejets radioactifs, boue de déminéralisation, rejet du circuit de refroidissement. Ce dernier, qui représente une circulation d'eau à vitesse élevée, est la source d'un stress mécanique auquel s'ajoutent en hiver le stress thermique et en été le stress thermique et chloré.

La nature de l'impact ou modes d'actions

- L'impact de transit, à l'intérieur des circuits de la centrale.
- L'impact dans le milieu récepteur.

Le premier est appréhendé par une comparaison entre l'entrée et la sortie, aux déversoirs de rejet ou dans le

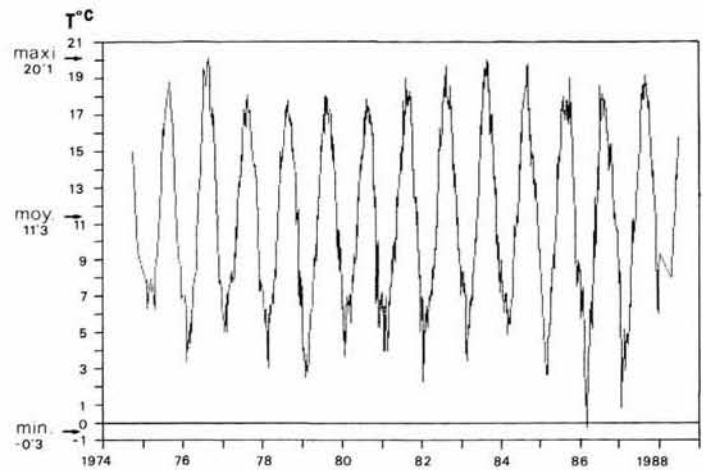


Figure 3 a

État de référence. Série chronologique des températures de 1975 à 1988 (2 384 mesures).

Reference state chronological series of temperatures from 1975 to 1988 (2 384 data).

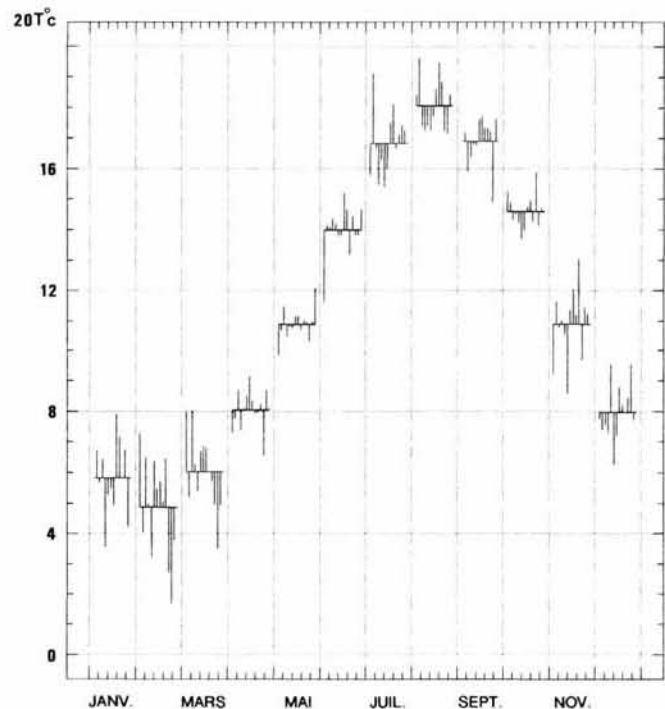


Figure 3 b

État de référence. Année moyenne des températures calculée sur la période 1975-1988. Barre horizontale : moyenne 1975-1988. Barre verticale : moyenne chaque année.

Reference state. Mean year of temperatures calculated on 1975-1988 period. Horizontal bar : mean value 1975-1988. Vertical bar : mean for each year.

canal de rejet, le deuxième par l'évolution dans la tache thermique depuis le rejet jusqu'au point de référence défini par un ΔT nul.

Les effets

Ils sont étudiés sur les compartiments suivants : le milieu physique et chimique de la masse d'eau, le sédiment et le milieu biologique.

Tableau 2

Températures de l'eau (moyennes mensuelles et nombre de mesures utilisées).

Water temperatures (month mean and number of used data).

Mois Années	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
	1975	-	7,3	8,0	7,3	9,8	11,7	15,8	18,4	16,9	15,3	9,2
1976	6,7	4,0	5,2	7,8	10,7	14,1	19,1	19,6	17,2	14,9	11,6	7,4
1977	5,7	6,5	8,0	8,7	11,5	14,1	16,7	17,4	15,9	14,3	10,8	7,6
1978	6,4	5,0	6,3	7,4	10,5	14,4	15,5	17,3	16,4	14,5	11,0	7,3
1979	3,6	3,2	5,4	8,1	10,8	14,2	16,3	17,4	16,8	14,2	10,5	9,5
1980	5,3	6,4	6,7	8,5	10,7	13,8	15,4	17,3	16,8	13,7	8,6	6,3
1981	5,5	5,4	6,9	9,2	11,2	13,8	16,0	17,7	17,6	14,0	11,4	7,2
1982	4,9	5,7	6,8	8,3	11,2	15,2	17,5	18,6	17,7	14,8	12,0	8,8
1983	7,9	5,1	6,0	7,9	10,7	14,7	18,1	19,5	17,3	15,0	11,2	8,2
1984	7,2	6,4	5,7	8,0	11,0	13,2	16,7	18,9	17,3	14,3	13,0	
1985	-	2,8	5,0	8,2	11,0	14,5	17,1	17,2	17,2	15,9	9,7	8,4
1986	6,7	1,7	3,5	6,6	10,3	13,8	17,4	17,2	14,9	14,1	11,4	9,5
1987	4,2	3,8	4,9	8,7	11,0	13,8	17,3	18,4	17,6	14,7	11,2	7,7
1988	-	-	-	8,1	12,1	14,7	-	-				
Toutes années 1975-1988	5,9	5,3	6,1	8,2	10,9	14,2	16,8	18,1	17,1	14,4	10,8	7,8
Nombre n de mesures	210	196	211	207	216	196	197	205	200	192	181	173

Tableau 3

Paramètres hydrologiques.

Hydrological parameters.

	Moyenne générale	Nombre de mesures	Moyenne maximale	Moyenne minimale
Température (°C)	11,3	2 384	Août 18,1	Fév. 5,3
Salinité	33,8	529	Sept. 33,8	Mai 33,2
NO ₃ µg/l	7,45	363	Fév. 15,6	Août 1,3
NO ₂ µg/l	0,49	365	Déc. 0,9	Août 0,2
NH ₄ µg/l	3,07	357	Nov. 5,2	Avril 1,4
PO ₄ µg/l	1,06	81	Fév. 1,6	Août 0,9

EXEMPLES DE RÉSULTATS

Les relations de causes à effets sont dans la plupart des cas difficiles à établir avec certitude. Elles apparaissent cependant dans deux situations : quand l'impact est facilement mesurable compte tenu de l'ordre de grandeur des différences observées, et quand l'impact, bien que faible, est détecté par une évolution à long terme et par l'observation d'une dérive.

L'impact de transit

. Température de l'eau et chloration

L'échauffement moyen observé dans le canal de rejet est actuellement stabilisé à 8°5 environ, ce qui, pour la saison estivale 1989, correspondant à 29° dans le canal de rejet. La fixation de larves planctoniques et le

développement de bryozoaires, moules, ascidies, hydrozoaires et cirripèdes sont évités par la chloration. La disparition du chlore est rapide mais parmi les haloformes produits, le bromoforme est abondant et constitue un excellent traceur de la chloration (Abarnou, 1981 ; Delesmont, 1990). Le nombre de mois de chloration dépend des conditions météorologiques générales de l'année. En 1989 par exemple, la chloration a été effectuée pendant huit mois ($t^{\circ} > 10^{\circ}\text{C}$ dans l'avant-port), ce qui amplifie l'impact certaines années en cumulant l'impact thermique et l'impact du chlore. Il a été démontré depuis longtemps (McLean, 1973 ; Block, 1977) que le stress produit par le chlore sur un organisme est fonction de la température, la dose et le temps d'exposition. Il doit être suffisamment efficace (pourcentage de mortalité élevé) pour

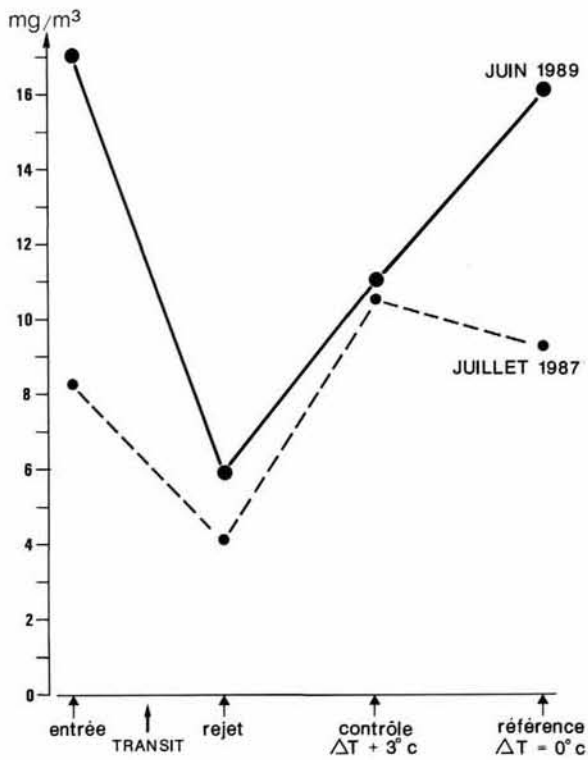


Figure 4

Impact du transit sur la quantité de chlorophylle a (mg/m³).

Transit impact on the chlorophyll a abundance (mg/m³).

provoquer la destruction de larves indésirables (moules), mais pas trop destructeur sur l'ensemble des organismes, ce qui est difficilement compatible. En période de chloration, la dose moyenne de bromoforme au rejet est 18 µg/l, ce qui représente 97 % de la masse des produits dosés, les deux autres composés étant CHClBr_2 et CHCl_2Br (Delesmont, 1990).

. La chlorophylle

Les teneurs à Gravelines sont élevées. Les maxima de 20 à 40, et exceptionnellement 60 mg/m³, sont rencontrés au printemps, dus aux blooms précoces de diatomées et en mai au bloom de *Phaeocystis*, espèce de nanoflagellé particulièrement abondante dans la région (Grossel, communication même congrès, 1990). Le déficit en biomasse chlorophyllienne a été estimé à 50 % environ. Des écarts importants apparaissent selon les saisons, la chloration est responsable de la plus grande destruction en période estivale (Grossel, 1986). La biomasse chlorophyllienne détruite au printemps pendant le transit est estimée à 5 mg/m³ en 1987 et 16 mg/m³ en 1988 (Grossel, 1988 ; 1989). La figure 4 représente deux exemples du fort déficit de transit suivi d'une remontée des valeurs dans le milieu récepteur, et un gradient croissant de la côte vers le large ($\Delta T = 0^\circ$), gradient inverse du gradient normal établi pendant l'état de référence sur le site.

. *Noctiluca* sp.

Les noctiluques sont des dinoflagellés qui, à Gravelines, offrent un cycle saisonnier régulier. Elles sont absentes en

hiver. Le maximum d'abondance est estival (juillet), de 10^5 à 10^6 cellules/m³ ou même plus, jusqu'à 10^9 cellules/m³ dans les cas d'eaux colorées. Ces dernières se forment principalement par temps ensoleillé et léger vent d'est persistant (Le Fèvre-Lehoërff et Derrien, 1986 ; Le Fèvre-Lehoërff, 1988). L'avant-port ouest de Dunkerque où est captée l'eau de refroidissement est une zone de développement estival intense. La comparaison entre points d'entrée et de rejet montre une évolution de 1980 à 1989 (fig. 5 a, b). L'effet destructeur du transit est un phénomène accentué depuis 1987 (fig. 5 b).

. Le zooplancton : exemple des appendiculaires *Oikopleura dioica*

La biomasse du zooplancton, comme celle du phytoplancton, est très élevée, variant selon la saison de 20 à 300 mg/m³ en poids sec et de 10^2 à 10^4 individus/m³, ce qui correspond à 3-4 % d'azote et 20-25 % de carbone. Les travaux connus dans la littérature concernant l'estimation de la mortalité par transit ne permettent pas de prévision généralisable, les chiffres variant de 10 à 100 %. A Gravelines, les résultats obtenus sont fréquemment compris entre 40 et 80 %, et 5 à 50 mg/m³ (Le Fèvre-Lehoërff, 1989). Les espèces qui transitent semblent différemment affectées : les organismes mous comme les

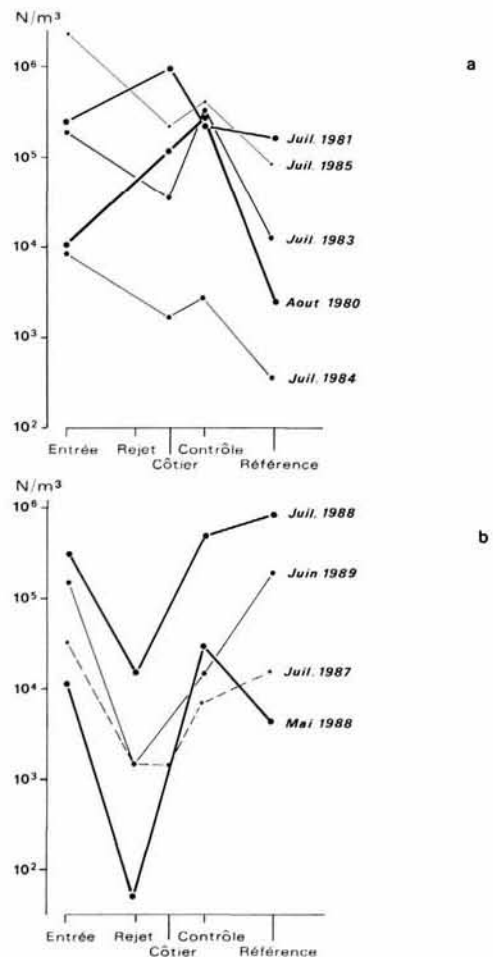


Figure 5

Étude d'impact. Impact du transit sur la quantité de noctiluques (N/m³).

Impact study. Transit impact on abundance of *Noctiluca* sp. (N/m³).

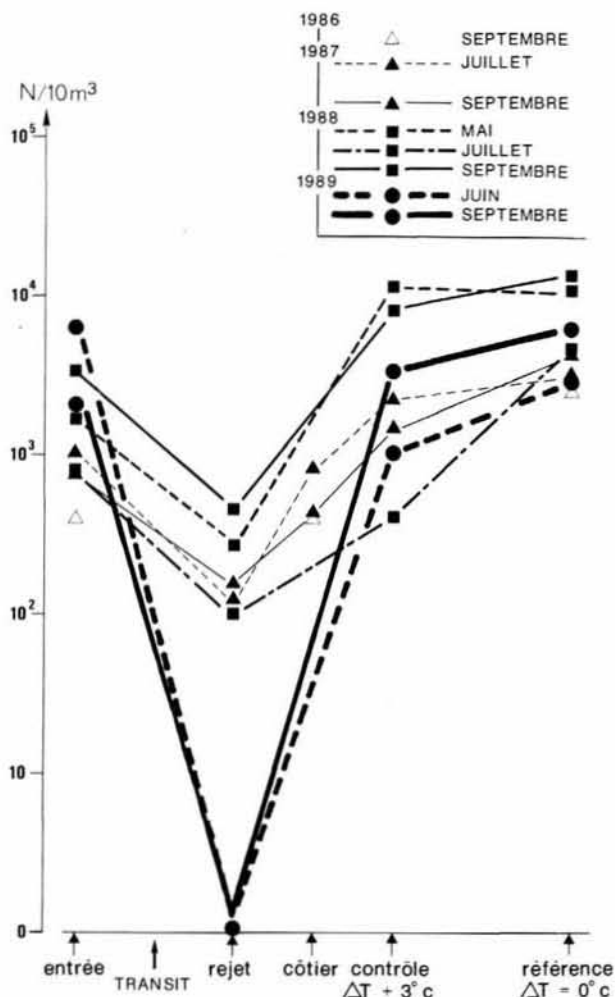


Figure 6
Étude d'impact. Impact du transit sur l'abondance des appendiculaires *Oikopleura dioica* (N/10 m³).

Impact study. Transit impact on abundance of larvacaea *Oikopleura dioica* (N/10 m³).

chaetognates *Sagitta*, les larves d'annélides, ainsi que les appendiculaires *Oikopleura dioica* (fig. 6), particulièrement fragiles (Fenaux, 1963 ; 1972 ; 1976), subissent une mortalité immédiate importante par transit, calculée sur la différence d'abondance entrée - sortie. Pour d'autres groupes (les crustacés copépodes par exemple), l'effet du transit se traduit par une augmentation du nombre de lésions (antennes cassées) et du parasitisme.

Les organismes qui transitent dans les circuits sont de petite taille, les individus de taille supérieure à 3 mm étant arrêtés par les filtres rotatifs à l'entrée. L'évaluation quantitative et qualitative des organismes entraînés dans les circuits et un essai de quantification d'impact global a fait l'objet des travaux de Blanpied-Woehrer (1984) et de Victor-Baptiste (1984). Les organismes animaux et végétaux capturés annuellement par unité de production sont estimés à 800 tonnes, 94 % constitués de crabes, algues, méduses, cténaïres, tuniciers et 6 % de poissons. Le colmatage des grilles peut se produire au moment du pic d'abondance des cténaïres *Pleurobrachia* au printemps (mai), ce qui peut être une gêne au pompage.

Pendant le transit, l'effet mécanique est considérable. Afin de tester l'effet de transit sur les oeufs de soles, une étude

expérimentale a été conduite en 1982 et 1983 (Woehrling, 1983) à différents moments de la saison de reproduction. Les résultats sont schématisés en figure 7. Ils ont montré que :

- Le transit provoque une mortalité d'environ 30 % des oeufs, les premiers stades étant plus sensibles, ainsi que les pontes du début de saison, ce qui corrobore les assertions de Riley (1974) et de Fonds (1979).
- L'essentiel de l'impact est dû au choc mécanique. On n'observe pas significativement d'effet supplémentaire de l'échauffement ou de la chloration, ni de sommation ou de synergie des impacts.
- Il n'y a pas d'effet différé : la mortalité additionnelle de 10 % en moyenne observée après 72 heures d'incubation n'est pas significativement différente entre les témoins et les oeufs impactés. Le bilan quantitatif est globalement déficitaire pour le transit du phytoplancton, du zooplancton et des jeunes stades des espèces halieutiques. L'élévation de température à l'intérieur des circuits stimule cependant la production de certaines catégories d'organismes ; c'est le cas pour des espèces sessiles de bryozoaires quand ils ne sont pas détruits par le chlore, et la flore bactérienne, mais le temps de trajet est trop court pour la mise en évidence d'une multiplication. L'effet différé dans le canal de rejet, par contre, sera discuté ultérieurement.

L'impact dans le milieu récepteur

. Le milieu physique. Température

Le rejet provoque la formation d'une tache thermique qui a été largement étudiée et est bien connue actuellement

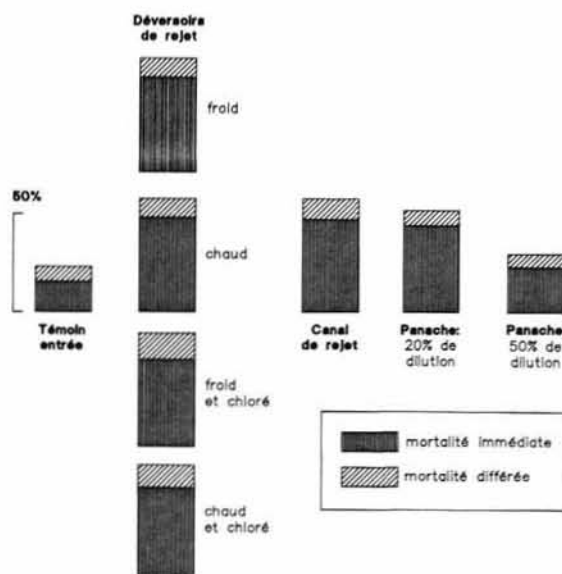


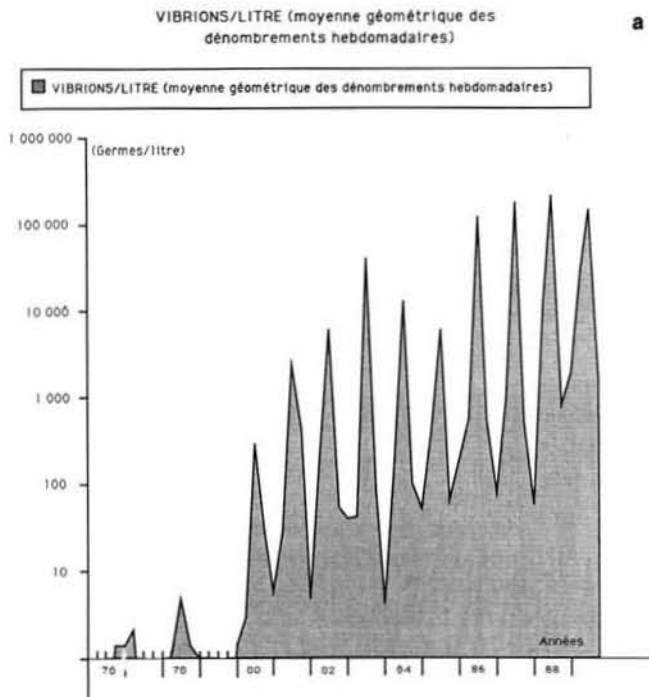
Figure 7
Étude d'impact. Mortalité des oeufs de sole *Solea vulgaris* Quensel lors du transit dans le circuit de refroidissement de la centrale, moyenne de six campagnes pour quatre situations différentes.

Impact study. Mortality of solea eggs *Solea vulgaris* Quensel during entraînement through the cooling system of nuclear power plant, mean value of six surveys for four different situations.

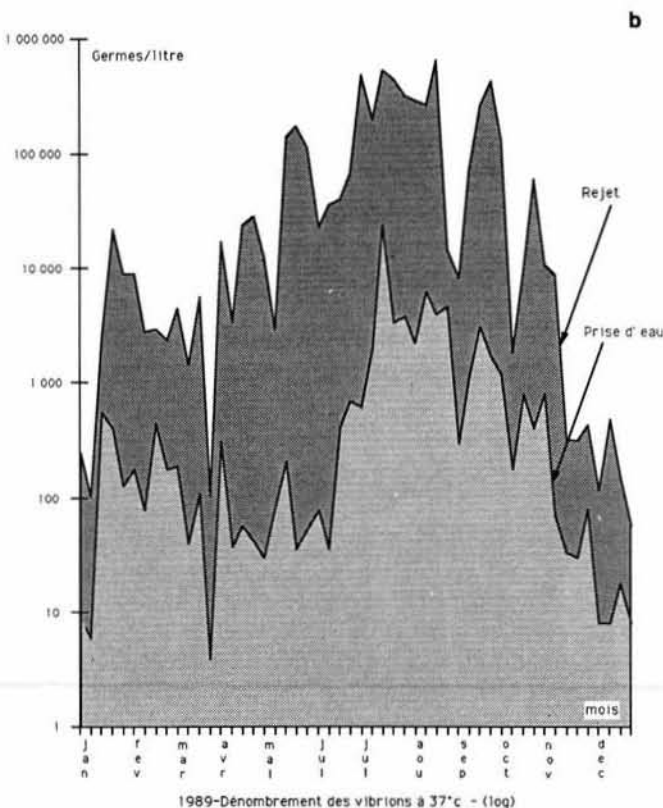
(Darras *et al.*, 1986 ; Donnars *et al.*, 1990 ; Gentien *et al.*, 1986). La zone est caractérisée par un gradient horizontal et par une structure verticale. Le premier est variable, et peut atteindre 10° en surface (été 1989 : 30° au rejet, 20° au large). La position de la tache thermique et la surface échauffée sont fonction de plusieurs facteurs : le moment de la marée, son coefficient et la puissance de

fonctionnement de la centrale. Le panache subit un mouvement d'oscillation du sud-ouest à basse mer vers le nord à haute mer. Au moment du flot, le panache est plaqué sur la digue de l'avant-port ouest. Au moment de la renverse, une fraction du panache revient vers le sud, la plus grande fraction est entraînée vers le nord-est, dans le sens du courant résiduel général. Une petite partie de l'eau ayant transité dans la centrale subit une recirculation. Le pourcentage d'eau concernée par un deuxième transit a été estimé à la prise d'eau pour l'année 1989 à 5,4 % grâce au dosage du bromoforme, traceur de la chloration (Delesmont, 1990). Le deuxième facteur qui influence la position et l'aire du panache, très bien mis en évidence par les imageries infrarouges IGN (Institut Géographique National), est le coefficient de marée, l'extension maximale d'étirement Sud Ouest-Nord Est se produisant aux fortes marées. Il faut également tenir compte de la puissance de fonctionnement de la centrale (variation saisonnière à maximum hivernal), les deux tiers de l'énergie étant dissipés sous forme de chaleur. Les facteurs météorologiques jouent évidemment leur rôle, et en particulier l'agitation de l'eau, la force et la direction du vent. La structure verticale du panache est bien caractérisée (Delesmont et Delesmont, 1990 ; Gentien *et al.*, 1986), et il est fréquent de noter un ΔT de 5 à 6° entre la surface et 3 m de profondeur. La comparaison des mesures de terrain et des mesures du modèle 3D mis au point par EDF (Donnars *et al.*, 1990) est considérée comme prédictive.

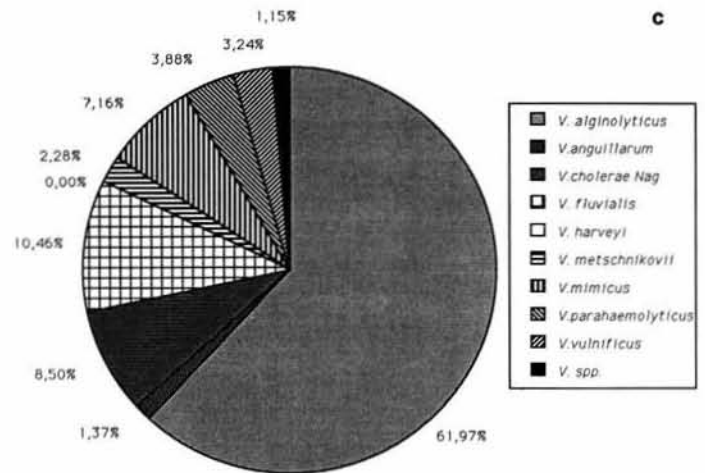
Le rejet accentue l'hétérogénéité côte-large. La limite extérieure de la tache thermique est une structure frontale typique, marquée visuellement par l'accumulation de particules diverses, de plancton mort ou en décomposition,



a



b



c

1989 - Pourcentages des diverses espèces de vibrions au Rejet

Figure 8

Étude d'impact. Impact sur les vibrions. a) évolution saisonnière au rejet de 1976 à 1988 ; b) comparaison des abondances de vibrions à la prise d'eau et au rejet pour l'année 1989 ; c) pourcentage des différentes espèces de vibrions au rejet en 1989.

Impact study : a) seasonal variations in out fall station from 1976 to 1988 ; b) comparison of abundance of *Vibrio* sp. between intake and out fall stations in 1989 ; c) diversity of species *Vibrio* sp. in outfall station in 1989.

de mousses à polysaccharides des espèces ayant transité dans la centrale (*Phaeocystis*, *Pleurobrachia*) et ayant subi un brassage intense dans les déversoirs et le canal de rejet. Le dépôt au niveau du front est particulièrement net quand le temps est calme et le vent faible.

. Le milieu biologique

Les espèces pélagiques ont été étudiées selon un gradient côte-large défini par un ΔT décroissant et non selon un réseau de stations fixes. Chaque station est définie par rapport à la station référence du large ($\Delta T = 0^\circ$) : la station contrôle $\Delta T + 3^\circ\text{C}$, les stations dans le panache définies par leur ΔT mesuré à l'aide d'une sonde maintenue en surface en route et au moment des prélèvements. Afin de détecter l'impact dans le milieu récepteur, une étude de la dilution du panache et de l'évolution des populations pélagiques y résidant a été tentée (Gentien *et al.*, 1986). On peut dire que l'impact dans le milieu récepteur, tant pour le phytoplancton que pour le zooplancton, est apparu quantitativement négligeable par rapport à l'impact prépondérant du transit.

La stratégie d'étude du panache qui consiste à comparer les zones impactée et non-impactée, ou approche «dedans-dehors» (Chardy et Menesguen, 1984), ne permet d'appréhender l'impact que sur la fraction des peuplements ou les paramètres dont le délai de réponse est compatible avec la durée du transit augmentée de la durée du séjour dans le panache, ou ce dernier seul pour les organismes ne transitant pas. Il s'agit d'impacts sublétaux, réponses physiologiques ou démographiques pour les espèces à cycle court, ou létaux. Pour les populations halieutiques, avec la méthode d'investigation employée et le taux de dilution observé, l'échantillonnage devrait être capable de déceler un déficit de 40 %. Alors que l'approche de comparaison «dedans-dehors» est destinée à mettre en évidence les impacts aigus, la seconde approche des longues séries chronologiques est davantage conçue pour déceler les éventuels impacts chroniques. L'évaluation du déficit en plancton animal et végétal dans le panache et d'un impact thermique rémanent du rejet sur le milieu récepteur, n'est mesurable que si l'on dispose d'un échantillonnage qui permet d'estimer en continu la production spécifique dans le panache. La productivité primaire semblerait liée à la charge particulière (Gentien *et al.*, 1986). Des effets létaux ont été observés sur le zooplancton en saison estivale en 1987 et 1988 avec

échouages massifs et ponctuels de crustacés planctoniques *Temora longicornis*, *Pseudocalanus minutus* et *Centropages hamatus*, sur la plage de Petit-Fort-Philippe.

. Les bactéries

L'impact thermique stimule le développement bactérien. Une étude expérimentale des effets des chocs thermiques et de la chloration sur les bactéries avait permis de simuler sur modèle réduit avant fonctionnement de la centrale la multiplication des vibriens (Delattre et Delesmont, 1981). La simulation prévoyait une multiplication intense pour des températures supérieures à 35°C . L'analyse des données de terrain montre un effet différent du modèle prévisionnel. La figure 8 a représente l'abondance des vibriens de 1976 à 1989 dans une zone proche du rejet. L'analyse des données récoltées avant 1980 montre un maximum estival favorisé par les fortes températures, les valeurs maximales extrêmes sont inférieures à 100/l et le minimum hivernal proche de zéro. Depuis 1980 le maximum estival augmente jusqu'à des valeurs proches de 10^5 vibriens/l et le minimum hivernal n'est plus nul (Delattre et Delesmont, 1986).

La figure 8 b et le tableau 4 représentent les différences d'abondances à la prise et au rejet en 1989. La relation entre la température de l'eau et les concentrations en vibriens est très forte au rejet et moindre à la prise d'eau. Exemple : année 1987-1988 (données Delesmont, 1989) :

Prise d'eau : $\text{Log} (N \text{ vibriens/l}) = 0,103 \text{ t}^\circ\text{C} + 0,233$

$r = +0,534$ $n = 52$

Rejet : $\text{Log} (N \text{ vibriens/l}) = 0,315 \text{ t}^\circ\text{C} - 2,903$

$r = +0,765$ $n = 52$

La stabilisation du cycle apparaît du point de vue quantitatif depuis 1986. En revanche la diversité spécifique augmente. Delesmont et Delesmont (1990) ont mis en évidence l'évolution qualitative des vibriens devant Gravelines et entrepris une étude approfondie de ce groupe depuis 1989. Si *Vibrio alginolyticus* était la seule espèce régulièrement isolée jusqu'en 1984, depuis cette date *V. parahaemolyticus* a été isolé à plusieurs reprises (fig. 8 c). Depuis 1986 la diversité croissante des souches est observée (fig. 8 c). Le pouvoir pathogène de certaines espèces isolées oblige à accorder une attention particulière à cette étude, compte tenu de la présence d'une unité d'aquaculture. *V. anguillarum*, *V. parahaemolyticus* et *V. vulnificus* seraient pathogènes pour les poissons. Le pouvoir chitinolytique de certaines espèces peut avoir une incidence sur les populations de crustacés, crevettes, copépodes (Vanderzant *et al.*, 1970 ; Hucq *et al.*, 1983).

. Benthos

L'impact sur le milieu récepteur a pu être mis en évidence également sur les organismes qui ne transitent pas, les espèces benthiques par exemple, et qui subissent pendant un temps relativement long l'effet du rejet. Dewarumez (1990) a estimé à 65 g/m^2 le déficit en biomasse benthique subtidale par comparaison de deux peuplements à *Abra alba*, l'un impacté l'autre non.

Le bilan d'impact sur le milieu récepteur peut être estimé non seulement quantitativement mais qualitativement. La

Tableau 4

Vibrio spp. (N/l). Variations d'abondance de 1976 à 1988.

Vibrio spp. (N/l). Abundance variation from 1976 to 1988.

Moyenne annuelle générale	N/litre
1976-1979	5/litre
1984-1985	300/litre
1987-1988	Prise Rejet d'eau
	30 3 000

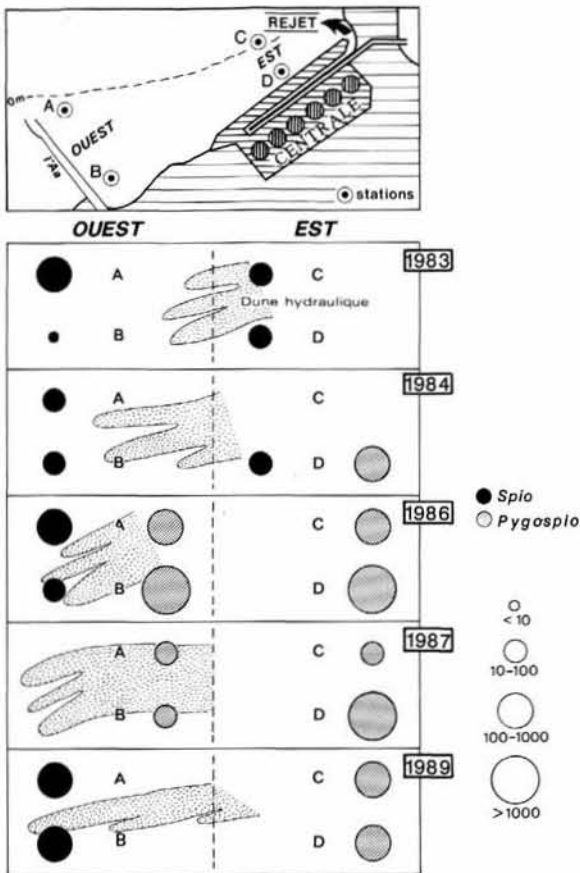


Figure 9

Étude d'impact. Impact du rejet sur la plage de Petit-Fort-Philippe et sur la distribution spatiale des annélides *Spio* et *Pygospio*.

Impact study. Impact of outfall system on Petit-Fort-Philippe beach and on annelids, *Spio* and *Pygospio*, distribution.

figure 9 présente des données fournies par les travaux de Dewarumez (1990), qui a étudié l'évolution de la plage de Petit-Fort-Philippe de 1973 à 1989. La dune hydraulique a éclaté sous la force du rejet, et progressé vers l'ouest avec atténuation progressive de hauteur. Une évolution bionomique intéressante a été constatée : à partir de 1984, *Spio martinensis* (partie Est, sous le rejet) s'est trouvée progressivement supplantée par une espèce plus thermophile, *Pygospio elegans*, qui restait seule en place en 1987. Depuis 1989, l'érosion de la dune est telle que la houle crée une différenciation entre bas et haut niveaux, tandis que le rejet tend à une homogénéisation, d'où une nouvelle répartition due à la compétition entre *Spio* à l'Ouest et *Pygospio* à l'Est (tab. 5).

BILAN, DISCUSSION ET CONCLUSION

Pendant la construction de la centrale, aucun modèle prédictif d'impact global n'existait et les résultats obtenus constituent un bilan d'impact par « constat ». La connaissance des courants et les modèles physiques permettaient de prévoir une bonne dilution des eaux échauffées. La tache thermique observée actuellement

s'est stabilisée en intensité, profondeur et étendue. Son oscillation périodique en fonction de la marée, du vent et de la puissance de production électrique, donc de chaleur dissipée de la centrale est maintenant bien connue et modélisée (modèle 3D). Le modèle biologique qui permettrait de connaître les effets des impacts thermiques de la chloration et des chocs mécaniques ne peut être aussi performant, et ce sont les observations les plus spectaculaires, par exemple les effets aigus de destruction par transit ou par chocs sur les filtres d'entrée et les effets de stimulation de la multiplication bactérienne ou les effets chroniques essentiellement sur les organismes du benthos soumis au rejet, qui sont mis en évidence. Pour schématiser, les espèces pélagiques et les phases pélagiques des poissons intègrent plutôt les aspects aigus de l'évolution de l'écosystème, les phases benthiques des poissons et les espèces benthiques, les aspects chroniques.

L'expérience acquise au cours des études a permis de choisir les méthodologies et les stratégies (Gros, 1988) les mieux adaptées pour une surveillance minimale acceptable en qualité, par la sélection des espèces suivies ou des points de prélèvements les plus caractéristiques des peuplements à surveiller, et par l'optimisation du nombre de prélèvements par point, du nombre de missions par an à entreprendre.

Le bilan de ces études comporte plusieurs ensembles :

- L'acquisition d'une base de données considérable hors impact, permettant une synthèse et une modélisation.
- Les études d'impact ont montré que l'impact de transit est prépondérant sur l'impact dans le milieu récepteur d'un point de vue quantitatif, mais qu'il faut aussi tenir compte de l'aspect qualitatif, compétition interspécifique et évolution dans la diversité des espèces ou modification des structures hydrologiques.
- Pour l'instant nous n'avons pas observé de bouleversement majeur, mais la surveillance future doit pouvoir détecter, à la fois les modifications quantitatives et qualitatives du milieu, les températures excessives, les déficits en biomasses, les proliférations d'espèces, le

Tableau 5

Variations d'abondance (N/m^2) de *Spio martinensis* (S) et de *Pygospio elegans* (P) sur la plage de Petit-Fort-Philippe (données Dewarumez, 1990).

Abundance variations of *Spio martinensis* (S) and *Pygospio elegans* (P) on the Petit-Fort-Philippe beach (data from Dewarumez, 1990).

		OUEST		EST	
1983	Bas niveau	S 112	P 0	S 20	P 0
	Haut niveau	S 8	P 0	S 12	P 0
1984	Bas niveau	S 80	P 0	S 0	P 0
	Haut niveau	S 48	P 0	S 12	P 664
1986	Bas niveau	S 236	P 636	S 0	P 236
	Haut niveau	S 60	P 1460	S 0	P 2004
1987	Bas niveau	S 0	P 40	S 0	P 80
	Haut niveau	S 0	P 20	S 0	P 1472
1989	Bas niveau	S 592	P 0	S 0	P 144
	Haut niveau	S 152	P 0	S 0	P 144

déséquilibre des populations, l'apparition ou l'augmentation d'espèces toxiques.

L'application de l'expérience acquise peut être partiellement utilisable pour d'autres centrales. Les conditions de bonne dispersion du rejet sont importantes pour éviter le confinement thermique et chloré, mais aussi pour éviter une recirculation partielle de la masse d'eau ayant transité. Un site comme Flamanville, en Manche Ouest, semble mieux répondre à ces exigences. Il restera toutefois à examiner les effets sur la faune et la flore, qui diffèrent selon les sites, et d'estimer les risques de :

- mortalité ou colmatage sur les grilles des tambours, poissons plats à Gravelines, grandes algues à Flamanville ;
- mortalité et effets létaux du transit ;
- inhibition du phytoplancton ou eutrophisation ;
- stimulation bactérienne ;
- réactions des organismes du fouling ;

- les réactions possibles aux stress que sont l'adaptation, l'évitement et la défense.

Remerciements

Nous tenons à remercier tous nos collègues, chercheurs, techniciens, secrétaires, informaticiens, dessinateurs, qui ont participé aux études pluridisciplinaires pendant quinze années, et particulièrement à la Station Marine de Wimereux, au laboratoire de l'Institut Pasteur de Lille-Gravelines et l'IFREMER de Boulogne, Nantes et Brest.

Les études ont été financées en grande partie par EDF dans le cadre de la convention générale IFREMER-Électricité de France.

RÉFÉRENCES

- Abarnou A.** (1981). Trihalomethanes formés par la chloration de l'eau de mer. in Influence des rejets thermiques sur le milieu vivant en mer et en estuaire. 2^{èmes} Journées de Thermoécologie, Nantes, novembre 1979, EDF équipement Éd., 247-266.
- Aminot A. et M. Chaussepied** (1983). *Manuel des analyses chimiques en milieu marin*. Centre National pour l'Exploitation des Océans, ISBN 2.902721.10.2, 395 pp.
- Belsher T., R. Delesmont, N. Degros, J.M. Dewarumez, H. Grossel et G. Le Fèvre-Lehoerff** (1986). Recueil des techniques utilisées pour l'étude écologique des sites de centrales nucléaires sur les côtes françaises de Manche et Atlantique. Rapport IFREMER, Direction de l'Environnement et des Recherches Océanographiques, DERO-86.24-EL.
- Blanpied-Wohrer C.** (1984). Étude qualitative et quantitative des organismes entraînés dans la centrale de Gravelines (Nord). Influence des facteurs du milieu sur la capture de ces organismes. Thèse de 3^{ème} cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, Océanologie-Biologie, 484 pp.
- Block R.M.** (1977). Physiological responses of estuarine organisms to chlorine. *Chesapeake Sci.*, **18**, 1, 158-160.
- Bougard M.** (1977). Hydrologie et phytoplancton. in : Étude écologique de projet, site de Gravelines. Rapport final 2^{ème} année. 4 volumes. CNEXO-Station Marine de Wimereux pour EDF.
- Chardy P., et A. Menesguen** (1984). Ecological monitoring and assessment in a coastal power plant impact study : alternative strategy. *Thalassia Jugosl.*, **20**, 2, 115-126.
- Crassous M.-P., E. Erard et M. Ryckaert** (1981). Apparition des floraisons et successions saisonnières phytoplanctoniques sur quelques sites de la Mer du Nord, Manche et Atlantique. 2^{èmes} Journées de la Thermoécologie, Nantes, novembre 1979, EDF équipement Éd., 53-69.
- Darras M., P. Donnars et P. Pechon** (1986). Three-dimensional numerical model for thermal impact study, Rapport EDF, Études et Recherches, LNH. Rapport HE-42-86.31.
- Delattre J.-M., et R. Delesmont** (1981). Étude expérimentale des effets des chocs thermiques et de chloration sur les bactéries du milieu marin. 2^{èmes} Journées de la Thermoécologie, Nantes, novembre 1979, 538-551.
- Delattre J.-M. et R. Delesmont** (1986). Vibrions halophiles et apports thermiques sur le littoral français de la Mer du Nord. GERBAM, 2^{ème} colloque international de bactériologie marine, CNRS, Brest, 1-5 octobre 1984, IFREMER, Actes de Colloques, 3, 491-497.
- Delesmont R. et J.-M. Delattre** (1982). Microbiologie. in : Surveillance écologique du site de Gravelines. Rapport IFREMER pour EDF, avril 1982, 40-68.
- Delesmont R. et E. Delesmont** (1990). Climatologie et fonctionnement de la centrale. Stratégie et présentation des campagnes pélagiques. Bactériologie et étude de la chloration. in : Surveillance écologique et halieutique du site de Gravelines, IFREMER DRO-90.12-EL, 3-34.
- Dewarumez J.-M., R. Smigiemski et A. Richard** (1976). *Abra alba* (mollusque lamellibranche), sa localisation en zone littorale de la Mer du Nord. *Haliotis*, **7**, 13-19.
- Dewarumez J.-M.** (1979). Étude biologique d'*Abra alba* (Wood) mollusque lamellibranche du littoral de la Mer du Nord. Thèse de spécialité, Université des Sciences et Techniques de Lille, 189 pp.
- Dewarumez J.-M.** (1990). Benthos subtidal. in : Étude de surveillance écologique et halieutique du site de Gravelines (novembre 1988 - octobre 1989). Rapport IFREMER pour EDF, DRO-90.12-EL, 75-120.
- Dewarumez J.-M.** (1983). Évolution de populations de mollusques intertidaux en relation avec des modifications sédimentologiques sur le littoral de la Mer du Nord. *Haliotis*, **13**, 3-12.
- Donnars P. et B. Manoha** (1990). Simulation tridimensionnelle de l'impact thermique d'une centrale nucléaire en bord de mer. Application à Gravelines, Communication Colloque «Mers épicontinentales», Lille 1990.
- Fenaux R.** (1963). Écologie et biologie des appendiculaires méditerranéens. *Vie Milieu, suppl.*, **16**, 42 pp.
- Fenaux R.** (1972). Cinétique du déploiement de la logette chez l'appendiculaire *Oikopleura dioica*. *Fol. 1872, C.r. Acad. Sci., Paris*, **275**, 449-452.
- Fenaux R.** (1976). Cycle vital d'un appendiculaire *Oikopleura dioica*. *Fol. description et chronologie. Anns Inst. océanogr., Paris*, **52**, 1, 89-101.
- Fonds M.** (1979). Laboratory observations on the influence of temperature and salinity on development of the eggs and growth of the larvae of *Solea solea*. *Piscis. Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, **1**, 91-99.
- Gentien P., P. Gros et G. Le Fèvre-Lehoerff** (1986). Étude des conséquences du fonctionnement de la centrale de Gravelines sur le milieu marin. Rapport IFREMER DERO-86.07-EL.
- Grégoire A.** (1976). Étude de la macrofaune intertidale de la région de Gravelines (Nord). *Mémoire de DEA, Université des Sciences et Techniques de Lille*.

- Gros P.** (1988). Bases statistiques de la stratégie de surveillance du milieu marin. Rapports scientifiques et techniques IFREMER, n° 12, 150 pp.
- Grossel H.** (1981). Hydrologie et phytoplancton. in : Étude de surveillance écologique 1^{ère} année du site de Gravelines. CNEXO, Station Marine de Wimereux pour EDF.
- Grossel H.** (1986). Phytoplancton. in : Surveillance écologique et halieutique du site de Gravelines. IFREMER, rapport 1986, 55-73.
- Grossel H.** (1988). Phytoplancton. in : Surveillance écologique et halieutique du site de Gravelines. Rapport IFREMER DERO-88.17-EL, 45-49.
- Grossel H.** (1989). Phytoplancton. in : Surveillance écologique et halieutique du site de Gravelines. Rapport IFREMER DERO-89.08-EL, 45-49.
- Grossel H., G. Le Fèvre-Lehoërff, D. Woehrling, J.-M. Dewarumez et R. Delesmont** (1990). La centrale nucléaire littorale de Gravelines. Écologie, environnement et impact. Poster, Colloque «Mers épicontinentales», Lille, mars 1990.
- Hucq A., E.B. Small, P.A. West, M.I. Hucq, R. Rahman, R.R. Colwell** (1983). Ecological relationships between *Vibrio cholerae* and planktonic crustacean copepods. *Appl. environ. Microbiol.*, **45**, 1, 275-283.
- Institut Géographique National (IGN).** Documents : photographies aériennes IGN pour le CPN de Gravelines EDF.
- Laurec A., P. Chardy, G. Le Fèvre-Lehoërff et F. Toularastel** (1981). Définition d'un état de référence écologique. Problèmes d'inférences statistiques. *Congrès Influence des rejets thermiques sur le milieu vivant et en estuaire. 2^{èmes} Journées de la Thermoécologie, Nantes, novembre 1979*, EDF Éd., 158-191.
- Le Fèvre-Lehoërff G.** (1988). Noctiluques et zooplancton. in : Surveillance écologique et halieutique du site de Gravelines. IFREMER DERO-88.17-EL, 51-64.
- Le Fèvre-Lehoërff G.** (1989). Dinoflagellés noctiluques et zooplancton. in : Surveillance écologique et halieutique du site de Gravelines. IFREMER, DERO-89.08-EL, 51-71.
- Le Fèvre-Lehoërff G. et J.-Y. Quintin** (1981). Étude comparative de la sensibilité des différentes espèces de copépodes aux variations de la température en Manche. Relation entre la taille des individus et les facteurs du milieu. *2^{èmes} Journées de la Thermoécologie, Nantes, novembre 1979*, EDF Éd., 72-86.
- Le Fèvre-Lehoërff G., H. Grossel et A. Derrien** (1983). Évolution des populations planctoniques animales en Manche et au sud de la Mer du Nord. *Oceanologica Acta. Proceedings 17th European Marine Biology Symposium, Brest, septembre 1982. vol. sp.*, 131-135.
- Le Fèvre-Lehoërff G. et A. Derrien** (1986). Noctiluques et zooplancton. in : Surveillance écologique et halieutique du site de Gravelines. IFREMER, DERO-EL, 74-105.
- Mac Lean** (1973). Chlorine and temperature stress on estuarine invertebrates. *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, **45**, 5, 837-841.
- Mac Gowan T.A. et D.M. Brown** (1966). A new opening closing paired zooplankton net. Scripps Institution of Oceanography. Reference Series 66-123, 56 pp.
- Riley J.D.** (1974). The distribution and mortality of sole eggs (*Solea solea*) in inshore areas. in : *The early life history of fish blaxter*. J.H.S. Redspruge, éditeur, Verlag Éd.
- Ryckaert M., P. Gros et É. Erard-Le Denn** (1983). Succession saisonnière des populations phytoplanctoniques des eaux côtières de la Manche. *Proceedings 17th European Marine Biology Symposium, Brest, septembre-octobre 1982. Oceanologica Acta, vol. sp. n°4*, 171-175.
- Smith P. et S.L. Richardson** (1977). Standard techniques for fishes eggs and larvae surveys. FAO, Fisheries Technical Paper, 175, 100 pp.
- Souplet A. et J.-M. Dewarumez** (1980). Les peuplements benthiques de la région de Dunkerque. *Cah. Biol. mar.*, **21**, 23-39.
- Souplet A., R. Glaçon, J.-M. Dewarumez et F. Smigielski** (1980). Distribution des peuplements benthiques littoraux en Mer du Nord, du Cap Blanc Nez à la frontière belge. *C. r. Acad. Sci., Paris, sér. D*, **290**, 627-630.
- Toularastel F., G. Le Fèvre-Lehoërff et O. Arnal** (1977). L'intérêt du zooplancton dans l'élaboration d'un état de référence. *1^{ères} Journées de la Thermoécologie, Centre Océanologique de Bretagne, Brest, novembre 1976*, EDF équipement Éd., 461-483.
- UNESCO** (1966 a). Tables océanographiques internationales. National Institute of Oceanography of Great Britain and UNESCO, Paris.
- UNESCO** (1966 b). Determination of photosynthetic pigments in sea water. *UNESCO Monogr. Oceanogr. Methodol.*, **1**, UNESCO Press, Paris, 69 pp.
- UNESCO** (1968). Zooplankton sampling. *UNESCO Monogr. Oceanogr. Methodol.*, **2**, UNESCO Press, Paris, 174 pp.
- UNESCO** (1978). Background papers and supporting data on the practical salinity scale. *UNESCO tech. Pap. mar. Sci.*, **37**.
- UNESCO** (1979). Ninth report of the point panel on oceanographic tables and standards. UNESCO, Paris, 11-13 September 1978, *UNESCO tech. Pap. mar. Sci.*, **38**.
- UNESCO** (1981). Tables océanographiques internationales. 3^{ème} vol. *UNESCO tech. Pap. mar. Sci.*, **39**.
- Vanderzant C., R. Nickelson et J.C. Parker** (1970). Isolation of *Vibrio parahaemolyticus* from Gulf coast shrimp. *J. Milk Food technol.*, **33**, 161-162.
- Victor-Baptiste F.** (1984). Étude qualitative et quantitative des organismes entraînés dans la centrale de Gravelines (Nord). Essai de quantification de l'impact global de la centrale : application aux harengs *Clupea harengus* L. *Thèse 3^{ème} cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, Océanologie-Biologie*, 442 pp.
- Woehrling D.** (1983). Étude expérimentale de l'impact de la centrale de Gravelines (Nord) sur les oeufs et larves de la sole (1982-1983). Rapport Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes pour EDF.
- Woehrling D.** (1984). Premiers essais de localisation des périodes critiques dans la vie des jeunes stades de sole en Mer du Nord. IFREMER Déterminisme du recrutement, 2-4 juillet 1984. Contribution 45.
- Woehrling D.** (1985 a). Données sur la population de soles du secteur de Gravelines (Nord). Contribution à la connaissance de la biologie des oeufs, larves et juvéniles. Rapport IFREMER pour EDF, 2 vol., 237 pp.
- Woehrling D.** (1985 b). Simulation des périodes d'éclosion et de métamorphose de la sole. *Rapp. P.-v. Réun. Cons. perm. int. Explor. Mer, Comité des poissons démersaux*, G 41.
- Woehrling D., M. Giret, D. Halgand et A. Battaglia** (1981). Reproduction des poissons et températures de l'eau. Cas du sprat (*Sprattus sprattus* L.) et de la sole (*Solea vulgaris* Quensel) sur différents sites en Manche et sud de la Mer du Nord. in : *Influences des rejets thermiques sur le milieu vivant en mer et en estuaire. 2^{èmes} Journées de la Thermoécologie, EDF, Direction de l'équipement Éd.*, 97-118.

