

**Evaluation of the expected situation of the
eutrophication status in the Maritime Area following
the 50 % reduction target for nutrient inputs**

*Evaluation de la situation attendue concernant l'état
d'eutrophisation dans la zone maritime suite à la
réduction de 50 % des apports de nutriments*



OSPAR Commission

Commission OSPAR

2001

The Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic (the “OSPAR Convention”) was opened for signature at the Ministerial Meeting of the former Oslo and Paris Commissions in Paris on 22 September 1992. The Convention entered into force on 25 March 1998. It has been ratified by Belgium, Denmark, Finland, France, Germany, Iceland, Ireland, Luxembourg, Netherlands, Norway, Portugal, Sweden, Switzerland and the United Kingdom and approved by the European Community and Spain.

La Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est, dite Convention OSPAR, a été ouverte à la signature à la réunion ministérielle des anciennes Commissions d'Oslo et de Paris, à Paris le 22 septembre 1992. La Convention est entrée en vigueur le 25 mars 1998. La Convention a été ratifiée par l'Allemagne, la Belgique, le Danemark, la Finlande, la France, l'Irlande, l'Islande, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni de Grande Bretagne et d'Irlande du Nord, la Suède et la Suisse et approuvée par la Communauté européenne et l'Espagne.

© OSPAR Commission, 2001. Permission may be granted by the publishers for the report to be wholly or partly reproduced in publications provided that the source of the extract is clearly indicated.

© Commission OSPAR, 2001. La reproduction de tout ou partie de ce rapport dans une publication peut être autorisée par l'Editeur, sous réserve que l'origine de l'extrait soit clairement mentionnée.

Part I - English Version

contents

Executive Summary of the Evaluation of the expected situation of the eutrophication status in the Maritime Area following the 50 % reduction target for nutrient inputs

- I Introduction
 - II Results of the ASMO Modelling Workshop on Eutrophication Issues
 - III Follow-up of the ASMO modelling workshop
 - IV Belgian coastal waters
 - V Model calculations for oxygen: Dutch and Danish waters
 - VI Mesocosm results: effects on primary and secondary production
 - VII Wadden Sea: effects on nutrients and Phaeocystis
 - VIII Danish waters: effects of low run off in 1996, 1997 and calculated effects on nutrients, chlorophyll a, eelgrass and brownalgae
 - IX German waters: calculated effects on nutrients, primary production, phytoplankton
 - X Norwegian waters: transboundary calculations
 - XI French waters: Atlantic and Channel coasts
 - XII Irish waters: Mathematical Modelling of Wexford and Cork Harbours
 - XIII Portuguese waters: Fate of nitrogen discharged in the Tagus Estuary
 - XIV Conclusions
- References

Executive Summary

PARCOM Recommendation 88/2 on the Reduction of Inputs of Nutrients to the Paris Convention Area recommends that Contracting Parties take effective national steps in order to reduce nutrient inputs into areas where these inputs are likely, directly or indirectly, to cause pollution, with the aim of achieving a substantial reduction (of the order of 50 %) in inputs of phosphorus and nitrogen into these areas (between 1985 and 1995, or earlier if possible).

The 50 % reduction target for nutrient inputs is an important step towards the requirement in the OSPAR Strategy to Combat Eutrophication to achieve a healthy marine environment with respect to eutrophication by 2010. This Strategy also requires an evaluation to be undertaken of the expected situation in various parts of the maritime area, following the implementation of the 50 % reduction target (see § 3.4a of the Strategy).

An evaluation has been prepared on the basis of modelling results, mesocosm studies and natural events. Taking into account the limitations of the available information, this evaluation indicates the direction of changes in levels and effects but does not forecast the precise eutrophication status of the marine environment with respect to nutrient enrichment (nutrient concentrations and N/P ratios) and direct and indirect effects following achievement of the 50 % reduction targets.

Positive effects with respect to nutrient enrichment and direct and indirect effects are expected from a 50 % reduction in both N inputs and P inputs for coastal waters (French estuaries/Atlantic coast, French and UK Channel, Belgian, Dutch, German and Danish coastal waters, Norwegian Skagerrak, Irish estuaries, Tagus estuary in Portugal), and for offshore waters (some transboundary affected waters). Effects can be summarised as follows:

- a. for direct causative factors, a reduction of up to 25 % - 30 % in N and P concentrations in coastal waters is expected. Due to reduction measures being more effective for P than for N, the current increased N/P ratios in these waters will move towards normal ratios when reductions for N match those for P;
- b. for direct effect parameters, the expected effects are:
 - (i) up to 25 % - 30 % reduction of chlorophyll in coastal waters: and up to ca. 30 % reduction in primary production in coastal waters;
 - (ii) for phytoplankton indicator species, a reduction in *Phaeocystis* bloom levels and in duration of its bloom and a decreased risks of toxic blooms;
 - (iii) for macrophytes including macroalgae in shallow waters, an improvement in occurrence and depth limits for long lived species (like eelgrass and brown algae);
- c. for indirect effect parameters, the expected effects are:
 - (i) no pronounced oxygen depletion in normal climatic years and decreased risk of oxygen depletion in stratified coastal waters as well as in stratified offshore waters and sedimentation areas;
 - (ii) hence, decreased risk for benthic life;
- d. the following effects are anticipated:
 - (i) a food supply that is still sufficient for higher trophic levels;
 - (ii) an improved quality of food supply (lower risks of nuisance and toxic algal blooms and oxygen deficiency);
 - (iii) increased ecological efficiency.

I Introduction

1. Actions required in the OSPAR Strategy to Combat Eutrophication (reference number: 1998-18) should comprise an integrated target-oriented and source-oriented approach. The main elements of the target-oriented approach are:

- a. an evaluation of the situation in the maritime area that is expected following the implementation of agreed measures;
- b. the development, where possible, of an agreed procedure to derive ecological quality objectives (EcoQOs) and the adoption of such objectives, possibly in the form of region-specific EcoQOs aimed at avoiding harm to marine ecosystems. The development of appropriate assessment criteria in the Common Procedure (reference number: 1997-11) is fundamental to the development of an agreed procedure to derive EcoQOs;
- c. the setting of intermediate targets, in order to work towards attaining such objectives. Such targets should be combined with an indication of the size of further nutrient reductions required, estimated on the basis of an evaluation of the situation that is expected following the implementation of agreed measures, and possible means to achieve these reductions taking into account the main elements of the source-oriented approach (cf. § 3.5 of the strategy).

2. In order to comply with the timeframe of the OSPAR strategy, i.e. the requirement that, in order to achieve, by the year 2010, a healthy marine environment where eutrophication does not occur, several immediate steps have to be taken:

- by the year 2000, the evaluation as in § 1.a. The relevant reduction target for nutrient inputs is 50 % to be achieved in 1995 on the basis of the year 1985 (cf. PARCOM Recommendation 88/2 on the Reduction in Inputs of Nutrients to the Paris Convention Area);
- by the year 2002, the identification of the eutrophication status of all parts of the maritime area. For this purpose the assessment criteria should be developed within this timeframe, which would enable the further development of EcoQOs and an assessment as to whether additional measures would be required.

3. Based on several studies (e.g. model calculations, mesocosm studies) and ongoing work by Contracting Parties, an indication of the expected situation in various parts of the maritime area, following the implementation of the 50 % reduction target for nitrogen and phosphorus, has been derived.

II Results of the ASMO Modelling Workshop on Eutrophication Issues

4. The workshop, organised in 1996 by The Netherlands (with participation of Belgium, Denmark, France, Germany, The Netherlands, Norway, Portugal and UK) focused on model validation and responsiveness of the models to nutrient input reduction for various OSPAR areas:

- greater- and southern North Sea: The Netherlands (Continental Shelf model, ERSEM model); Germany (ECOHAMI model, ERSEM model); Norway (NORWAYCOM model); UK (DYMONNS model);
- coastal zones (Belgian-, Dutch-, and French coastal zones, English Channel, Danish estuaries/coast, and Tagus estuary): Belgium (MIRO model); The Netherlands (Dutch coastal model); France (ELISE model); Denmark (Stratified estuary model) and Portugal (ECOWIN model).

5. One further achievement of the model workshop was the support for the validation of the models by the provision of validation data and the request to achieve a statistical result for the fit between validation data and model results by calculating cost function values.

6. All models showed good fits for phosphate. However, for other nutrients and chlorophyll a (chl. a) there were some deviations. The models that were considered do not yet address the complexity of the ecosystem, e.g. internal processes of nutrient fluxes in sediment and higher levels of the food chain (benthos). It was also noted that coastal models are not particular good in predicting far-field results, while large-scale models are not very good in modelling steep gradients.
7. With respect to the responsiveness of the models the following general conclusions were drawn:
- nutrient load reduction of 50 % does not linearly translate into a 50 % reduction in nutrient concentrations and direct effect parameters such as chl. a;
 - the maximum response of nutrient concentrations to 50 % nutrient load reduction is around 35 % - 40 % reduction, the response in chlorophyll a is around 25 % - 30 %, and the response in yearly primary production around 30 % reduction;
 - the calculated responses for the phytoplankton species composition varied considerably (see further below).

III Follow-up of the ASMO modelling workshop

8. Two models covering the larger North Sea, which had been presented at this workshop, have recently been compared. This intercomparison concludes that changes in the physical conditions and forcing result in large variability in primary production. In particular, the exchange of Atlantic water and / or variations in the vertical density structure may cause interannual variations in primary production in the North Sea of around 15 % with even larger local values near the continental coasts.
9. The outcome of this comparison further indicates that a reduction in annual flagellate production of more than 10 % is expected within coastal waters up to 200 km off the south-west and whole eastern North Sea coast including Kattegat and Skagerrak.
10. Some eutrophication problems are often confined to short periods during the year in combination with special weather conditions. Recent modelling results indicate that for peak events much higher reductions than the annual average reduction of several assessment parameters are expected.

IV Belgian coastal waters

11. MIRO is a mechanistic biogeochemical model being developed for predicting the response of the *Phaeocystis*-dominated ecosystem of the coastal North Sea to changes in riverine nutrient inputs, distinguishing between natural and human-induced variability. This mechanistic model describes and predicts the cycling of carbon, nitrogen, phosphorus and silicon through aggregated chemical and biological compartments of the planktonic and benthic components of the coastal area, over seasons and years, in response to the physical and nutrient forcing. MIRO parameterisation is based on physiological and geochemical principles. The numerical code thus synthesises the current knowledge on the kinetics and the factors controlling the main auto- and heterotrophic processes involved in the functioning of the marine coastal ecosystem. The code is continuously in development relying on progress gained in experimental aquatic ecology.

12. The merits for the Belgian coastal waters of 50 % reduction of N and P loads discharged by the Scheldt and the upwards rivers (Seine/Somme) have been investigated with the MIRO model in the scope of the ASMO Modelling Workshop on Eutrophication issues (OSPAR, 1998). MIRO model runs show that a 40 % reduction of *Phaeocystis* blooms is reached when both N and P loads to the Southern Bight of the North Sea are reduced by 50 %. Also, it is shown that a 50 % reduction of N and P loads to the coastal sea is primarily affecting the diatom spring development reducing their bloom magnitude by more than 45 %.

13. The effects of a 50 % reduction of P loads to the coastal sea were also investigated. This 50 % reduction of P to the coastal sea is primarily affecting spring diatom development reducing their bloom magnitude by nearly 50 %.

14. The consequences for biological harvestable resources are not predicted by MIRO but should be considered.

V Model calculations for oxygen: Dutch and Danish waters

15. Dutch model calculations, including various, but constant windfields and nutrient reduction scenarios, indicate that the risk of low oxygen concentrations during the stratification period in the Dutch sedimentation area Oysterground is lowered when both N and P inputs are reduced. A 50 % reduction in both N and P leads to higher oxygen levels (5 mg/l) when compared with no reduction measures (3 mg/l), under the most unfavourable conditions (north-eastern / south-western wind and a stratification period of more than 10 weeks).

16. Danish model calculations indicate that the development of oxygen depletion during stratification in fjords will take much longer when the nitrogen load is reduced by 50 %. Depletion would take 12 days to develop and 20 days to become acute, instead of 6 days to develop and 14 days to become acute. In other words, the risk of oxygen depletion declines with a 50 % reduction in N inputs. Oxygen conditions will be improved in years of typical precipitation, run-off, wind and water exchange. In a normal year, there would thus be no pronounced oxygen depletion (<2 mg/l) in the open parts of inner Danish waters, with the exception of the Little Belt, the Sound and the Fehmern Belt would maintain oxygen concentrations below 4 mg/l.

VI Mesocosm results: effects on primary and secondary production

17. From Dutch mesocosm studies it can be concluded that a 50 % reduction in N input reduces negative effects of eutrophication (reduction of too high algal production and reduction of risk of toxic species), while the secondary (benthic) production remains at an optimum level. The secondary production is only moderately lower at a further reduction of N input of 65 %. As a consequence, the ecological efficiency (which is the ratio of secondary production / primary production) increases from 7 % (high, no reduced N input) to 12 and 15 % at reduced inputs of 50 % and 65 % respectively.

VII Wadden Sea: effects on nutrients and Phaeocystis

18. Multiple regression functions for the Dutch Wadden Sea predict an autumn level of ammonium + nitrite of about 12 μ M. This is about 70 % of the levels in the 1980s - 1990s and much higher than the value of 7 μ M observed in 1960-1962. The expected decrease of the remineralisation is of the same order as the expected decrease of coastal primary production. It is important to note that the N load during the early 1960s was comparable to the 1985 load. This indicates that a second source not taken in account in our statistical analysis also adds to the present day remineralisation level (caused by the present day import of organic matter) in the Wadden Sea.

19. The duration of Phaeocystis blooms will be reduced from 105 days (mean level 80's and 90's) to 83 days at a 50 % nutrient reduction. This bloom duration is still higher than the duration at the turn of the 19th century. Extrapolations suggest that apart from riverine input a second nitrogen source is of importance.

20. Analyses of time series in the Dutch most western part of the Wadden Sea (tidal inlet of the North Sea) revealed that major changes in the biomass and species composition of phytoplankton coincided with changes in the absolute and relative concentrations of nitrogen and phosphorus. This implies a strong correlation between the N/P ratio and the phytoplankton community structure, and therefore a change in the quality of food supply for secondary producers.

VIII Danish waters: effects of low run off in 1996, 1997 and calculated effects on nutrients, chlorophyll a, eelgrass and brown algae

21. The year of 1996 may be considered “nature's own huge experiment”, which incidentally showed that a reduction of the nitrogen load to the level aimed at in the Action Plan for the Aquatic Environment will improve the environmental condition of Danish waters significantly under normal meteorological conditions. Due to low run off in 1996, but also in 1997, the inputs from land in these years of nitrogen from land were approx. halved compared to the normal level. The effects were clear-cut, e.g. significantly higher values for Secchi depths and oxygen concentrations, as well as lower primary production and reduced concentrations of nutrient salts. The effects began to show already in 1996 in the fjords etc. and in 1997 the effects were significant in the more open stretches of the marine area. The improvements compared well to estimates generated by models.

22. Within the framework of the HAV-90 research programme attempts have been made to assess what effects the implementation of the Action Plan for the Aquatic Environment would have on the flora. Based on model calculations the Plan's target of a 50 % reduction in nitrogen inputs to the aquatic environment would typically bring about a reduction of 40 % in nitrogen concentration in heavily polluted areas and of 20 % in less polluted areas. Examples of calculated changes are given in table 1.

Table 1. Examples of changes in phytoplankton masses and benthic flora depth limits resulting from a reduction in nitrogen load (Danish EPA, 1998: The Danish Marine Environment: Has Action Improved its State?).						
	Heavily eutrophicated areas			Slightly eutrophicated areas		
	before	after	change	before	after	change
Total nitrogen (µg/l)	1 500	900	-40 %	400	320	-20 %
Biomass of phytoplankton (µg chlorophyll)	17,8	10,3	-42 %	4,3	3,4	-21 %
Depth limit for eelgrass	1,7 m	2,5 m	+47 %	4,6 m	5,4 m	+17 %
Depth limit for brownalgae	1,0 m	2,0 m	+100 %	5,8 m	7,8 m	+34 %

IX German waters: calculated effects on nutrients, primary production, phytoplankton

23. Model calculations by Lenhart (1999) are in good accordance to the conclusions of the ASMO modelling workshop (OSPAR 1998). The results of COCOA (Continental Coastal Application, a modified configuration of the ecosystem-model ERSEM with increased resolution in the continental region) support the conclusion of the ASMO workshop that a 50 % nutrient load reduction in total N and P (including POM and DOM) can not be linearly transferred to a 50 % reduction in primary production. This result is also supported by Cadee & Hegemann (1993) based on measurements. Due to the phosphorus reduction since 1985, the winter concentration in the Marsdiep dropped by about 40 % in 1992, while no change in the associated net primary production could be observed. These findings are related to the representation of the complex structure in ERSEM, which special emphasis on the benthic part which takes care of the slow processes acting in the sediment. In addition a lot of attention is given to the forcing of the model in order to provide a good reproduction of the natural variability under which the anthropogenic signal is followed.

24. The results of the reduction scenario, in which the inorganic and organic river loads for N and P were reduced by 50 %, are compared against a standard run which was based on realistic forcing for the year 1988. The COCOA simulation revealed decreased winter concentrations of nitrogen and phosphorous

of up to 40 % in the reduction scenario. Differences between the two time series remain on a lower level also during the summer period. The largest effect on the net primary production was observed in the coastal zone (ICES boxes 4 and 5) with a reduction of up to 20 % in small areas near the coast. Assuming a 10 % threshold level (as significant difference between the two simulations) only the continental coastal zone, south of a line reaching from the Humber mouth to the southern tip of Norway, was affected by the reduction of the river nutrient load (Lenhart (1999) and Lenhart et al. (1997)).

25. Phytoplankton groups in COCOA showed different reactions to changed nutrient availability. Biomass and production of diatoms did not change much, however there were significant changes in the timing of the nutrient limitation. The time series for the flagellates in the mouth of the river Rhine showed no decrease according to the reduction scenario although a number of short periods with flagellate concentrations exceeding those of the standard run occurred. This result is remarkable, because the increase in algal biomass due to eutrophication was related mainly to an increase in flagellates. This result, based on modelling four different groups of phytoplankton (diatoms, flagellates, picophytoplankton and inedible phytoplankton (Phaeocystis colonies), is supported by other model results from the ASMO workshop, where the reactions of the phytoplankton groups on the reduction scenario were reported in form of the diatom/non-diatom ratio. Generally all significant changes in the time series of the modelled phytoplankton concentration occurred after the spring bloom, and therefore after the annual maximum of the river discharges.

26. Also regional differences between primary production and nutrient uptake of algae were indicated. Primary production decreased in the coastal current downstream of the river mouths of the Rhine and the Elbe. This pattern was similar to a reduced ammonium uptake. In contrast, the horizontal distribution of phosphorus uptake by the phytoplankton showed its greatest differences in the vicinity of the river mouths of Rhine and Elbe.

27. Another result of the reduction scenario with the COCOA model was an increasing bacterial biomass indicating an increased recycling. This reveals a contradiction to a lower detritus concentration of about 30 %, due to the reduction of the organic river loads. The reason was an increased efficiency of the bacteria to utilise inorganic nutrients and detritus material, which leads to a stronger grazing of zooplankton on bacteria.

28. In conclusion, the comparison of the reduction scenario with the simulation for the standard year 1988 demonstrated, that a reduction in the nutrient load of the major rivers hardly affects the central North Sea, but lead to significant changes in nutrient limitations and mass flows in the coastal area. The temporal coincidence of maximum river inputs and the spring phytoplankton bloom is one possible reason for the small response of primary production to decreasing nutrient inputs. After the spring bloom, inorganic nutrients are available after remineralisation, independent of the lower river discharges and riverine nutrient inputs in summer.

29. For further modelling activities it should be considered, that changes in the river loads have already taken place with a 50 % reduction in the phosphorus load and with lower reduction in the nitrogen load. So in comparison to the year 1985, when the 50 % reduction was designed to start, there is a different situation now with increased N/P-ratios, which might lead to new problems in the coastal areas.

30. However, the 50 % reduction could still be a valuable test-case to compare results from ecosystem models for a defined scenario, based on identical forcings applied (the same year of simulation concerning river discharges and boundary conditions), as has been performed in model comparisons of hydrodynamical models like NOMADS.

31. Additionally, realistic scenarios should be used for modelling, related to recent eutrophication events, calculating the direct and indirect effects of reduced nutrient loads (inorganic and organic) to these effects.

X Norwegian waters: transboundary calculations

32. In a Norwegian assessment, the Norwegian Coastal Current (NCC) in the Skagerrak has been estimated on the basis of the fractions of water originating from the Baltic outflow through the Kattegat and from coastal waters of the southern North Sea via the Jutland current. Combined with nutrient concentration data, it has been estimated that the winter nitrate concentration in the NCC has increased by a factor of 1,9 since the 1970s. A 50 % reduction in winter nitrate concentration in the German Bight, corresponding to the situation before 1970, is estimated to result in about a 40 % reduction in winter nitrate concentration in the NCC in the Skagerrak.

XI French waters: Atlantic and Channel coasts

33. Two kinds of simulations have been made by IFREMER for testing the effects of various scenarios of load reductions along the Atlantic and Channel French coasts:

- a. a global, coarse-gridded approach of:
 - (i) the Channel (Hoch and Ménesguen, 1997)
 - (ii) the Atlantic French continental shelf (Loyer *et al.*, 2000).
- b. a local, refined modelling of some coastal domains where loadings are particularly high, inducing some eutrophication problem:
 - (i) the Bay of Seine, Eastern Channel (Guillaud and Ménesguen, 1998, Guillaud *et al.*, 2000, Cugier, 1999)
 - (ii) the Bays of Saint-Brieuc and Lannion, Northern Brittany (Ménesguen, 1998)
 - (iii) the Bay of Brest, Western Brittany (Le Pape and Ménesguen, 1997)
 - (iv) the Bay of Vilaine, South Brittany (Chapelle *et al.*, 1994)

In both cases, the model is first used to evaluate interannual variability of primary production, using measured time-series for driving variables (daily meteorological parameters, flow rates and nutrient concentrations of the main rivers). In a second phase, some arbitrary reduction rates (50 %, 100 %, ...) are applied to the nitrate or phosphate concentrations for a specific meteorological year.

34. For the Channel, a two-layered box model (71 boxes) has shown that the total riverine nitrogen load into the Channel was responsible for 15 % of the annual gross phytoplanktonic production of the whole Channel, 7 % due to the Seine inputs, 8 % due to all the other rivers. Doubling the terrestrial nitrogen loadings induces a 6 % increase of the whole Channel production, whereas halving these loadings decreases the production by about 6 % also. Doubling or halving phosphorus inputs have a very light effect, around 0,5 %. An interesting result of this diatom/dinoflagellate model is that the effect of the nitrogen loading is four times more pronounced upon the dinoflagellate production than upon the dominant diatom production. For the Atlantic shelf, a 3D model, with a 5km x 5 km mesh and ten σ -layers, will be used before 2001 for the same scenarios applied to the Loire and Gironde rivers.

35. For the eastern Bay of Seine particularly, which exhibits high phytoplanktonic biomasses during spring and summer, a continuous simulation of the twenty years 1976-1995 has shown a shift in the limitation of the diatom blooms from silicon, then nitrogen in the seventies towards phosphorus, then silicon in the nineties; this is due to the huge reduction of industrial phosphorus loadings from fertiliser factories during this period. Reduction scenarios applied to the 1995 situation show that halving the Seine loadings of nitrogen or phosphorus induces only a slight reduction (~5 %) of the dominant diatom blooms; for the dinoflagellate production on the contrary, halving P-loadings has a significant effect (~20 %), whereas halving N-loadings has a major effect (~50 %).

36. For the Brittany embayments, which are heavily polluted by ulva mass blooms, modelling studies have clearly shown the absence of effect of phosphorus loading reduction, and the non-linear effect of

nitrogen loading reduction. Ten years of intensive lowering of phosphate loadings from the urban waste have brought a dramatic confirmation of such provisions: no effect at all could be seen on the eutrophicated sites. Due to the actual very high level of nitrate in the small rivers coming from watersheds supporting very intensive agriculture (50 to 100 mg/l NO₃), halving actual nitrate concentration cannot bring a noticeable reduction of green algae production in very confined embayments; for example, in the Bay of Lannion, halving the algal biomass would require a drop of nitrate concentration from the actual value 40 mg/l down to a value about 10 mg/l.

37. On the contrary, the Bay of Brest, which also receives a large amount of nitrate from agricultural source, is free of major, large, eutrophication problem thanks to its efficient and quick mixing of riverine loadings in a large marine water body. Modelling has indicated that doubling the nitrate loading would not have very significant effects on phytoplankton maximum (which remains around 10 µg/l Chl.a), but would enhance the dinoflagellate fraction of phytoplankton during summer.

38. In the Bay of Vilaine, the most severely eutrophicated embayment along the French coast (it exhibits recurrent summer blooms, inducing bottom hypoxia, even anoxia as in July 1982), the simulation has shown that the yearly phytoplankton production is controlled more by nitrogen than by phosphorus: 70 % N reduction induces a 25 % drop, whereas 70 % P reduction induces a 10 % drop. Even if phosphorus may be limiting at the end of spring bloom, the first role of nitrogen in the control of summer blooms (those which cause hypoxia) remains evident.

XII Irish waters: Mathematical Modelling of Wexford and Cork Harbours

39. A project has been completed to develop mathematical models for Wexford and Cork Harbours, Ireland, and the final report (1) on the project is due to be completed by the end of 2000. The methodology for the project included *in situ* field measurements of nutrients and chlorophyll-a, *in situ* studies of dispersion, aircraft-borne remote sensing of chlorophyll-a, and the development of a geographic information system (GIS) linked to a mathematical model.

40. The GIS system was developed to support the preparation, analysis and display of a disparate range of datasets, including data on bathymetry, tides and river inflows. A GIS module 'MODESTIS' was developed to link the GIS system to a hydrodynamic and nutrient modelling system 'DIVAST'. The MODESTIS module allows the user of the models to customise the transfer of data and operational parameters into the DIVAST system and also to present the results.

41. At a spatial resolution of 30 x 30 m, this was the most detailed water quality model developed in Ireland, and the first to integrate hydrodynamic, nutrient dynamics and chlorophyll-a. The formulations incorporate the full phytoplankton-phosphorus-nitrogen-dissolved oxygen cycles and interactions (based on the US EPA formulations used in the QUAL2E model).

42. An extensive body of data from previous studies of these harbours and from the field surveys and remote sensing work of the project was used successfully to calibrate and validate the model.

43. The initial application of the models is focusing on the relative impacts of direct and riverine inputs of nutrients on chlorophyll-a levels in the harbours. The models are intended to be applied to assess both the impacts of existing nutrient inputs as well as the potential benefits of reducing nutrient inputs.

44. The first trial application of the models was an investigation of the effects of direct inputs to Wexford Harbour on chlorophyll-a levels in the harbour waters. The preliminary modelling results of a hypothetical situation in the absence of direct discharges indicates not just a decrease in the maximum chlorophyll-a levels (in the region of 25 % reduction for the particular set of input loads and ambient conditions modelled) but also a reduction in the area of water within which the higher chlorophyll-a levels occur. This initial application was intended primarily as a demonstration of the capability of the model. A full modelling assessment of the relative significance of the different inputs to both Harbours, and of the options and potential benefits of reducing inputs, remains to be undertaken.

XIII Portuguese waters: Fate of nitrogen discharged in the Tagus Estuary

45. The fate of organic and inorganic forms of nitrogen discharged in the Tagus Estuary has been studied using models. A box model (ECOWIN) and a fine resolution model (MOHID) have been used. MOHID system includes modules to simulate hydrodynamics, wave propagation, sediment transport and ecology. The fine resolution module requires more computing resources but is better suited to study the interaction between physics and ecology.

46. Using MOHID it was shown that primary production in the estuary is limited by light penetration and not by nutrients. Interdependency between physics and biology is enhanced by the role of wind waves on suspended matter. The size of the estuary (surface: 300 km² and width 10 km) creates conditions for the generation of wind waves inside the estuary, which are typically higher than 30 cm. These waves play a major role on resuspension of fine sediments in shallow intertidal areas.

47. Using MOHID it was shown that between 70 and 100 % of the nitrogen discharged in the estuary can be discharged in the ocean. Further research was undertaken on sediment transport, on diagenesis, on benthic algae production and refinement of boundary conditions to improve the calculation of estuary budgets. This work is accompanied by a monitoring program.

XIV Conclusions

48. The following conclusions are based on modelling results, mesocosm studies and natural events and these results should always be interpreted in the light of their respective limitations, e.g. model results should be considered in relation to the way in which they are validated. Procedures for future model validation are provided in the recommendations of the ASMO workshop. The merits of models, mesocosm studies and natural events indicate the direction of changes in levels and effects but do not forecast the exact results of the eutrophication status in the marine environment with respect to nutrient enrichment (nutrient concentrations and N/P ratios), and direct and indirect effects following the achievement of the 50 % reduction targets for nutrient inputs.

49. Positive effects with respect to nutrient enrichment and direct and indirect effects are expected from a 50 % reduction in both N inputs and P inputs for coastal waters (French estuaries/Atlantic coast, French and UK Channel, Belgian, Dutch, German and Danish coastal waters, Norwegian Skagerrak, Irish estuaries, Tagus estuary in Portugal), and for offshore waters (some transboundary affected waters). Effects on the assessment parameters of the Comprehensive Procedure can be summarised as follows:

- a. for direct causative factors, a reduction of up to 25 % - 30 % in N and P concentrations in coastal waters is expected. Due to reduction measures being more effective for P than for N, the current increased N/P ratios in these waters will move towards normal ratios when reductions for N match those for P;
- b. for the direct effect parameters, the expected effects are:
 - (i) up to 25 % - 30 % reduction of chlorophyll in coastal waters: and up to ca. 30 % reduction in primary production in coastal waters;
 - (ii) for phytoplankton indicator species, a reduction in *Phaeocystis* bloom levels and in duration of its bloom and a decreased risks of toxic blooms;
 - (iii) for macrophytes including macroalgae in shallow waters, an improvement in occurrence and depth limits for long lived species (like eelgrass and brown algae);
- c. for the indirect effect parameters, the expected effects are:

- (i) no pronounced oxygen depletion in normal climatic years and decreased risk of oxygen depletion in stratified coastal waters as well as in stratified offshore waters and sedimentation areas;
- (ii) hence, decreased risk for benthic life;
- d. the following effects are anticipated:
 - (i) a food supply that is still sufficient for higher trophic levels;
 - (ii) an improved quality of food supply (lower risks of nuisance and toxic algal blooms and oxygen deficiency);
 - (iii) an increased ecological efficiency.

50. The 50 % reduction target for nutrient inputs is an important step towards the requirement in the OSPAR Strategy to achieve a healthy marine environment with respect to eutrophication in 2010. However, the level of reduction was based on a policy decision. The more precise level of required reduction for the areas concerned will be established by implementing the OSPAR Strategy to Combat Eutrophication, in particular, through the application of the harmonised assessment criteria of the Comprehensive Procedure and the further elaboration of relevant ecological quality objectives. These are under development and are expected to become available in the period 2001-2003. The further development and use of predictive (e.g. modelling) tools (including mesocosm studies) will assist in respect of this.

References

- OSPAR Commission, 1998. Report of the ASMO Modelling Workshop on Eutrophication Issues (5-8 November 1996, The Hague, The Netherlands).
- Cadee, G.C., Hegeman, J., 1993. Persisting high levels of primary production at declining phosphate concentrations in the Dutch coastal area (Marsdiep). *Neth. J. Sea Res.* 31 (2), 147-152.
- Chapelle, A., Lazure, P., Ménesguen, A., 1994. Modelling eutrophication events in a coastal ecosystem. Sensitivity analysis. *Estuar., Coast. and Shelf Sci.*, 39, 529-548.
- Costello, M.J., *et al.* Measurement and Modelling Nutrient Dynamics of Two Estuaries in Ireland, Wexford and Cork Harbours. Final Report to the Environmental Protection Agency, Wexford (in preparation).
- Cugier, P., 1999. Modélisation du devenir à moyen terme, dans l'eau et le sédiment, des éléments majeurs (N, P, Si, O) rejetés par la Seine en Baie de Seine. Thesis, Caen University, 250 p.
- De Vries *et al.*, 1998. Patterns and trends in nutrients and phytoplankton in Dutch coastal waters: comparison of time-series analysis, ecological model simulation, and mesocosm experiments. *ICES Journal of Marine Science*, 55: 620-643.
- De Vries *et al.*, 1993. Risk Analysis of Eutrophication North Sea (Dutch Report on modelling studies on predicted effects of various nutrient reduction scenarios).
- Guillaud, J.F., Andrieux, F., Ménesguen, A., 2000. Biogeochemical modelling in the Bay of Seine (France): an improvement by introducing phosphorus in nutrient cycles. *J. Mar. Systems*, 25, 369-386.
- Guillaud, J.F., Ménesguen, A., 1998. Modélisation sur vingt ans (1976-1995) de la production phytoplanktonique en Baie de Seine (France), *Oceanol. Acta*, 21(6), 887-906.
- Hoch, T., Ménesguen, A., 1997. Modelling the biogeochemical cycles of elements limiting primary production in the English Channel. II. Sensitivity analyses. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 146, 189-205.
- Lancelot, C., Rousseau V., Billen G. & van Eeckhout D. (1997). Coastal eutrophication in the Southern Bight of the North Sea: assessment and modelling. NATO Advanced Research Workshop on 'Sensitivity of North Sea, Baltic Sea and Black Sea to anthropogenic and climatic changes' (14-18 November 1995). NATO-ASI Series, 439-454.

- Lenhart, H.J., Radach, G., Ruardij, P., 1997. The effects of river input on the ecosystem dynamics in the continental coastal zone of the North Sea using ERSEM. *J. Sea Res.* 38, 249-274.
- Lenhart, H.-J., 1999. Eutrophierung im kontinentalen Küstenbereich der Nordsee, Reduktionsszenarien der Flußeinträge von Nährstoffen mit dem Ökosystem-Modell ERSEM. *Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung, Reihe B: Ozeanographie*, 35: 169.
- Le Pape, O., Ménesguen, A., 1997. Hydrodynamic prevention of eutrophication in the Bay of Brest (France), A modelling approach. *Journal of Marine Systems*. 12, 171-186.
- Loyer, S., Lazure, P., Ménesguen, A., Lampert, L., Druon, J.N., 2000. Primary production model of the Bay of Biscay. In: *Actes du VII-ième Colloque International d'Océanographie du Golfe de Gascogne*, Biarritz, 4-6 avril 2000.
- Ménesguen, A., 1998. Détermination d'objectifs de qualité en nutriments dissous pour les rivières alimentant la marée verte des baies de Saint-Brieuc et Lannion. *Rapport final de contrat pour le Conseil Général des Côtes d'Armor*, 24 p.
- Phillipart, C.H., Cadée, G.C., van Raaphorst, W., Riegman, R., 2000. Long-term phytoplankton-nutrient interactions in the shallow coastal sea: Algal community structure, nutrient budgets and denitrification potential. *Limnol. Oceanogr.*, 45(1):131-144.

Partie II - Version française

Table des matières

Evaluation de la situation attendue concernant l'état d'eutrophisation dans la zone maritime suite à la réduction de 50 % des apports de nutriments

- I Introduction
 - II Résultats de l'atelier de modélisation ASMO sur les questions liées à l'eutrophisation
 - III Suivi de l'atelier de modélisation ASMO
 - IV Eaux du littoral belge
 - V Modélisations pour l'oxygène : Eaux néerlandaises et danoises
 - VI Résultats mésocosmiques : effets sur la production primaire et secondaire
 - VII Mer des Wadden : effets sur les nutriments et le *Phaeocystis*
 - VIII Eaux danoises : effets du faible ruissellement observé en 1996 et 1997 ; effets calculés sur les nutriments, la chlorophylle a, la zostère et les algues brunes
 - IX Eaux allemandes : effets calculés sur les nutriments, la production primaire et le phytoplancton
 - X Eaux norvégiennes : calculs transfrontaliers
 - XI Eaux françaises : Littoraux de l'Atlantique et de la Manche
 - XII Eaux irlandaises : modélisation mathématique des ports de Wexford et de Cork
 - XIII Eaux portugaises : devenir de l'azote rejeté dans l'estuaire du Tage
 - XIV Conclusions
- Références

Récapitulatif

La Recommandation PARCOM 88/2 sur la réduction des apports de nutriments à la zone de la Convention de Paris recommande que les Parties contractantes prennent des mesures nationales efficaces afin de réduire les apports en nutriments aux zones dans lesquelles ces apports sont susceptibles, directement ou indirectement, d'entraîner une pollution et qu'elles visent à une réduction substantielle (de l'ordre de 50 %) des apports en phosphore et en azote aux zones en question entre 1985 et 1995, voire de préférence à une date plus précoce.

L'objectif de réduction de 50 % des apports de nutriments constitue une étape importante vers la réalisation de l'exigence de la Stratégie OSPAR, à savoir un milieu marin sain, en ce qui concerne l'eutrophisation, en l'an 2010. Cette stratégie prévoit aussi la réalisation d'une évaluation de la situation probable dans divers secteurs de la zone maritime après que l'objectif de réduction de 50 % aura été atteint (voir § 3.4a de la stratégie).

Une évaluation a été faite sur la base des résultats obtenus sur des modèles, des résultats des études du mésocosme et des phénomènes naturels. En tenant compte des limites des informations à disposition, cette évaluation indique le sens des évolutions des niveaux et des effets, tout en ne permettant pas de prédire avec exactitude le degré d'eutrophisation du milieu marin en raison de l'enrichissement en nutriments (teneurs en nutriments et ratios N/P) ainsi que des effets directs et indirects après que les objectifs de 50 % de réduction auront été atteints.

Des effets positifs sont attendus d'une réduction de 50 % des apports tant d'azote que de phosphore sur les eaux côtières (estuaires français/côte atlantique, Manche, côtés français et britanniques de la Manche, eaux côtières belges, néerlandaises, allemandes et danoises, Skagerrak norvégien, estuaires irlandais, estuaire du Tage au Portugal) et sur les eaux offshore (à noter certains effets transfrontières dans les eaux). Les effets sur les paramètres d'évaluation peuvent se résumer comme suit :

- a. pour les facteurs causatifs directs, une réduction allant jusqu'à 25 % - 30 % des teneurs en N et P des eaux côtières est attendue. Etant donné que les mesures de réduction de P sont plus efficaces que les mesures prises pour réduire le N, les ratios N/P, qui sont actuellement plus élevés dans ces eaux, évolueront vers des ratios normaux lorsque les réductions de N seront équivalentes à celles de P ;
- b. pour les paramètres des effets directs, on attend les effets suivants :
 - (i) une réduction pouvant aller jusqu'à 25 - 30 % de la chlorophylle dans les eaux côtières et jusqu'à environ 30 % de la production primaire dans les eaux côtières ;
 - (ii) pour les espèces indicatrices de phytoplancton, une réduction des efflorescences de *Phaeocystis* et de la durée de cette efflorescence, abaissement des risques d'efflorescence toxiques ;
 - (iii) pour les macrophytes, y compris les macroalgues vivant dans les eaux peu profondes, une amélioration de la fréquence et des limites de profondeur pour les espèces à forte longévité (comme la zostère et les algues brunes) ;
- c. pour les paramètres des effets indirects, les effets attendus sont :
 - (i) aucune réduction prononcée de l'oxygène au cours des années où le climat est normal et recul du risque d'épuisement en oxygène dans les eaux côtières stratifiées ainsi que dans les eaux éloignées stratifiées et les zones de sédimentation ;
 - (ii) par conséquent, risque moindre pour la vie benthique ;

- d. on attend les effets suivants :
- (i) une chaîne d'approvisionnement qui reste suffisante pour les niveaux trophiques supérieurs ;
 - (ii) une qualité améliorée de l'approvisionnement en aliments (risque inférieur de nuisance et d'efflorescence algale toxique ainsi que de déficience en oxygène) ;
 - (iii) efficacité écologique accrue.

I Introduction

1. Les mesures à prendre dans le cadre de la Stratégie OSPAR de lutte contre l'eutrophisation (référence : 1998-18) devraient comprendre une approche intégrée, axée sur la cible et axée sur la source. Les principaux éléments de l'approche axée sur la cible sont :

- a. une évaluation de la situation dans la zone maritime qui devrait découler de la mise en œuvre des mesures convenues ;
- b. l'élaboration, là où cela est possible, d'une procédure convenue permettant de calculer les objectifs de qualité écologique (EcoQO) et l'adoption de tels objectifs, éventuellement sous la forme d'EcoQO spécifiques à chaque région, visant à éviter tout dommage aux écosystèmes marins. L'élaboration des critères d'évaluation appropriés dans le cadre de la Procédure commune (référence : 1997-11) est fondamentale pour l'élaboration d'une procédure de calcul des EcoQO ;
- c. la fixation de cibles intermédiaires, rapprochant peu à peu OSPAR de ces objectifs. De telles cibles seraient combinées à une indication de l'importance des nouvelles réductions de nutriments nécessaires, estimée à partir d'une évaluation des résultats de la mise en œuvre des mesures convenues. Par ailleurs, les moyens à mettre éventuellement en œuvre pour atteindre ces réductions, en tenant compte des principaux éléments de l'approche axée sur les sources (cf. § 3.5 de la stratégie) devraient être définis.

2. Afin de respecter le calendrier prévu pour la Stratégie OSPAR, c'est-à-dire que, en l'an 2010 au plus tard, un environnement marin sain dénué d'eutrophisation aura été rétabli, plusieurs mesures immédiates doivent être prises :

- en l'an 2000 au plus tard, l'évaluation figurant au § 1.a. La cible de réduction pour les apports de nutriments est de 50 % (chiffre qui devait être atteint en 1995) avec, comme année de référence, 1985 (cf. Recommandation PARCOM 88/2 sur la réduction des apports de nutriments à la zone de la Convention de Paris) ;
- pour l'an 2002 au plus tard, l'identification de l'état d'eutrophisation de toutes les parties de la zone maritime. A cette fin, les critères d'évaluation devraient être élaborés dans le respect de ces échéances, ce qui permettrait d'élaborer davantage les EcoQO et d'apprécier l'opportunité de mesures complémentaires.

3. Sur la base de plusieurs études (exemple : calculs modélisés, études de mésocosme) et du travail actuellement réalisé par les Parties contractantes, une indication de la situation attendue dans les différentes parties de la zone maritime, suite à la mise en œuvre de la réduction de 50 % de l'azote et du phosphore, a été calculée.

II Résultats de l'atelier de modélisation ASMO sur les questions liées à l'eutrophisation

4. L'atelier, organisé en 1996 par les Pays-Bas (avec la participation de l'Allemagne, de la Belgique, du Danemark, de la France, de la Norvège, des Pays-Bas, du Portugal et du Royaume-Uni), a pour thème la validation des modèles et la réactivité des modèles à la réduction des apports de nutriments pour différentes zones OSPAR :

- la mer du Nord au sens large et sa partie méridionale : Pays-Bas (modèle Plateau continental, modèle ERSEM) ; Allemagne (modèle ECOHAMI, modèle ERSEM) ; Norvège (modèle NORWAYCOM) ; Royaume-Uni (modèle DYMONNS) ;

- zones côtières (zones côtières belges, néerlandaises et françaises, Manche, estuaires/côte danoises, et estuaire du Tage) : Belgique (modèle MIRO) ; Pays-Bas (modèle côtier néerlandais) ; France (modèle ELISE) ; Danemark (modèle stratifié estuaire) et Portugal (modèle ECOWIN).

5. Par ailleurs, l'atelier a pu exprimer son appui à la validation des modèles par l'apport de données de validation et en demandant qu'il y ait un résultat statistique confirmant la concordance entre les données de validation et les résultats du modèle en calculant les valeurs des fonctions de coût.

6. Pour tous les modèles, on constatait de bonnes concordances pour le phosphate. Toutefois, pour d'autres nutriments et pour la chlorophylle a (chl.a), il y avait certains écarts. Les modèles qui ont été envisagés n'abordent pas encore la complexité de l'écosystème, c'est-à-dire les processus internes des flux de nutriments dans les sédiments ni les niveaux supérieurs de la chaîne alimentaire (benthos). Il a également été constaté que les modèles côtiers ne réussissent pas très bien dans leurs prédictions des résultats "far-field", tandis que les modèles à grande échelle ne donnaient que des résultats médiocres pour des gradients particulièrement forts.

7. S'agissant de la réactivité des modèles, l'atelier a tiré les conclusions générales suivantes :

- la réduction de la charge de nutriments de 50 % ne se traduit pas de façon linéaire en une réduction de 50 % des concentrations de nutriments ni en paramètres d'effets directs, tels que la chl.a ;
- la réponse maximum des concentrations de nutriments à une réduction de 50 % de la charge de nutriments se situe autour de 35 à 40 % ; pour la chlorophylle, la réponse est d'environ 25-30 %, la réponse des productions primaires annuelles est d'environ 30 % de réduction ;
- les réponses calculées pour la composition en espèces de phytoplancton variaient considérablement (voir ci-après).

III Suivi de l'atelier de modélisation ASMO

8. Deux modèles, couvrant la mer du Nord au sens large, ont été présentés à cet atelier et ont pu récemment être comparés. Cette comparaison a montré que les changements apportés à l'état physique, ainsi que la pression exercée entraîneront une forte variabilité de la production primaire. En particulier, l'échange des eaux atlantiques et/ou les variations dans la structure de densité verticale peuvent susciter des variations interannuelles de la production primaire en mer du Nord (environ 15 %) ; des valeurs localisées encore plus importantes sont prédites près des côtes continentales.

9. Le résultat de cette comparaison indique par ailleurs qu'une production annuelle de flagellés de plus de 10 % est attendue dans les eaux côtières, jusqu'à 200 km au large du Sud-Ouest et de l'ensemble de l'Est du littoral de la mer du Nord, y compris Kattegat et Skagerrak.

10. Certains problèmes d'eutrophisation sont limités à de courtes périodes pendant l'année, lorsqu'ils coïncident avec des conditions atmosphériques particulières. Une modélisation récente indique qu'on peut s'attendre à des réductions beaucoup plus prononcées, pendant ces pointes, que la réduction annuelle moyenne, pour plusieurs des paramètres.

IV Eaux du littoral belge

11. MIRO est un modèle biogéochimique mécaniste en cours d'élaboration. Il vise à prédire la réponse de l'écosystème dominé par le *Phaeocystis* de la mer du Nord côtière aux changements des apports de

nutriments fluviaux ; il distingue entre la variabilité naturelle et la variabilité anthropique. Ce modèle mécaniste décrit et prédit le cycle carbone-azote-phosphore-silice en totalisant les compartiments chimiques et biologiques des composantes planctoniques et benthiques de la zone côtière, d'une saison et d'une année à l'autre, en réponse à un surcroît d'ingestion. La paramétrisation du MIRO repose sur des principes physiologiques et géochimiques. Le code numérique synthétise donc les connaissances actuelles sur la cinétique et sur les facteurs déterminant les principaux processus auto- et hétérotrophes qui interviennent dans le fonctionnement de l'écosystème côtier marin. Le code change constamment, au fur et à mesure que viennent s'ajouter des connaissances dans le domaine de l'écologie aquatique expérimentale.

12. Le modèle MIRO a permis d'étudier les bienfaits qu'aurait une réduction de 50 % des charges azotées et phosphorées provenant de l'Escaut et des fleuves situés à proximité (Seine/Somme) pour les eaux côtières belges. Cette étude a été effectuée à l'occasion de l'atelier de modélisation sur l'eutrophisation ASMO (OSPAR, 1998). Le modèle fait apparaître une réduction de 40 % des efflorescences de *Phaeocystis* lorsque tant les charges azotées que phosphorées dans la baie sud de la mer du Nord sont réduites de 50 %. Par ailleurs, on voit qu'une réduction de 50 % des apports d'azote et de phosphore à la mer côtière agit principalement sur le développement diatomique printanier, ce qui réduit la floraison de plus de 45 %.

13. Les effets d'une réduction de 50 % des apports phosphorés à la mer côtière ont également été étudiés. Cette réduction de 50 % des apports phosphorés à la mer côtière influe principalement sur le développement diatomique printanier, avec réduction de l'efflorescence de près de 50 %.

14. MIRO ne prédit pas les conséquences à tirer de cette modélisation pour les ressources biologiques pouvant être récoltées. Il serait intéressant de mener des études dans ce sens.

V Modélisations pour l'oxygène : Eaux néerlandaises et danoises

15. Les modélisations néerlandaises, basées sur plusieurs scénarios de champs de vent et de nutriment restant constants indiquent que le risque de concentrations d'oxygène, faibles pendant la période de stratification dans la zone de sédimentation néerlandaise "huïtrière", baisse lorsque les apports azotés et phosphorés sont réduits. Une réduction de 50 % de l'azote et du phosphore entraîne des concentrations d'oxygène plus élevées (55 mg/l) par rapport aux scénarios où aucune réduction n'est appliquée (3 mg/l), dans les conditions les plus défavorables (vent du Nord-Est/Sud-Ouest et période de stratification dépassant les 10 semaines).

16. Les modélisations danoises indiquent que l'épuisement de l'oxygène pendant la stratification des fjords prendra plus longtemps si l'apport azoté est réduit de 50 %. L'épuisement nécessitera 12 jours pour se manifester et 20 jours pour devenir aigu, au lieu de 6 jours et 14 jours, respectivement, en l'absence d'une telle réduction. En d'autres termes, le risque d'épuisement en oxygène recule si les apports azotés sont réduits de 50 %. L'oxygénation s'améliorera pendant les années où les précipitations, le ruissellement, les échanges de vent et d'eau atteignent les niveaux habituels. Au cours d'une année normale il n'y aura donc pas d'épuisement prononcé de l'oxygène (<2 mg/l) dans les parties ouvertes des eaux intérieures danoises, à l'exception de la Petite Ceinture, du Sund et de la Ceinture Fehmern, où les concentrations d'oxygène resteraient inférieures à 4 mg/l.

VI Résultats mésocosmiques : effets sur la production primaire et secondaire

17. D'après les études mésocosmiques néerlandaises, on peut conclure qu'un abaissement de 50 % des apports azotés réduit les effets négatifs de l'eutrophisation (recul de la production algale excessive et réduction du risque d'espèces toxiques), tandis que la production secondaire (benthique) reste à un niveau

optimal. La production secondaire n'est que modérément inférieure si l'on abaisse davantage l'apport d'azote (65 %). Ainsi donc, l'efficacité écologique (c'est-à-dire le ratio entre production secondaire et production primaire) passe de 7 % (avec charge azotée élevée, sans application de réduction) à 12 et 15 % si les apports sont réduits de 50 % et de 65 % respectivement.

VII Mer des Wadden : effets sur les nutriments et le Phaeocystis

18. Les fonctions de régression multiples pour la mer des Wadden néerlandaise prédisent un niveau automnal d'ammoniaque + nitrite d'environ 12 μM . Cette concentration égale environ 70 % des niveaux observés dans les années 1980-1990 et est très supérieure à la valeur de 7 μM observée en 1960-1962. La réduction prévue de la reminéralisation est du même ordre que le recul attendu de la production primaire côtière. Il importe de noter que l'apport azoté au début des années 1960 était comparable à la charge de 1985. Ainsi, il semblerait qu'une deuxième source, qui n'a pas été prise en compte dans notre analyse statistique, contribue également à la reminéralisation actuelle (causée par l'importation actuelle de matière organique par la mer des Wadden).

19. Si la réduction de nutriments est de 50 %, la durée des efflorescences de phaeocystis sera ramenée de 105 jours (niveau moyen observé dans les années 1980 et 1990) à 83 jours. Il faut signaler que cette durée reste supérieure à celle qui fut enregistrée à la fin du 19^{ème} siècle. Des extrapolations semblent indiquer que, en dehors des apports fluviaux, il existe une deuxième source d'azote importante.

20. L'analyse de séries temporelles dans la partie occidentale néerlandaise la plus extrême de la mer des Wadden (chenal de marée de la mer du Nord) révèlent que des changements majeurs subis par la biomasse et la composition des espèces de phytoplancton a coïncidé avec des changements des concentrations absolues et relatives d'azote et de phosphore. Ainsi donc, il y aurait une forte corrélation entre le ratio N/P et la structure de la communauté phytoplanctonique, et donc un changement de qualité des approvisionnements alimentaires ingérés par les producteurs secondaires.

VIII Eaux danoises : effets du faible ruissellement observé en 1996 et 1997 ; effets calculés sur les nutriments, la chlorophylle a, la zostère et les algues brunes

21. L'année 1996 peut être considérée comme "l'énorme expérience conduite par la nature elle-même". Celle-ci a indiqué, entre autres, que si l'on ramène la charge azotée au niveau visé par le Plan d'action pour le milieu aquatique, l'état de l'environnement dans les eaux danoises sera considérablement amélioré, en supposant des conditions météorologiques normales. Etant donné le faible ruissellement observé en 1996, mais aussi en 1997, les apports telluriques d'azote étaient environ inférieurs de moitié au niveau normal. Les effets ne se sont pas fait attendre et étaient on ne peut plus nets : accroissement considérable des profondeurs de Secchi et des concentrations d'oxygène, abaissement de la production primaire et des concentrations de sels de nutriments. Déjà en 1996, les effets ont commencé à se faire sentir dans les fjords etc. ; en 1997, les effets étaient significatifs dans les parties les plus ouvertes de la zone maritime. Ces améliorations supportaient favorablement la comparaison avec les estimations générées par les modèles.

22. Dans le cadre du programme de recherche HAV-90, nous avons tenté d'apprécier les effets qu'aurait la mise en œuvre du Plan d'action pour le milieu aquatique sur la flore. D'après les modélisations, les 50 % de réduction des apports azotés au milieu aquatique entraîneraient, habituellement, un recul de 40 % des concentrations azotées dans les zones fortement polluées et de 20 % dans les zones moins polluées. On trouvera des exemples des changements ainsi calculés au tableau 1.

Tableau 1. Exemples de changements observés dans les limites de profondeur des masses phytoplanctoniques et de la flore benthique résultant d'un abaissement de la charge azotée (Agence danoise pour la protection de l'environnement, 1998 : The Danish Marine Environment : Has Action Improved its State?).

	Zones hautement eutrophisées			Zones légèrement eutrophisées		
	avant	après	changement	avant	après	changement
Azote totale ($\mu\text{g/l}$)	1 500	900	-40 %	400	320	-20 %
Biomasse phytoplanctonique (μg chlorophylle)	17,8	10,3	-42 %	4,3	3,4	-21 %
Limites de profondeur de la zostère	1,7 m	2,5 m	+47 %	4,6 m	5,4 m	+17 %
Limites de profondeur pour les algues brunes	1,0 m	2,0 m	+100 %	5,8 m	7,8 m	+34 %

IX Eaux allemandes : effets calculés sur les nutriments, la production primaire et le phytoplancton

23. Les calculs effectués par modèle par Lenhart (1999) concordent bien avec les conclusions de l'atelier ASMO sur la modélisation (OSPAR 1998). Les résultats de COCOA (Continental Coastal Application, une configuration modifiée du modèle écosystème ERSEM, avec une résolution accrue dans la région continentale, va dans le même sens que l'atelier ASMO : un abaissement de 50 % de la charge d'azote total et de phosphore total (y compris le POM et le DOM) ne peut pas être transféré de façon linéaire à un abaissement de 50 % de la production primaire. Ce résultat est également étayé par les travaux de Cadee & Hegemann (1993), basés, eux, sur des mesures. Vu la réduction de phosphore appliquée depuis 1985, la concentration hivernale dans le Marsdiep a reculé d'environ 40 % en 1992, alors qu'aucun changement n'a été observé dans la production primaire nette correspondante. Ces constatations sont liées à la représentation de la structure complexe du ERSEM, qui insiste tout particulièrement sur la partie benthique, ce qui explique les processus lents en cours dans les sédiments. En outre, les auteurs veillent à forcer le modèle afin d'obtenir une bonne reproduction de la variabilité naturelle par rapport à laquelle le signal anthropique est suivi.

24. L'auteur compare les résultats du scénario de réduction où les charges fluviales minérales et organiques pour l'azote et le phosphore sont abaissées de 50 %, avec une situation "normale", basée sur un forçage réaliste pour l'année 1988. La simulation COCOA révèle un abaissement des concentrations azotées et phosphorées hivernales, qui peut aller jusqu'à 40 %, dans le scénario avec réduction. Les différences entre les deux séries temporelles restent assez faibles également pendant la période estivale. L'effet le plus important observé sur la production primaire nette se produit dans la zone côtière (cases CIEM 4 et 5) : en effet, on observe un abaissement allant jusqu'à 20 % dans des zones limitées, près du littoral. Si l'on suppose un seuil de 10 % (comme représentant une différence significative entre les deux simulations), seule la zone côtière continentale, située au Sud d'une ligne reliant l'embouchure de la Humber à la pointe Sud de la Norvège, a été touchée par la réduction de la charge fluviale de nutriments (Lenhart (1999) et Lenhart *et al.* (1997)).

25. Selon le COCOA, les groupes phytoplanctoniques réagissent différemment aux changements de disponibilité de nutriments. La biomasse et la production de diatomées ne changent pas beaucoup ; cependant, le moment de la limitation de nutriments change fortement. La série temporelle concernant les

flagellés dans l'embouchure du Rhin ne recule pas selon le scénario de réduction, quoiqu'il y ait un certain nombre de périodes courtes où les concentrations de flagellés dépassent celles du scénario "normal". Ce résultat est remarquable parce que l'augmentation de la biomasse algale due à l'eutrophisation est liée principalement à un accroissement des flagellés. Ce résultat, qui repose sur la modélisation de quatre groupes différents de phytoplanctons (diatomés, flagellés, picophytoplanctons et phytoplanctons non comestibles (colonies de phaeocystis) est confirmé par d'autres résultats de modélisation obtenus à l'atelier ASMO, où les réactions des groupes phytoplanctoniques au scénario de réduction sont représentées sous forme de ratios diatomés/non diatomés. En général, tous les changements significatifs observés dans les séries temporelles de la concentration phytoplanctonique modélisée se produisent après l'efflorescence printanière, et, par conséquent, après le maximum annuel de déversements fluviaux.

26. Par ailleurs, des différences régionales entre la production primaire et l'absorption des nutriments par les algues apparaissent également. La production primaire est abaissée dans les courants côtiers situés en aval de l'estuaire du Rhin et de l'Elbe. Nous avons là un schéma qui rejoint celui d'une réduction de l'absorption d'ammoniaque. En revanche, la répartition horizontale de l'absorption de phosphore par le phytoplancton ne change pas beaucoup au voisinage de l'estuaire du Rhin et de l'Elbe.

27. Le scénario de réduction donne également un autre résultat : un accroissement de la biomasse bactérielle, qui indique un recyclage accru. Ceci révèle une contradiction par rapport à la concentration en détritiques, qui est réduite d'environ 30 % par l'abaissement des charges fluviales organiques. La cause en est l'efficacité accrue des bactéries dans l'utilisation des nutriments minéraux et du matériel contenu dans les détritiques, ce qui permet aux zooplanctons d'obtenir une nourriture bactérielle plus importante.

28. En conclusion, la comparaison du scénario de l'abaissement avec la simulation pour l'année standard 1988 démontre qu'une réduction de la charge de nutriments des grands fleuves n'a guère d'effet sur le centre de la mer du Nord mais entraîne des changements significatifs dans les limites de nutriments et les flux massiques dans la zone côtière. La coïncidence dans le temps des apports fluviaux maximum et de l'efflorescence printanière de phytoplancton est l'une des raisons qui pourraient expliquer la faible réponse de la production primaire à un recul des apports de nutriments. Après l'efflorescence printanière, les nutriments minéraux sont disponibles après reminéralisation, indépendamment de l'abaissement des rejets de nutriments fluviaux en été.

29. Pour les modélisations futures, il conviendra de se souvenir que des changements ont déjà été apportés aux charges fluviales avec une réduction de 50 % de la charge phosphorée et une réduction moins forte de la charge azotée. Ainsi, nous avons aujourd'hui une situation différente de l'année 1985 (où l'abaissement de 50 % devait commencer à être appliqué) : les ratios N/P ont augmenté, ce qui pourrait conduire à de nouveaux problèmes dans les zones côtières.

30. Toutefois, la réduction de 50 % pourrait tout de même constituer un cas intéressant qui permettrait de comparer les résultats des modèles écosystèmes pour un scénario défini, basé sur des forçages identiques appliqués (on prendrait la même année de simulation pour les rejets fluviaux et l'état des frontières). C'est ce qu'ont permis des comparaisons de modèles hydrodynamiques tels que NOMAD.

31. En outre, il conviendrait de retenir des scénarios réalistes qui soient reliés à des eutrophisations récentes, et rapporter les effets directs et indirects d'un abaissement des charges de nutriments (minéraux et organiques) aux eutrophisations observées.

X Eaux norvégiennes : calculs transfrontaliers

32. Dans une évaluation norvégienne, le Courant côtier norvégien (Norwegian Coastal Current (NCC)) dans le Skagerrak est estimé sur la base des fractions de l'eau provenant de la Baltique, par le Kattegat, et des eaux côtières de la partie Sud de la mer du Nord via le courant du Jutland. Les auteurs combinent ces

données avec les concentrations de nutriments et estiment que la concentration hivernale en nitrates dans le NCC a été multipliée par 1,9 depuis les années 1970. Un abaissement de 50 % des concentrations hivernales en nitrates dans la baie allemande, correspondant à la situation qui prévalait avant 1970, devrait, selon les estimations, conduire à un abaissement de 40 % des concentrations hivernales de nitrates dans le NCC, dans le Skagerrak.

XI Eaux françaises : Littoraux de l'Atlantique et de la Manche

33. Deux types de simulations ont été réalisés par IFREMER afin de vérifier les effets de différents scénarios d'abaissement de charges le long des côtes de l'Atlantique et de la Manche, du côté français :

- a. avec grille globale, à grande échelle :
 - (i) la Manche (Hoch et Ménesguen, 1997) ;
 - (ii) le plateau continental atlantique français (Loyer et al., 2000) ;
- b. une modélisation locale, raffinée, de quelques domaines côtiers où les charges sont particulièrement élevées et présentent quelques problèmes d'eutrophisation :
 - (i) la Baie de la Seine, Est de la Manche (Guillaud et Ménesguen, 1998, Guillaud *et al.*, 2000, Cugier, 1999) ;
 - (ii) les Baies de Saint-Brieuc et de Lannion, Nord de la Bretagne (Ménesguen, 1998) ;
 - (iii) la Baie de Brest, Bretagne occidentale (Le Pape et Ménesguen, 1997) ;
 - (iv) la Baie de Vilaine, Bretagne du Sud (Chapelle *et al.*, 1994).

Dans les deux cas, les auteurs utilisent d'abord le modèle pour évaluer la variabilité interannuelle de la production primaire en obtenant les variables des séries temporelles mesurées (paramètres météorologiques journaliers, débits et concentrations de nutriments des principaux fleuves). Au cours d'une deuxième phase, certains taux de réduction arbitraires (50 %, 100 %, ...) sont appliqués aux concentrations de nitrates ou de phosphates pour une année météorologique particulière.

34. Pour la Manche, un modèle de case à deux couches (71 cases) indique que la charge azotée fluviale totale déversée dans la Manche est responsable de 15 % de la production phytoplanctonique brute annuelle de l'ensemble de la Manche, 7 % étant dus aux apports provenant de la Seine et 8 % à tous les autres fleuves. Si l'on double les charges azotées telluriques, nous obtenons une augmentation de 6 % pour l'ensemble de la production de la Manche ; en revanche, si nous diminuons ces charges de moitié, la production baisse également d'environ 6 %. Ainsi donc, doubler ou réduire de moitié les apports de phosphore n'a qu'un effet très léger, d'environ 0,5 %. L'un des résultats intéressants découlant de ce modèle diatomes/dinoflagellés est que l'effet des apports azotés est quatre fois plus prononcé sur la production de dinoflagellés que sur la production de diatomes, qui est dominante. Pour le plateau atlantique, un modèle en trois dimensions, avec une grille de 5 km x 5 km et dix couches- σ , sera utilisé avant 2001 pour les mêmes scénarios appliqués à la Loire et à la Gironde.

35. Pour la Baie orientale de la Seine, en particulier, où les biomasses phytoplanctoniques sont élevées au printemps et en été, une simulation continue des 20 années comprises entre 1976 et 1995 révèle un déplacement de la limitation des efflorescences diatomiques à partir du silicium puis, dans les années soixante-dix, de l'azote vers le phosphore, puis le silicium dans les années 1990. Cela est dû à l'énorme réduction appliquée pendant cette période aux apports phosphorés provenant des usines d'engrais. Des scénarios de réduction appliqués à 1995 montrent que diminuer de moitié les apports azotés ou phosphorés provenant de la Seine n'entraînent qu'une légère réduction (~5 %) des efflorescences diatomiques dominantes; pour la production de dinoflagellés, au contraire, réduire de moitié les charges phosphorées a un effet significatif (~20 %) ; diminuer de moitié les charges azotées a un effet majeur (~50 %).

36. S'agissant des baies bretonnes, qui sont fortement polluées par des efflorescences de masses d'ulves, les modélisations ont clairement indiqué l'absence d'effet d'une réduction des charges phosphorées et l'effet non linéaire de l'abaissement des charges azotées. Dix années d'abaissement intensif des charges phosphatées provenant des déchets urbains ont entraîné une confirmation spectaculaire de ces prévisions : on n'a en effet observé aucun effet aux sites eutrophisés étant donné les teneurs extrêmement élevées des petits cours d'eau en nitrates provenant de bassins versants où existe une agriculture très intensive (50 à 100 mg/l NO₃). Diminuer la concentration de nitrate de moitié ne peut pas entraîner de réduction sensible de la production d'algues vertes dans des baies extrêmement confinées ; par exemple, dans la Baie de Lannion, réduire de moitié la biomasse algale exigerait un abaissement de la concentration en nitrate, qui est actuellement de 40 mg/l, jusqu'à une valeur d'environ 10 mg/l.

37. Au contraire, la Baie de Brest, qui reçoit également une grande quantité de nitrate de source agricole, est exempte d'eutrophisation majeure grâce au mélange efficace et rapide des charges fluviales avec un corps aquatique marin important. La modélisation a indiqué que doubler la charge en nitrate n'aurait pas d'effet très significatif sur le maximum de phytoplancton (qui restent à environ 10 µg/l Chl.a), mais renforcerait la fraction des dinoflagellés du phytoplancton pendant l'été.

38. Dans la Baie de Vilaine, l'enfoncement le plus gravement eutrophisé de tout le littoral français (avec efflorescence estivales récurrentes, y compris une hypoxie du fond, et même, une anoxie observée en juillet 1982), la simulation indique que la production phytoplanctonique annuelle est fonction davantage de l'azote que du phosphore : un abaissement de 70 % de la charge azotée conduit à un recul de 25 %, tandis qu'une réduction de 70 % de phosphore entraîne une régression de 10 %. Même si le phosphore peut être un facteur limitatif à la fin d'une efflorescence printanière, le rôle primordial de l'azote dans la limitation des efflorescences estivales (celles qui causent l'hypoxie) reste évident.

XII Eaux irlandaises : modélisation mathématique des ports de Wexford et de Cork

39. Un projet permettant d'élaborer des modèles mathématiques pour les ports de Wexford et de Cork a été mis au point en Irlande. Le rapport définitif (thèse 1) doit être terminé à la fin de l'an 2000. La méthodologie comprend des mesures *in situ* de nutriments et de chlorophylle-a, des études *in situ* de dispersion, un télécaptage de la chlorophylle-a à bord d'avions, et l'élaboration d'un système d'information géographique (geographic information system (GIS)) lié à un modèle mathématique.

40. Le système GIS a été élaboré pour permettre la préparation, l'analyse et l'affichage d'une gamme disparate de données, y compris de données sur la bathymétrie, les marées et les apports d'eau fluviale. Un module GIS "MODESTIS" a été élaboré pour relier le système GIS à une modélisation hydrodynamique et des nutriments, le système "DIVAST". Le module MODESTIS permet à l'utilisateur des modèles d'adapter le transfert de données et de paramètres opérationnels à ses besoins propres avant de les intégrer au système DIVAST, et aussi de présenter les résultats.

41. Avec une résolution spatiale de 30 x 30 m, il s'agit du modèle de qualité de l'eau le plus détaillé qui ait été élaboré en Irlande. C'est également le premier à avoir intégré l'hydrodynamique, la dynamique des nutriments et la chlorophylle-a. Les formules incorporent la totalité des cycles et interactions phytoplanctons-phosphore-azote-oxygène dissous. Elles sont calquées sur les formulations de l'agence de protection de l'environnement américaine utilisées dans le modèle QUAL2E).

42. Une somme considérable de données issues d'études précédentes concernant ces ports et des études effectuées sur le terrain ainsi que du télécaptage ont été utilisées avec succès pour calibrer et valider le modèle.

43. Au départ le modèle est axé sur les impacts relatifs des apports directs et fluviaux de nutriments sur les indices de chlorophylle-a dans les ports. Les modèles doivent être appliqués à l'évaluation des impacts des apports de nutriments existants ainsi que les avantages éventuels qu'apporterait une réduction de ces nutriments.

44. La première application-pilote des modèles a permis d'observer les effets des apports directs au port de Wexford sur les valeurs de chlorophylle-a dans les eaux du port. La première modélisation, basée sur une situation hypothétique où les rejets directs seraient absents, indique non seulement une baisse des niveaux maxima de chlorophylle-a (réduction d'environ 25 % pour la série d'apports et de conditions prévus dans le modèle) mais aussi une réduction de la quantité d'eau dans laquelle existent des niveaux plus élevés de chlorophylle-a. Cette application initiale devait en un premier temps servir de démonstration de la capacité du modèle. Une évaluation complète, par modélisation, de l'importance significative des différents apports aux deux ports et des options et avantages potentiels d'une réduction des apports reste à réaliser.

XIII Eaux portugaises : devenir de l'azote rejeté dans l'estuaire du Tage

45. Le devenir des formes organiques et minérales de l'azote rejeté dans l'estuaire du Tage a été étudié avec différents modèles. Un modèle à cases (ECOWIN) et un modèle à résolution fine (MOHID) ont été utilisés. Le système MOHID comprend des modules qui simulent l'hydrodynamique, la propagation des vagues, le transport de sédiments et l'écologie. Le module à résolution fine exige une capacité de calcul plus considérable mais est mieux adapté à l'étude de l'interaction entre la physique et l'écologie.

46. A partir du MOHID on a pu montrer que la production primaire dans l'estuaire est limitée par la pénétration de la lumière et non pas par les nutriments. L'interdépendance entre la physique et la biologie est accentuée par le rôle de la houle du vent sur la matière en suspension. La dimension de l'estuaire (surface : 300 km² et largeur 10 km) crée les conditions de la génération de vagues dues au vent soufflant à l'intérieur de l'estuaire qui dépassent habituellement 30 cm. Ces vagues jouent un rôle majeur dans la resuspension des sédiments fins dans les zones intertidales peu profondes.

47. A partir du MOHID on a montré qu'entre 70 et 100 % de l'azote rejeté dans l'estuaire peut l'être dans l'océan. Des recherches complémentaires ont été menées concernant le transport de sédiments, sur la diagenèse, sur la production d'algues benthiques et un travail de raffinement dans l'état des frontières a été effectué pour améliorer le calcul des budgets estuariels. Ce travail est accompagné par un programme de surveillance continue.

XIV Conclusions

48. Les conclusions suivantes sont basées sur les résultats des modélisations, des études de mésocosme et des événements naturels. Ces résultats doivent toujours être interprétés en tenant compte de leurs limites respectives : les résultats d'un modèle doivent être étudiés en tenant compte de la façon dont le modèle a été validé. Les procédures concernant les validations futures sont décrites dans les recommandations de l'atelier ASMO. L'avantage des modèles, des études mésocosmiques et des événements naturels est qu'ils indiquent la direction des changements de niveaux et des effets mais ne permettent pas de prédire les résultats exacts sur le plan de l'eutrophisation en milieu marin, s'agissant de l'enrichissement en nutriments (concentrations de nutriments et ratios N/P), non plus que les effets directs et indirects découlant de la réduction de 50 % des apports de nutriments.

49. Des effets positifs sont attendus d'une réduction de 50 % des apports tant d'azote que de phosphore sur les eaux côtières (estuaires français/côte atlantique, Manche, côtés français et britanniques de la Manche, eaux côtières belges, néerlandaises, allemandes et danoises, Skagerrak norvégien, estuaires

irlandais, estuaire du Tage au Portugal) et sur les eaux offshore (à noter certains effets transfrontières dans les eaux). Les effets sur les paramètres d'évaluation peuvent se résumer comme suit :

- a. pour les facteurs causatifs directs, une réduction allant jusqu'à 25 % - 30 % des teneurs en N et P des eaux côtières est attendue. Etant donné que les mesures de réduction de P sont plus efficaces que les mesures prises pour réduire le N, les ratios N/P, qui sont actuellement plus élevés dans ces eaux, évolueront vers des ratios normaux lorsque les réductions de N seront équivalentes à celles de P ;
- b. pour les paramètres des effets directs, on attend les effets suivants :
 - (i) une réduction pouvant aller jusqu'à 25 - 30 % de la chlorophylle dans les eaux côtières et jusqu'à environ 30 % de la production primaire dans les eaux côtières ;
 - (ii) pour les espèces indicatrices de phytoplancton, une réduction des efflorescences de *Phaeocystis* et de la durée de cette efflorescence, abaissement des risques d'efflorescence toxiques ;
 - (iii) pour les macrophytes, y compris les macroalgues vivant dans les eaux peu profondes, une amélioration de la fréquence et des limites de profondeur pour les espèces à forte longévité (comme la zostère et les algues brunes) ;
- c. pour les paramètres des effets indirects, les effets attendus sont :
 - (i) aucune réduction prononcée de l'oxygène au cours des années où le climat est normal et recul du risque d'épuisement en oxygène dans les eaux côtières stratifiées ainsi que dans les eaux éloignées stratifiées et les zones de sédimentation ;
 - (ii) par conséquent, risque moindre pour la vie benthique ;
- d. on attend les effets suivants :
 - (i) une chaîne d'approvisionnement qui reste suffisante pour les niveaux trophiques supérieurs ;
 - (ii) une qualité améliorée de l'approvisionnement en aliments (risque inférieur de nuisance et d'efflorescence algale toxique ainsi que de déficience en oxygène) ;
 - (iii) efficacité écologique accrue.

50. L'objectif de réduction de 50 % des apports de nutriments constitue une étape importante vers la réalisation de l'exigence de la Stratégie OSPAR, à savoir un milieu marin sain, en ce qui concerne l'eutrophisation, en l'an 2010. Toutefois, le niveau de réduction a été basé sur une décision de politique. Le niveau plus exact de réduction nécessaire pour les zones en question sera établi grâce à la mise en place de la Stratégie OSPAR de lutte contre l'eutrophisation, en particulier par l'application des critères harmonisés d'évaluation de la Procédure exhaustive ainsi que les travaux ultérieurs d'élaboration des objectifs de qualité écologique. Tous ceux-ci sont actuellement à l'étude et devraient devenir disponibles pendant la période 2001-2003. La poursuite des travaux d'élaboration et d'utilisation des outils prédictifs (par exemple, la modélisation) (y compris les études de mésocosme) seront utiles à cet égard.

Références

- OSPAR Commission, 1998. Report of the ASMO Modelling Workshop on Eutrophication Issues (5-8 November 1996, The Hague, The Netherlands).
- Cadee, G.C., Hegeman, J., 1993. Persisting high levels of primary production at declining phosphate concentrations in the Dutch coastal area (Marsdiep). *Neth. J. Sea Res.* 31 (2), 147-152.
- Chapelle, A., Lazure, P., Ménesguen, A., 1994. Modelling eutrophication events in a coastal ecosystem. Sensitivity analysis. *Estuar., Coast. and Shelf Sci.*, 39, 529-548.
- Costello, M.J., *et al.* Measurement and Modelling Nutrient Dynamics of Two Estuaries in Ireland, Wexford and Cork Harbours. Final Report to the Environmental Protection Agency, Wexford (in preparation).
- Cugier, P., 1999. Modélisation du devenir à moyen terme, dans l'eau et le sédiment, des éléments majeurs (N, P, Si, O) rejetés par la Seine en Baie de Seine. Thesis, Caen University, 250 p.
- De Vries *et al.*, 1998. Patterns and trends in nutrients and phytoplankton in Dutch coastal waters: comparison of time-series analysis, ecological model simulation, and mesocosm experiments. *ICES Journal of Marine Science*, 55: 620-643.
- De Vries *et al.*, 1993. Risk Analysis of Eutrophication North Sea (Dutch Report on modelling studies on predicted effects of various nutrient reduction scenarios).
- Guillaud, J.F., Andrieux, F., Ménesguen, A., 2000. Biogeochemical modelling in the Bay of Seine (France): an improvement by introducing phosphorus in nutrient cycles. *J. Mar. Systems*, 25, 369-386.
- Guillaud, J.F., Ménesguen, A., 1998. Modélisation sur vingt ans (1976-1995) de la production phytoplanctonique en Baie de Seine (France), *Oceanol. Acta*, 21(6), 887-906.
- Hoch, T., Ménesguen, A., 1997. Modelling the biogeochemical cycles of elements limiting primary production in the English Channel. II. Sensitivity analyses. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 146, 189-205.
- Lancelot, C., Rousseau V., Billen G. & van Eeckhout D. (1997). Coastal eutrophication in the Southern Bight of the North Sea: assessment and modelling. NATO Advanced Research Workshop on 'Sensitivity of North Sea, Baltic Sea and Black Sea to anthropogenic and climatic changes' (14-18 November 1995). NATO-ASI Series, 439-454.
- Lenhart, H.J., Radach, G., Ruardij, P., 1997. The effects of river input on the ecosystem dynamics in the continental coastal zone of the North Sea using ERSEM. *J. Sea Res.* 38, 249-274.
- Lenhart, H.-J., 1999. Eutrophierung im kontinentalen Küstenbereich der Nordsee, Reduktionsszenarien der Flußeinträge von Nährstoffen mit dem Ökosystem-Modell ERSEM. *Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung, Reihe B: Ozeanographie*, 35: 169.
- Le Pape, O., Ménesguen, A., 1997. Hydrodynamic prevention of eutrophication in the Bay of Brest (France), A modelling approach. *Journal of Marine Systems*. 12, 171-186.
- Loyer, S., Lazure, P., Ménesguen, A., Lampert, L., Druon, J.N., 2000. Primary production model of the Bay of Biscay. In: *Actes du VII-ième Colloque International d'Océanographie du Golfe de Gascogne, Biarritz, 4-6 avril 2000*.
- Ménesguen, A., 1998. Détermination d'objectifs de qualité en nutriments dissous pour les rivières alimentant la marée verte des baies de Saint-Brieuc et Lannion. Rapport final de contrat pour le Conseil Général des Côtes d'Armor, 24 p.
- Phillipart, C.H., Cadée, G.C., van Raaphorst, W., Riegman, R., 2000. Long-term phytoplankton-nutrient interactions in the shallow coastal sea: Algal community structure, nutrient budgets and denitrification potential. *Limnol. Oceanogr.*, 45(1):131-144.

For further information about the work and publications of the OSPAR Commission, or additional copies of this report, please contact:

Pour tout renseignement sur les activités et les publications de la Commission OSPAR, ou pour tout exemplaire supplémentaire de ce rapport veuillez contacter :

The Executive Secretary
OSPAR Commission
New Court
48 Carey Street
London WC2A 2JQ
United Kingdom
Tel: 00 44 (0) 20 7430 5200
Fax: 00 44 (0) 20 7430 5225
E-mail: secretariat@ospar.org
Website: <http://www.ospar.org>

Price: Free when downloaded from the OSPAR website
£6.00 including postage & packing for hard copy orders
Prix: gratuit lorsque le rapport est téléchargé du site web d'OSPAR
£6.00 franco de port pour les commandes de copie papier

ISBN 0 946956 76 6