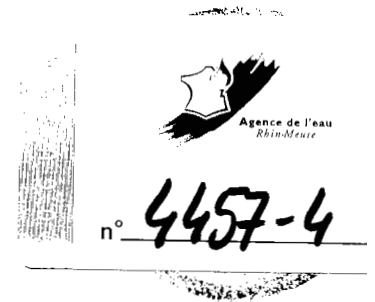


AGENCE FINANCIERE DE BASSIN RHIN, MEUSE  
AGENCE FINANCIERE DE BASSIN SEINE NORMANDIE  
LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES



**PROTECTION DE LA NAPPE DU DOGGER  
CONTRE LES RISQUES DE POLLUTION  
EN PROVENANCE DE L'AUTOROUTE B 31  
ETUDES D'IMPACT DES AUTOROUTES  
SUR LA QUALITE  
DES EAUX SOUTERRAINES**

**ANNEXE III**

**PREJUDICES CAUSES  
A L'EAU DE NAPPE**

COYNE & BELLIER  
BUREAU D'INGENIEURS CONSEILS  
S'rue d'Héliopolis 75017 PARIS

JANVIER 1977

## S O M M A I R E

1 - DEGRADATION DE LA TRAITABILITE DE L'EAU DE NAPPE	1
1.1 - Normes de traitabilité de l'eau de nappe	1
1.2 - Norme de qualité des eaux destinées à l'alimentation humaine	5
1.3 - Paramètres principaux à prendre en compte	7
2 - TENTATIVES D'EVALUATION ECONOMIQUE DE PREJUDICE	10
2.1 - Cas de la pollution chronique et saisonnière	10
2.11 - CoGt annuel du préjudice	10
2.12 - Actualisation	11
2.2 - Pollution accidentelle	12
3 - COUTS UNITAIRES DE LA FOURNITURE D'EAU POTABLE	13
3.1 - Prix de revient d'une installation classique	13
3.2 - Estimation du coût d'une fourniture provisoire d'eau	14

## 1 - DEGRADATION DE LA TRAITABILITE DE L'EAU DE NAPPE

### 1.1 - Normes de traitabilité de l'eau de nappe

En théorie, les techniques permettant d'assurer la fourniture d'eau potable à partir de l'eau de nappe ne diffèrent pas de celles qui sont utilisées pour les eaux douces en provenance d'autres ressources (eaux superficielles). (En pratique, ces techniques sont plus simples pour les eaux de nappe en raison de leur meilleure qualité).

Ces techniques peuvent être classées en trois grandes catégories (nous reprenons la classification retenue dans la Directive 74/440/CEE du Conseil des Communautés Européennes en date du 16 juin 1975) :

#### Catégorie A1

Traitement physique simple et désinfection, par exemple filtration rapide et désinfection.

#### Catégorie-A2

Traitement normal physique, chimique et désinfection, par exemple préchloration, coagulation, floculation, décantation, filtration, désinfection (chloration finale).

#### Catégorie-A3

Traitement physique, chimique poussé, affinage et désinfection, par exemple chloration au break point, coagulation, floculation, décantation, filtration, affinage (Charbon actif), désinfection (ozone, chloration finale).

En règle générale, les techniques de la catégorie A1 sont appliquées également aux eaux de nappes.

Le tableau n° A III/1 récapitule les concentrations guides ou impératives de l'eau brute à l'amont des différentes catégories de traitement. Cette directive, rappelons le, ne s'applique pas aux eaux souterraines mais peut servir de bon exemple pour illustrer le choix de telle ou telle technique de traitement.

On notera que les dérogations ne sont prévues qu'en cas d'inondations ou de catastrophes naturelles ou si les eaux subissent un enrichissement naturel, c'est-à-dire qu'elles reçoivent du sol certaines substances contenues dans celui-ci, sans intervention de la part de l'homme.

TABLEAU A III/I

Qualités d'eaux superficielles destinées à la production d'eau alimentaire

	Paramètres	AI G	AI I	A2 G	AI I	A3 G	A3 I
1	pH	6,5-8,5		5,5-9		5,5-9	
2	Coloration (après filtration simple)	mg/i échelle Pt	10	20 (O)	50	100 (O)	200 (O)
3	Matières totales en suspension	mg/l MES	2s				
4	Température	"C	22	25 (O)	22	25 (O)	25 (O)
5	Conductivité	µs/cm <sup>-1</sup> à 20 "C	1 000		1 000	1 000	
6	Odeur	(facteur de dilution à 2s "C)	3		10	20	
7	Nitrates	mg/l NO <sub>3</sub>	2s	50 (O)		50 (O)	50 (O)
8 (1)	Fluorures	mg/l F	0,711	1,5	0,7/1,7	0,7/1,7	
9	Chlore organique total extractible	mg/l Cl					
10	Fer dissous	mg/l Fe	0,1	0,3	1	2	1
11*	Manganèse	mg/l Mn	0,05		0,1		1
12	Cuivre	mg/l Cu	0,02	0,05 (O)	0,05		1
13	Zinc	mg/l Zn	0,5	3	1	5	5
14	Bore	mg/l B	1		1		1
15	Béryllium	mg/l Be					
16	Cobalt	mg/i Co					
17	Nickel	mg/l Ni					
18	Vanadium	mg/l V					
19	Arsenic	mg/l As	0,01	0,05		0,05	0,1
20	Cadmium	mg/l Cd	0,001	0,005	0,001	0,005	0,005
21	Chrome total	mg/l Cr		0,05		0,05	0,05
22	Plomb	mg/l Pb		0,05		0,05	0,05
23	Sélénium	mg/l Se		0,01		0,01	0,01
24	Mercure	mg/l Hg	0,0005	0,001	0,0005	0,001	0,001
25	Baryum	mg/l Ba		0,1		1	1
26	Cyanure	mg/l Cn		0,05		0,05	0,05

**TABLEAU A III/1**  
(suite)

	Paramètres	A1 G	A1 I	A2 G	A2 I	A3 G	A3 I
27	Sulfates mg/l SO <sub>4</sub>	150	<b>250</b>	150	<b>250 (O)</b>	150	<b>250 (O)</b>
28	Chlorures mg/l Cl	200		200		200	
29	Agents de surface (réagissant au bleu de méthylène) mg/l (lauryl-sulfate)	<b>0,2</b>		0,2		0,5	
30' (*)	Phosphates mg/l P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<b>0,4</b>		<b>0,7</b>		0,7	
31	Phénols (indice phénols) para-nitraniline 4 aminoantipyrine mg/l C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH		<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,005</b>	0,01	0,1
32	Hydrocarbures dissous ou émulsionnés (après extraction par éther de pétrole) mg/l		0,05		0,2	0,5	1
33	Carbure aromatique polycyclique mg/l		<b>0,0002</b>		<b>0,0002</b>		<b>0,001</b>
34	Pesticides — total (parathion, HCH, dieldrine) mg/l		<b>0,001</b>		<b>0,0025</b>		<b>0,005</b>
35'	Demande chimique en oxygène (DCO) mg/l O <sub>2</sub>					<b>30</b>	
36'	Taux de saturation en oxygène dissous % O <sub>2</sub>	> 70		> 50		> 30	
37'	Demande biochimique en oxygène (DBOJ à 20 °C sans nitrification) mg/l O <sub>2</sub>	< 3		< 5		< 7	
38	Azote Kjeldahl (NO <sub>3</sub> excepté) mg/l N	1		2		3	
39	Ammoniaque mg/l NH <sub>3</sub>	0,05		1	<b>1,5</b>	2	<b>4 (O)</b>
40	Substances extractibles au chloroforme mg/l SEC	0,1		0,2		0,5	
41	Carbone organique total mg/l C						
42	Carbone organique résiduel après floculation et filtration sur membrane (5 µ) TOC mg/l C						
43	Coliformes totaux 37 °C /100 ml	50		5 000		50 000	
44	Coliformes fécaux /100 ml	20		2 000		20 000	
4s	Streptocoques fécaux /100 ml	20		1 000		10 000	
46	Salmonelles	absence dans 5 000 ml		absence dans 1 000 ml			

1 = impérative.

G = guide.

O = circonstances climatiques ou géographiques exceptionnelles.

\* = voir article à sous 1).

(\*) Les valeurs indiquées constituent les limites supérieures déterminées en fonction de la température moyenne annuelle (température élevée et température basse).

(\*) Ce paramètre est inséré pour satisfaire aux exigences écologiques de certains milieux.

On distinguera dans ces données, trois grands groupes :

- les paramètres dont la concentration limite maximum est de l'ordre de la dizaine ou de la centaine de mg/l :

MES, Nitrates, sulfates, chlorures, DCO ;

- les paramètres dont la concentration est de l'ordre du mg/l :  
Bore, fluorure, azote Kjeldahl ;

- les paramètres dont la concentration limite est de l'ordre du dixième ou du centième de mg/l :

Métaux lourds, phénols, composés aromatiques.

Enfin on remarquera que suivant le type de traitement retenu, les seuils limites ne varient pas dans le même rapport :

- la salinité, la plupart des métaux lourds, les nitrates, les fluorures le bore, gardent le même seuil : les procédés classiques de traitement de l'eau n'ont pratiquement pas d'influence sur eux. ;

- à l'opposé certains seuils varient dans des rapports importants :

- Fer dissous : de 1 à 10
- Manganèse : de 1 à 20
- Cuivre : de 1 à 50
- Phénols : de 1 à 100
- Hydrocarbures : de 1 à 20
- Ammoniaque : de 1 à 60.

Moyennant quelques précautions, leur élimination est relativement facile en mettant en oeuvre des chaînes de traitement complètes.

- Enfin certains seuils ne varient que dans une fourchette de 1 à 5 :  
zinc, détergents, composés aromatiques, matières organiques, substances extractibles au chloroforme : leur élimination reste relativement difficile.

## 1.2 - Normes de qualité des eaux destinées à l'alimentation humaine

Un certain nombre de normes servent actuellement en France à la définition de la potabilité d'une eau destinée à l'alimentation humaine :  
**Normes** Françaises complétées en général par les normes de **l'O.M.S.**

Afin de rester homogène avec les normes de traitabilité, nous exposerons succinctement des extraits des projets de normes des Communautés Européennes, en nous limitant aux facteurs physico-chimiques, indésirables ou toxiques les plus représentatifs de la pollution d'origine autoroutière. Ces extraits sont reportés au tableau A III/2.

On remarquera essentiellement :

- l'apparition d'une valeur limite quant au sodium, (100 mg/l) rejoignant : en cela le souci des spécialistes américains : une forte concentration de sodium ( $>20$  mg/l) favoriserait les maladies cardio-vasculaires. Hors, il est pratiquement impossible de réduire la teneur d'une eau en ions sodium par les moyens classiques de traitement ;
- la similitude entre normes de potabilité et de traitabilité quant **aux** métaux lourds ;
- le seuil très faible pour les carbures polycycliques aromatiques (inférieur au microgramme par litre) pour des raisons essentiellement organoleptiques.

TABLEAU A III12

Potabilité de l'eau

Paramètres	Unités	Niveau guide	Concentration maximale admissible
Minéralisation totale (résidu sec)	mg/l	-	1 500
Sodium (Na)	mg/l	< 20	100
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	mg/l	5	200
Azote Kjeldahl (N)	mg/l	0,05	0,5
Substances extractibles au chloroforme	mg/l	0,1	
Chrome (Cr)	mg/l		0,05
Cuivre (Cu)	mg/l		0,05
Nickel (Ni)	mg/l		0,05
Plomb (Pb)	mg/l		0,05
Zinc (Zn)	mg/l		0,1
Huiles minérales	mg/l		0,01
Carbures polycycliques aromatiques	mg/l		0,0002
Phénols (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH)	mg/l		0,0005



### 1.3 - Paramètres principaux à prendre en compte

Il s'agit ici de permettre une approche rapide des risques encourus par une nappe traversée par une autoroute.

D'une part les émissions de charges polluantes ne sont pas en proportion des valeurs indiquées dans les normes de traitabilité. D'autre part, l'autoépuration n'est pas la même pour chacun des produits émis.

Le tableau A III/3 résume l'incidence de ces éléments à partir des **hypothèses** suivantes :

- la pollution est répartie uniformément sur l'année,
- l'autoépuration est la suivante :
  - . DBO5, DCO, et Nk : 95 %
  - . Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>-</sup> : nulle
  - . Métaux lourds : 99 %
  - . Hydrocarbures : 50 %
- les seuils de nuisances sauf exceptions sont ceux qui sont définis par les normes de traitabilité de niveau **A1**, lorsque les valeurs existent,
- la dilution nécessaire est estimée à partir d'un apport de 5 l/s/km<sup>2</sup>.

On constate alors :

- que ce sont les hydrocarbures dissous qui sont le paramètre le plus important : pour qu'une nappe ne soit pas affectée par une autoroute, il faut que son bassin versant soit **déjà** très important : **de** l'ordre de la trentaine de km<sup>2</sup>.
  - . Ce chiffre peut être divisé par 20 **si** l'on consic'ère les normes de traitabilité A3 1, **au prix**, il est vrai, de coûts de traitements plus importants
- qu'en ce qui concerne les métaux lourds, c'est le plomb qui est le paramètre le plus important. Pour que son influence soit négligeable, il faut que le bassin versant soit supérieur à la vingtaine d'hectares.
- il en est de même du chlorure de sodium.
  - . Ces trois types de polluants font appel à des mode de transferts différents dans les nappes, ainsi qu'à des moyens différents quant aux possibilités de traitement. D'autre part, **si** leus teneurs restent inférieures aux seuils de traitabilité, il en sera de même pour les autres polluants. C'est pourquoi nous les considérons comme les trois types de paramètres clefs.

Pratiquement, pour une première approche, on notera que le chiffre de 5 l/s/km<sup>2</sup> est une valeur moyenne. Par précaution, en cas d'ignorance de ce module, on tablera sur une dilution plus faible, de l'ordre de 1 à 2 l/s/km<sup>2</sup>.

En ce qui concerne les hydrocarbures, la dilution nécessaire prise en compte au tableau A III13 est certainement sévère ; il est supposé que pratiquement la moitié des hydrocarbures est soluble et non biodégradable, faute d'une connaissance précise et de la nature de ces hydrocarbures et de leur comportement dans le sol. La dilution réelle nécessaire est, sans doute, dans la plupart des terrains, inférieure à notre hypothèse beaucoup plus valable pour des terrains fracturés en grand.

Pour un dégrossissage du problème, connaissant l'emprise approximative des bassins versants traversés par une autoroute, il sera nécessaire d'étudier de plus près les risques de pollution des eaux souterraines si le rapport longueur d'autoroute/superficie du bassin versant traversé est :

- supérieur à 0,1 km/km<sup>2</sup> : hydrocarbures
- supérieur à 0,5 km/km<sup>2</sup> : plomb ou chlorure de sodium

TABLEAU A III/3

Seuils de sensibilité des nappes  
en fonction de la longueur de l'autoroute

Paramètre	Charges émises (kg/an)	Charges restantes	Concentration )	Bassin versant minimum (km <sup>2</sup> /km)
DBO	800	40	< 3	0,08
DCO	6 500	325	30 —	0,07
No <sub>3</sub> -	10	10	50	0,0012
NK	10	0,5	3***	0,01
Cd	4	0,01	0,005	0,05
Cr	70	0,07	0,05	0,09
Cu	15	0,15 0,15	0,05	0,02
Pb	180	1,8	0,05	
Zn	70	0,7	3	0,014
Hydrocarbures dissous	450	225	0,05	28
Na <sup>+</sup>	5 550	5 550	100**	0,34
cl-	9 200	9 200	200	0,29

k Sur la base d'un débit de 5 l/s/km<sup>2</sup> ou 160 000 m<sup>3</sup>/an/km<sup>2</sup>

\*\* Selon le critère de traitabilité A3 1

\*\*\* Selon les critères de potabilité

## 2 - TENTATIVES D'EVALUATION ECONOMIQUE DU PREJÜDICE

### 2.1 - Cas de la pollution chronique et saisonnière

Nous traiterons ici le cas d'une émission de charges polluantes permanente et non aléatoire, provoquée par l'existence même de l'autoroute.

#### 2.11 - Coût annuel du préjudice

##### a) La nappe est déjà exploitée

La mise en service de l'autoroute va :

- soit ne pas influencer le type de traitement déjà existant : les accroissements de concentration seront suffisamment faibles, au droit des prélèvement pour qu'aucun seuil critique ne soit atteint.

Dans ces conditions, le coût du préjudice reste nul.

- soit modifier la qualité des eaux brutes pour qu'un traitement plus poussé soit nécessaire mais possible : le coût annuel du préjudice sera alors égal à l'accroissement du prix de revient du traitement.
- soit détériorer définitivement la qualité de l'eau brute : il n'est plus possible, même en faisant appel aux traitements les plus poussés, de garantir la potabilité de l'eau.

Il devient alors nécessaire de trouver une ressource de remplacement.

Le préjudice est alors égal à la somme :

- du coût annuel de la nouvelle fourniture (soit captage, traitement et adduction) : coût de substitution ;
- de l'amortissement résiduel des anciennes installations désaffectées.

Soit  $C_i$  la valeur annuelle du préjudice ainsi déterminée l'année  $i$

$V_i$  le volume annuel délivré l'année  $i$

le coût rapporté au  $m^3$  délivré est alors :  $c_i = \frac{C_i}{V_i}$

b) La nappe n'est pas encore exploitée

Si cette nappe n'était jamais exploitée, on peut considérer qu'il n'y a pas de préjudice sensible quantifiable.

Si la nappe devait être un jour exploitée, le coût du préjudice ne peut être rapporté qu'au volume annuel potentiellement exploitable. Il est égal au coût de la fourniture équivalente dite également de substitution (eau de surface, exploitation d'une autre nappe plus éloignée) et qui n'aurait pas été sollicitée si la première nappe n'avait pas été polluée.

2.12 - Actualisation

Soit  $a$  le taux d'actualisation retenue pour les ouvrages d'alimentation en eau ;

Soit  $C_i$  la dépense ou le préjudice prévu l'année  $i$ , à l'année de référence 0 (par exemple 1976) la valeur actualisée de cette somme :  $C_{0,i}$  est égale à :

$$C_{0,i} = \frac{C_i}{(1+a)^i} = r^i C_i$$

$$r = \frac{1}{1+a} = \text{coefficient d'actualisation, } r < 1$$

Si l'on envisage une dépense annuelle  $C_i$  constante, de l'année  $k$  à l'année  $q$ , la valeur totale actualisée de la dépense sera :

$$C = \sum_{i=k}^q C_{0,i} = \sum_{i=k}^q r^i C_i = C_i \sum_{i=k}^q r^i$$

$$C = \frac{r^{(k+1)} - r^{(q+1)}}{1 - r} C_i$$

En particulier,

si  $k = 0$  : mise en oeuvre immédiate de la dépense  
et  $q = \infty$  : (en pratique, supérieur à 50 ans)

Alors,

$$C = \frac{r}{1-r} C_i$$

## 2.2 - Pollution accidentelle

**Les** calculs qui suivent ne s'appliquent qu'à des émissions aléatoires, mais indépendantes et rares de charges polluantes : cas de l'épandage d'un camion citerne.

- Soit  $q_j$  = volume annuel qui devrait être fourni par la nappe l'année  $j$ ,
- Soit  $d_{ijk}$  le coût par  $m^3$ , l'année  $j$ , de l'accident  $i$  survenu l'année  $k$ ,
- Soit  $T$  année la durée de la contamination de la nappe par l'accident  $i$ ,

Alors :  $d_{ijk} = 0$  pour  $j \ll k-1$  et  $j \geq k+T$

$$d_{ik} = \sum_{j=k}^{j=k+T-1} r^{j-k} d_{ijk} q_j$$

où  $d_{ik}$  est le **coût** total capitalisé l'année  $k$  de l'accident  $i$  survenu l'année  $k$

soit  $P(i)$  la probabilité pour que survienne l'accident  $i$ , l'année  $k$ ,  
donc que survienne le Coût  $d_{ik}$

$$\bar{d}_k = \sum_{i=1}^N P_k(i) d_{ik} = \text{espérance mathématique du coût capitalisé l'année } k, \text{ sur tous les accidents possibles survenus l'année } k;$$

$$\text{et } \bar{d} = \sum_{k=0}^{\infty} r^k \bar{d}_k = \text{espérance mathématique du coût total, capitalisé l'année zéro (par exemple 1976).}$$

$$\text{Par suite, } \bar{d} = \sum_{k=0}^{\infty} r^k \sum_{i=1}^N P_k(i) \sum_{j=k}^{j=k+T-1} r^{j-k} d_{ijk} q_j$$

### Exemple.

$i = 0$  ou  $1$ , 1 seul type d'accident (par exemple déversement de produits pétroliers).

$d_{0,j,k} = 0$  avec la probabilité  $1 - P$

$d_{1,j,k} = C_j$  avec la probabilité  $P$

Si pour simplifier, nous supposons :

que  $q_j$  reste constant =  $q$

que  $c_j = c$

Alors,

$$\bar{d} = Pqc \sum_{k=0}^{\infty} r^k \sum_{j=k}^{j=k+T-1} r^{j-k} C_j$$

Tous calculs faits :

$$\bar{d} = P (qc) \frac{r(1-r^T)}{(1-r)^2}$$

### 3 - COUTS UNITAIRES DE LA FOURNITURE D'EAU POTABLE

#### 3.1 - Prix de revient d'une installation classique

- Le prix de revient du mètre cube d'eau potable arrivant aux réservoirs de distribution est très variable en fonction de l'origine de la ressource. Dans ce prix interviennent les frais relatifs :
  - aux installations de prélèvements (captages, prises d'eaux en rivière,) et de stockage,
  - aux installations de traitement de l'eau,
  - aux installations d'adduction d'eau.

Ces trois types de frais sont en plus relativement sensibles aux facteurs d'échelle : dans les mêmes conditions géographiques, le coût du m<sup>3</sup> d'eau peut être abaissé dans un rapport de 3 à 1 entre la fourniture de 1000 m<sup>3</sup>/j et 100 000 m<sup>3</sup>/j.

Nous citerons à ce niveau de l'étude quelques ordres de grandeurs actuels pour une fourniture de 50 000 m<sup>3</sup>/j :

• <u>Prélèvements</u> :	:	0,05 F/m <sup>3</sup>
• <u>Traitement</u> :		
. Installations catégorie A1	:	0,10 F/m <sup>3</sup>
"                  "      A2	:	0,20 F/m <sup>3</sup>
"                  "      A3	:	0,30 F/m <sup>3</sup>
• <u>Transport</u>		
. Sur 10 km	:	0,30 F/m <sup>3</sup>
▪ " 50 km	:	0,70 F/m <sup>3</sup>
▪ " 100 km	:	1 F/m <sup>3</sup>
▪ " 200 km	:	1,8 F/m <sup>3</sup>

Ces prix comprennent les amortissements des installations et les frais d'exploitations.

On retiendra essentiellement :

- la part importante revenant aux transports,
- la différence non négligeable entre les différentes catégories de traitement
- et finalement l'importance d'un examen cas par cas des coûts.

### 3.2 - Estimation du coût d'une fourniture provisoire d'eau

En cas d'accident grave entraînant une coupure momentanée mais totale de l'alimentation en eau, il peut être nécessaire de prévoir un système de distribution par citernes.

Les volumes à distribuer ne doivent pas être inférieurs aux besoins minimum pour la toilette, la cuisine et la vaisselle, estimés à 25 l/j/habitant.

D'autre part, il est prévisible que l'ensemble de la population fera appel pour la boisson à l'eau conditionnée en bouteille, à raison de 2 l/j/habitant, l'ordre de grandeur des coûts est le suivant par jour et par habitant :

- Eau de boisson			
1 F/l x 2 l/j	=	2	F/j
- Fourniture de secours			
20 F/m <sup>3</sup> x 0,025 m <sup>3</sup> /j	=	0,50	F/j
<b>TOTAL</b>			<b>2,50 F/j</b>