

# EXPÉRIMENTATION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR ET MULTIPLEXAGE

Raymond LESTOURNELLE, René MEYFREDI

## DIFFICULTE DE L'EXAO EN BIOLOGIE

### 1 - des phénomènes multifactoriels

La plupart des phénomènes biologiques mettent en jeu un grand nombre de paramètres, dans la plupart des cas lumière, température et eau, mais aussi teneurs en CO<sub>2</sub>, en oxygène, en sels minéraux... Parfois un grand nombre de *capteurs du même type* doivent être mis en place. C'est le cas lorsqu'on veut étudier des déplacements d'animaux ou de fluides.

Or, pour l'instant, la plupart des systèmes d'EXAO ne permettent pas d'aborder, dans les meilleures conditions, ces phénomènes multifactoriels. La plupart de ces systèmes ne gèrent que 2 ou 3 capteurs en même temps. Le boîtier ORPHY va jusqu'à 8 mais c'est encore insuffisant.

### 2 - cartes d'acquisition et boîtiers de mise en forme

Les choses sont peut être en train de changer, puisque le développement de la robotique permet de trouver, actuellement sur le marché, des cartes 24 entrées/24 sorties pour moins de 1 000 F. Pour autant, cet abaissement des coûts ne réglera pas les problèmes du biologiste. En effet, la plupart des capteurs sont associés à un *boîtier électronique* qui a pour fonction de mettre en forme le signal, de manière à le rendre compatible avec les valeurs en entrée de la carte d'acquisition. Or ces boîtiers coûtent cher et il est exclu de disposer d'autant de boîtiers que de capteurs.

### 3 - les interactions entre capteurs

Un certain nombre de capteurs sont alimentés électriquement, par exemple les sondes à oxygène, les sondes pH... Lorsqu'ils fonctionnent simultanément, dans un espace restreint, ces capteurs interfèrent et les mesures enregistrées sont aberrantes.

### 4 - régulations et sorties logiques

Beaucoup d'expériences de biologie étudient l'influence d'un facteur de l'environnement sur le développement des végétaux. Dans ce cas, il faut maintenir constant, sur de longues périodes, un certain nombre de paramètres tels que lumière, température, humidité, taux de CO<sub>2</sub>... C'est souvent difficile, voire impossible, pour des raisons diverses : accès aux locaux pendant les week-end et les vacances, disponibilité du personnel de laboratoire, difficulté des interventions... Si l'on dispose de *sorties* en nombre suffisant il est possible de mettre au point des systèmes de régulation entièrement automatisés.

## LE MULTIPLEXAGE, UNE SOLUTION ECONOMIQUE

Les difficultés évoquées ci-dessus peuvent être résolues par l'utilisation d'un système de multiplexage : *le multiplexeur est un boîtier électronique qui connecte les différents capteurs (ou les différents appareils) de façon cyclique grâce à des relais.*

Les avantages sont les suivants :

- \* il est possible d'utiliser un grand nombre de capteurs sur une carte d'acquisition ne disposant que de 1 entrée.
- \* le même boîtier de mise en forme peut être utilisé pour l'ensemble des capteurs.
- \* il ne peut pas y avoir d'interférence entre les différents capteurs puisqu'ils ne sont pas alimentés en même temps.

Le multiplexage a cependant des limites :

- \* le temps de connexion est long et il est hors de question d'utiliser un tel système pour l'étude de phénomènes très rapides, comme ceux que l'on connaît en physiologie nerveuse.
- \* la multiplication du nombre de capteurs implique que leur coût ne soit pas trop élevé. Or certains d'entre eux ont un prix supérieur à 2 000 F !

## UNE APPLICATION DU MULTIPLEXAGE : L'ÉTUDE DE LA POLLUTION PAR ÉLECTROLYTES DANS UNE NAPPE PHRÉATIQUE

C'est dans ce contexte que nous avons été amenés à mettre au point un système de multiplexage applicable à l'étude de la pollution par électrolytes dans une nappe phréatique. En effet, l'étude de la pollution des nappes est au programme des classes de 2° cycle et un certain nombre de commerçants proposent, à l'achat des établissements, des maquettes de nappe phréatique. Il était tentant d'y étudier la propagation d'une pollution grâce à un système d'EXAO.

### 1 - Capteurs et boîtiers

#### 1.1 - le choix des capteurs

Un certain nombre de capteurs autorisent la mise en évidence d'une pollution : capteurs de température pour une pollution thermique, capteurs à oxygène... Ils présentent cependant 2 inconvénients : soit ils sont coûteux (capteurs à oxygène), soit (pour les capteurs de température) ils mettent en évidence un type de pollution qui n'affecte pas les nappes phréatiques. La pollution chimique étant la plus courante, il était intéressant de rechercher des capteurs capables de l'apprécier : les *capteurs de résistivité* représentent une solution possible.

#### 1.2 - fonctionnement des capteurs de résistivité

##### *a - principe*

Il est fort simple : si l'on plonge 2 électrodes, de surface  $S$  séparées par distance " $d$ ", dans des solutions électrolytiques de concentration variable, la résistance mesurée entre les 2 électrodes est une fonction inverse de la concentration de l'électrolyte.

##### *b - alimentation*

Ces capteurs doivent être alimentés électriquement. Hélas ! l'alimentation en continu les polarise en quelques minutes et leur résistance devient très grande. Seule une alimentation en courant alternatif permet d'éviter ce phénomène. Les spécialistes (cf. "les capteurs en instrumentation industrielle" de Georges Asch) indiquent que pour des solutions de conductivité moyenne, il convient d'utiliser des fréquences voisines de 1 000 Hz. La fréquence choisie a été de 1 500 Hz.

### *c - quelles électrodes ?*

Elles doivent présenter les caractéristiques suivantes :

- \* être rigides pour pouvoir être plantées dans du sable par exemple.
- \* être séparées par une distance non modifiable.
- \* être ajustables.

La sonde mise au point par René Meyfredi (cf. **document 1**) répond à ces exigences : il s'agit d'une bande d'epoxy cuivré double face de 5 mm de largeur et de 30 cm de longueur, isolée pour l'instant à l'araldite et limée en biseau à son extrémité.

### *d - boîtier de mise en forme du signal*

L'objectif est d'obtenir que la sonde délivre une tension comprise entre 0 et 5 V, ce qui correspond aux tensions habituellement traitées par les cartes d'acquisition de données.

Il n'existe pas, à notre connaissance, de circuit tout prêt. Celui qui est décrit ici est inspiré de deux articles de M. Archambault \*\* sur la mesure de la dureté de l'eau (hydrotimétrie). Sa réalisation exige des compétences en électronique.

Pour tous renseignements sur la partie électronique on pourra s'adresser à René Meyfredi, lycée A. Briant. 05000 GAP.

### *e - réponse des capteurs*

Elle est figurée sur le **document 2**. La tension est bien une fonction croissante de la concentration mais *ce n'est pas une fonction linéaire*. Cette anomalie peut être corrigée par un circuit électronique ou, plus simplement, encore par un programme informatique

## **2 - MULTIPLEXAGE**

### **2.1 - identification des signaux**

Nous avons choisi de *ne pas asservir le multiplexeur* à l'ordinateur : cela signifie que la connexion des capteurs n'est pas décidée par le processeur, mais qu'elle se fait de façon autonome et séquentielle. Cette technique implique que le logiciel soit en mesure d'*identifier le signal*, c'est à dire de préciser par quel capteur il a été émis. Il suffit pour cela de définir un "capteur de référence", fictif, ayant un potentiel parfaitement reconnaissable et, pourquoi pas, le potentiel 0. Le "capteur de référence" ayant été identifié, il ne reste plus au logiciel qu'à compter...

## 2.2 - la nécessité d'un top de prise de donnée

Au moment de la fermeture du relais qui connecte le capteur, le contact mécanique n'est pas toujours franc. De ce fait, la valeur donnée par le capteur n'est pas stable. Il est donc nécessaire d'attendre un bref instant pour prélever le signal. C'est le rôle du top de prise de donnée : il indique à quel moment la mesure doit être effectuée.

## 2.3 - traitement logiciel

En raison de la présence de la présence de 11 capteurs, il a paru préférable de dissocier l'archivage des données de leur traitement.

### 2.3.1 - fichier d'archivage des données

#### *a - reconnaissance du capteur de référence (initialisation)*

La carte reçoit - toujours dans le même ordre - les tensions présentes aux bornes des capteurs ainsi que la tension du "capteur de référence". Le logiciel repère ce capteur en recherchant une valeur 0. A partir de là, il ne lui reste plus qu'à compter et à ranger les valeurs reçues dans un tableau

#### *b - correction des erreurs et recalage*

Les parasites des circuits créent des tops supplémentaires qui engendrent des acquisitions "intempestives" de valeur 0 : le logiciel ne reconnaît plus les capteurs. Il est donc nécessaire d'effectuer un *recalage* logiciel. Celui ci intervient dès qu'une valeur 0 apparaît alors que le compteur de capteurs affiche une valeur non nulle : une réinitialisation s'opère ; elle se traduit concrètement par une absence d'acquisition pendant 1 cycle de mesures (quelques secondes).

#### *c - affichage et archivage des acquisitions*

- \* L'affichage des acquisitions s'effectue de façon ordonnée sur l'écran, ce qui permet à l'utilisateur de contrôler le bon déroulement des opérations.
- \* L'archivage est réalisé dans un "*fichier texte*" importable dans la plupart des bases de données ou des tableurs.

### 2.3.2 - fichier de traitement des données

Il peut être réalisé grâce à une base de données ou un tableur ou faire l'objet d'un traitement logiciel spécifique, le logiciel "NAPPE", associé à la présente publication. Ce logiciel permet à ceux qui ne possède

pas encore le dispositif, de mener une réflexion sur le fonctionnement de la maquette de nappe. La version 1 de ce logiciel comporte les fonctionnalités suivantes :

- \* *affichage* du fichier
- \* *tracés* représentant les réponses des différents capteurs (6 affichages simultanés).
- \* *visualisation* de la pollution à l'aide d'un code de couleur.
- \* affichage de données *statistiques*

Les extensions prévues sont les suivantes :

- \* *ajustage* logiciel des capteurs et *conversion* des valeurs en fonction de la courbe de réponse de ces derniers (et éventuellement archivage dans un fichier corrigé).
- \* tracé de *courbes d'iso-pollution*.

Pour tous renseignements sur la partie informatique, on pourra s'adresser à Raymond Lestournelle, lycée d'altitude, 05100 BRIANCON

### 3 - MISE EN ŒUVRE ET RÉSULTATS

Ce système capteurs de résistivité-multiplexage a été testé avec succès sur une maquette de nappe phréatique.

#### 3.1 - le dispositif expérimental

- \* il s'agit d'un modèle de maquette de nappe phréatique "classique" (document 3).
- \* 11 capteurs avaient été plantés en quinconce dans le sable, sur 3 lignes *équidistantes* et sur une profondeur de 12,5 cm (document 4).
- \* ces capteurs étaient reliés au boîtier électronique et au multiplexeur.
- \* pour éviter le creusement d'un trou dans le sable, le jet de l'alimentation en eau était "brisé" par un grillage et l'exhaure était réalisée par l'orifice supérieur.

### 3.2 - les expériences

Elles ont consisté à étudier le cheminement d'une pollution aux *électrolytes* dans une aquarium rempli d'eau, comme préliminaire, puis dans la maquette décrite ci-dessus.

#### 3.2.1 - *pollution dans un aquarium*

Les résultats, non présentés dans ce document, ont montré que la dilution d'une solution de Na Cl n'est pas aussi rapide qu'on aurait pu le penser et qu'une nappe d'eau salée, plus dense, s'installe au fond de l'aquarium.

#### 3.2.2 - *pollution dans la maquette*

5 séries d'expériences ont été menées. Elles ont consisté à verser 100 ml d'une solution salée, à l'emplacement du jet d'eau, dans 3 situations :

- \* *expérience 1* : solution salée à  $10 \text{ g.l}^{-1}$
- \* *expérience 2* : solution salée à  $100 \text{ g.l}^{-1}$
- \* *expérience 3* : solution salée à  $100 \text{ g.l}^{-1}$  mais avec siphonnage dans le puits P2 (rapport des débits puits/exhaure normale : 1,5)
- \* *expérience 4* : identique à l'expérience 2 mais avec une solution de nitrate de K.
- \* *expérience 5* : identique à l'expérience 2 mais une solution de phosphate de sodium

### 3.3 - les résultats

Les documents présentés sont les suivants :

- \* **document 5** : fichier "brut" de l'expérience 2 ne prenant pas en compte l'ajustement des électrodes et la conversion des valeurs. Chaque ligne correspond à un enregistrement du fichier. Chaque enregistrement comptabilise les résultats pour 11 capteurs (+ le capteur de référence) ce qui correspond à une durée de 7 s environ.
- \* **document 6** : progression de la pollution dans les différentes lignes de capteurs pendant l'expérience 2. Les capteurs choisis A2, B2, C2 indiquaient au départ des valeurs identiques.
- \* **document 7** : idem mais pour 3 capteurs. On peut ainsi comparer les variations de résistivité à l'intérieur d'une même ligne de capteurs.

- \* **document 8** : comme le document 6 mais pour l'expérience 3
- \* **document 9** : variations de résistivité observées au niveau des capteurs de la ligne A, pour l'expérience 3.

### 3.4 - les conclusions

#### 3.4.1 - pour l'expérience 2

L'examen du *fichier* et des *graphiques* 6, 7 permet de tirer les conclusions suivantes :

- a- l'élimination du polluant (il est vrai très soluble dans l'eau) est *rapide* : environ 10-15 min.
- b- le niveau de la pollution va en *diminuant* de la 1° à la 3° ligne de capteurs en raison de la dilution du sel.
- c- le *délai* entre le moment de la pollution et sa mise en évidence au niveau des capteurs, est beaucoup plus élevé pour la 3° ligne de capteurs.
- d- mêmes conclusions en ce qui concerne la *durée* de la pollution dans les différentes lignes de capteurs.
- e- la pollution atteint les capteurs d'une même ligne à peu près au *même moment* mais les capteurs situés à proximité des puits montrent une pollution plus grande, révélant ainsi un flux privilégié. *Cette constatation remet en cause la validité des mesures effectuées avec des capteurs placés dans des puits.*

#### 3.4.2 - pour l'expérience 3

L'examen du *fichier* (non présenté ici) et des *graphiques* 8 et 9 relatifs à l'expérience 3 font apparaître les faits suivants :

- a- la pollution atteint les lignes de capteurs beaucoup plus *précocement* en raison d'un drainage beaucoup plus important.
- b- *l'affaiblissement* du niveau de la pollution, de la ligne 1 à la ligne 3, est beaucoup plus grand
- c- la durée de la pollution au niveau de la 3° ligne de capteur est infiniment plus *longue*.
- d- les capteurs qui recueillent le plus de polluant sont les capteurs A1, B1 et C3, qui révèlent ainsi des *flux* de drainage vers le puits P2 et vers l'exutoire naturel.
- e- les capteurs qui recueillent le moins de polluant sont les capteurs A3, B3 et C2 ; résultats difficilement interprétables.

### **3.4.3 - pour l'expérience 4**

Les résultats non présentés ici montrant une inversion des amplitudes de la ligne A à la ligne C. Une explication est à rechercher.

### **3.5 - développements**

La recherche sur cette maquette va se poursuivre dans les directions suivantes :

- \* pollution à rebours dans le cône de rabattement.
- \* les flux en surface et en profondeur.
- \* les "effets karstiques".
- \* essai avec différents nitrates.

...

## **CONCLUSION**

La réalisation et la programmation des dispositifs décrits ici exigent des connaissances en électronique et en informatique. Les idées faisant leur chemin, rien n'interdit de penser que ces matériels pourraient être mis à la disposition des utilisateurs par des constructeurs bien inspirés.

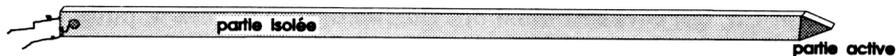
Raymond LESTOURNELLE

Professeur de Biologie - Lycée d'Altitude  
05100 BRIANCON

René MEYFREDI  
Professeur de Biologie - Lycée Nord  
05000 GAP

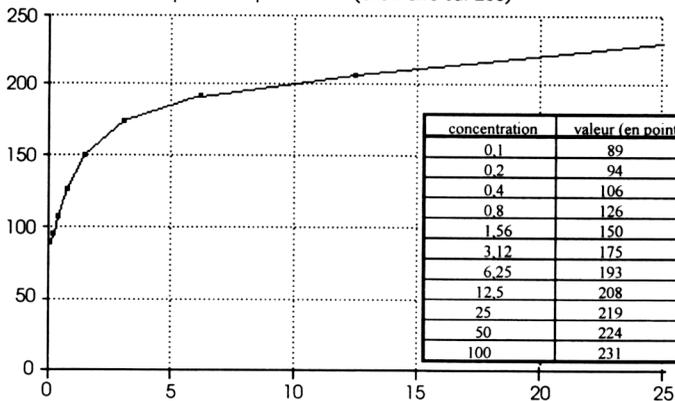
## ANNEXE

## Document 1 : modèle de capteur de résistivité



## Document 2

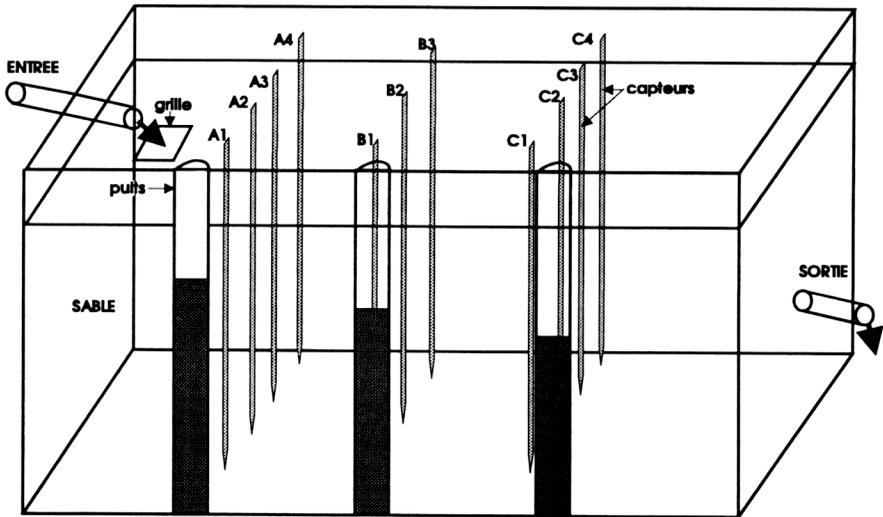
valeurs affichées par le capteur (arbitraire sur 256)



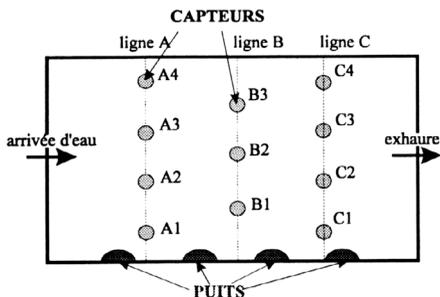
REPONSE DES  
CAPTEURS

concentration	valeur (en points sur 255)	tension (en volts)
0.1	89	1.74
0.2	94	1.84
0.4	106	2.07
0.8	126	2.47
1.56	150	2.96
3.12	175	3.42
6.25	193	3.77
12.5	208	4.08
25	219	4.28
50	224	4.38
100	231	4.50

## Document 3 : maquette de nappe phrétique



Document 4 : disposition des capteurs dans la maquette



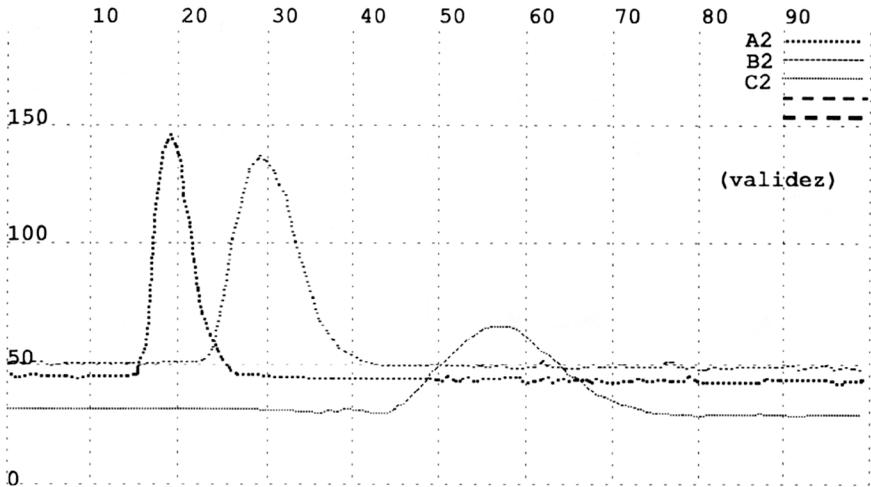
Document 5 : fichier d'expérience NAPPE 2

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	C1	C2	C3	C4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	44	46	33	45	50	50	29	42	32	56	52
2	45	45	32	46	50	50	30	42	31	57	52
3	45	45	33	45	50	51	29	42	32	56	51
4	44	46	32	46	50	50	30	42	31	56	51
5	44	45	33	46	50	51	30	42	31	56	51
6	44	45	32	46	49	50	29	42	31	56	52
7	44	45	32	45	50	50	30	42	31	56	52
8	44	45	32	46	49	50	29	42	31	57	52
9	44	44	32	46	50	50	30	42	31	57	52
10	44	45	33	45	49	50	29	42	31	55	51
11	44	45	32	45	50	51	30	42	31	56	52
12	44	45	32	46	50	50	29	42	31	56	51
13	44	45	32	46	49	51	29	42	31	56	51
14	44	45	33	50	49	50	29	42	31	56	51
15	44	45	33	51	50	51	30	42	31	56	52
16	44	46	33	49	49	50	30	42	31	56	51
17	44	59	37	49	50	50	30	41	31	55	52
18	58	103	55	53	49	50	29	42	31	55	52
19	102	138	80	74	49	51	30	41	31	56	51
20	140	(146)	(91)	104	50	50	29	42	31	55	51
21	155	133	87	125	49	50	29	41	31	56	51
22	150	108	73	(133)	50	50	30	41	31	56	51
23	133	83	57	125	50	51	29	42	31	56	51
24	103	65	46	111	50	53	29	41	31	55	51
25	77	55	39	90	57	63	29	47	31	55	51
26	61	50	35	72	71	81	31	41	31	55	51
27	52	41	34	61	96	102	37	41	31	55	50
28	48	46	33	51	117	119	48	41	31	56	50
29	46	46	33	51	132	131	63	41	31	55	52
30	45	45	32	48	142	(137)	76	41	31	55	51
31	44	45	32	47	(143)	134	82	41	31	55	51
32	44	44	32	47	135	129	89	41	30	55	51
33	44	44	32	46	132	119	88	40	30	55	51
34	44	44	32	46	119	106	81	41	30	55	51
35	44	44	32	45	03	91	72	41	31	55	51
36	43	44	31	46	88	78	62	40	31	51	52
37	44	44	32	45	75	69	52	41	30	55	51
38	44	44	31	45	67	62	44	41	31	55	52
39	44	44	32	45	61	57	39	40	30	56	51
40	44	44	31	45	56	55	35	41	31	58	52
41	43	44	32	46	51	53	33	40	31	60	52
42	43	44	32	45	52	52	31	41	30	63	54
43	43	44	32	45	51	51	30	41	30	66	51
44	43	44	32	45	50	50	29	41	30	70	55
45	43	44	32	45	50	50	29	40	33	75	56
46	43	44	32	44	50	50	29	41	33	81	57
47	43	44	32	45	49	50	28	41	34	87	56
48	43	44	31	45	49	50	29	43	38	91	58
49	43	44	32	45	48	50	29	45	41	101	58
50	44	44	31	45	49	50	29	45	41	107	61
51	43	44	31	45	48	50	28	51	49	114	63
52	43	44	31	44	48	50	28	56	51	118	65
53	43	43	31	45	48	50	28	61	58	120	69
54	43	44	32	45	48	50	28	68	61	(122)	73
55	43	43	31	45	49	49	28	71	63	122	79
56	43	44	31	45	48	50	28	79	66	121	83
57	43	44	31	45	48	49	28	83	66	119	88
58	43	44	31	45	48	50	28	87	66	117	92
59	43	44	31	44	48	49	28	90	66	113	96
60	43	44	31	45	48	49	28	92	61	109	98
61	43	43	31	44	48	49	28	90	61	102	101
62	43	43	31	44	47	49	28	90	58	97	102
63	43	44	31	45	47	50	28	89	55	94	(102)
64	43	43	31	44	47	50	28	86	52	89	100
65	42	44	30	45	47	49	28	82	52	84	100
66	43	43	30	44	48	49	28	78	48	76	98
67	42	44	30	45	48	49	28	75	43	72	96
68	43	43	30	44	47	49	28	70	40	69	91
69	42	44	31	45	47	50	28	66	38	66	87
70	43	43	31	44	47	49	28	62	36	64	83
71	42	43	31	44	48	49	28	59	35	61	79
72	42	43	31	45	47	50	28	56	34	60	76
73	43	43	31	44	48	49	28	53	32	58	82
74	42	44	31	45	48	49	28	50	32	58	69
75	42	43	31	44	47	49	28	47	30	57	66
76	42	43	30	44	47	49	28	46	30	56	63
77	43	43	30	45	47	50	28	44	30	55	60
78	42	43	31	44	48	50	28	43	30	55	64
79	43	43	31	44	47	49	28	42	30	55	56
80	42	44	31	45	47	49	28	41	29	55	55
81	43	43	30	44	47	49	28	41	29	54	54
82	42	43	31	45	47	49	28	40	29	55	54
83	42	43	31	44	47	49	28	39	29	55	52
84	43	43	31	44	47	49	28	40	29	54	52
85	43	43	30	45	48	50	28	39	29	54	51
86	42	43	31	45	45	49	28	39	29	54	51
87	42	43	30	45	45	49	28	39	29	54	51
88	42	43	30	44	47	49	28	39	29	54	50
89	43	44	31	45	47	49	28	39	29	54	50
90	42	43	30	44	47	49	28	38	29	54	50
91	42	43	31	44	46	49	28	39	29	54	50
92	43	43	30	44	46	49	28	39	29	54	50
93	42	43	30	44	46	48	28	39	29	53	50
94	42	43	30	45	47	49	28	39	30	54	50
95	42	43	30	44	47	49	28	38	29	54	50
96	42	43	30	44	47	49	28	38	29	53	84
97	43	42	30	44	47	48	27	38	29	53	50
98	42	43	30	44	47	49	28	39	29	53	50
99	42	43	31	44	46	49	28	39	29	53	50
100	42	43	31	44	47	48	28	38	29	53	50

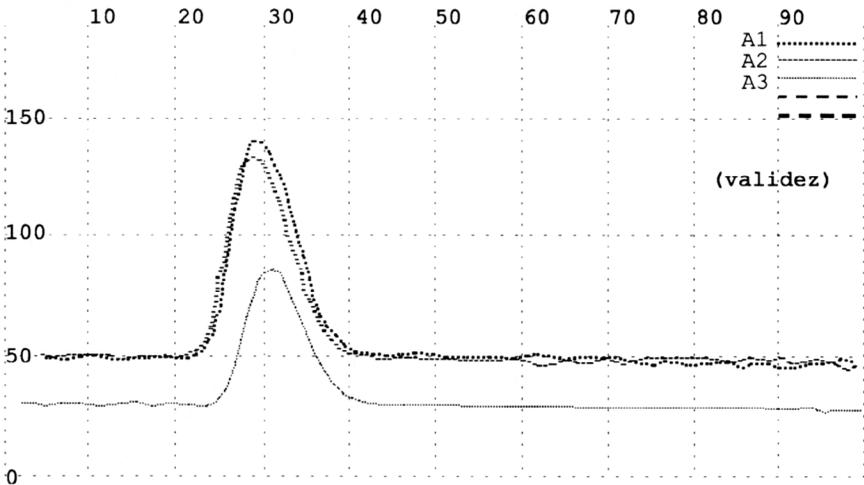
## Expérience 2

(en abscisses : nombre de cycle de 11 acquisitions, en ordonnées : niveau de la pollution de 0 à 255)

**Document 6** : progression de la pollution dans les différentes lignes



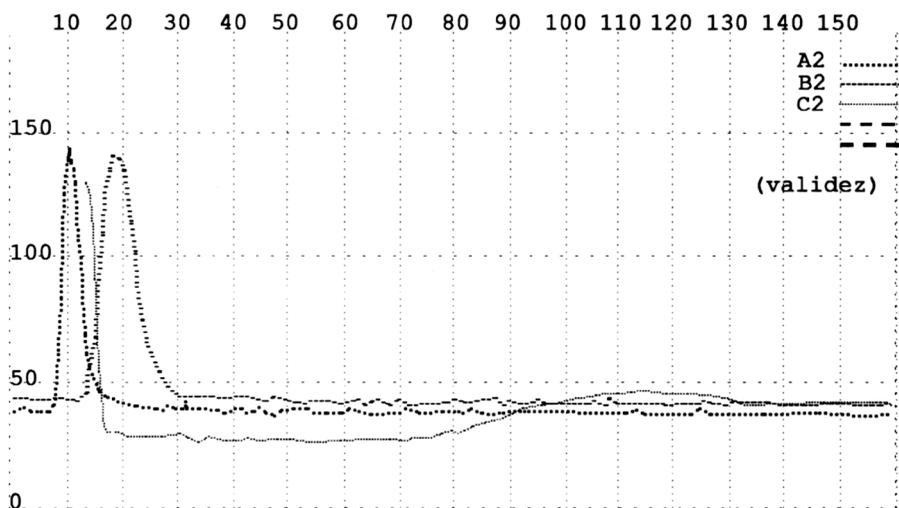
**Document 7** : pollution au niveau des capteurs d'une même ligne



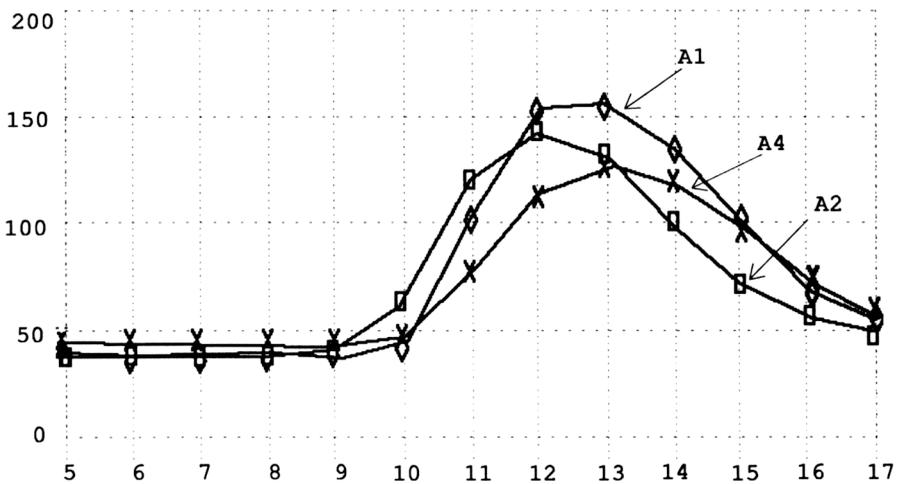
**Expérience 2**

(en abscisses : nombre de cycle de 11 acquisitions, en ordonnées : niveau de la pollution de 0 à 255)

**Document 8** : progression de la pollution dans les différentes lignes



**Document 9 :** pollution au niveau des capteurs d'une même ligne (tracé obtenu après transfert dans une base de données)



**Document 10 : carte d'isopollution (situation sans puisage)**