

UNIVERSITE DE PARIS VI

DIPLÔME D'ÉTUDE
APPROFONDIE
D'OCÉANOGRAPHIE BIOLOGIQUE

IMPACT DE LA CENTRALE THERMIQUE
DE CORDEMAIS SUR LES CIVELLES DE LOIRE

ÉTUDE PRÉLÉMINAIRE SUR SITE
ET EN LABORATOIRE

par Hélène DE PONTUAL

Soutenu le 20 septembre 1982

Jury : MM. les Pr BOUGIS - Président
NIVAL - Membre
SOYER - Membre

Stage réalisé du 15 mars au 30 juillet 1982
au laboratoire Effets biologiques des Nuisances
à l'Institut scientifique et technique
des Pêches maritimes

Je remercie Messieurs LASSUS et ELIE qui m'ont
accueilli et conseillé au cours de ce stage.

Mes remerciements vont également à Mademoiselle MIOSSEC
et à Messieurs LE DEAN, BOCQUENE et TRUQUET du Laboratoire
Effets Biologiques des Nuisances pour l'aide pratique qu'ils
m'ont apportée sur le terrain comme au laboratoire.

o

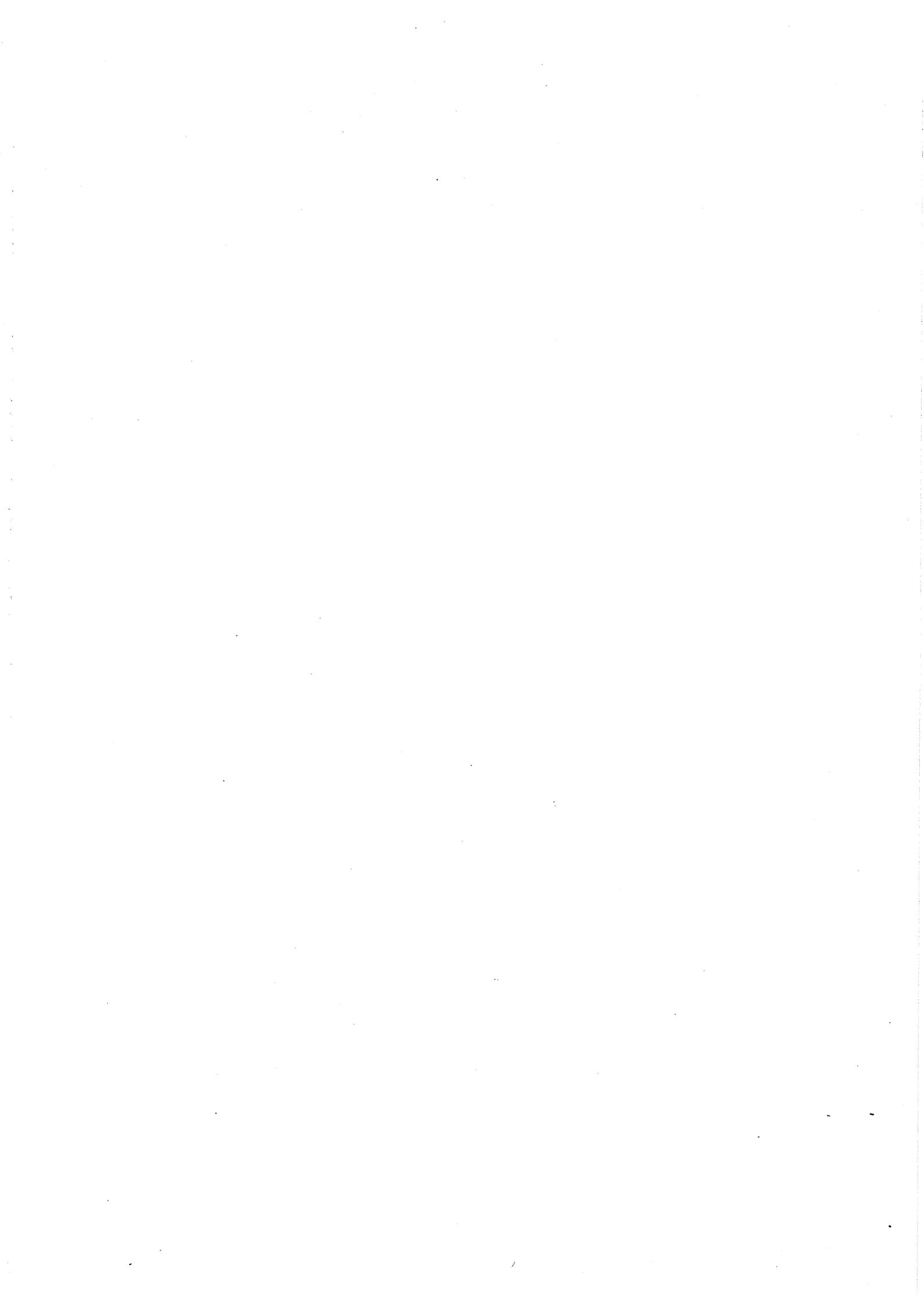
o o

SOMMAIRE

I - GENERALITES	2
II - ETUDES SUR LE SITE DE CORDEMAIS	2
1 - Présentation du site	2
1.1 - Position géographique	2
1.2 - Caractéristiques hydrologiques de la Loire au niveau de Cordemais	3
1.3 - La centrale de Cordemais : caractéristiques et impacts	3
2 - Etudes sur le site de Cordemais	5
2.1 - Détermination du temps de transit dans le circuit de refroidissement - Etude de survie des civelles ayant transité dans les installations	6
2.1.1 - Matériel et méthode	6
2.1.2 - Résultats et discussion	6
2.2 - Pêche au rejet de la tranche n° 1	7
2.2.1 - Matériel et méthode	7
2.2.2 - Résultats et discussion	8
2.3 - Pêche en Loire et dans le bras de Cordemais	10
2.3.1 - Matériel et méthode	10
2.3.2 - Résultats et discussion	10
3 - Conclusion	11
III - RESISTANCE THERMIQUE DES CIVELLES : ETUDE EXPERIMENTALE	13
1 - Action de la température	13
1.1 - Température et physiologie des organismes	13
1.2 - Optimum thermiques - températures léthales - température critique maximale	13
1.3 - Tolérance aux variations combinées de la température et d'autres facteurs	14
2 - Résistance thermique de la civelle : état de la question	15
3 - Chocs thermiques en laboratoire	15
3.1 - Matériel et méthode	16
3.1.1 - Dispositif expérimental	16
3.1.2 - Traitements particuliers aux diverses expériences	16
3.2 - Résultats et discussions	18
3.2.1 - Analyse globale de l'incidence de l'intensité du choc thermique (ΔT) sur la mortalité	18
3.2.2 - Analyse globale de l'influence du temps d'exposition	19
3.2.3 - Etude de la mortalité en fonction du stade de développement	20

3.2.4 - Incidence de chocs thermiques répétés sur la mortalité	23
3.2.5 - Incidence de l'état physiologique sur les potentialités de résistance thermique	24
3.2.6 - Influence d'un choc salin précédent un choc thermique	24
3.3 - Conclusion	25
4 - Suivi de croissance de civelles ayant subi un ou plusieurs chocs thermiques	26
4.1 - Matériel et méthode	26
4.2 - Résultats et discussion	27
4.2.1 - Civelles élevées en eau douce	27
4.2.2 - Civelles élevées en eau saumâtre à 15 ‰	30
4.3 - Conclusion	31
IV - CONCLUSION GENERALE	32

BIBLIOGRAPHIE



INTRODUCTION

L'importance économique de la civelle en Loire n'est plus à démontrer. Cette région est en effet à la base de 50 % de la production française qui s'élève à 2 000 t environ (ELIE, communication personnelle). La prédation croissante exercée par l'homme (pêche, construction d'ouvrages industriels, modifications de l'hydrodynamisme des bassins versants, pollutions diverses) conduit à la nécessité d'une gestion de cette ressource.

Il semble, dans ce cadre, important de définir le niveau de perturbations des phénomènes migratoires engendrées par le développement actuel et futur des centrales thermiques classiques ou nucléaires.

La centrale de Cordemais, actuellement en extension, exerce un impact encore peu étudié sur la montée des civelles (sur ce seul site, des pêcheurs professionnels ont relevé une importance relative du nombre de civelles blanches (1)). Des études expérimentales sur le terrain et au laboratoire doivent permettre de mieux cerner les problèmes inhérents à cette installation et aux futures implantations dans cet estuaire.

A la complexité des phénomènes migratoires (ponctuels, annuels et pluriannuels) vient se joindre celle des différents niveaux d'action d'une centrale thermique sur le milieu aquatique environnant, support de cette migration.

Ce travail limité dans le temps et situé en fin de saison migratoire ne peut donc prétendre appréhender les problèmes de façon globale. Il s'attache plus particulièrement à l'étude au laboratoire de la résistance thermique des civelles à court et moyen terme en intégrant quelques uns des paramètres mis en lumière sur le terrain. Il permet en outre de dégager certains axes de recherches indispensables à la visualisation correcte des effets exercés par de tels ouvrages.

(1) Les civelles deviennent "blanches" ou opalescentes lorsque leur mucus s'opacifie. Ce phénomène traduit un état physiologique défaillant aboutissant le plus souvent à la mort.

I - GENERALITES

L'anguille européenne (*Anguilla anguilla*, Linné 1758) est un Poisson Téléostéen Anguilliforme appartenant à la famille des Anguillidae.

C'est une espèce amphibiotique dont le cycle biologique est bien connu dans ses grandes phases grâce en particulier aux travaux de SCHMIDT (1906, 1922).

Il peut se résumer brièvement en cinq étapes fondamentales (fig. 1, A1) :

- ponte et migration larvaire dénatante transocéanique,
- migration anadrome et colonisation des aires de développement,
- croissance dans les zones littorales et continentales,
- migration catadrome ou dévalaison des individus en voie de maturation sexuelle,
- migration génésique transocéanique.

La phase de migration anadrome correspond au stade civelle de l'anguille. Elle a retenu et retient encore l'attention de nombreux chercheurs (BERTIN, 1952 ; DEELDER, 1960 ; CREUTZBERG, 1961). ELIE (1979) étudie plus particulièrement les phénomènes migratoires dans l'estuaire de la Loire. Leur perturbation par les rejets de divers ouvrages industriels dont la centrale de Cordemais reste cependant un problème assez mal étudié sur lequel il convient de se pencher.

II - ETUDES SUR LE SITE DE CORDEMAIS

1 - Présentation du site

1.1 - Position géographique

A égale distance de Nantes et St Nazaire, la centrale est située dans la section intermédiaire de l'estuaire interne de la Loire.

Elle est construite sur l'île de la Calotte devenue presque île par suite du comblement partiel du bras de Cordemais qui fait office de canal de rejet (cf A2).

1.2 - Caractéristiques hydrologiques de la Loire au niveau de Cordemais

La salinité varie en moyenne en année normale de 5 à 20 g/l (fig. 2, A3).

La température moyenne de l'estuaire varie d'environ 6°C (décembre-janvier) à 23°C (juillet) avec des fluctuations quotidiennes de ces valeurs pouvant atteindre $\pm 5^\circ\text{C}$. Un modèle mathématique donne les probabilités de se trouver pour un mois considéré à une température donnée (tabl. 1, A3).

Le débit fluvial moyen annuel est de 825 m³/s. Les étiages moyens sont de 117 m³/s (estimés à 150 m³/s à Cordemais d'après EDF (1979)). En étiage extrême le débit peut n'être que de 43 m³/s (en 1949).

La marée se définit, comme dans tous les estuaires, en deux composantes principales :

- la marée dynamique qui se traduit par la pénétration de l'onde de marée. Elle entraîne à Cordemais une variation du niveau de l'eau de 5 m (en vive eau)
- la marée de salinité résultant de la pénétration du flot d'eau de mer vers l'amont de l'estuaire.

La zone de transition entre l'eau douce et l'eau de mer est appelée front de salinité. Sa situation est fonction notamment du débit fluvial. Pour la Loire en débit moyen, il se situe au niveau de Cordemais.

1.3 - La centrale de Cordemais : caractéristiques et impacts

C'est une centrale de type classique qui comporte actuellement trois tranches thermiques ; une de 600 MW et deux de 700 MW. Les travaux d'extension sont relatifs à deux tranches de 600 MW chacune.

La réfrigération fonctionne en circuit ouvert.

La salinité des eaux pompées étant relativement faible, le problème des salissures marines ne se pose pas et l'utilisation de la chloration ne s'avère pas nécessaire.

L'impact de la centrale peut se définir grossièrement en deux composantes.

. Impact sur l'hydrologie (cf A4, A5)

La centrale prélève actuellement 79 m³/s à pleine charge. La mise en service des tranches 4 et 5 portera le débit de réfrigération total à 125 m³/s (EDF, 1979). Si l'on se réfère aux débits fluviaux mentionnés précédemment, le prélèvement de la centrale est loin d'être négligeable.

En ce qui concerne l'échauffement des eaux trois aspects sont à considérer :

- l'échauffement entre la prise et le rejet. Pour une tranche de 600 MW il est de l'ordre de 8°C (EDF, 1979)
- la recirculation directe (liée à la montée des eaux chaudes le long de la rive droite et dont l'effet maximal se fait sentir une heure après la renverse du courant). L'échauffement qui en découle est estimé à 0,7 °C en morte eau et 2,3°C en vive eau (EDF, 1979)
- la recirculation différée correspond à l'échauffement général de l'estuaire : actuellement 1,1°C sur une zone de 24 km (EDF, 1979).

Compte tenu des possibilités de variations de charge et de dilution des rejets, il est prévu que la température ne dépasse pas 30°C en sortie du bras de Cordemais (EDF, 1979). Cette norme n'est cependant pas toujours respectée surtout en été pour de faibles débits de la Loire.

Concernant l'impact sur l'hydrodynamisme local, les données font défaut. Il serait intéressant pourtant de connaître les vitesses de courant au rejet ainsi qu'à la sortie du bras de Cordemais.

. Impact sur l'environnement aquatique

Des sources de dommages potentiels définies par COUTANT (1970), sont à retenir pour le site considéré :

- une élévation de la température ayant des effets directs et indirects (action sur le métabolisme, la croissance, les maladies, la prédation)
- des effets mécaniques et de pression sur les organismes passant dans les pompes et entraînés dans le circuit de refroidissement
- des dommages au niveau des prises d'eau (chocs sur les grilles de protection)
- une réduction de la quantité d'oxygène dissous dans l'eau réchauffée
- une perturbation de la circulation d'eau dans l'aire des rejets
- la combinaison de ces effets dont les dommages associés peuvent être plus importants que la somme de chacun d'eux (synergie).

Si l'on considère l'impact biologique des seuls effluents chauds, on reconnaît deux modes d'action : le choc thermique et l'atteinte chronique :

- le choc thermique résulte de la brusque augmentation de température à laquelle peuvent être soumis les organismes qui passent à travers les tubes des condenseurs ou qui se trouvent dans la nappe la plus chaude à la sortie de l'émissaire
- l'atteinte chronique concerne, d'une manière générale, les espèces séjournant dans la zone des rejets à plus ou moins grande distance de l'émissaire.

2 - Etudes sur le site de Cordemais

Les études d'impact de la centrale concernant la civelle reposent essentiellement sur des recherches effectuées par Aquacop (1978) sur le site du Pellerin. ELIE (1980) montre l'inadéquation de la comparaison des deux sites du fait notamment de leurs caractéristiques hydrologiques très différentes. Cette étude extrêmement brève et, qui plus est, effectuée en fin de saison

migratoire (1) ne peut prétendre résoudre les problèmes propres au site de Cordemais. Seuls quelques points ont pu être abordés.

2.1 - Détermination du temps de transit dans le circuit de refroidissement
Etude de survie des civelles ayant transité dans les installations

2.1.1 - Matériel et méthode

La méthode choisie est celle de marquage-recapture. La technique de marquage par colorants vitaux semble la plus appropriée à ce type de matériel biologique. CANTRELLE (1981) conseille l'utilisation du rouge neutre en vue de recapture à court terme : un marquage à la concentration de 1/100 000 pendant cinq heures n'est pas toxique du moins à court terme. Cette étude prévoyant une recapture quasi immédiate, une concentration de 1/200 000 a été employée. Deux essais en laboratoire n'ont pas montré de mortalité significative par rapport aux lots témoins.

Cinq kilogrammes de civelles colorées (soit environ 20 000 individus) ont été injectés en deux fois au niveau du tambour de filtration de la tranche n° 1. Elles ont été en partie repêchées au rejets de cette même tranche (cf A2 et photo n° 2 A, A33).

2.1.2 - Résultats et discussion

. Temps de transit

A partir des deux essais une courbe de recapture en fonction du temps (t) écoulé après l'injection (t₀) a pu être établie (fig. 4, A6).

Le temps de transit de la première civelle apparue en surface au rejet est de trois minutes. Un pic de recapture apparaît à t₀ + 10 mn.

Le temps de transit de l'eau dans le circuit de refroidissement est de 175 secondes (EDF, 1979). Il semble d'après ces résultats que celui des civelles soit plus important.

(1) L'arrivée des civelles dans l'estuaire de la Loire débute au mois d'octobre de l'année en cours et se termine au mois de mai ou juin de l'année suivante avec des maxima de montée en janvier-février et mars (ELIE, 1979).

Selon CANTRELLE (1981), des civelles marquées au rouge neutre sont incapables de résister plus de 60 secondes à un courant de 45 cm/s. La vitesse de l'eau dans le circuit est certainement très supérieure à cette valeur.

Une question se pose alors : le circuit de refroidissement comporte-t-il des zones (pompes, parois rugueuses...) susceptibles de retenir temporairement l'ichthyofaune ? Il faut signaler que le choc mécanique du transit a entraîné une mortalité immédiate de 0,6 % des individus repêchés (1) (tête sectionnée, colonne vertébrale brisée) alors que les civelles n'ont pas subi de passage au travers du tambour de filtration.

. Survie des civelles colorées ayant transité dans la centrale
(température en Loire : 10°C ; température au rejet : 15,8°C)

Deux lots de 200 et 80 civelles, respectivement, ont été rapportés au laboratoire dans des sacs plastique humidifiés, gonflés d'oxygène pur, et mis en survie. L'étude de la mortalité en fonction du temps montre qu'elle est supérieure à 50 % dès le premier jour (fig. 5, A6). De telles expériences ne manquent pas d'intérêt et doivent être reconduites. Il faudrait cependant s'attacher à tester préalablement au laboratoire :

- les effets coloration/choc thermique par rapport à des témoins subissant un choc thermique seul
- la résistance des individus colorés et non colorés aux conditions de transport.

2.2 - Pêche au rejet de la tranche n° 1

Cette étude se propose de suivre l'évolution et si possible de quantifier le passage des civelles dans le circuit de refroidissement en fonction de la marée d'une part, du cycle jour/nuit d'autre part.

2.2.1 - Matériel et méthode

Le matériel de pêche se compose de deux tamis à civelles d'un maillage de 1 000 μ équipés de volucompteurs. Un filet de même maillage muni d'un collecteur sert à la récupération de la faune associée (flets, mulets, amphipodes en particulier).

(1) Environ 2,5 % des individus injectés.

Deux séries de pêche ont été effectuées les 23.03.82 et 1.04.82. Cinq kilogrammes de civelles colorées ont été injectés dans le circuit de refroidissement le 1.04.82 à 2 heures (PM + 3 h).

2.2.2 - Résultats et discussion

Deux civelles colorées ont été repêchées au rejet le 2.04.82 à 0 h 15 soit 22 heures environ après leur premier passage dans le circuit. Ceci tend à confirmer l'hypothèse des passages répétés (dits recyclages) des mêmes individus dans les installations.

Les figures 6 et 7 (A7) montrent l'évolution de la densité des civelles "indigènes" au rejet en fonction du temps. Les relevés du marégraphe de Cordemais permettent de recalculer ces résultats par rapport à l'évolution de la marée.

L'examen des courbes obtenues montre :

- un passage plus important la nuit que le jour (du double au triple)
- un pic de forte densité en fin de flot avec une chute de densité en début de jusant.

De nombreux chercheurs se sont intéressés aux facteurs influençant l'intensité migratoire. Parmi ceux-ci, le rythme tidal journalier et le moment du cycle nyctéméral correspondant à la marée montante jouent un rôle de premier ordre. Les civelles "lèvent" surtout en période de flot ; au jusant elles tendent à disparaître de la colonne d'eau et demeurent à proximité du fond (DEELDER, 1952 ; CREUTZBERG, 1961 ; TESCH, 1971 ; ELIE, 1979). La migration a lieu en général de nuit sauf dans les zones très turbides. Ceci entraîne des mouvements migratoires intenses quand la marée montante coïncide avec l'obscurité.

Le passage des civelles dans le circuit de refroidissement suit donc les modalités générales de la migration.

L'intensité migratoire est fonction, dans une certaine mesure, du coefficient de marée : les migrations sont importantes en marée de vive eau (JELLYMAN, 1979 ; ELIE, 1979). Les résultats de ces deux pêches montrent que

ce seul facteur n'est pas déterminant. En effet la densité des captures du 23.03.82 (coeff. 69-76) semble moins importante que celle du 1.04.82 (coeff. 48-46). Ceci est à mettre en relation avec l'influence, non étudiée ici, d'épiphénomènes locaux tels que la direction des vents par rapport à l'axe de l'estuaire, la couverture nuageuse, la turbidité des eaux.

L'observation de la figure 7 permet de noter un phénomène intéressant à savoir l'obtention de pics de recapture 2 à 4 heures après la pleine mer. Ils sont dus à un phénomène de double marée, fréquent en Loire, qui entraînerait soit un décalage du pic migratoire vers le jusant soit un phénomène de double pic. La trop courte durée des prélèvements ne permet pas de conclure.

En assimilant les courbes de densité à des courbes en "cloche" et en intégrant les densités de capture dans le temps, sur des cycles complets de marées, il devrait être possible d'obtenir une approche quantitative du passage des civelles à travers les installations.

L'application de cette méthode aux résultats obtenus n'est pas envisageable pour plusieurs raisons :

- la plupart du temps il n'a pas été possible, pour des raisons techniques, de mettre en évidence le pic de migration dans sa totalité
- les résultats porteraient sur une moyenne de deux pêches seulement, en fin de saison migratoire, et pour des conditions climatiques et hydrologiques qui ne sont pas nécessairement favorables à la migration
- la méthodologie employée s'avère trop imprécise : les critères de positionnement des filets au rejet ne sont pas définis. L'écoulement de l'eau n'étant pas homogène, il est fort improbable que la répartition spatiale des civelles le soit. Un phénomène de berge pourrait notamment jouer sur cette répartition. Les civelles en effet, s'orientant par le biais de leur ligne latérale, montrent une tendance à nager le long des rives.

Enfin la durée optimum des traits de pêche n'est pas précisée. Un colmatage relativement rapide des filets peut introduire un biais important dans les estimations.

2.3 - Pêche en Loire et dans le bras de Cordemais

Le but de cette expérience est de déterminer s'il existe ou non une différence significative des taux de mortalité de civelles pêchées en Loire aux abords de la centrale et dans le bras de Cordemais.

2.3.1 - Matériel et méthode

Le 26.02.82 quatre traits ont été réalisés dont la localisation apparaît sur la figure 9 (A10).

Les individus pêchés ont été mis en survie au laboratoire. Pour chacun des lots, la mortalité est étudiée en fonction du temps.

L'expérience de survie terminée, tous les individus ont été conservés dans le formol. Le stade pigmentaire de chacun d'entre eux a été ultérieurement déterminé. La phase civelle du cycle vital de l'anguille est en effet couramment divisée en deux stades V et VI (1) eux même subdivisés en différents sous stades. Cette classification due à GILSON (1908), SCHMIDT (1906 et 1909) et STRUBBERG (1913), reprise par ELIE (1979), repose, en grande partie, sur l'évolution des dépôts pigmentaires.

Un tableau récapitulatif en résume les principales caractéristiques (cf A8, A9).

2.3.2 - Résultats et discussion

Les lots semblent différer entre eux quant à l'état pigmentaire des individus qui les composent (fig. 10, A10).

A noter cependant une certaine similitude des lots n° 2 et n° 4 prélevés tous deux entre la sortie du bras de Cordemais et la centrale.

(1) Les stades I à IV correspondent aux leptocephales, le stade VII aux jeunes anguillettes.

Les courbes des mortalités en fonction du temps pour chacun des prélèvements (fig. 11, A11) montrent :

- un taux de mortalité très élevé en début d'expérience
- une mortalité tous stades confondus beaucoup plus importante pour le lot n° 3 issu du canal de rejet que pour les autres lots.

Une analyse de la mortalité par stade fait apparaître :

- une grande fragilité du stade VB quelque soit le lot considéré et maximale pour le lot n° 3
- une moindre fragilité des stades plus âgés, en particulier des stades VI A1 et VI A3
- une mortalité des individus du lot n° 3 toujours supérieure à celle des autres lots.

Les prélèvements n'étant pas homogènes dans leur structure, la présence d'un grand nombre de stades VB dans le lot n° 3 pourrait expliquer le taux élevé de mortalité que présente cet échantillon.

Si l'on fait abstraction des stades VB d'une part, VB et VI A0 d'autre part, le stade VI A0 présentant lui aussi une certaine fragilité, la différence des taux de mortalité demeure significative (tabl. 4, A12). On peut donc émettre l'hypothèse d'une moindre survie des civelles pêchées dans le bras de Cordemais par rapport à celles pêchées en Loire, ce qui confirmerait les observations des pêcheurs.

Les raisons de ce phénomène sont très certainement complexes. En première approche, on peut remarquer que les individus du lot n° 3, dont une partie a, probablement, subi un transit à travers le circuit de refroidissement proviennent tous d'un biotope perturbé par un échauffement thermique important avec les conséquences directes et indirectes qui peuvent en découler.

Les autres lots peuvent être, eux, formés de deux contingents d'origine différente : des individus ayant séjourné dans la zone de rejet, d'autres provenant directement de l'aval du bras.

Le comportement migratoire local des civelles reste un point à préciser, probablement essentiel dans la compréhension des phénomènes.

L'étude de la mortalité en fonction du lieu de prélèvement doit être reconduite sur toute une saison de pêche, tenant compte de l'influence de facteurs environnants (température de l'eau, ΔT de la centrale...). Il serait bon de travailler sur une durée de trait constante en étudiant préalablement son influence sur la mortalité.

3 - Conclusion

Deux phénomènes se dégagent de cette étude :

- il existe des possibilités de recyclage des individus ayant déjà transité dans les installations
- le stade de développement de l'individu joue probablement un rôle quant à l'étendue de ses potentialités de résistance thermique.

Une étude au laboratoire devrait permettre de mieux appréhender les problèmes inhérents à ces deux facteurs. D'un point de vue global les expériences conduites sur le site de Cordemais ne constituent qu'une approche très incomplète de l'impact exercé par cette installation. Elles peuvent permettre cependant de dégager quelques axes de recherche à savoir :

- l'utilisation de la technique de marquage par coloration pour préciser, en collaboration étroite avec les professionnels, le devenir de civelles ayant transité dans le circuit. Ceci permettrait d'évaluer leur "temps de résidence" dans le canal de rejet et orienterait ainsi une recherche sur les chocs thermiques en laboratoire ;

- l'étude "in situ" de l'impact immédiat du transit par la même méthode et en déterminant préalablement le biais, s'il existe, introduit par le marquage ;

- la nécessité, si l'on veut quantifier le passage dans le circuit de définir une méthodologie fiable : conditions de pêche à la prise et au rejet notamment.

De façon plus générale il faut envisager (ELIE, 1980) :

- une étude sur plusieurs cycles annuels. La masse des arrivées n'est en effet pas équivalente d'une année à l'autre et présente une variation cyclique (BERTIN, 1951)

- une étude saisonnière fine, le phénomène de montée n'étant constant ni dans sa forme ni dans son intensité au cours de la saison, la montée elle-même n'étant pas constante dans les caractéristiques des individus qui la composent (ELIE, 1979).

III - RESISTANCE THERMIQUE DES CIVELLES : ETUDE EXPERIMENTALE

1 - Action de la température

1.1 - Température et physiologie des organismes

La membrane cellulaire fonctionne à la manière d'un filtre permettant la régulation de la composition de la cellule et ce dans des limites de température relativement étroites. Les cellules exposées à une augmentation de température présentent une plus grande viscosité protoplasmique ; au delà d'un certain seuil, cet effet devient irréversible et entraîne la mort.

Une augmentation de température entraîne, dans les limites compatibles avec la vie, une augmentation des processus métaboliques, de la rapidité de l'influx nerveux, du rythme cardiaque, du rythme respiratoire, de la consommation d'oxygène.

Un changement rapide de température - 10°C ou moins - entraîne une réponse physiologique rapide 2 à 5 mn après le choc (CHAVIN, 1964) se traduisant notamment par des changements ioniques dans le sang et les tissus, une diminution des globules rouges et surtout des globules blancs, une augmentation de sécrétion de corticostéroïdes (PICKFORD et al., 1971). Les corticostéroïdes ayant une action sur le développement morphogénétique, l'augmentation de leur taux dans le sang peut induire des anomalies dans le développement.

1.2 - Optimum thermique - températures létales - température critique maximale

L'optimum thermique est la température à laquelle le taux des processus métaboliques atteint un maximum avec le fonctionnement normal du système (GUNTER, 1957). Il comporte une marge de plusieurs degrés et est habituellement plus près du maximum que du minimum tolérable.

Deux méthodes sont habituellement utilisés pour établir la résistance thermique d'une espèce considérée :

- la première détermine la température critique maximale (ou CTM), définie à l'origine par COWLES et BOGERT (1944) comme étant le point où la locomotion devient désorganisée et l'animal incapable d'échapper à des conditions menaçant sa survie. Cette méthode fait appel à une technique d'élévation rapide de la température avec un taux variable d'augmentation de la température en fonction du temps (°C/mn)

- la deuxième méthode utilise une technique de chocs thermiques instantanés. L'étude du temps de résistance à des températures finales variées, pour une gamme donnée de température d'acclimatation, (BRETT, 1952), conduit à la notion de température létale définie comme étant celle qui provoque la mort d'un pourcentage déterminé d'individus du lot étudié. La référence la plus généralement employée est la température létale 50 %. Pour une température d'acclimatation donnée, la température correspondant à une TL 50 constante pour un temps d'exposition indéfini (sans augmentation du taux de mortalité si le temps d'exposition augmente) délimite une zone de tolérance et une zone de résistance thermiques (BRETT, 1952 ; COUTANT, 1970).

Les températures létales représentent des extrêmes entraînant ou risquant d'entraîner la mort. Il existe avant l'apparition de celle-ci pour des gammes de température inférieures voisines une série de phénomènes (perte de l'équilibre, de la mobilité, arrêt de la respiration...) traduisant une diminution de la vitalité des individus qui peuvent ainsi succomber indirectement à l'excès thermique même si celui-ci n'atteint pas sa valeur maximale.

Il est donc intéressant d'étudier à quelles températures apparaissent des troubles physiologiques marqués tels que la cessation des mouvements spontanés et la perte d'irritabilité (ou coma thermique).

1.3 - Tolérance aux variations combinées de la température et d'autres facteurs

La tolérance thermique d'une espèce est sous contrôle génétique et la température létale peut être utilisée comme un facteur taxonomique (FRY, 1957). Cependant, quelque soit la température d'acclimatation, l'expression phénotypique est sujette à des modifications fréquemment réversibles induites

par des facteurs divers tels que la salinité, la photopériode, le régime alimentaire, le stade de développement, les cycles saisonniers et journaliers (HUTCHINSON, 1976).

2 - Résistance thermique de la civelle : état de la question

Malgré le grand nombre de travaux entrepris sur la résistance thermique des poissons (ANCELLIN et al, 1973 ; TALMAGE et COUTANT, 1978, 1979 et 1980 ; CRAVENS, 1981) peu de données concernent la résistance thermique des anguilles et des civelles notamment.

SADLER (1979) étudie chez les adultes la C.T.M. et les seuils supérieur et inférieur de tolérance par la méthode des chocs thermiques progressifs.

LECOMTE-FINIGER (1981) détermine la TL 50 à 96 heures de civelles soumises d'une part à des chocs thermiques progressifs, d'autre part à des chocs thermiques instantanés et dresse ainsi un profil thermique de la civelle.

Cette étude ne tient pas compte d'une fragilité-différentielle possible des individus testés selon leurs stades de développement pigmentaire. Les conditions expérimentales ne font pas non plus intervenir des phénomènes mis en évidence par une étude de terrain, à savoir : recyclages dans les installations, variations de salinité dans les zones estuariennes comprises dans les limites saisonnières du seuil de salinité. La recherche d'éventuels phénomènes sublétaux n'est pas non plus entreprise.

Le comblement partiel de ces lacunes est l'objet de la présente étude.

3 - Chocs thermiques en laboratoire

Ces expériences se proposent d'observer la résistance thermique des civelles en fonction :

- du stade de développement des individus testés
- du nombre de chocs thermiques subis par un même individu (phénomène de recyclage)
- du passage eau saumâtre-eau douce (choc salin) précédent immédiatement un choc thermique
- de l'état physiologique des animaux testés (animaux alimentés ou non alimentés).

3.1 - Matériel et méthode

3.1.1 - Dispositif expérimental

Il est schématisé par la figure 12 (A13). L'eau de la réserve, maintenue à la température d'acclimatation ($T_a = 16^\circ\text{C}$) des individus testés, est entraînée par une pompe dans un échangeur thermique. Elle y est soumise à une augmentation de température ΔT . Les civelles sont introduites dans le circuit par un entonnoir. A la sortie elles sont récupérées dans des cuves en acier placées dans un bain-marie thermorégulé à la température finale $T_a + \Delta T$. Les cuves sont maintenues à cette température pendant 15 ou 25 mn, durée des deux paliers thermiques étudiés. Le retour à la température initiale, assuré automatiquement, est obtenu en douze heures (la programmation de la descente thermique a pour support un film cinématographique se déroulant devant une cellule photoélectrique. Celle-ci commande la rotation d'un micro moteur associé à un thermomètre à contact. La régulation thermique est obtenue par l'utilisation alternative des sources froide et chaude. Les échanges thermiques entre bain-marie et contenu des cuves sont favorisés par une agitation constante des deux milieux).

Les témoins subissent le même traitement que les autres lots en étant constamment maintenus à la température initiale de 16°C .

En fin de manipulation les civelles sont transvasées dans des cristallisoirs de 3 l et replacées en milieu thermorégulé à 16°C (photo n° 5, A35) La survie est étudiée pendant 96 heures.

3.1.2 - Traitements particuliers aux diverses expériences

. Résistance thermique en fonction du stade de développement.

Les individus sont examinés sous la loupe binoculaire et triés en fonction de leur stade de pigmentation dans les trois jours précédant l'expérimentation. Une vérification sur des échantillons prélevés au hasard a lieu immédiatement avant d'engager les tests.

. Administration d'un choc salin précédent un choc thermique

Les civelles acclimatées à une eau de salinité 15 ‰ sont immergées pendant 5 minutes en eau douce avant de transiter dans le dispositif expérimental.

. Recyclages

Ils consistent à refaire passer dans le circuit une ou deux fois selon le cas des individus ayant déjà subi un premier choc thermique. Les différents chocs ont lieu à douze heures d'intervalle.

. Tests sur des civelles alimentées

L'alimentation, avec une nourriture vivante (*Artemia salina*) commence dix jours avant l'étude de résistance thermique. La ration alimentaire journalière se situe aux environs de 25 % du poids vif des individus. Ce taux est retenu pour l'utilisation d'aliments naturels (CTGREF, 1973). Les civelles, toutes de stade A2 et plus, sont pesées au cinquième jour d'alimentation en vue d'une étude de croissance, postérieure aux chocs thermiques subis. Au huitième jour d'alimentation, l'examen des contenus stomacaux par transparence montre une réplétion du tube digestif pour 90 % environ des individus observés.

Quatre séries d'expériences parmi celles effectuées sont ici présentées dont la réalisation technique n'a pas posé de problèmes notables.

Série I - Résistance thermique en fonction du stade de développement.

Série II - Résistance thermique en fonction du stade de développement
Influence d'un recyclage

Série III - Civelles de stades A2 et plus, non alimentées
- choc salin précédent un choc thermique
- influence d'un ou plusieurs recyclages

Série IV - Civelles de stades A2 et plus, alimentées
a - choc salin précédent un choc thermique
b - choc thermique seul
Influence d'un recyclage

Le traitement statistique des résultats obtenus repose sur l'utilisation de tests G. Ces tests à deux ou trois dimensions permettent de mesurer l'indépendance ou l'interaction de plusieurs facteurs entre eux (SOKAL et ROHLF, 1969).

3.2 - Résultats et discussions

Deux des facteurs étudiés se retrouvent dans toutes les séries d'expériences : l'intensité du choc thermique subi et la durée du temps d'exposition. Ils font donc l'objet d'analyses globales, séparées de l'étude des résultats propres à chaque manipulation.

La référence utilisée dans le traitement des données est la mortalité à 96 heures.

On remarque, d'une façon générale, que les mortalités apparaissent essentiellement dans les 24 heures consécutives aux chocs thermiques. Ce phénomène déjà observé par LECOMTE-FINIGER (1981) confirme les observations de terrain.

3.2.1 - Analyse globale de l'incidence de l'intensité du choc thermique (ΔT) sur la mortalité

. Comportement

Il reste normal pour ΔT égal à 12°C. Pour un ΔT de 15°C on observe une perturbation de la nage et une tétanisation de quelques individus. Un ΔT de 17°C entraîne une absence de nage spontanée chez tous les individus. Parmi ceux ci certains, tétanisés, se couchent sur le flanc. De 20 à 80 % des individus selon le cas montrent une perte d'irritabilité (coma thermique).

. Lésions consécutives aux chocs thermiques

Aucune lésion externe n'apparaît pour des individus ayant subi un choc de 12 ou 15°C. Lorsque celui ci s'élève à 17°C on observe chez certains individus :

- une dilatation cérébrale (photo n° 3)
- des hémorragies multiples (cérébrale, orbitaire, hépatique) et une dilatation de l'aorte ventrale
- une torsion anormale de la colonne vertébrale (photo n° 4).

Les individus comateux sont conservés en survie jusqu'à leur mort. Le seul critère de vie est le battement cardiaque dont le rythme est d'ailleurs très diminué par rapport à la normale.

La plus longue survie en coma thermique est de 17 jours. Dans le traitement des résultats, les comateux à 96 heures sont considérés comme potentiellement morts.

. Analyse des résultats

L'étude des figures 13 et 15 (A14, A16) schématisant les résultats des séries d'expériences I, III et IV_a montrent en première analyse un même type de réponse aux stress thermiques pour chacune des séries. La létalité semble n'apparaître que pour un ΔT supérieur à 15°C.

Les résultats de tests G à deux dimensions montrent effectivement (tabl. 5, A17) que l'hypothèse d'indépendance de la mortalité et du choc thermique subi ne peut être rejetée que pour un ΔT égal à 17°C. Ceci quelque soit le temps d'exposition considéré (15 ou 25 mn). Il apparaîtra ultérieurement que le taux de mortalité observé pour un tel ΔT n'est pas constant mais fonction de plusieurs paramètres.

D'un point de vue général la létalité n'apparaît, pour des animaux acclimatés à 16°C, qu'au delà d'une température de 31°C.

COUTANT (1973) montre que le seul concept de température létale est insuffisant. Un stress thermique peut entraîner une importante vulnérabilité à la prédation bien avant que des températures létales ne soient atteintes (fig. 16, A17). A cet effet un facteur correctif aux données de résistance thermiques a été proposé qui les minore de 2°C.

3.2.2 - Analyse globale de l'influence du temps d'exposition

Les résultats de tests G à trois dimensions montrent (tabl. 6, A18) que l'influence des temps d'exposition étudiés n'est significative que pour un ΔT de 17°C.

La finalité de telles expériences n'est pas tant de démontrer s'il existe ou non une dépendance d'un effet vis à vis d'une cause possible mais d'essayer, dans l'affirmative, de quantifier l'effet de cette cause.

A ce titre on peut étudier l'influence du temps d'exposition en quantifiant la différence en pourcentage existant pour un même ΔT entre la mortalité observée pour un palier de 15 mn et celle observée pour un palier de 25 mn. En cumulant les résultats des séries I, III et IV on peut établir des intervalles de confiance sur cette différence (fig. 17, A19). Un intervalle entièrement positif n'est obtenu que pour un ΔT de 17°C, cette différence pouvant alors atteindre 18 %.

Les séries I, III et IV ne constituant pas, à proprement parler, des réplicats, aucune valeur absolue ne peut être attribuée à ces résultats. Les temps d'exposition étudiés ont une influence variable selon les conditions expérimentales. Le facteur primant sur la mortalité se trouve être de toute façon dans ces expériences le ΔT . La démonstration en est faite par la comparaison des G obtenus dans le tableau 6 (A18).

A noter que les temps d'exposition utilisés jusqu'à présent et étudiés ici sont choisis de façon purement arbitraire. Si l'on considère uniquement le transit dans le circuit ce temps doit être diminué ; si l'on considère en plus le temps de stationnement dans la zone de rejet ce temps doit être augmenté. L'examen de la figure 18 (A19) laisse supposer que des temps d'exposition plus longs à des températures élevées entraîneraient des taux de mortalité beaucoup plus importants. SCHUBEL et al (1978) recommandent d'étudier les mortalités sur une échelle de temps d'exposition variant de quelques minutes à plus de deux heures.

3.2.3 - Etude de la mortalité en fonction du stade de développement

Série I

L'examen de la figure 13 (A14) laisse apparaître en première approximation une mortalité différentielle selon le stade.

Cette hypothèse est confirmée par un test G à trois dimensions étudiant la mortalité en fonction du stade de développement et du choc thermique subi (tabl. 7, A20). Il apparaît que la mortalité est fonction du stade quelque soit le temps d'exposition considéré.

Les résultats du tableau 8 (A20) montrent qu'aucun des stades ne présente de réponse significative à un choc inférieur ou égal à 15°C.

Le tableau 9 (A21) montre que tous les stades, par contre, réagissent à un ΔT de 17°C et ce pour des paliers de 15 et 25 mn. La réponse au stress thermique apparaît d'autant plus significative que l'on s'adresse respectivement au stade A_2 , A_0 et A_1 .

Une étude de la mortalité en fonction des stades pris deux à deux montre (tabl. 10, A21) que les stades A_0 et A_2 ont une réponse statistiquement proche. Le stade A_1 , se détachant donc des deux autres, apparaît comme étant le plus fragile.

Le tableau 11 (A21) montre enfin que pour un ΔT de 17°C la durée du temps d'exposition n'a pas d'influence significative sur la mortalité.

Les résultats obtenus à savoir : une plus grande fragilité du stade VI A_1 peuvent s'expliquer par un changement de l'état physiologique de l'animal à cette étape de sa vie. Le stade VI A_1 est le dernier stade d'inanition de la phase civelle. L'arrêt de la nutrition se produit en effet lors de la métamorphose leptocéphale en civelle. La reprise de l'alimentation peut apparaître dans la nature dès le stade VI A_2 (BERTIN, 1951).

On note d'ailleurs que le tube digestif et la denture sont fonctionnels à partir des stades VI A_1 ou VI A_2 .

Il aurait été intéressant d'établir pour chaque stade étudié la courbe "dose-réponse" selon la méthode préconisée par BLISS (1949) faisant appel à une transformation Log-Probit (transformation sur les probabilités cumulées) des données. Cette méthode très fiable n'est pas applicable ici. Elle utilise, en effet, une technique, de régression linéaire et nécessite plusieurs points échelonnés sur l'échelle d'anamorphose (échelle des ordonnées correspondant aux pourcentages de mortalité). Cela aurait nécessité dans le cas présent l'étude d'un ΔT intermédiaire (16°C par exemple) pour le stade VI A_1 , de ΔT plus importants ($18-20^{\circ}\text{C}$) pour les stades VI A_0 et VI A_2 mais n'était pas techniquement réalisable. A titre indicatif les résultats obtenus portés simplement sur un diagramme Log-Probit montre une TL 50 à 96 heures de :

- 33° pour le stade VI A_0
- 32° pour le stade VI A_1
- $> 33^{\circ}$ pour le stade VI A_2

Ces chiffres n'ont qu'une valeur très relative et doivent être précisés par d'autres études.

Pour LE BAUT et al (1980) la TL 50 à 96 heures évolue aux environs de 31°C.

LECOMTE (1981) situe la TL 50 à 96 heures des civelles atlantiques à 34°C. En fait seuls les stades VI A₂ et plus semblent montrer une telle résistance thermique.

Le stade VB n'a pu être testé car non représenté dans les lots étudiés. Ceci constitue une lacune importante de cette étude si l'on considère les résultats obtenus sur le terrain. Ce stade apparaissait en effet comme le moins résistant de tous ceux étudiés.

Série II

Une deuxième série d'expérience a été réalisée aux mêmes fins d'étude. Les résultats apparaissent sur la fig. 14 (A15).

Des ΔT de 12 et 15°C ont été appliqués. Les réponses à ces stress apparaissent totalement anarchiques du moins pour les stades VI A₀ et VI₁. Une très forte mortalité est observée chez les témoins. Elle peut être plus élevée que chez les individus testés. Ce phénomène est probablement dû à un mauvais état sanitaire du lot étudié.

Ceci indique clairement qu'il est souhaitable dans la mesure du possible de travailler sur des individus dont les conditions de pêche, de conservation en bassin, de transport enfin sont connues et optimisées. Ceci ne peut être réalisé quand les lots étudiés, comme dans le cas présent, sont achetés chez des mareyeurs.

Une analyse poussée des résultats obtenus ne peut être engagée du fait du biais ainsi introduit. On peut noter cependant que la mortalité des témoins des stades VI A₂ et plus est relativement faible par rapport à celle des autres témoins. Ce qui indique de nouveau et d'un point de vue plus général, de plus grandes potentialités de résistance des stades âgés. L'étude de la mortalité différentielle observée en fonction du stade de développement n'a pu être poursuivie du fait de l'absence de stades jeunes parmi les individus disponibles.

3.2.4 - Incidence de chocs thermiques répétés sur la mortalité

Série III : civelles non alimentées (à jeun depuis 28 jours) de stades A₂ et plus.

Les résultats apparaissent sur la figure 15 A (A16).

Le taux de mortalité augmente très rapidement pour des individus soumis à un ΔT de 17°C et laisse présumer d'une faible extension de la zone de résistance.

Une analyse statistique montre que les recyclages sont sans influence sur la mortalité pour des ΔT inférieurs ou égaux à 15°C (tabl. 12, A22).

Le tableau 13 (A22) montre pour un ΔT de 17°C une dépendance de la mortalité, vis à vis du nombre de choc thermique subi, dépendance moindre cependant que celle observée vis à vis du temps d'exposition.

Il est intéressant d'essayer de quantifier l'impact d'un ou plusieurs recyclages sur la résistance thermique. Ceci peut être réalisé en notant la différence de mortalité observée pour chaque ΔT et pour un même palier, entre les individus ayant subi 1 ou 2 chocs thermiques, 1 ou 3 chocs thermiques, 2 ou 3 chocs thermiques. En cumulant pour chaque ΔT les résultats obtenus pour chacun des paliers on peut obtenir un intervalle de confiance sur cette différence (fig. 19, A23).

Il apparaît encore que l'influence du recyclage s'exerce au delà seulement d'un ΔT de 15°C. Par contre cette influence, quand elle existe est loin d'être négligeable puisque la différence de mortalité observée se situe entre 28,5 et 31,5 % (chevauchement des intervalles (1) et (2)). Il apparaît en outre que l'influence d'un deuxième recyclage (3 chocs thermiques) n'est pas significative.

Ceci laisse penser que les effets ne sont pas obligatoirement cumulatifs. Si certains individus, affaiblis par un premier choc, ne résistent pas à un deuxième choc, d'autres (en très petite minorité) se montrent résistants à 3 chocs consécutifs.

Série IVa : civelles alimentées de stade A₂ et plus

L'examen de la figure 15 B (A16) montre d'emblée que le nombre de chocs thermiques n'a pas d'influence sur la mortalité.

3.2.5 - Incidence de l'état physiologique sur les potentialités de résistance thermique

Les séries III et IVa (fig. 15 A et B, A16) diffèrent entre elles par le seul fait de l'alimentation ou la non alimentation des individus testés.

On remarque immédiatement des différences notables entre les résultats obtenus. La résistance thermique des civelles alimentées a très nettement augmenté par rapport à celle des civelles non alimentées. Elle est, par ailleurs, comparable à celle observée pour les individus de stade A₂ + de la série I qui n'ont pas non plus subi de jeun avant d'être testés. HOAR et COTTLE (1952) montrent que la résistance thermique est fonction du régime alimentaire et notamment de sa richesse en lipides.

3.2.6 - Influence d'un choc salin précédent un choc thermique

Ce facteur est étudié dans les séries III et IV. Deux types de témoins ont été établis : témoins conservés en eau saumâtre à 15 ‰ et témoins subissant un choc salin c'est à dire un passage en eau douce 5 mn avant le transit dans le circuit expérimental. Un test G à deux dimensions montre qu'il n'existe pas de mortalité différentielle significative entre les deux séries de témoins ($G = 2.13$ à comparer avec un $\chi^2 [1] = 3.84$). Le choc salin ne joue donc pas en lui même sur la mortalité.

Il peut par contre exister des effets de synergie, le travail fourni pour l'osmorégulation pouvant amoindrir temporairement la résistance thermique de l'animal. Ceci peut être mis en évidence par comparaison de deux séries de manipulations identiques au facteur choc salin près. Les séries IVa et IVb (non représentée car la mortalité y est totalement nulle) jouent partiellement ce rôle. La série IVb en effet n'étudie pas - faute d'un nombre suffisant d'individus disponibles - l'influence d'un ΔT égal à 17°C. Un test G, comparant ces deux séries, effectué pour des $\Delta T \leq 15^\circ\text{C}$, montre qu'il n'existe entre elles pas de différence significative : $G = 1.56$ à comparer avec un $\chi^2 [1] = 3.84$.

L'euryhalinité des Anguillidae est un phénomène bien connu. Le passage en eau douce est accompagné chez la civelle d'une diminution de la teneur en eau avec une accumulation de graisses et une augmentation des électrolytes (PARRY, 1966). Un changement de salinité est suivi par un changement progressif de la concentration sanguine. Pour une anguille adulte 50 heures sont nécessaires pour que la concentration du sang se stabilise à sa valeur normale.

Pour des poissons euryhalins, la différence de tolérance thermique n'excède généralement pas 1°C (BRETT, 1970).

L'influence d'un choc salin précédant immédiatement un choc thermique a été peu étudiée. Si l'osmorégulation se passe sans problème, lorsqu'il n'existe pas de stress supplémentaire, il peut ne pas en être de même dans le cas inverse. Mac LEESE (1956) travaillant sur le homard américain montre que la combinaison de trois stress (température, salinité, oxygène) entraîne une érosion des limites de la zone de tolérance (fig. 20, A24).

3.3 - Conclusion

Si l'on se réfère aux données publiées par COUTANT (1977), les civelles d'*Anguilla anguilla* se situent parmi les poissons qui présentent les plus fortes potentialités de résistance thermique. Au regard des résultats obtenus la létalité n'apparaît, en effet, d'une manière générale qu'au delà de 31°C. Il existe cependant une fragilité différentielle selon les stades, le stade VI A₁ étant, parmi ceux étudiés, le plus vulnérable.

Pour les stades âgés (VI A₂ et plus), seul l'intensité du choc thermique semble déclencher une mortalité. L'importance de celle-ci est alors fonction de deux des paramètres étudiés : - le temps d'exposition
- le nombre de recyclages subis.

Le degré d'action de ces deux paramètres est, lui-même, fonction, et de façon très large, de l'état physiologique des individus testés.

L'utilisation de telles données dans un modèle conceptuel prédictif de l'impact d'une centrale thermique doit cependant faire l'objet d'autres recherches

Les limites de cette étude sont, en effet, nombreuses :

- le type de réponse obtenus pour les stades âgés n'est pas nécessairement le même chez des stades jeunes

- le rôle de la température d'acclimatation n'est pas étudiée. La résistance thermique en est cependant fonction. La DL 50 change en effet de \pm 1°C pour une température d'acclimatation de 3°C en plus ou en moins (FRY, 1971)

- deux paliers thermiques seulement ont été étudiés

- le nombre de facteurs étudiés simultanément est tel qu'il existe une grande complexité dans la définition des niveaux et degrés d'action voire d'interaction de chacun d'eux.

La base fondamentale de travail enfin devrait être l'établissement systématique, à partir de plusieurs replicats, de courbe de résistance thermique selon le modèle proposé par BRETT (1952). Pour SCHUBEL et al (1978) elles seules ont une valeur prédictible effective (cf fig. 21, A24).

4 - Suivi de croissance de civelles ayant subi un ou plusieurs chocs thermiques

L'impact des effluents chauds sur l'environnement aquatique ne doit pas être seulement mesuré en termes de létalité. Une recherche d'éventuels phénomènes sublétaux doit être aussi entreprise. A ce titre une étude de croissance de civelles ayant subi un stress thermique a été engagée.

4.1 - Matériel et méthode

Le suivi de croissance s'exerce sur les individus des séries IVa (eau douce) et IVb (eau saumâtre à 15 ‰).

Les civelles sont élevées dans des aquariums de 25 l scindés en deux compartiments n° 1 et 2 accueillant des individus ayant subi pour un même ΔT un ou deux chocs thermiques (photo n° 6, A35).

La charge biotique ne dépasse jamais celle, préconisée, de 0,4 kg/m² (ELIE et DAGUZAN, 1976).

La température d'élevage est de 16°C, température qui, si elle est inférieure à la température optimum d'élevage de 17°C pour MATSUI (1972), 25°C pour ELIE et DAGUZAN (1976), doit autoriser une croissance telle que la mise en évidence d'un éventuel phénomène sublétal soit possible.

La photopériode est constante : 12 N/12 J.

La salinité des bacs recueillant les individus élevés en eau saumâtre est périodiquement vérifiée et oscille autour de 15 ± 1 ‰.

Tous les lots sont nourris en fin d'après-midi. La ration alimentaire journalière évolue au cours du temps : elle est maintenue à environ 25 % du poids vif des individus.

L'élimination des déchets est assurée par une filtration chimique (carbone actif) et un changement d'eau périodique.

Les animaux sont pesés individuellement à la précision de 0,01 g. Les pesées ont toujours lieu à 16°C pour limiter les stress engendrés par cette manipulation.

4.2 - Résultats et discussion

4.2.1 - Civelles élevées en eau douce

Les résultats bruts de cette expérience sont consignés dans le tableau 14 (A25). Le système de séparation des aquariums en deux compartiments s'est avéré partiellement inefficace (problème d'étanchéité des joints). Des transferts de civelles ont eu lieu d'un compartiment à l'autre. L'influence du recyclage sur la croissance ne peut donc être étudiée en toute rigueur. Une tendance semble cependant se dégager : la moyenne des poids individuels observés dans chacun des lots est toujours supérieure dans le compartiment n° 1 (1 seul choc thermique).

Le traitement des résultats ne tient pas compte de l'effet possible du recyclage. Il est basé sur un cumul des données pour chaque ΔT .

La comparaison de l'évolution des poids moyens entre les différents lots (fig. 22, A26) montre une divergence de la moyenne des témoins par rapport à celles des autres lots. Cette divergence semble devenir sensible à partir du 50ème jour d'élevage.

L'évolution des poids globaux suit celle des poids moyens. L'évolution de la mortalité au cours de l'élevage (fig. 22) semble différer d'un lot à un autre.

D'une façon générale elle ne concerne que de petits individus d'un poids moyen de $0.19 \text{ g} \pm 0.05 \text{ g}$.

Abstraction faite de celle immédiatement consécutive au choc thermique subi (entre le 10ème et le 20ème jour d'élevage), la mortalité en pourcentages cumulés se répartie comme suit : - $\Delta T = 0$: 3.77 % - $\Delta T = 15$: 11.30 %
- $\Delta T = 12$: 5.21 % - $\Delta T = 17$: 6.1 %

Une mortalité différée pourrait donc apparaître chez les individus ayant subi un choc thermique de 15°C (le lot " ΔT 17" serait moins affecté par ce phénomène, les individus les plus faibles n'ayant pas survécu au stress imposé).

Le résultat d'un test G à deux dimensions ($\Delta T \times M$) montre cependant que l'hypothèse nulle d'indépendance de la mortalité observée et du choc subi correspondant ne peut être rejetée ($[G = 4.51] < [X^2_{0.05}[3] = 7.81]$).

Les histogrammes des figures 23 et 24 (A27 et 28) schématisent les distributions des poids individuels de chaque lot en début et en fin d'élevage. L'intervalle de classe I_C est calculé selon la méthode de GOULDEN (1952) pour laquelle I_C doit être inférieur au quart de l'écart type provisoire de la distribution. En début d'élevage, les intervalles ainsi calculés sont les même pour tous les lots et égaux à 0,03 g. En fin d'élevage I_C est égal à 0,07 g pour le lot témoin, 0,05 g pour les autres lots. Pour une plus grande facilité de comparaison des histogrammes la valeur retenue est de 0,05 g.

En début d'élevage les lots apparaissent relativement homogènes. En fin d'élevage on assiste à l'écrasement de la distribution des poids individuels, traduit par une augmentation du nombre de classes. Ceci apparaît le plus nettement dans le lot témoin.

Les variations individuelles de croissance apparaissent environ trois semaines après le début de l'alimentation. En l'absence de tris des individus elles s'accroissent avec le temps et aboutissent à une distribution tri ou quadri-modale des fréquences de taille au bout d'un mois d'élevage (MULLER-FEUGA, 1973).

En première approximation on peut remarquer que les individus présentant des potentialités de croissance quasi nulles (poids individuel inférieur ou égal au poids moyen au départ de l'élevage) sont relativement nombreux dans les lots témoins et " ΔT 12". Ils ont été éliminés suite au stress thermique dans les autres lots.

Les plus fortes potentialités de croissance s'observent dans le lot témoin qui seul présente des poids individuels supérieurs à 1 g.

L'hypothèse d'une diminution des potentialités de croissance consécutive à un choc thermique n'est donc pas à rejeter en 1ère analyse.

Les distributions expérimentales obtenues ont été comparées aux distributions normales théoriques correspondantes par un test χ^2 au seuil de 1 % d'erreur.

Il apparaît que ces distributions ne suivent pas une loi de LAPLACE-GAUSS, la divergence étant très importante en fin d'élevage.

L'analyse statistique des résultats obtenus doit donc s'appuyer sur l'utilisation de tests non paramétriques.

Les résultats des tests de MANN et WITNEY comparant les lots deux à deux apparaissent dans le tableau 15 (A29). L'hypothèse nulle testée est l'égalité des distributions. Au seuil de 5 % d'erreur elle est acceptée pour tous les lots en début d'élevage.

En fin d'élevage il apparaît que les distributions des témoins et ΔT 12 d'une part, témoins et ΔT 17 d'autre part, ne sont pas égales, à l'inverse de celles des témoins et ΔT 15. Ceci semble à première vue difficilement explicable. L'hypothèse que l'on peut avancer s'appuie sur la perte d'information du test utilisé qui s'attache en effet aux rangs pris par les différentes valeurs et non à ces valeurs elles-mêmes.

Une analyse globale par la méthode de KRUSKALL et WALLIS (analyse de variance appliquée à des variables non paramétriques) eut été préférable mais n'a pu être réalisée pour des raisons techniques.

A titre indicatif on peut préciser que les résultats d'une analyse de variance ne montrent pas de différence significative entre les lots. Aucune des deux conditions d'utilisation de ce test, à savoir normalité des distributions et égalité des variances, n'était cependant réalisée.

Il semble donc difficile de conclure, sans autre élément de jugement, à une incidence effective d'un stress thermique sur les potentialités de croissance.

4.2.2 - Civelles élevées en eau saumâtre à 15 ‰.

Les résultats de cette étude sont fortement biaisés par le déclenchement, au 30ème jour d'élevage, d'une infection bactérienne généralisée. Les données de QUERELOU (1974) sur la pathologie des civelles permettent de supposer que l'élevage a été atteint d'aéromonose ou furunculose de l'anguille. Il s'agit d'une infection septicémique contagieuse de caractère épizootique. Dans sa forme aiguë on observe un syndrome hémorragique : les nageoires anales puis pectorales et dorsales se congestionnent. L'anus se dilate et fait saillie. De nombreux ulcères évoluent sur le corps (photo n° 7, A35).

L'agent pathogène est *Aeromonas hydrophila*, bacille mobile gram négatif, oxydase positif, aéroanaérobie.

Des prélèvements de régions atteintes d'individus malades ont permis la mise en évidence d'une prolifération de germes gram négatif. Une étude plus poussée de l'étiologie de l'agent pathogène en cause n'a pu être engagée au laboratoire. Le fait que *Pseudomonas sp* prospère dans une eau de salinité inférieure à 0.8 ‰ (SCHAPERCLAUS, 1954) élimine l'hypothèse d'une pseudomonose dont le syndrome est pratiquement identique à l'aéromonose.

Le vecteur déclanchant de cette épidémie semble avoir été la mauvaise qualité de l'eau de mer puisque ce seul facteur différenciait les deux élevages en eau douce et eau de mer. Le traitement de la maladie a consisté en :

- une élimination des malades
- une désinfection des bacs d'élevage
- un traitement de l'eau au chlore
- l'administration à tous les individus de bains thérapeutiques de furanace à 5 ppm pendant 1 heure.

Pour un des bacs d'élevage (AT 15) l'introduction d'une lampe à ultra violet dans le système de filtration qui semble avoir été particulièrement efficace (cf évolution de la mortalité, fig. 26, A31).

A cette aéromonose supposée, s'est superposée une atteinte de certains individus de saprolégniose : parasitose infectieuse et irrégulièrement contagieuse due à une infestation localisée ou généralisée par des champignons de la famille des saproligniacés dont le plus fréquent chez l'anguille est *Saprolegnia parasitica* (COKER).

Les symptômes consistent en une modification comportementale : agitation puis affaiblissement progressif. Des taches cotonneuses apparaissent, disséminées sur le corps. Elles représentent la partie extérieure des hyphes du parasite.

Selon EGUSA (1965) les saprolégnioses sont des maladies affectant secondairement les poissons. L'existence d'un état primaire favorable peut notamment résulter de lésions induites par l'action de bactéries.

La thérapeutique utilisée se résume à l'administration de bains médicamenteux (vert malachite à 0,5 ppm).

Les résultats bruts de cette étude apparaissent dans le tableau 16 (A30). Si l'on observe sur la figure 26 (A31) l'évolution des poids moyens on remarque que se dégage la tendance déjà observée en eau douce : la moyenne des poids individuels des témoins est supérieure à celle des autres lots. Ceci ne peut être le fait du petit nombre d'individus ayant survécu, entraînant ainsi une diminution de la charge biotique. Le lot ΔT 12 montre en effet un poids moyen très inférieur pour un taux de mortalité supérieur (fig. 26, A31). Comme en eau douce la mortalité atteint préférentiellement les petits individus (0,21 g \pm 0,06 g). Le lot ΔT 15, subissant une moindre mortalité, conserve des classes de faibles poids individuels (cf histogrammes fig. 27, A32). La moyenne de ce lot est cependant supérieure à celle observée pour les ΔT 12. Il en découle qu'une comparaison des résultats obtenus serait inadéquate (témoins et ΔT 12 ont perdu leurs individus à faibles potentialités de croissance). Ceci montre d'autre part l'efficacité de la lampe U.V. utilisée et tend ainsi à confirmer l'hypothèse d'une origine bactérienne de la maladie.

4.3. - Conclusion

Le processus pathologique subi par l'élevage en eau saumâtre rend hasardeuse toute tentative de conclusion quant aux effets d'un stress thermique

sur la croissance dans les conditions étudiées. Il empêche d'autre part la comparaison des résultats obtenus pour les deux élevages. Concernant l'élevage en eau douce, deux tendances semblent se dégager :

- une mortalité différée des individus ayant subi une importante variation thermique
- de moindres potentialités de croissance chez les individus stressés.

Une analyse statistique des résultats obtenus ne permet pas de dégager clairement ces phénomènes.

Il semble donc difficile de conclure de façon certaine à un effet des stress thermiques sur la croissance. Rien ne permet cependant de rejeter cette hypothèse. De nouvelles études doivent s'attacher à lever cette incertitude et mettre en évidence, s'il existe, le rôle joué par les phénomènes de recyclage.

IV - CONCLUSION GENERALE

Les expériences de terrain conduites à Cordemais permettent de dégager certains axes de recherche quant à l'étude de l'impact de la centrale sur les civelles de Loire. La méthode de marquage-recapture doit faciliter :

- l'évaluation in situ de l'impact immédiat du transit (chocs thermiques et mécaniques)
- l'étude des phénomènes migratoires locaux dont la compréhension s'avère indispensable.

La quantification du passage dans le circuit de refroidissement doit s'appuyer sur des séries de pêche à la prise et au rejet et nécessite préalablement l'établissement d'une méthodologie fiable (critère de positionnement des filets, durée optimum des traits de pêche).

Les résultats de ces expériences renforcent l'hypothèse d'un recyclage des individus dans le circuit de refroidissement. Ce paramètre et celui possible d'un choc salin concomittant, intégrés dans une étude de résistance thermique au laboratoire, ne semblent pas avoir d'influence notable au-dessous d'un certain seuil. D'une façon générale les résultats de cette étude permettent de penser, dans les limites des expériences conduites, que le seul facteur élévation

thermique ne peut être incriminé dans les phénomènes de mortalités observés à Cordemais. Les variations de température entre la prise et le rejet (8 à 12°C en moyenne) ne sont en effet pas suffisantes pour provoquer une létalité significative.

Les études de résistance thermiques doivent être poursuivies si l'on considère le développement des centrales nucléaires. Celles-ci induisent en effet une pollution thermique importante puisque l'échauffement de l'eau du circuit de refroidissement peut alors atteindre 18°C (COUTANT, 1970). Les valeurs de telles études reposent sur l'établissement systématique de courbes "dose-réponses" intégrant des temps d'exposition suffisamment longs. L'influence de la température d'acclimatation sur les potentialités de résistance thermique doit aussi être étudiée. Il doit être tenu compte des caractéristiques biologiques de l'espèce : tous les stades civelles ne présentent pas les mêmes réactions aux stress imposés. La recherche d'éventuels phénomènes sublétaux doit enfin être poursuivie. Concernant les problèmes inhérents à une centrale classique telle que celle de Cordemais, une recherche doit être entreprise qui s'oriente vers l'étude des effets indirects engendrés par une élévation thermique :

- l'arrêt d'une centrale peut entraîner en hiver une chute de la température dans la zone de rejet créant ainsi une situation potentielle de choc thermique froid (COUTANT, 1977)

- l'augmentation de la température peut être à l'origine d'un fort développement de bactéries pathogènes pour certains organismes

- le transit en lui-même représente, et de façon constante, une succession de stress physiques dont l'effet ne peut être négligé (MARCY et al, 1978). Concernant la civelle, des lésions cutanées induites par le transit pourraient entraîner des mortalités différées importantes. L'intégrité de la peau est en effet nécessaire pour le maintien :

- . de la stabilité interne d'une part : un contrôle osmotique défaillant se produit si la couverture de mucus n'est plus intact (PARRY, 1966)
- . des capacités de résistance d'autre part, en particulier aux nombreuses parasitoses dont certaines peuvent entraîner des pertes considérables (QUERELLOU, 1974).

BIBLIOGRAPHIE

- ANCELLIN (J.), EUSTACHE (M.) et VILQUIN (A.), 1973.- Effet de l'élévation de la température du milieu sur la vie marine.- Etude bibliographique.- Laboratoire de radioécologie marine, CEA Centre de la Hague.
- AQUASCOP, 1978.- Passage des civelles au site du Pellerin (Loire Atlantique).- Rapport d'étude.
- BERTIN (L.), 1951.- Les anguilles.- Ed. Payot : 191 pages.
- BLISS (C.I.), 1938.- The determination of the dosage mortality curve from small numbers.- Quart. J. Pharm., 11 : 192-216.
- BRETT (J.R.), 1952.- Temperature tolerance in young Pacific *Salmon* genus *Oncorhynchus*.- J. Fish. Res. Bd. Canada, 9 : 265-309.
- 1970.- Temperature, fishes, functional responses. 515-560 in O. KINNE ed. Marine Ecology, Willey-interscience N.Y., Vol. 1. part 1
- BURTON (D.T.), ABELL (D.R.) and CAPIZZI (T.P.), 1979.- Cold shock : effect of rate of thermal decrease on Atlantic Menhaden.- Marine Poll. Bull. 10 : 347-349.
- CANTRELLE (I.), 1981.- Etude de la migration et de la pêche des civelles (*Anguilla anguilla*, L. 1758) dans l'estuaire de Gironde.- Thèse 3ème cycle CEMAGREF Bordeaux.- Université de Paris VI, 1981.
- CHAVIN (W.), 1964.- Sensitivity of fish to environmental alterations.- Proc. 7 th Great Lakes Conf. Great Lakes Res. Div. Publ. 11 : 54-67 in SCHUBEL et al., 1978.
- COUTANT (C.C.), 1970.- Entrainment and discharge canal effects.-C.R.C. Critical review in environmental control 1 : 341-381 in ANCELLIN, 1973.
- ✓ ——— 1973.- Effects of thermal shock on the vulnerability of juvenile salmonids to predation.- J. Fish. Res. Bd. Can. 31 : 351-354.
- 1977.- Cold shock to aquatic organism : guidance for power plant siting design and operation.- Nucl. Safety 18 : 329-342 in BURTON et al, 1979.
- 1977.^b Compilation of temperature preference Data.- J. Fish. Res. Bd. Can., 34 : 739-745.
- COWLES (R.B.), BOGERT (C.M.), 1944.- A preliminary study of the thermal requirements of desert reptiles.- Bull. Amer. Mus. Nat. Hist., 83 : 265-296 in SCHUBEL, 1978.
- CRAVENS (J.B.), 1981.- Thermal effects.- Literature review.- J. Wat. Poll. Cont. Fed., 53 : 949-964.

- CREUTZBERG (F.), 1961.- On the orientation of migrating elvers (*Anguilla vulgaris* Turt.) in a tidal area.- Neth. J. Sea. Res. 1 : 257-338 in ELIE, 1979.
- CTGREF, 1973.- Developpement de l'élevage de l'anguille en France.- CTGREF, 24 p. in ELIE et DAGUZAN, 1976.
- DEELDER (C.L.), 1952.- On the migration of the elvers (*Anguilla vulgaris* Turt.) at sea.- J. Cons. perm. int. Explor. Mer, 18 (2) : 187-218 in DEELDER, 1973.
- 1960.- The Atlantic eel problem.- Nature, London, 185 : 589-591 in DEELDER, 1973.
- 1973.- Exposé synoptique des données biologiques sur l'anguille *Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758).- Synopsis FAO - pêches - n° 80.
- EDF, 1979.- Centrale thermique de Cordemais, tranches 4 et 5.- Etude d'impact, Région d'Equipement Paris.
- EGUSA (S.), 1965.- The existence of a primary infections disease in the so-called "Fungus disease" in pond-reared Eels.- Bull. Jap. Sec. Scient. Fish. 31, 7 : 517-526 in QUERELLOU, 1974.
- ELIE (P.), 1979.- Contribution à l'étude des montées de civelles d'*Anguilla anguilla*, Linné (Poisson, Téléostéen, Anguilliforme) dans l'estuaire de la Loire.- Pêche, écologie, écophysiologie et élevage.- Thèse 3ème cycle.- Laboratoire de Zoologie générale et Ecophysiologie.- Univ. Rennes, 1979.
- 1980.- A propos des études concernant l'impact des centrales sur les civelles dans l'estuaire de la Loire.- Proposition d'un cadre préalable à un aménagement d'estuaire.- Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie (Service pêche et hydrobiologie)/C.R.E.B.S. rapport n° 18/78/1, 16 pages.
- 1976.- Alimentation et croissance des civelles d'*Anguilla anguilla* L. (Poissons Téléostéens Anguilliforme) élevées expérimentalement à diverses températures, au laboratoire.- Ann. Nut. Alim., 30 : 95-114.
- FRY (F.E.J.), 1957.- The lethal temperature as a tool in taxonomy.- Année biol., 33 : 205-213.
- 1971 The effects of environmental factors on the physiology of fish.- Fish Physiology, Academic Press New York, vol. IV : 1-98 in HOAR W.S. and RANDALL D.J. Ed.
- GILSON (G.), 1908.- L'anguille, sa reproduction, ses émigrations et son intérêt économique en Belgique.- Anns. Soc. r. zool. Malcol. Berg. 42, 7-58, in ELIE, 1979.

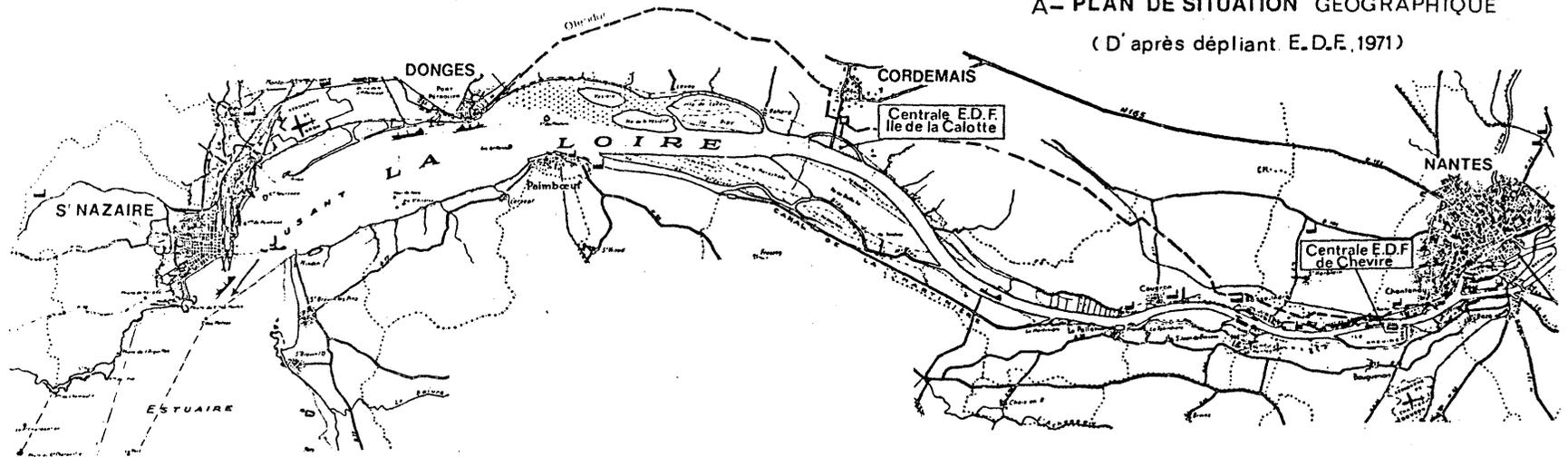
- GOULDEN (C.M.), 1952.- Methods of statistical analysis.- J. WILEY et SON eds
CHAPMAN et HALL London, 467 pages.
- ✓ GUNTER (G.), 1957.- Temperature in : Treatise on marine ecology and paleoecology,
J.W. HEDGPETH (Ed.) Vol. I Ecology Mem. geol. Soc. Am., 67 : 159-184.
- ✓ HOAR (W.S.) et COTTLE (M.K.), 1952.- Dietary fat and temperature tolerance of
goldfish.- Can. J. Zool., 30 : 41-48 in HUTCHINSON, 1976 .
- ✓ HUTCHINSON (V.H.), 1976.- Factors influencing thermal tolerance of individual
organisms. pp 10-26 in G.W. ESCH and R.W. Mac FARLANE Eds. Thermal
Ecology II.- ERDA Symposia series, conf. 750425.
- ✓ JELLYMAN (D.J.), 1979.- Upstream migration of glass-eels (*Anguilla spp*) in the
Waikato River.- N.Z.J. and Freshw. Res., 13 (1) : 13-22 in CANTRELLE,
1981 .
- ✓ LE BAUT (C.), LASSUS (P.) et MAGGI (P.), 1980.- Influence des chocs thermiques
sur la civelle.- Laboratoire Effets biologiques des nuisances (ISTPM).
- ✓ LECOMTE-FINIGER (R.), 1981.- Etude expérimentale de la résistance thermique des
civelles de Gironde et de Méditerranée.- Cahiers du laboratoire de
Montereau, 12 : 17-22.
- ✓ Mc LEESE (D.W.), 1956.- Effects of temperature, salinity and oxygen on the
survival of the American Lobster.- J. Fish. Res. Bd Canada, 13 : 247-272.
- ✓ MARCY (B.C.), BECK (A.D.) et ULACOWICZ (R.E.), 1978.- Effects and impacts of
physical stress on entrained organisms. pp 135-188 in J.R. SCHUBEL and
B.C. MARCY Eds. Power Plant Entrainment.- A biological assessment.
Academic Press, N.Y.
- ✓ MATSUI (I.), 1972.- Etude de l'anguille, élevage.- Koseicha Koseikaku (japonais)
vol. II : 285-737 in QUERELLOU, 1974.
- ✓ MULLER-FEUGA (A.), 1973.- L'élevage de la sériole du Japon.- Rapport scientifique
et technique, CNEXO, n° 15 in QUERELLOU, 1974.
- ✓ PARRY (G.), 1966.- Osmotic adaptation in fishes.- Biol. Rev., 41 : 392-444.
- ✓ PICKFORD (C.E.), STRIVASTAVA (A.K.), SCHLICHER (A.N.) et PANG (P.K.T.), 1971.-
The stress response in abundance of circulating Leucocytes in the kill
fish *Fundulus heteroclitus*.- J. Exp. Zool., 1966 : 89-96 in SCHUBEL
et al, 1978.
- ✓ QUERELLOU (J.), 1974.- Elevage des anguilles au Japon.- La pisciculture française.
n° 37 : 9-56.
- ✓ SADLER (K.), 1979.- Effects of temperature on the growth and survival of the
european eel, *Anguilla anguilla* L.- J. Fish. Biol., 15 : 499-507.

- SCHAPERCLAUS (W.), 1953.- Die Blumenkohlkrankheit der Aale und anderer Fische der Ostsee.- S. Fisch., 2 : 105-124 in DEELDER, 1973.
- SCHMIDT (J.), 1906.- Contribution to the life history of the eel (*Anguilla vulgaris*, Flem).- Rapp. P.V. Réun. Cons. perm. int. Explor. Mer, 5 : 137-264 in ELIE, 1979.
- 1909.- Remarks on the metamorphosis and distribution of the larval of the eel (*Anguilla vulgaris*, Turt.).- Meadr. Komm. Havunders., Ser. Fisk., 3 : 1-17 in ELIE, 1979.
- 1922.- The breeding places of the eel.- Phil. Trans. R. Soc., 211 : 179-208 in ELIE, 1979.
- SCHUBEL (J.R.), COUTANT (C.C.) and WOODHEAD (P.M.J.), 1978.- Thermal effects of entrainment : pp 19-93 in J.R. SCHUBEL and B.C. MARCY Eds Power Plant Entrainment.- A biological assessment. Academic Press, N.Y.
- SOKAL (R.R.) and ROHLF (F.J.), 1969.- Biometry.- The principles and practice of statistics in biological research.- W.H. Freeman & Cie, San Francisco, 776 p.
- STRUBBERG (A.), 1913.- The metamorphosis of elvers as influenced by outward conditions.- Medd. Komm. Havunders., Ser. Fisk., 4 : 1-11 in ELIE, 1979.
- TALMAGE (S.S.) et COUTANT (C.C.), 1978.- Thermal effects (litterature review).- J. Wat. Poll. Cont. Fed., 50 : 1514-1553.
- 1979.- Thermal effects (litterature review).- J. Wat. Poll. Cont. Fed., 51 : 1517-1554.
- 1980.- Thermal effects (litterature review).- J. Wat. Poll. Cont. Fed., 52 : 1575-1616.
- TESCH (F.W.), 1971.- Aufenthalt der Glasaale (*Anguilla anguilla*) an der südlichen Nordseeküste vor dem Eindringen in das Sübwasser.- Vie Milieu, sup. 22 : 381-392 in TESCH, 1977.
- 1977.- The eel, biology and management of anguillid eels.- Eds Chapman and Hall, 434 pages

ANNEXES

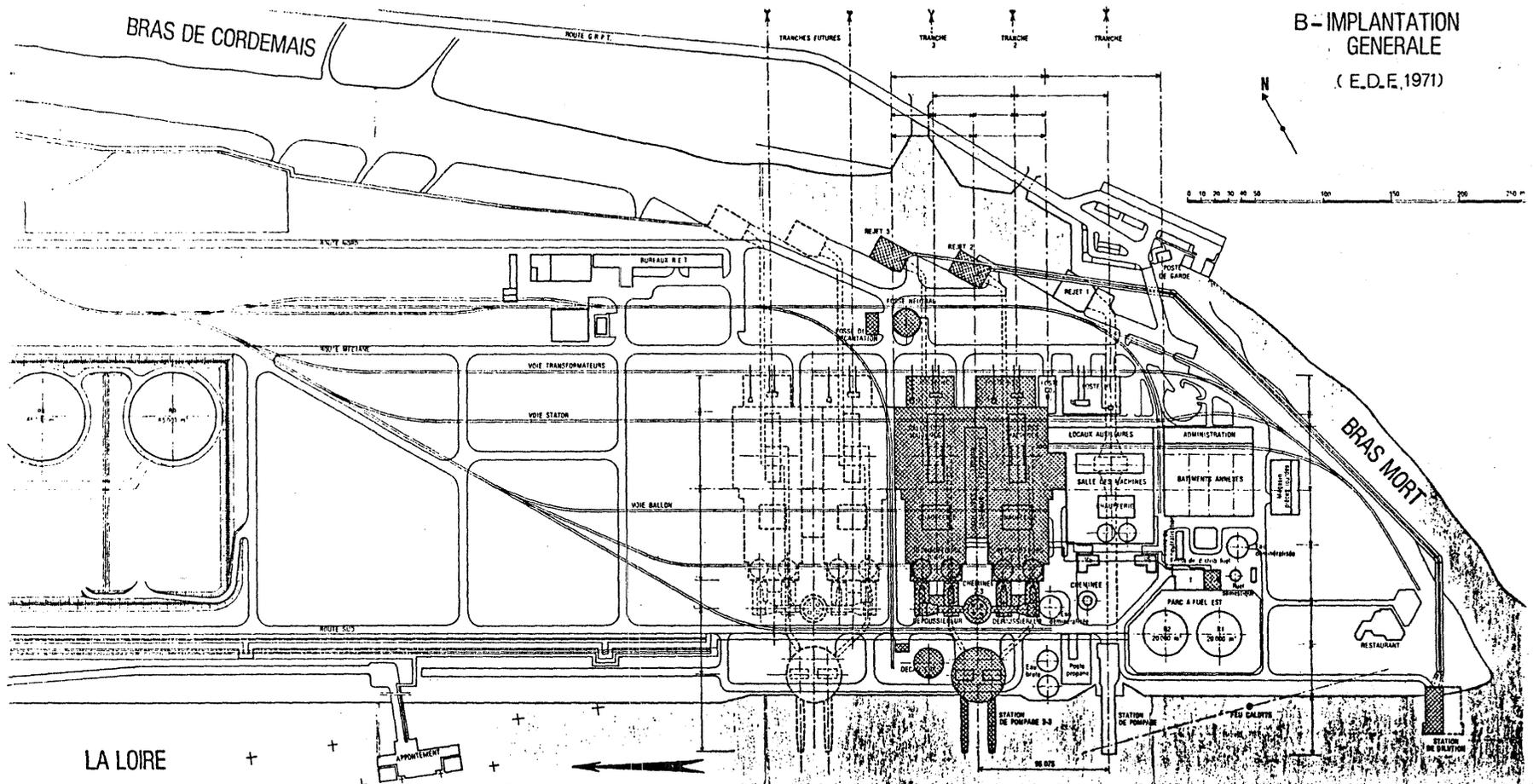
A- PLAN DE SITUATION GEOGRAPHIQUE

(D'après dépliant E.D.F. 1971)



B- IMPLANTATION GENERALE

(E.D.F. 1971)



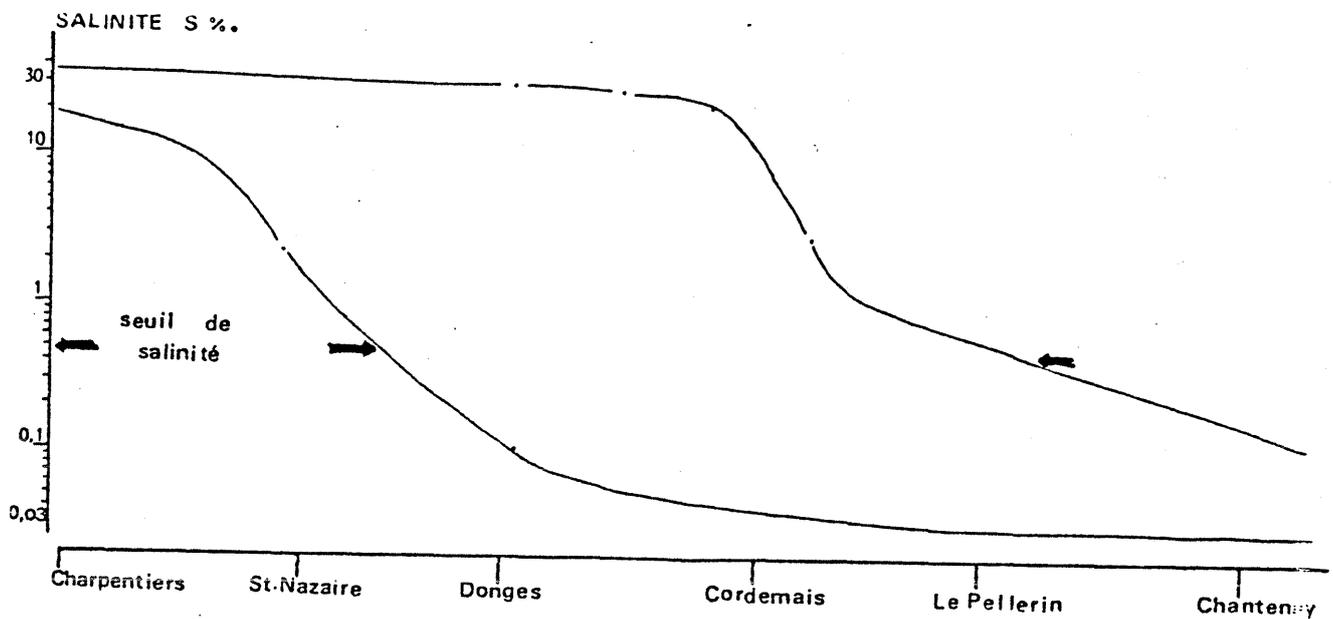


Fig. 2 - Répartition longitudinale des minima et maxima de salinité dans l'estuaire de la Loire d'après GALLENNE 1974. (in ELIE, 1979)

Tab.1 - Températures données par le modèle mathématique de la Loire (in E.D.F., 1979)

Un modèle mathématique a été mis au point pour simuler le régime thermique de la Loire. Calé sur des mesures réelles, il a donné les probabilités de se trouver entre deux températures données, pour un mois donné. Ces résultats sont consignés dans le tableau suivant où les probabilités sont exprimées en %. Les résultats sont arrondis de façon que les sommes en % soient égales à 100. Enfin les valeurs notées 0* sont inférieures à 0,5 %.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Nombre moyen de jours par an
0 < t < 2	10	3										8	7,2
2 < t < 4	13	8	3									13	10,8
4 < t < 6	26	17	10								4	20	21,6
6 < t < 8	33	36	21	1							17	33	43,2
8 < t < 10	17	29	24	13						2	31	21	39,6
10 < t < 12	1	7	27	17	0*					13	30	5*	28,8
12 < t < 14		0*	13	29	5				0*	20	17	0*	25,2
14 < t < 16			2	29	23	1			4	24	1		25,2
16 < t < 18			0*	10	31	8		0*	17	29			28,8
18 < t < 20				1	27	21	7	13	32	10			32,4
20 < t < 22					12	32	25	29	30	2			39,6
22 < t < 24					2	28	36	39	15				36
24 < t < 26						9	26	13	2				14,4
26 < t < 28						1	6	5					3,6
28 < t < 30							0*	1					< 1,8

Ce tableau de valeurs naturelles, reconstituées par calcul à NANTES - CHEVIRE peut être repris pour CORDEMAIS.

Il faut cependant préciser que compte tenu de l'expérience acquise pour la Gironde :

- la température doit être au niveau de CORDEMAIS légèrement plus faible qu'à NANTES CHEVIRE,
- la température de l'estuaire ne sera influencée par la mer que près de l'embouchure, c'est-à-dire très à l'aval de CORDEMAIS.

	tranche 1	tranches 2 et 3
condenseur		
- débit (m ³ /s)	24,7	2 x 17
- échauffement (°C)	8	12
réfr. auxil.		
- débit (m ³ /s)	0,3	2 x 1,5
- échauffement (°C)	5	3
dilution		
- débit (m ³ /s)	0	2 x 8,5
échauffement par tranche (°C)	8	7,7
globalement :		
- débit (m ³ /s)		79
- échauffement (°C)		7,8

Les valeurs données ci-dessus sont valables lorsque les 3 tranches sont à pleine charge et que les 2 dilutions sont en service. Lorsque la charge des tranches 2 et 3 est inférieure ou égale aux deux tiers (8/12) de la charge nominale de 700 MW (c'est-à-dire environ 470 MWe) l'échauffement est inférieur ou égal à 8° C, et la dilution est inutile.

Fig.3 - Echauffement moyen le long de la Loire induit par les rejets de CORDEMAIS (Etude L.N.H. - Rapport à paraître) (in E.D.F. 1979)

L'étude est réalisée pour les cas de fonctionnement les plus pénalisants prévus, c'est-à-dire en été pour le niveau moyen maximal de charge et pour un débit moyen d'étiage et une marée de vive-eau.

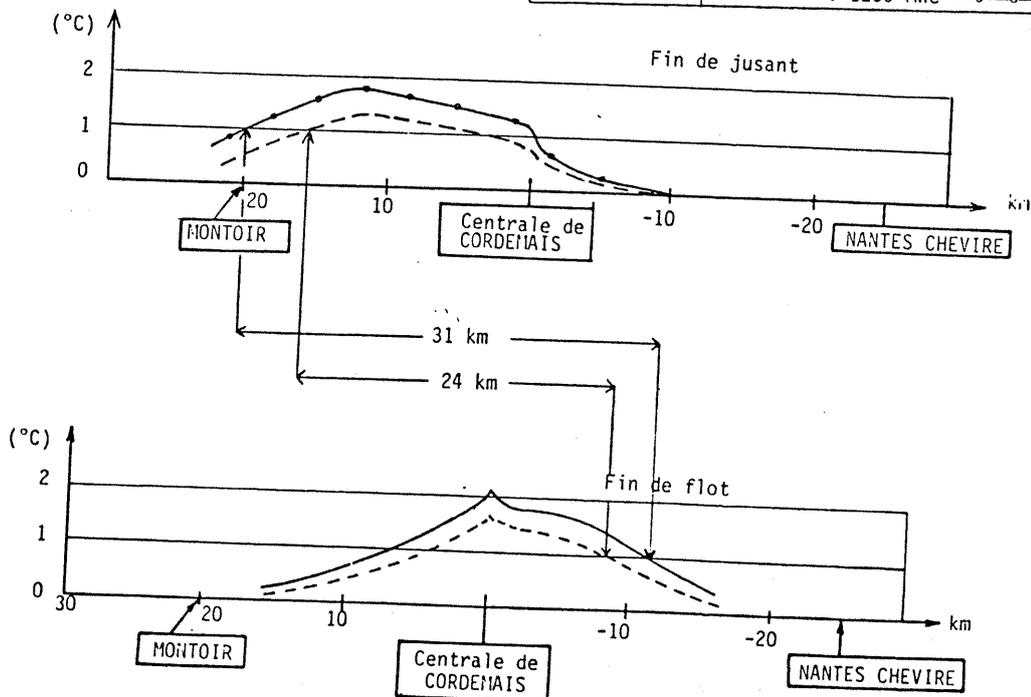
Le fonctionnement à 2000 MWe (puissance installée actuelle) et à 3200 MWe (situation future) ne présentant en été qu'un intérêt théorique n'est pas étudié.

L'échauffement de l'estuaire lié au rejet de la centrale de CORDEMAIS est présenté ci-après :

Echauffement induit par les rejets de la centrale de CORDEMAIS en été

Coefficient de marée : 95
 Débit fluvial : 150 m³/s
 Echauffement $\Delta t = 8^{\circ}\text{C}$
 Echange atmosphérique 27 W/m²/°C

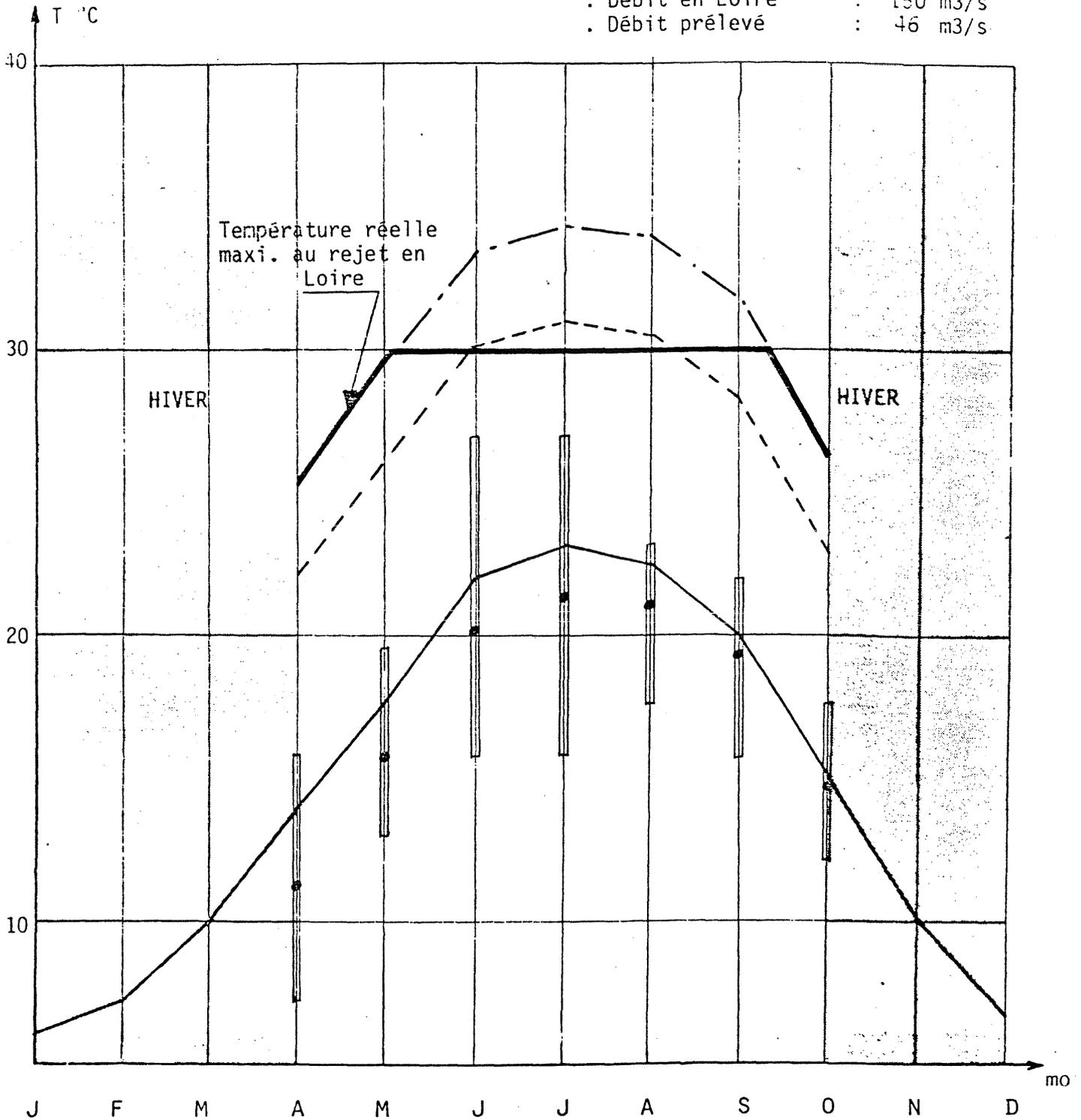
Charge maximale réelle :	Actuelle : 1000 MWe -----
	Prévue à partir de 1985 : 1200 MWe -o-o-



ESTIMATION DES PLUS FORTS NIVEAUX D'ECHAUFFEMENT DES EAUX DE CIRCULATION

(D'après E.D.F., 1979)

Conditions de fonctionnement :
· Puissance au réseau : 1200 MWe
· Débit en Loire : 150 m³/s
· Débit prélevé : 46 m³/s



- (dashed line) Température moyenne maxi en vive-eau sans baisse de charge ni dilution complémentaire.
- ... (dotted line) Température au rejet sans recirculation ni baisse de charge ni dilution complémentaire.
- (thick solid line) Température naturelle en Loire (calculée à NANTES CHEVIRE).
- ▮ (vertical bar with dot) Température moyenne mensuelle et fluctuation autour de la moyenne (mesures quotidiennes effectuées à CORDEMAIS de 1975 à 1978).
- (thick solid line) Température maxi au rejet après dilution et baisse de charge.

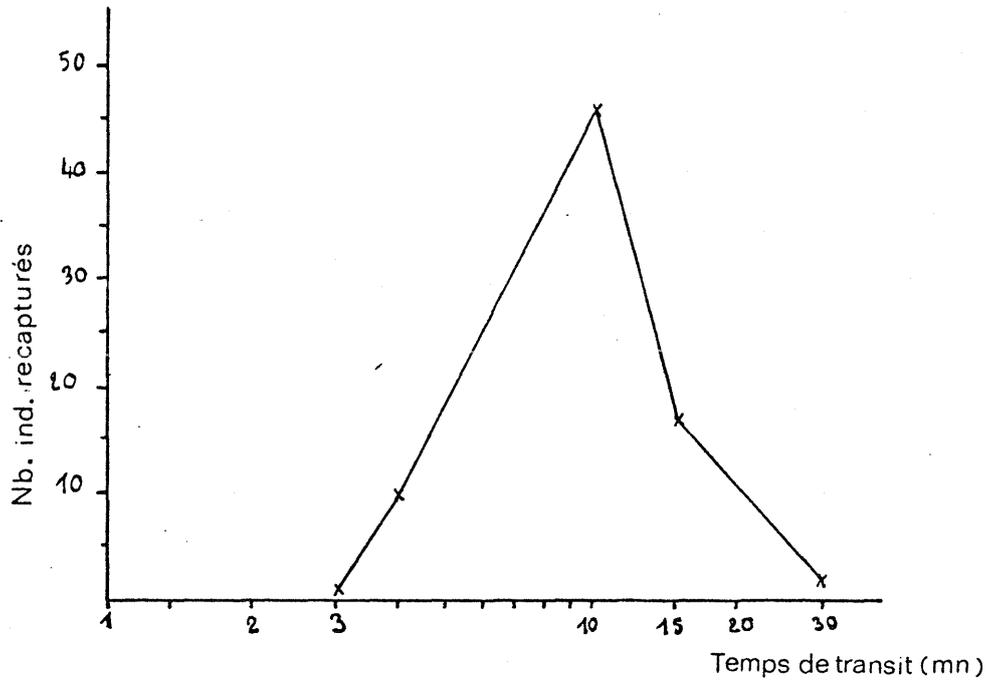


Fig. 4.- Etude du temps de transit.

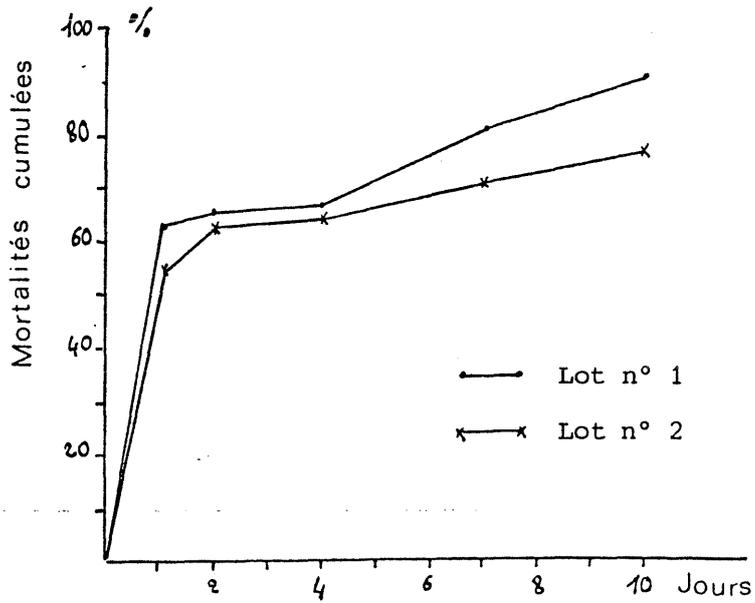


Fig. 5.- Survie après le transit.

Pourcentage de mortalité en fonction du temps.

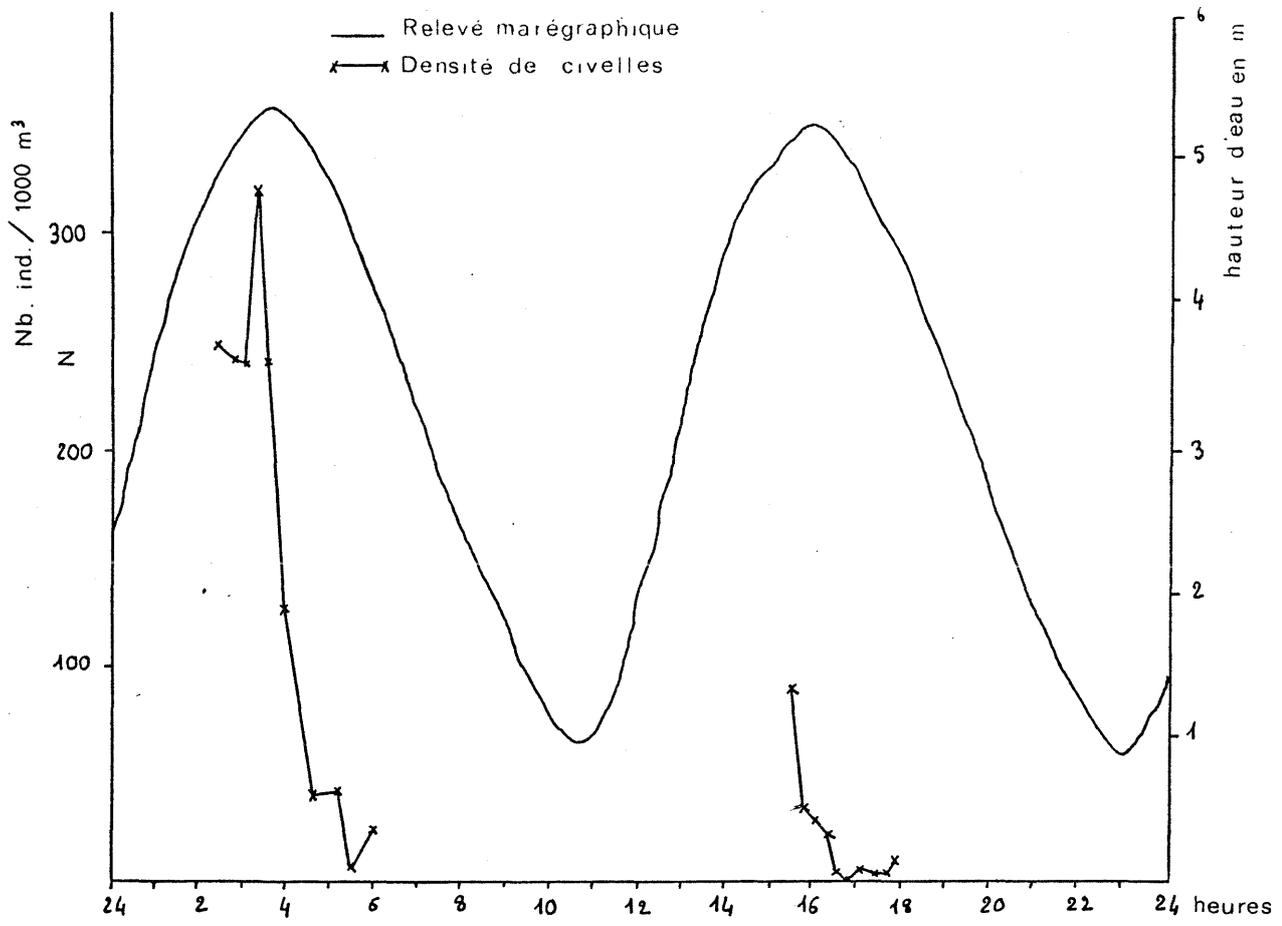


Fig. 6.- Pêche au rejet. Tranche n° 1 (23.03.82).

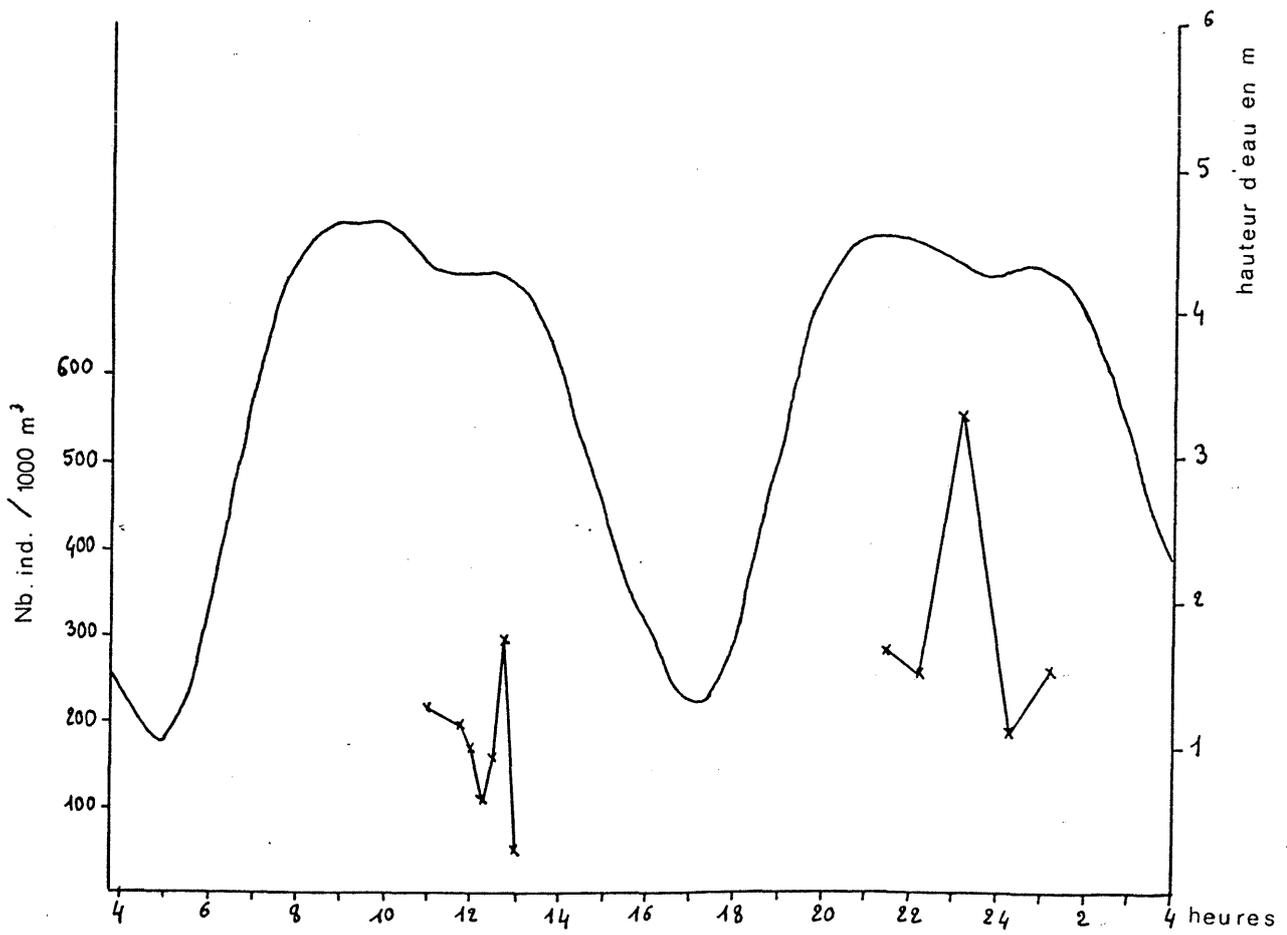
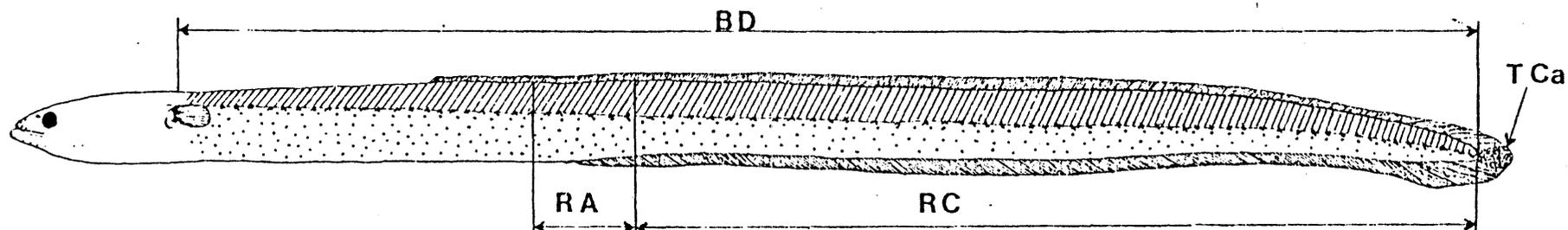


Fig. 7.- Pêche au rejet. Tranche n° 1 (1.04.82).



- Région dorsolatérale (pigmentation : PDL)
- Région ventrolatérale (pigmentation : PVL)
- Zone de formation de la tache cérébrale (T.C.)
- Ligne médio-latérale (pigmentation : PML)

BD: Bordure dorsale

M: Museau

Md: Mandibules

N: Narines

Orb: Orbites

pec: Pectorales

RA: Région anale

RC: Région caudale

TCa: Tache caudale

Zpc: Zone post-crâniale (PAT)

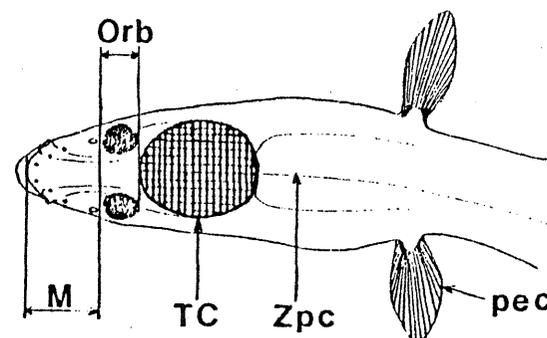
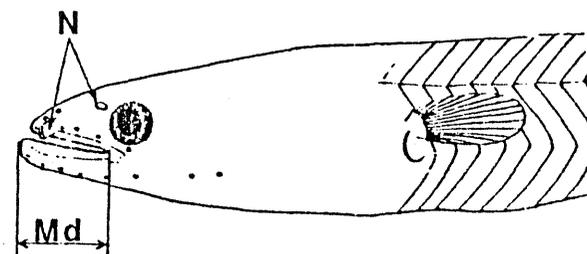


Fig. 8 .- Principaux sites d'observations de l'état pigmentaire chez la Civelle
(d'après ELIE, 1979).

	DEBUT DE STADE	FIN DE STADE
V A	TCa localisée à l'extrémité de la nageoire caudale Aucune pigmentation superficielle.	
V B	T - 1 point de pigmentation cérébral profond ou superficiel. C - Extension légère du pigment de la TCa sur la BD).	TC complète (aspect cordiforme). Le pigment superficiel rostral ne dépasse pas la partie postérieure de la région caudale : développement de la pigmentation sur la BD et dans la région dorsolatérale.
VI A0	T - Pigment superficiel rostral dépasse la TC (là 3 mélanophores). C - PBD atteint la partie distale de la région anale.	Progression de la pigmentation rostrale sans jonction avec la pigmentation caudale sur la BD. PDL dans la moitié postérieure de la région caudale. PML se développe dans la région caudale.
VI A1	T - Jonction de la pigmentation caudale et rostrale sur la BD. C - PDL développé jusqu'à la région post-anale.	Pigmentation superficielle dorsale continue. Deux rayons brachiosteges postérieurs mélanisés. PDL développée jusqu'à l'anus PML atteint la moitié postérieure de la région caudale.
VI A2	T - Epaississement latéral du pigment dorsal. Tous les rayons branchiosteges sont mélanisés. C - PVL développée dans le 1/3 postérieur de la région caudale. PML atteint l'anus. Développement de la pigmentation profonde le long des viscères.	Intensification de la mélanisation. PDL atteint l'extrémité antérieure de la nageoire dorsale. PVL atteint la moitié de la région caudale. PML dépasse l'anus.
VI A3	Epaississement du pigment rostral superficiel. PDL se développe jusqu'aux nageoires pectorales. PVL atteint l'anus. PML se développe jusqu'aux nageoires pectorales.	
VI A4	T - Points de mélanisation présents à la base des tubes nasaux, bord supérieur des mandibules pigmentés. Côté interne des pédoncules pectoraux mélanisés. C - PDL souligne tous les myoseptes. PVL dépasse l'anus (dépôt incomplet le long des myoseptes).	
VI B	TC masquée par la pigmentation superficielle. Fin de pigmentation de la bordure supérieure des mandibules. Développement de la pigmentation sur la base interne des nageoires pectorales. PDL diffuse. PVL diffusé sauf en avant de la nageoire dorsale où elle reste myoseptale. Développement de guanophores sur la bordure ventrale.	
VII ang.	Développement généralisé des cellules à pigment jaune. Cavité abdominale argentée (le tractus digestif n'est plus visible). Fin du stade marqué par le début du développement des gonades (taille 20 à 30 cm).	

Tabl. 3.- Différents stades pigmentaires chez la civelle.

T : tête

C : corps

Autres abréviations : voir fig. 8

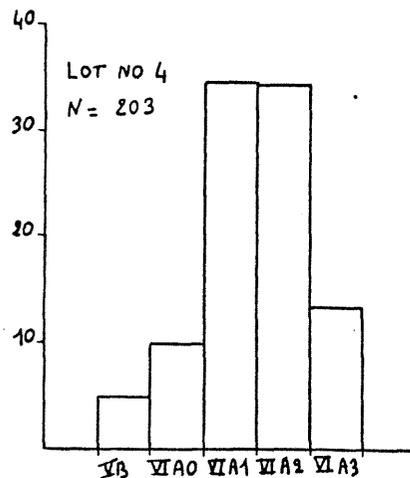
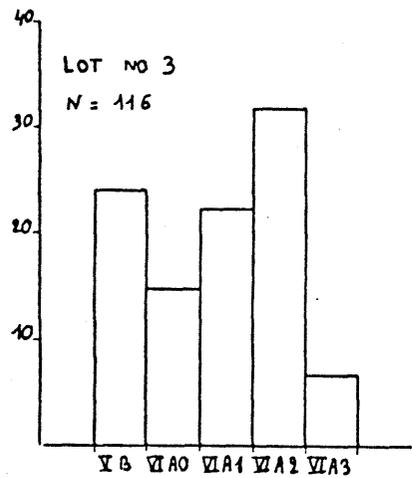
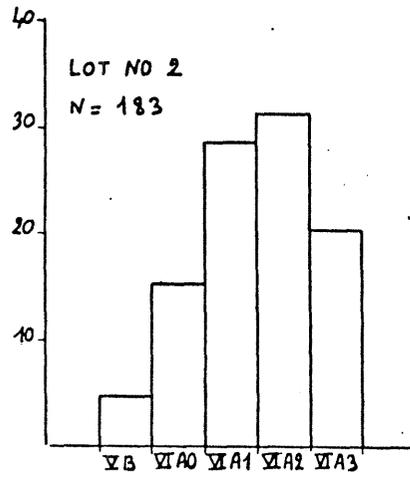
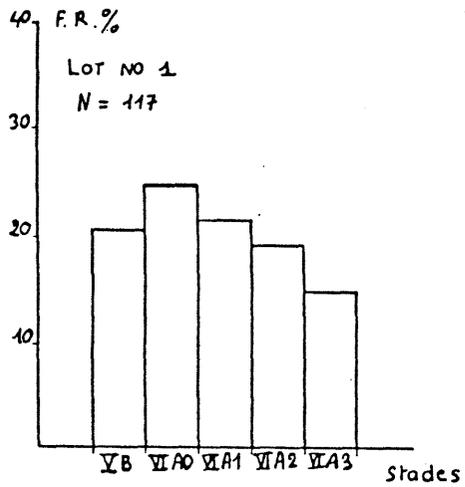


Fig. 10.- Structure des différents lots étudiés.

Date : 26.02.82

P.M : 19 h 40 (coeff. 97).

prélèvement	heure	durée du trait
1	18 h 15	30 mn
2	19 h 10	15 mn
3	19 h 40	23 mn
4	20 h 10	25 mn

Température en Loire : 7.5°C

Température au rejet : 13°C

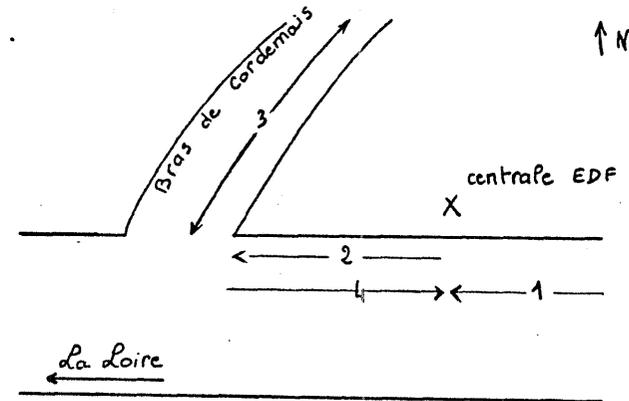


Fig. 9.- Localisation des prélèvements.

Pêche en Loire et dans le bras de Cordemais

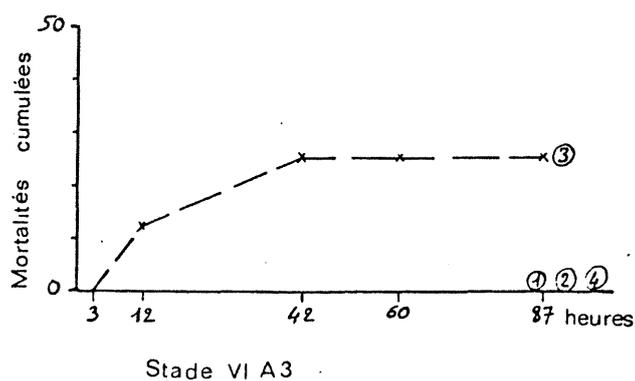
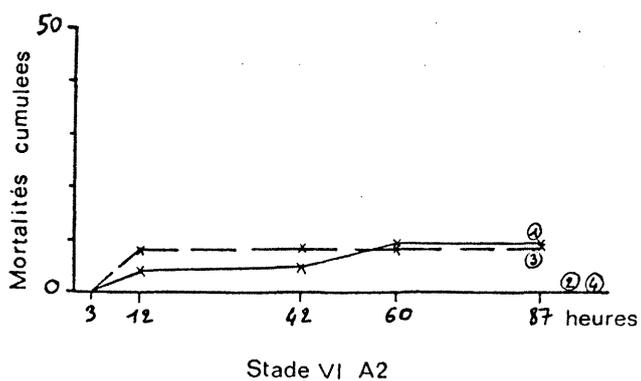
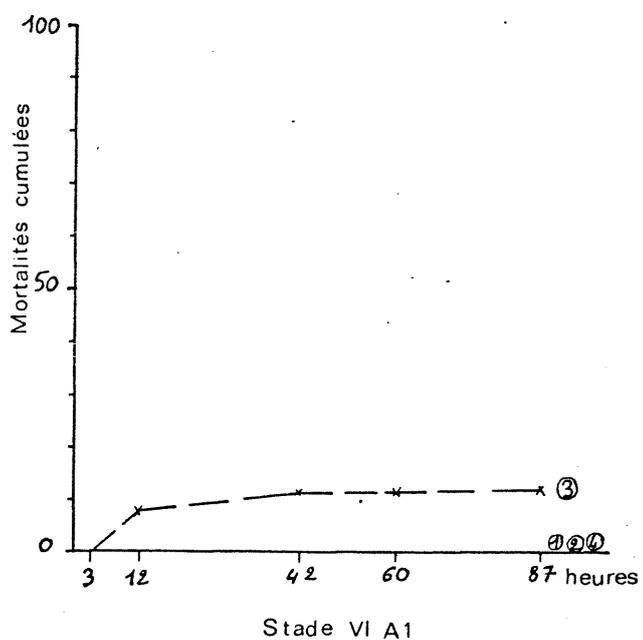
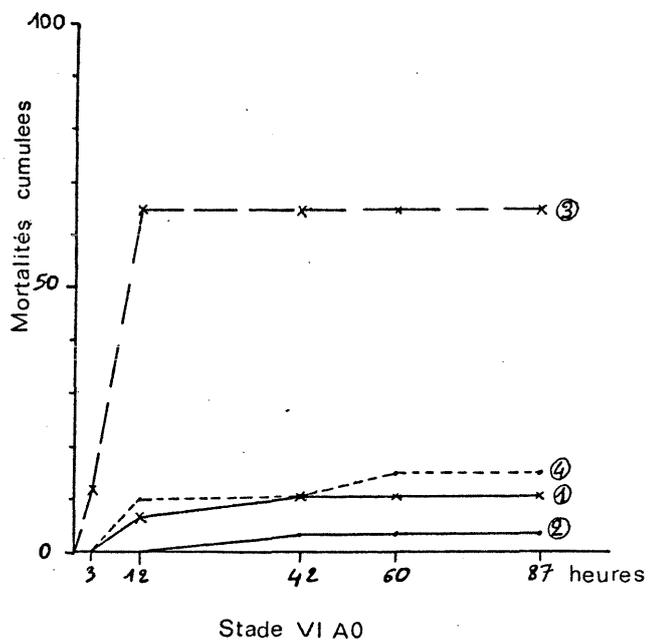
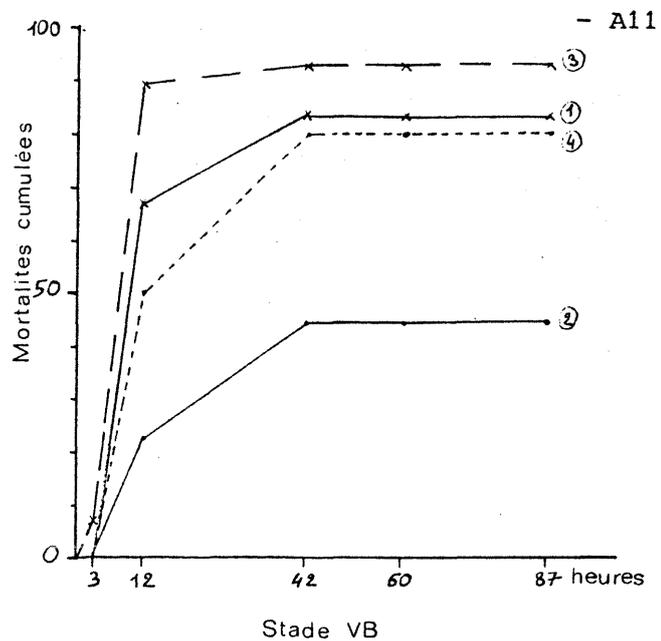
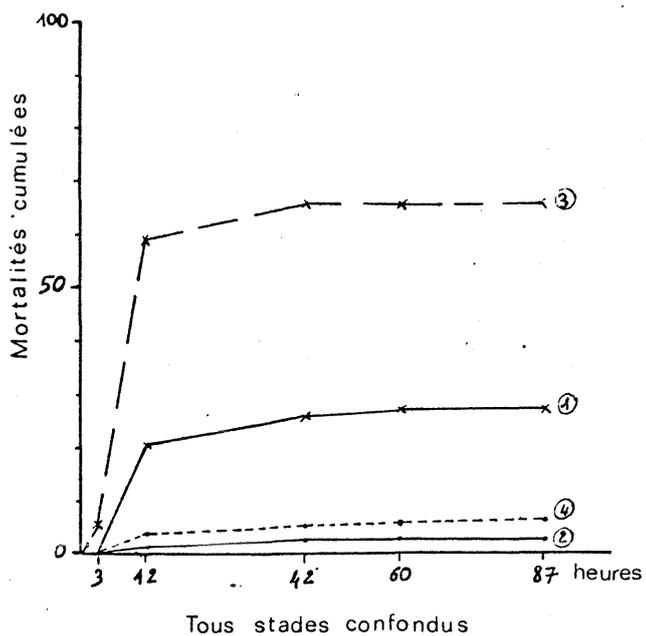


Fig. 11.- Evolution de la mortalité en fonction du temps.

Lot n°	Mortalité à 87 heures (en %)	
	Stade VB excepté	VB et VI AO exceptés
1	5.38	3.12
2	0.59	0
3	21.59	12.70
4	2.12	0.58

Tabl. 4.- Etude de la mortalité, abstraction faite des stades fragiles.

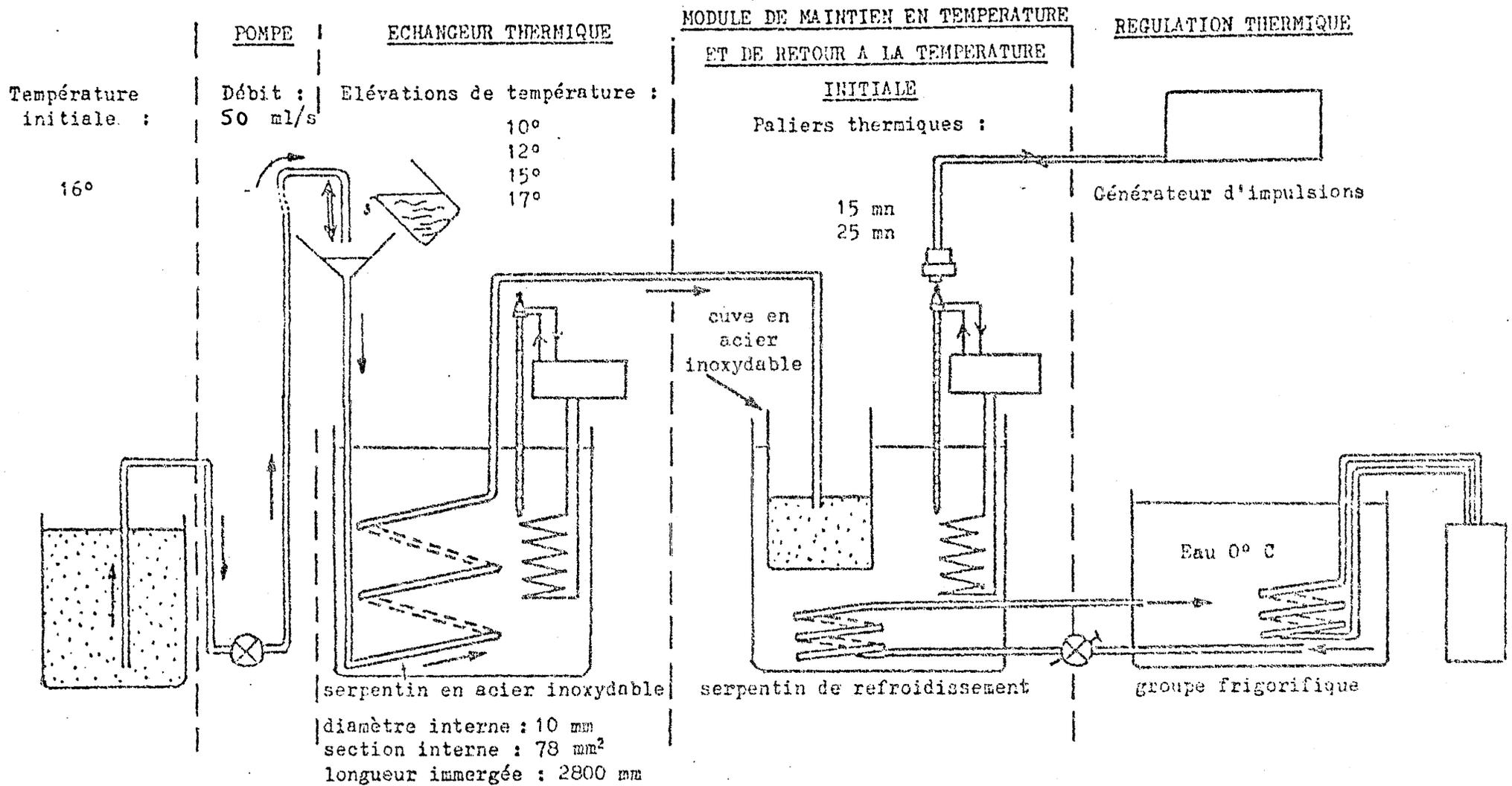


Fig. 12.- Schéma du dispositif expérimental (d'après LE BAUT et al, 1980)

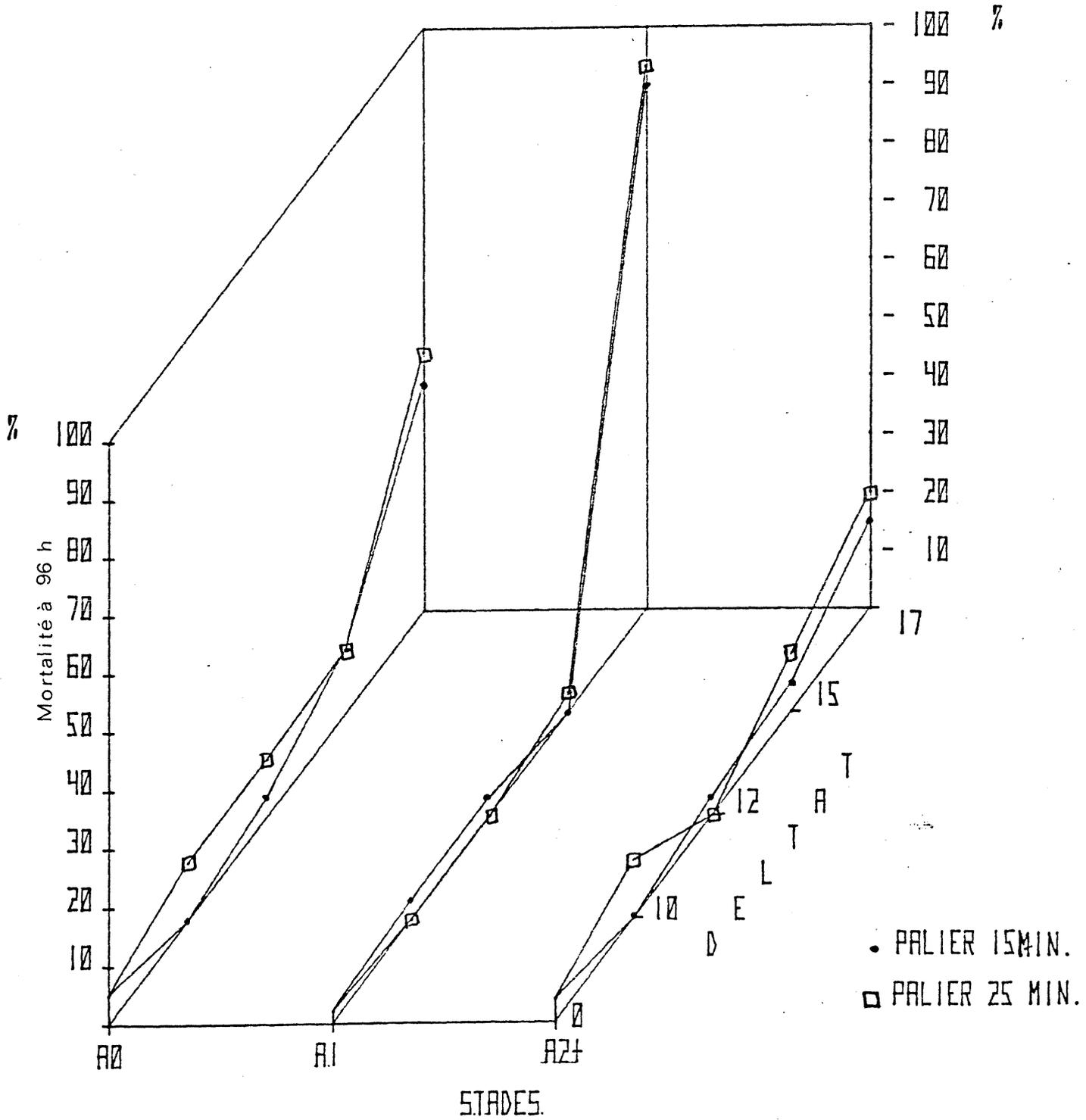
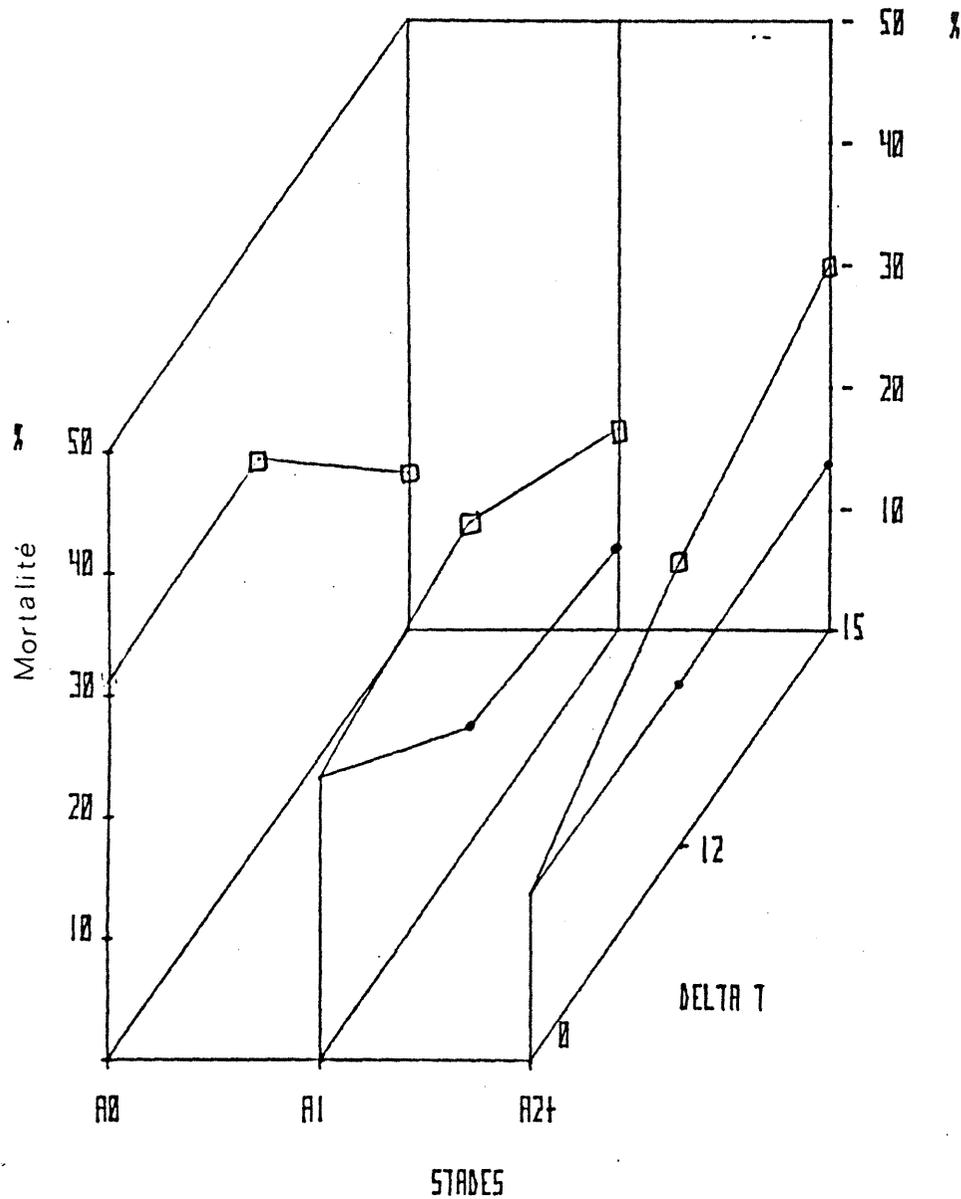


Fig. 13.- Série I - Etude de la mortalité en fonction du stade de développement, du ΔT subi et du temps d'exposition.

A- 1 CHOC THERMIQUE



B- 2 CHOCs THERMIQUES

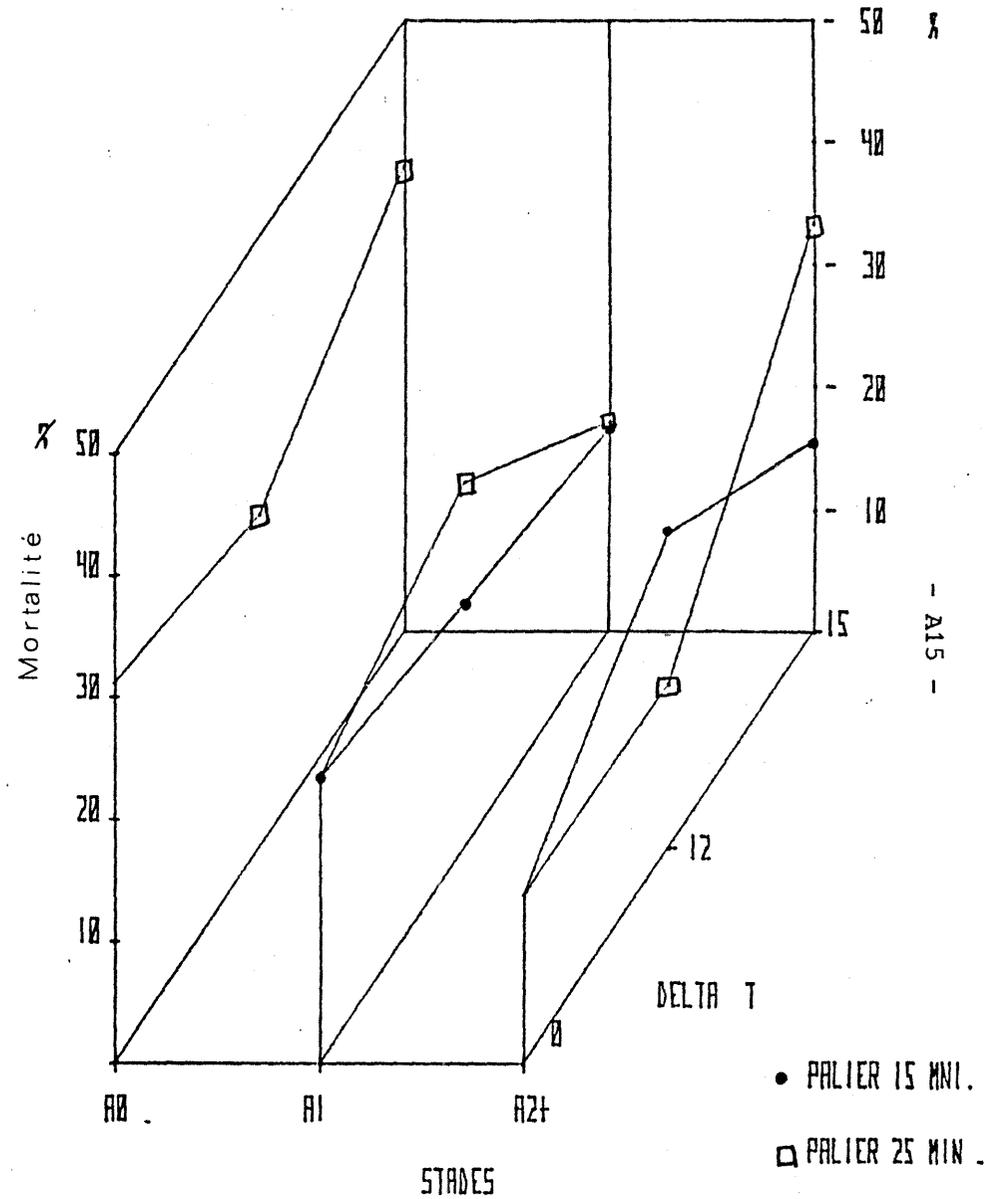
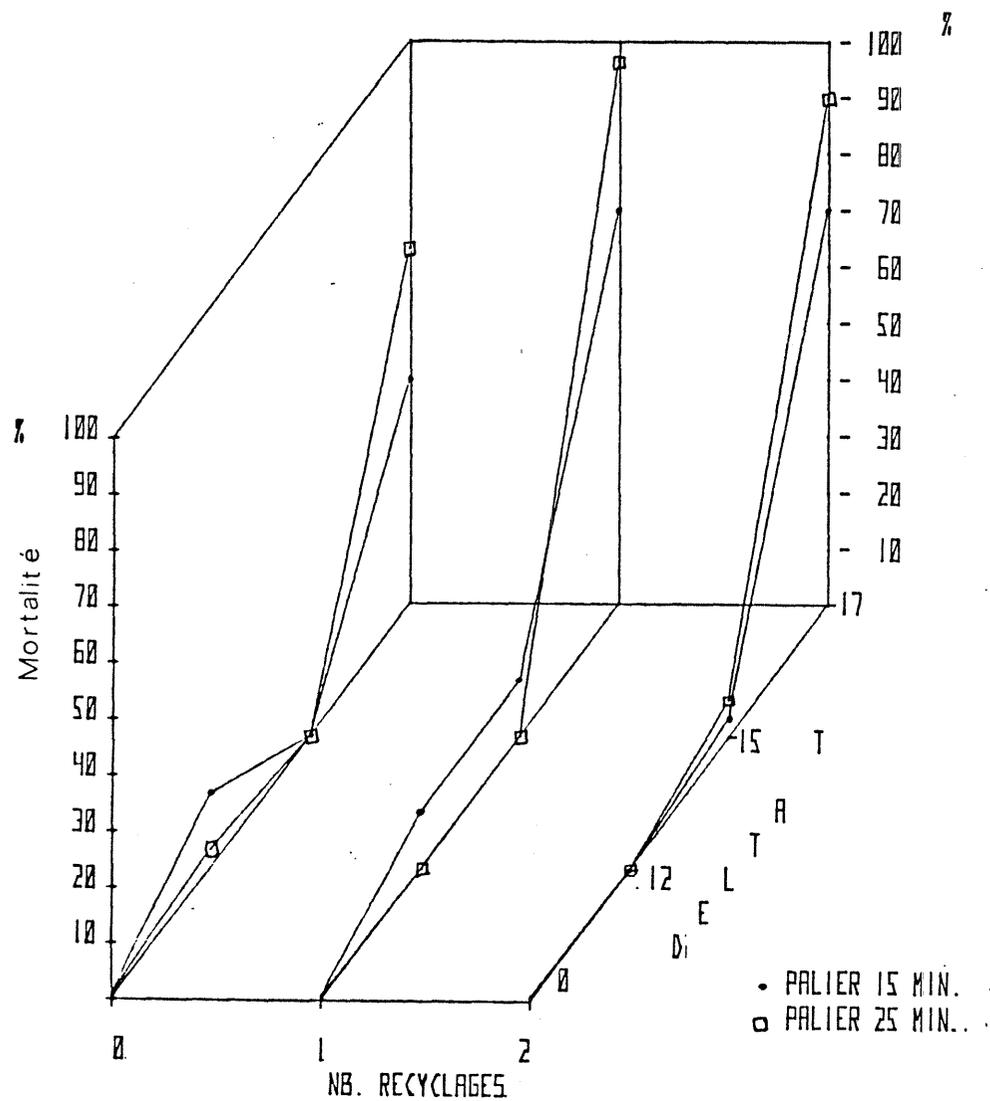


Fig. 14.- Série II - Etude de la mortalité en fonction du stade de développement, du ΔT subi et du temps d'exposition - A : pour un choc thermique - B : pour deux chocs thermiques (un recyclage).

A : Série III - civelles non alimentées



B : Série IVa - civelles alimentées

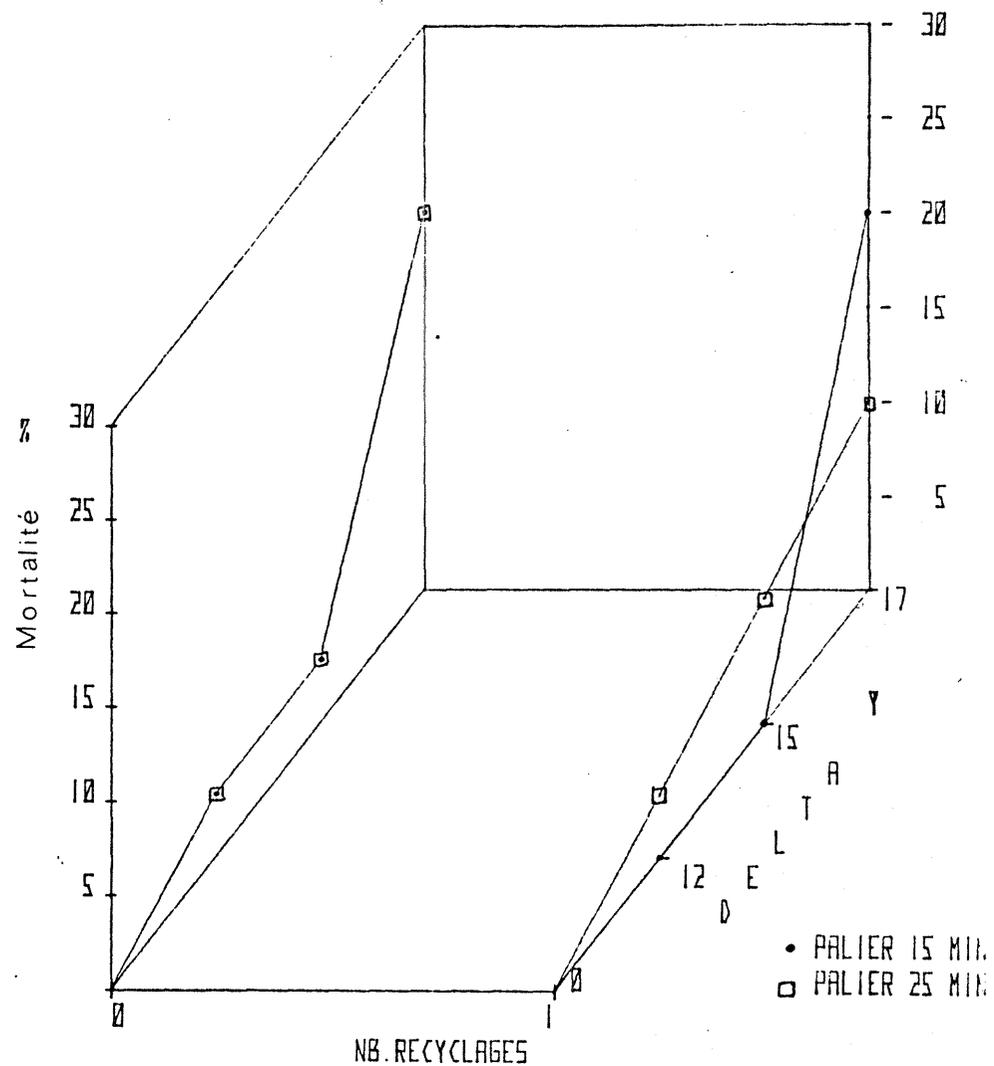


Fig. 15.- Influence du nombre de chocs thermiques successifs sur la mortalité (stade A₂ et plus - choc salin précédent un choc thermique).

PALIER	15 minutes	25 minutes
M x ΔT ΔT : [0 → 17]	G : 206.43 $\chi^2_{0.05} [4] = 9.41$	G : 313.57 $\chi^2_{0.05} [4] = 9.41$
M x ΔT ΔT : [0 → 15]	G : 5.82 $\chi^2 [3] = 7.81$	G : 6.70 $\chi^2 [3] = 7.81$

Tabl. 5.- Relations mortalité - ΔT subi : analyse globale tests G à deux dimensions. Le G obtenu doit être comparé à un χ^2 a [x] ddl. La dépendance des deux facteurs est significative (+) si $G > \chi^2$. Elle n'est pas significative (-) dans le cas inverses.

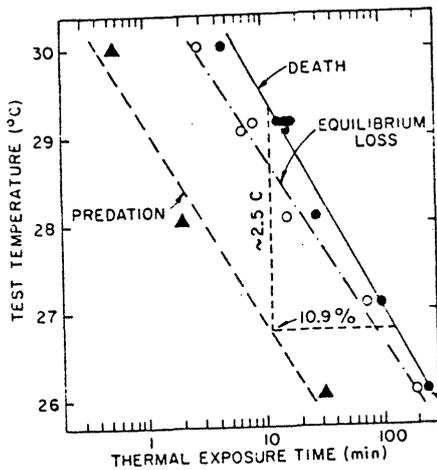


Fig.16. Relationships among three effects of acute thermal shock on a sibling group of juvenile rainbow trout acclimated to 15°C: (1) time to initial increase in vulnerability to predation, (2) median time to loss of equilibrium, and (3) median death time. (From Coutant, 1973). (in Schubel et al. 1978)

	$\Delta T : [10 \rightarrow 17]$	$\Delta T : [10 \rightarrow 15]$
TE x M	G : 4.61 $\chi^2 [1] = 3.84$ / +	G : 0.30 $\chi^2 [1] = 3.84$ / -
$\Delta T \times M$	G : 313.11 $\chi^2 [3] = 7.81$ / +	G : 0.30 $\chi^2 [3] = 7.81$ / -

Tabl. 6.- Tests à 3 dimensions TE x ΔT x M :
relations mortalité (M) temps d'exposition
ou palier (TE), intensité du choc thermique
subi (ΔT).

NOTA : Fonctionnement du test G à 3 dimensions.

L'hypothèse nulle testée est l'indépendance des facteurs entre eux. Un signe (+) signifie que cette hypothèse doit être rejetée. Un test G à 3 dimensions donne cinq résultats : un G global d'indépendance des 3 facteurs qui se décompose en 3 G d'indépendance des 3 facteurs pris deux à deux et un G d'interaction global.

Dans les cas présents d'utilisation de ce test, le G d'indépendance de TE x ΔT n'a pas de signification réelle. Cette mesure, artificielle, sert alors à tester l'homogénéité des mesures. En cas d'hétérogénéité (G significatif), le risque encouru est de déclarer non significative une mesure qui peut l'être \pm .

Le G d'interaction des 3 facteurs entre eux n'a pas non plus de signification réelle pour cette même raison de rapprochement artificiel de deux des facteurs entre eux. Il n'en sera pas tenu compte dans les résultats présents.

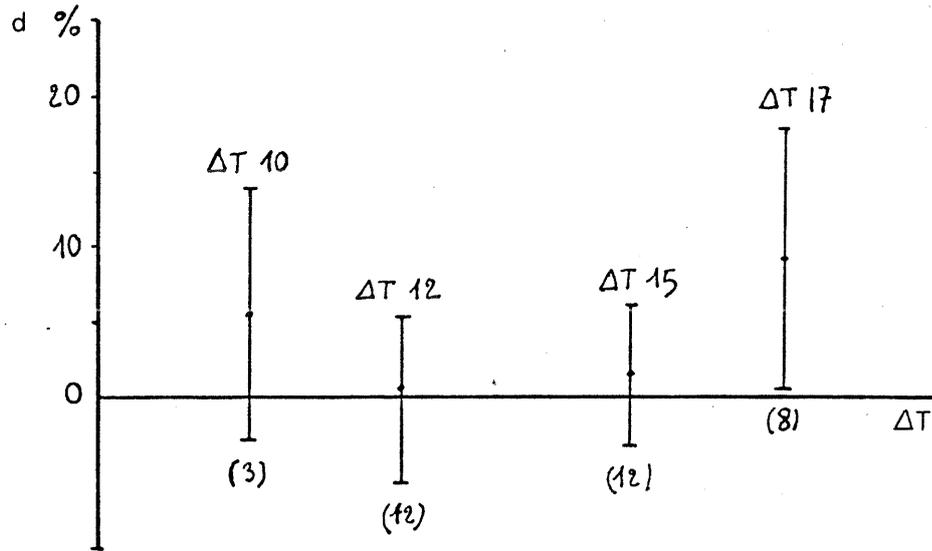


Fig. 17.- Différences de mortalité, en pourcentage, observées entre des paliers de 15 et 25 mm pour chaque ΔT . Calcul réalisé sur (n) mesures.

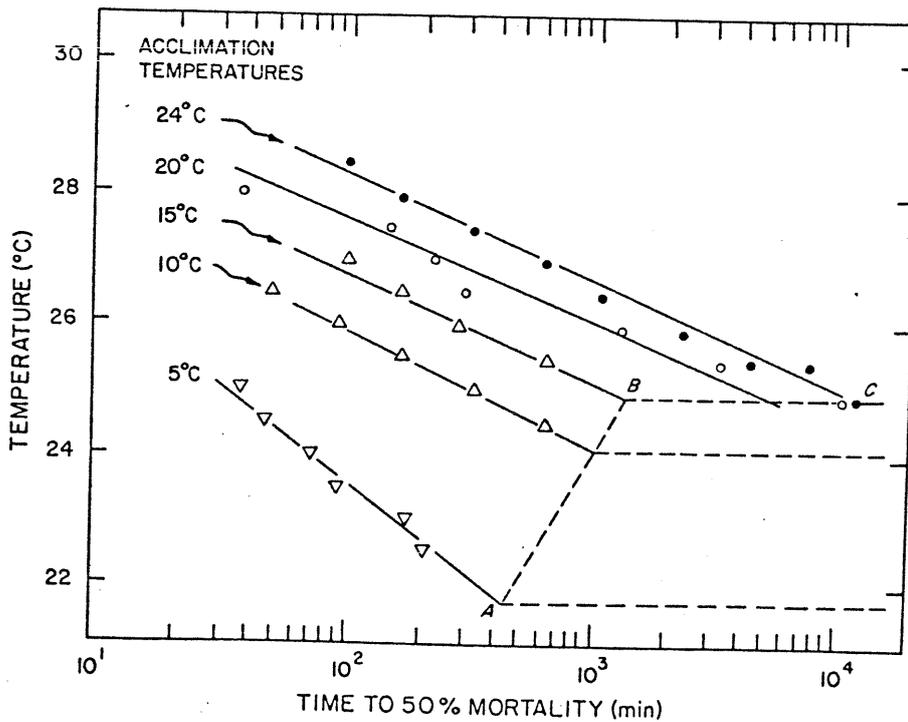


Fig. 18. Median resistance times to high temperature of organisms acclimated to different temperatures. For each acclimation temperature there is an incipient lethal temperature--the highest temperature to which an organism can be continuously exposed for an indefinite period without increasing the mortality rate. Line A-B denotes rising lethal threshold temperatures with increasing acclimation temperature. This rise in threshold eventually ceases at B-C, the ultimate incipient lethal temperature. (Adapted from Brett, 1952). in Schubel et al. 1978

	TE : 15 minutes	TE : 25 minutes
S x M	G : 16.22 $\chi^2 [2] = 5.99$	G : 9.66 $\chi^2 [2] = 5.99$
ΔT x M	G : 113.45 $\chi^2 [4] = 9.49$	G : 113.80 $\chi^2 [4] = 9.49$

Tabl. 7.- Test G à 3 dimensions. Relations mortalité (M), stades de développement (S), intensité du choc thermique subi (ΔT) avec $\Delta T \leq 17^\circ C$.

	TE : 15 minutes	TE : 25 minutes
S x M	G : 0.72 $\chi^2 [2] = 5.99$	G : 3.34 $\chi^2 [2] = 5.99$
ΔT x M	G : 1.89 $\chi^2 [3] = 7.81$	G : 5.66 $\chi^2 [3] = 7.81$

Tabl. 8.- Tests G à 3 dimensions. Relations mortalité (M), stades de développement (S), intensité du choc thermique subi (ΔT) avec $\Delta T \leq 15^\circ C$.

	TE : 15 minutes	TE : 25 minutes
$\Delta T \times M$ S = A ₀	G = 14.20 +	G = 17.47 +
$\Delta T \times M$ S = A ₁	G = 81.92 +	G = 88.27 +
$\Delta T \times M$ S = A ₂ ⁺	G = 4.68 +	G = 7.22 +

Tabl. 9.- Relations mortalité (M), intensité du choc subi (ΔT) pour chacun des stades ($\Delta T = 0,17$). Tests à 2 dimensions. Les G sont à comparer avec $1 \chi^2 [1] = 3.84$.

	TE : 15 minutes	TE : 25 minutes
S (A ₀ , A ₁) x M	G = 14.39 +	G = 15.56 +
S (A ₀ , A ₂) x M	G = 2.84 -	G = 2.65 -
S (A ₁ , A ₂) x M	G = 30.89 +	G = 30.63 +

Tabl. 10.- $\Delta T = 17^\circ C$. Relations mortalité (M), stades de développement (S) pris deux à deux. Tests à 2 dimensions. Les G obtenus sont à comparer à un $\chi^2 [1] = 3.84$.

S x M	G = 65.73 $\chi^2 [2] = 5.99$ +
TE x M	G = 0.27 $\chi^2 [1] = 3.84$ -

Tabl. 11.- $\Delta T = 17^\circ C$. Relations mortalité (M), stades de développement (S), temps d'exposition (TE). Tests à 3 dimensions.

	TE : 15 minutes	TE : 25 minutes
$\Delta T \times M$	$G : 0.75$ $\chi^2 [1] = 3.84$	$G : 2.37 \cdot 10^{-3}$ $\chi^2 [1] = 3.84$
$R \times M$	$G : 2.40$ $\chi^2 [2] = 5.99$	$G : 0.26$ $\chi^2 [2] = 5.99$

Tabl. 12.- Tests à 3 dimensions. Relations mortalité (M), intensité du choc thermique subi (ΔT), nombre de recyclages (R) avec $\Delta T = [12,15]$.

$R \times M$	$G = 19.39$ $\chi^2 [2] = 5.99$
$TE \times M$	$G = 29.71$ $\chi^2 [1] = 3.84$

Tabl. 13.- Tests à 3 dimensions. Relations mortalité (M), recyclages (R), temps d'exposition (TE) pour un ΔT de $17^\circ C$.

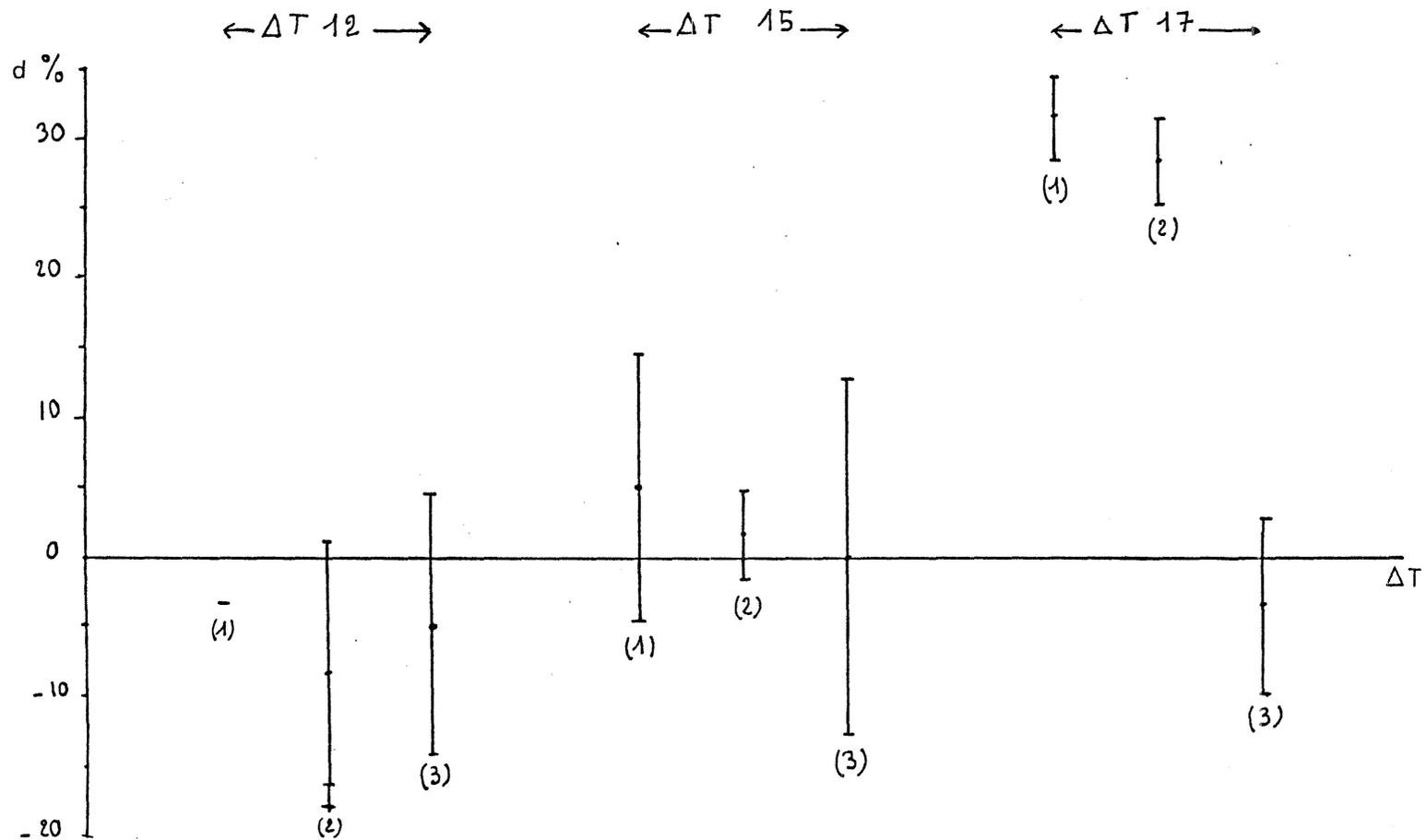


Fig. 19.- Différences de mortalité, en pourcentage, observées pour chaque ΔT selon le nombre de chocs thermiques subis. Comparaison des résultats pour : 1 et 2 chocs (1)
 1 et 3 chocs (2)
 2 et 3 chocs (3)

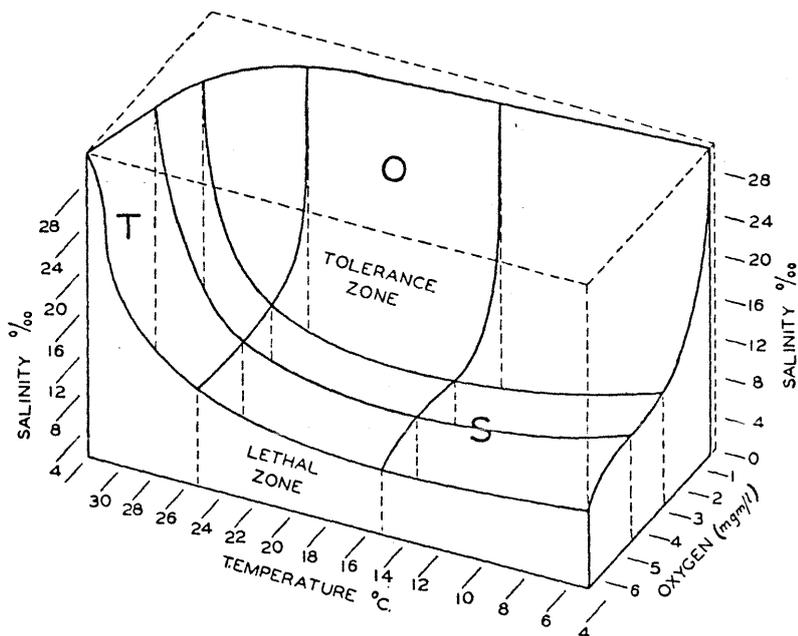


FIG.20-Diagram of the boundary of lethal conditions for lobsters for various combinations of temperature, salinity and oxygen.
 T-region in which temperature alone acts as a lethal factor
 S-region in which salinity alone acts as a lethal factor
 O-region in which oxygen alone acts as a lethal factor (D'après McLEESE, 1956)

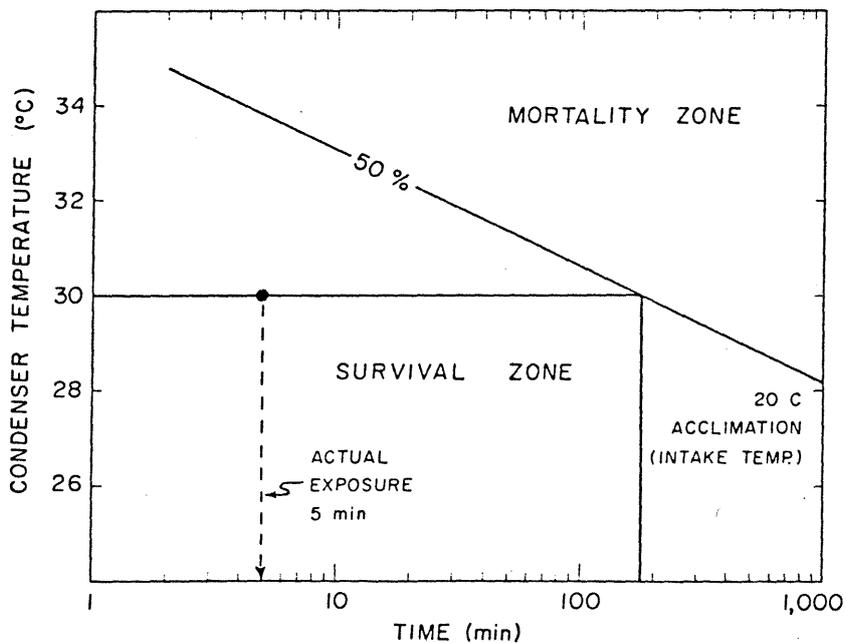


Fig. 21. Example of how a Thermal Resistance Curve can be used to predict whether or not mortality from thermal stresses will be expected for entrained organisms. Consider a plant with an intake temperature of 20°C, a ΔT of 10°C, and a transit time of 5 min. Assume the organisms are acclimated to 20°C and that cooling takes place instantaneously. (D'après SCHUBEL et al.1978)

PESEES	P ₁ 5.05.82		P ₂ 20.05.82		P ₃ 4.06.82		P ₄ 22.06.82		P ₅ 4.07.82		P ₆ 17.07.82	
LOT	N	\bar{X}	N	\bar{X}	N	\bar{X}	N	\bar{X}	N	\bar{X}	N	\bar{X}
Témoin	55	0.26	53	0.27	53	0.29	53	0.37	52	0.41	51	0.50
ΔT 12 1	57	0.25	55	0.26	47	0.29	45	0.36	46	0.38	46	0.47
ΔT 12 2	60	0.25	60	0.26	63	0.27	65	0.32	64	0.34	63	0.39
ΔT 12 total	117	0.25	115	0.26	110	0.27	110	0.34	110	0.35	109	0.42
ΔT 15 1	60	0.25	57	0.26	55	0.30	52	0.37	46	0.40	46	0.48
ΔT 15 2	60	0.25	58	0.25	57	0.27	57	0.33	61	0.32	56	0.41
ΔT 15 total	120	0.25	115	0.25	112	0.28	109	0.35	107	0.35	102	0.44
ΔT 17 1	60	0.25	48	0.26	46	0.27	43	0.34	41	0.36	42	0.41
ΔT 17 2	60	0.25	49	0.24	51	0.25	51	0.33	51	0.37	49	0.43
ΔT 17 total	120	0.25	97	0.25	97	0.26	94	0.33	92	0.36	91	0.42

↑
C.T

Tabl. 14.- Elevage en eau douce : résultats bruts

N = nombre d'individus du lot considéré

\bar{X} = poids moyen en grammes

C.T = choc thermique

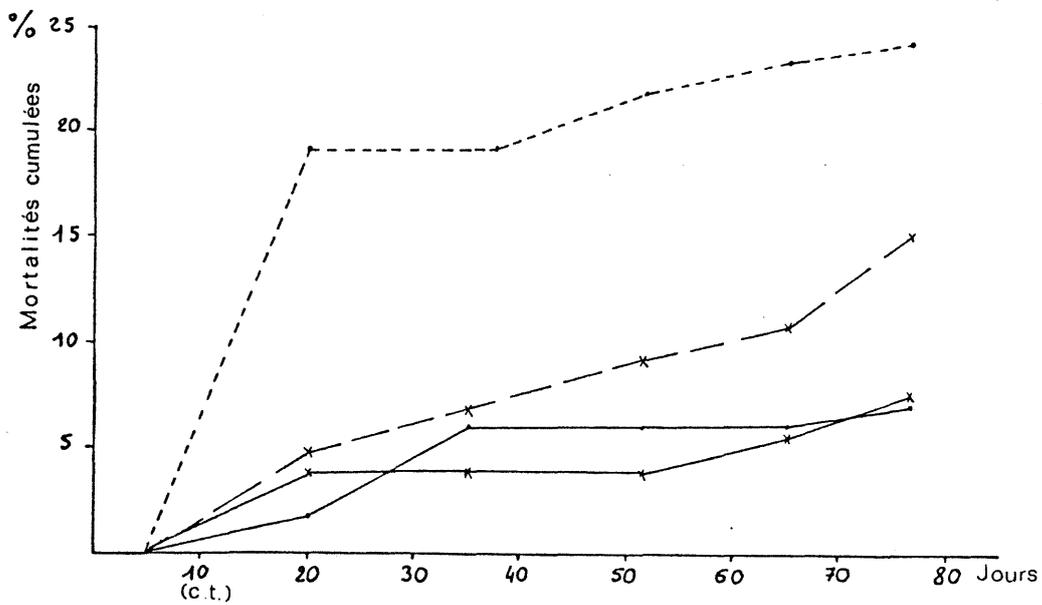
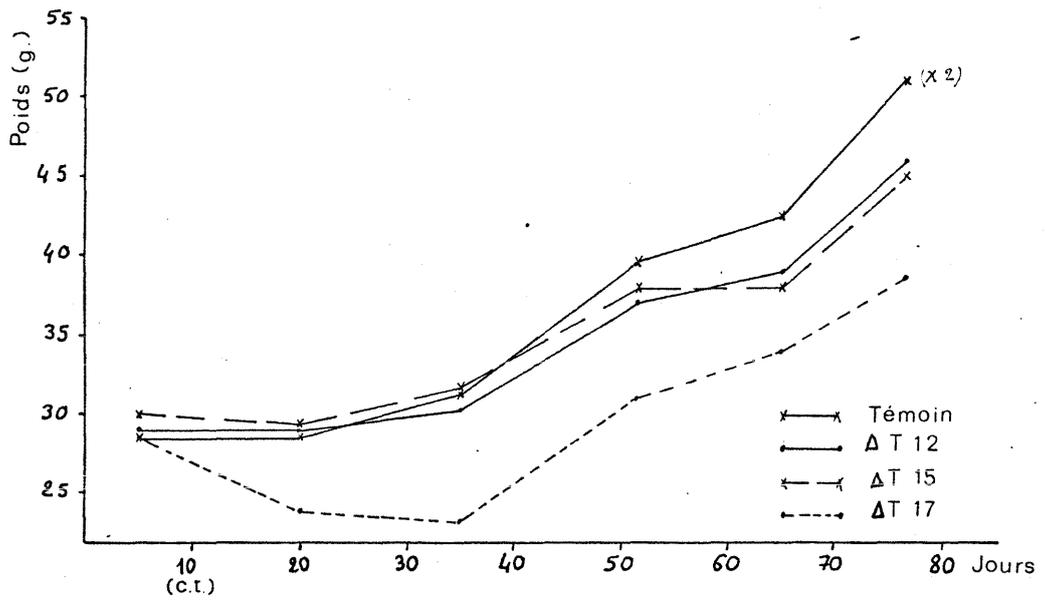
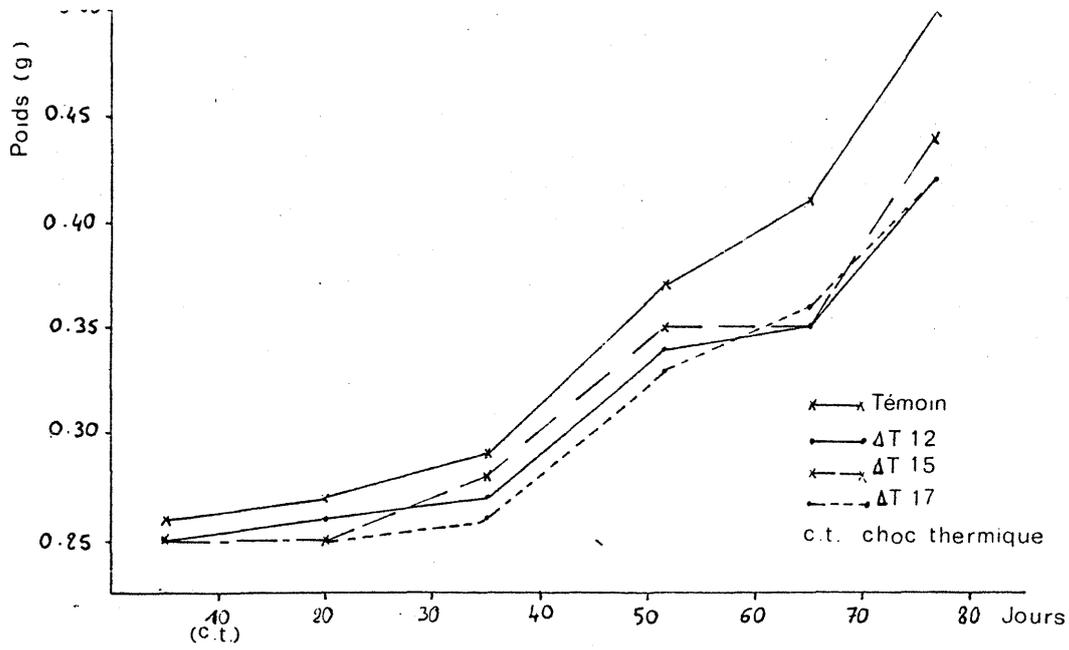


Fig. 22.- Elevage en eau douce. Evolution des poids moyens individuels (A) des poids globaux (B) et de la mortalité (C) en fonction du temps.

c.t. : choc thermique.

Elevage en eau douce

Poids eng

Poids eng

Poids eng

Poids eng

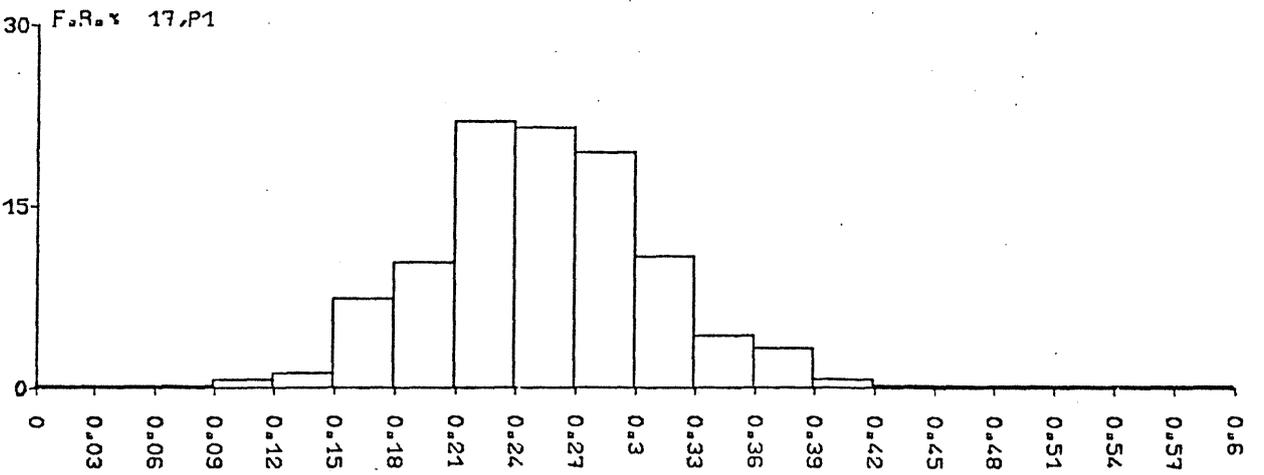
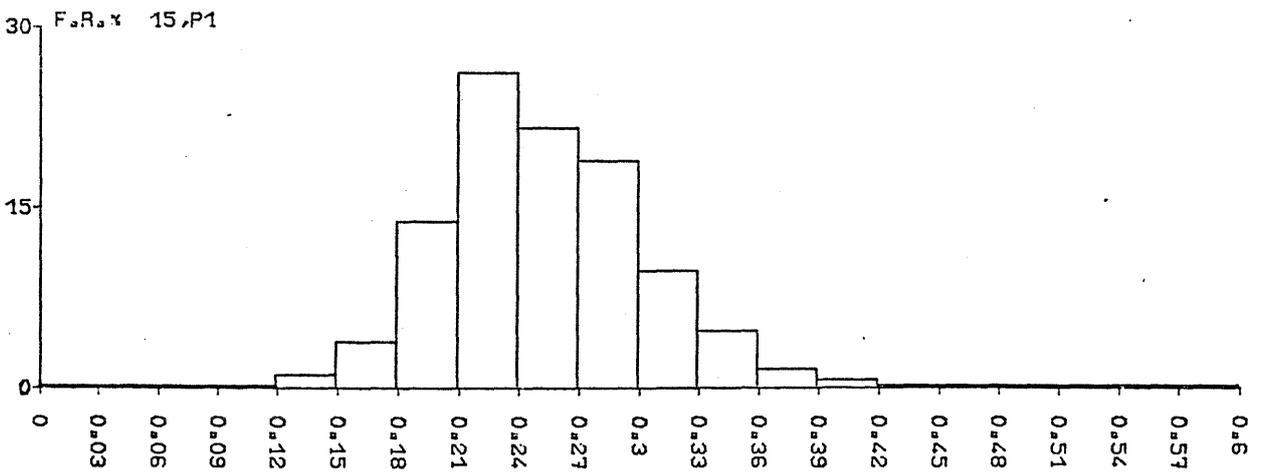
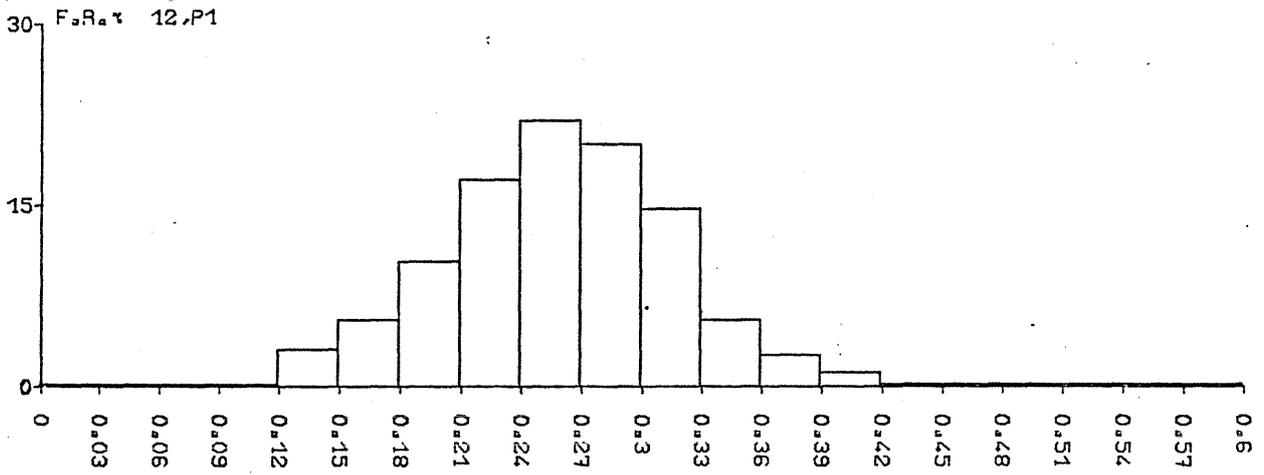
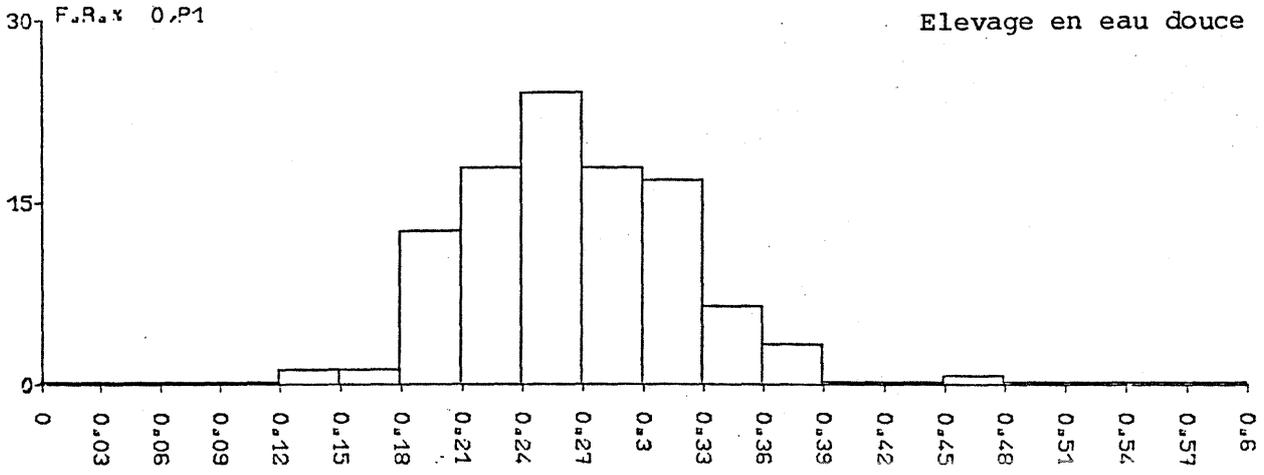


Fig. 23.- Distribution des fréquences de poids individuels en début d'élevage.

Elevage en eau douce

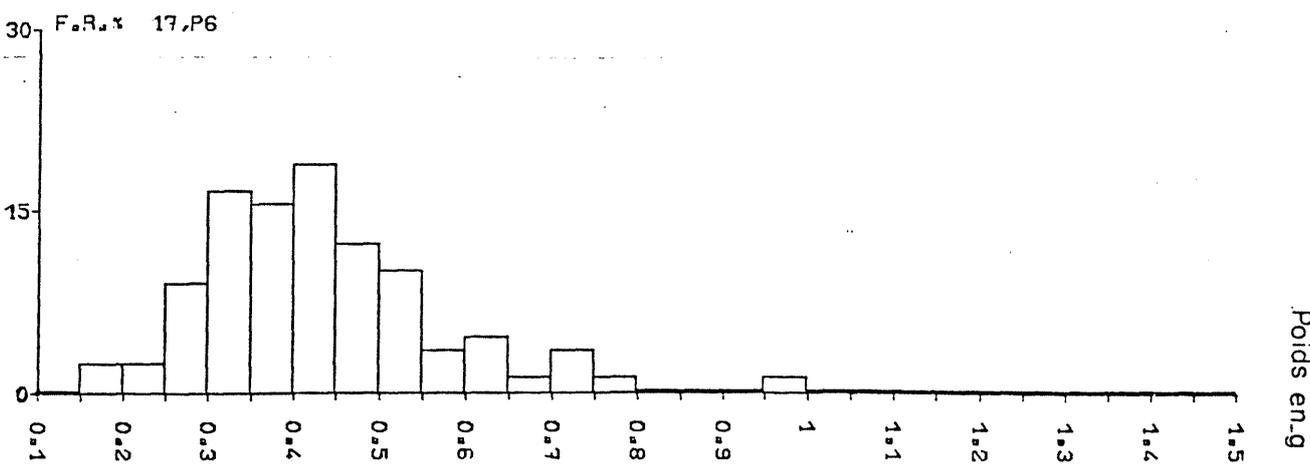
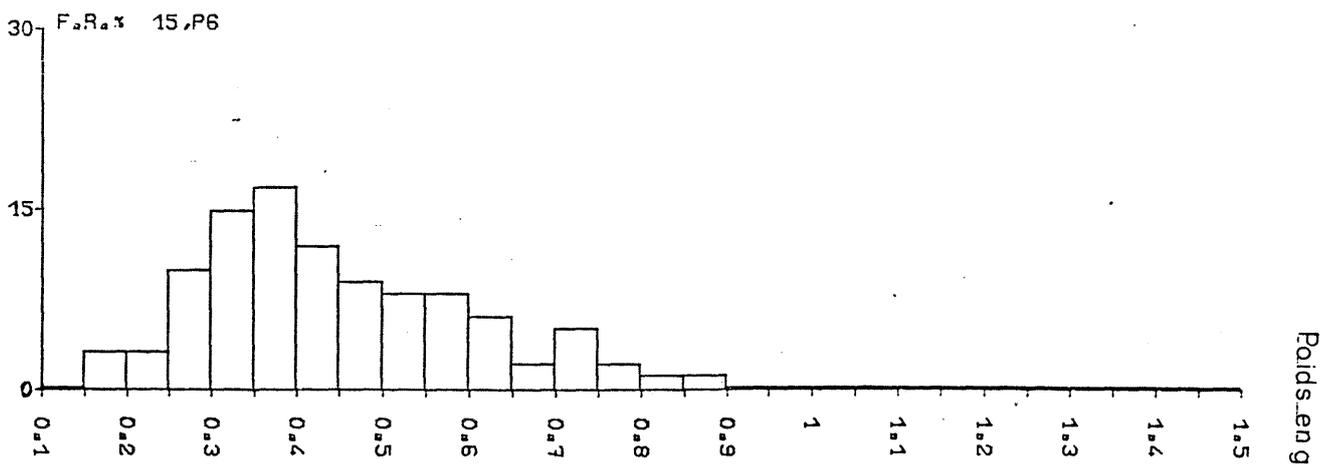
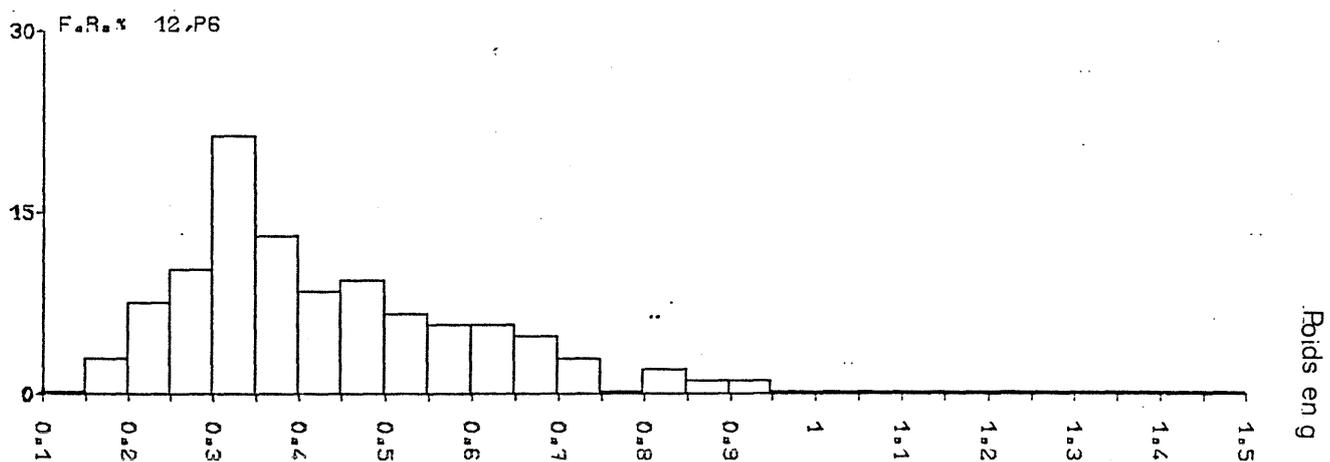
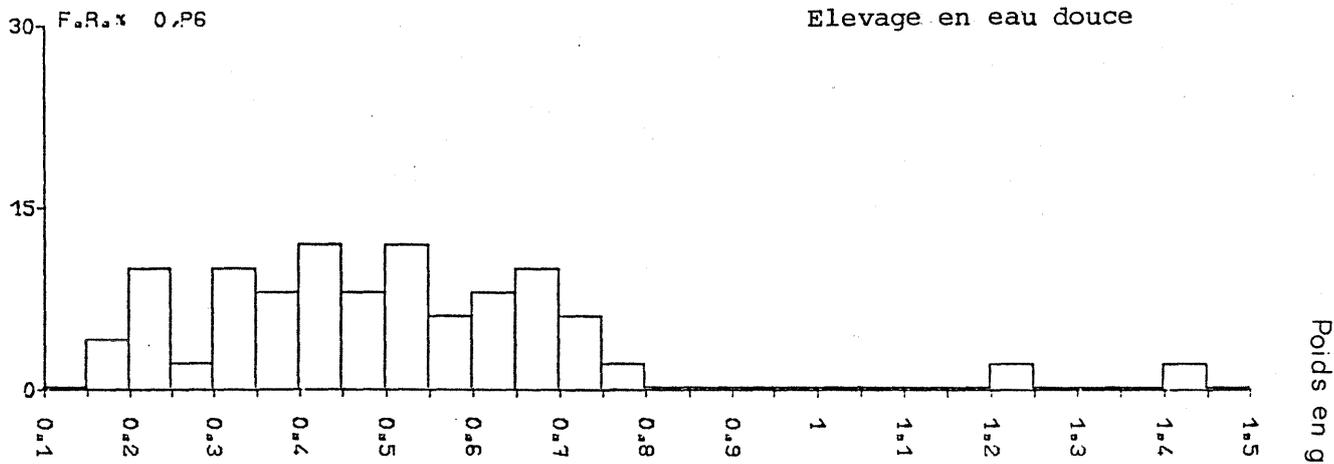


Fig. 24.- Distribution des fréquences de poids individuels en fin d'élevage.

0	12	15	17	
	$\epsilon U = 0.731$ / -	$\epsilon U = 1.665$ / -	$\epsilon U = 1.796$ / -	0
		$\epsilon U = 1.576$ / -	$\epsilon U = 1.091$ / -	12
			$\epsilon U = 0.440$ / -	15
				17

A - Début d'élevage

0	12	15	17	
	$\epsilon U = 2.148$ / +	$\epsilon U = 1.465$ / -	$\epsilon U = 2.091$ / +	0
		$\epsilon U = 1.121$ / -	$\epsilon U = 0.670$ / -	12
			$\epsilon U = 0.628$ / -	15
				17

B - Fin d'élevage

Tabl. 15.- Test de Mann-Witney-Wilcoxon - Comparaison des distributions des différents lots pris deux à deux : A - en début d'élevage
B - en fin d'élevage.

ϵ_U représente l'écart réduit entre la valeur U calculée et la valeur U_0 attendue si les distributions sont égales.

On saura si U s'écarte significativement de U_0 en consultant la table de l'écart réduit. Au seuil de 5 % d'erreur les distributions sont significativement différentes (+) si $\epsilon_U > 1.96$.

PESEES	P ₁ 5.05.82		P ₂ 22.05.82		P ₃ 21.06.82		P ₄ 3.07.82		P ₅ 17.07.82	
LOT	N	\bar{X}	N	\bar{X}	N	\bar{X}	N	\bar{X}	N	\bar{X}
Témoin 1	61	0.25	61	0.26	19	0.36	18	0.41	17	0.47
Témoin 2	59	0.25	59	0.24	18	0.37	18	0.40	17	0.47
Témoin total	120	0.25	120	0.25	37	0.36	36	0.41	34	0.47
ΔT 12 1	62	0.25	61	0.24	4	0.32	5	0.28	5	0.33
ΔT 12 2	59	0.25	59	0.25	18	0.31	16	0.33	14	0.37
ΔT 12 total	121	0.25	120	0.24	22	0.31	21	0.31	19	0.36
ΔT 15 1	62	0.25	62	0.24	52	0.27	48	0.28	48	0.34
ΔT 15 2	59	0.25	59	0.25	18	0.33	19	0.38	19	0.45
ΔT 15 total	121	0.25	121	0.24	70	0.29	67	0.31	67	0.37

↑
C.T

Tabl. 16.- Elevage en eau saumâtre à 15 ‰

N = nombre d'individus

\bar{X} = poids moyen en gramme

C.T = choc thermique

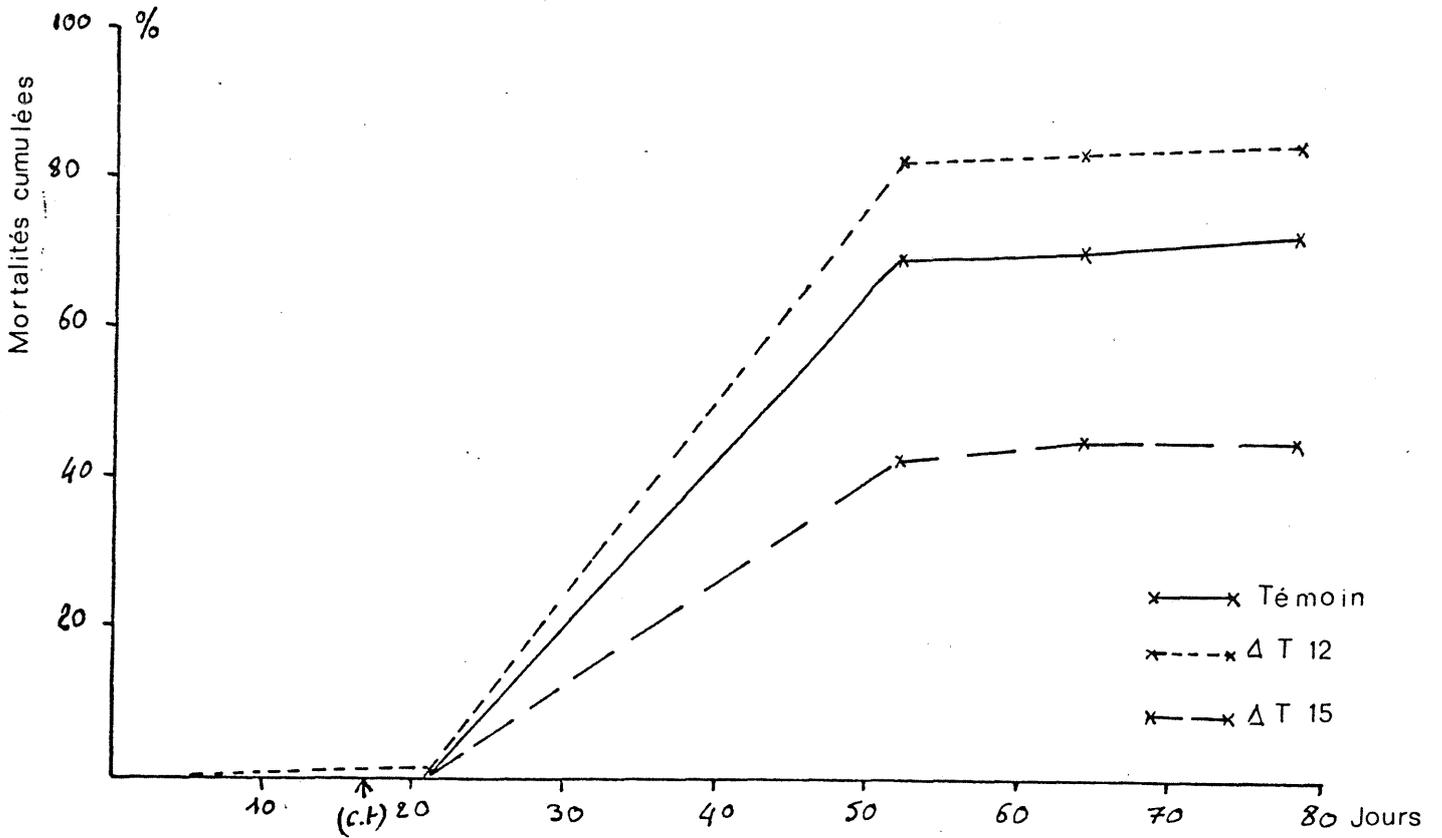
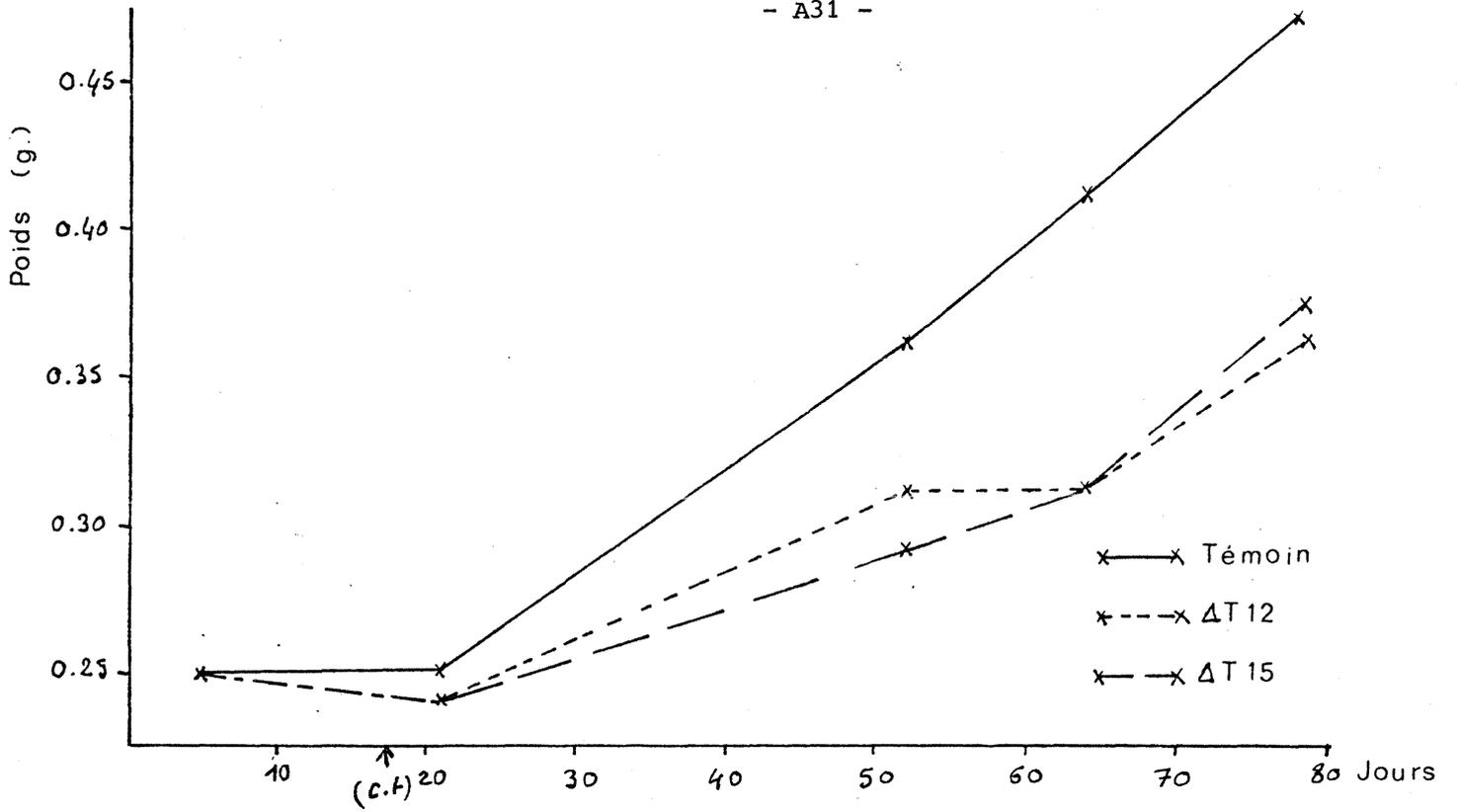


Fig. 26.- Elevage en eau saumâtre (S = 15 %). Evolution des poids moyens individuels (H) et de la mortalité (B) en fonction du temps.

c.t. : choc thermique.

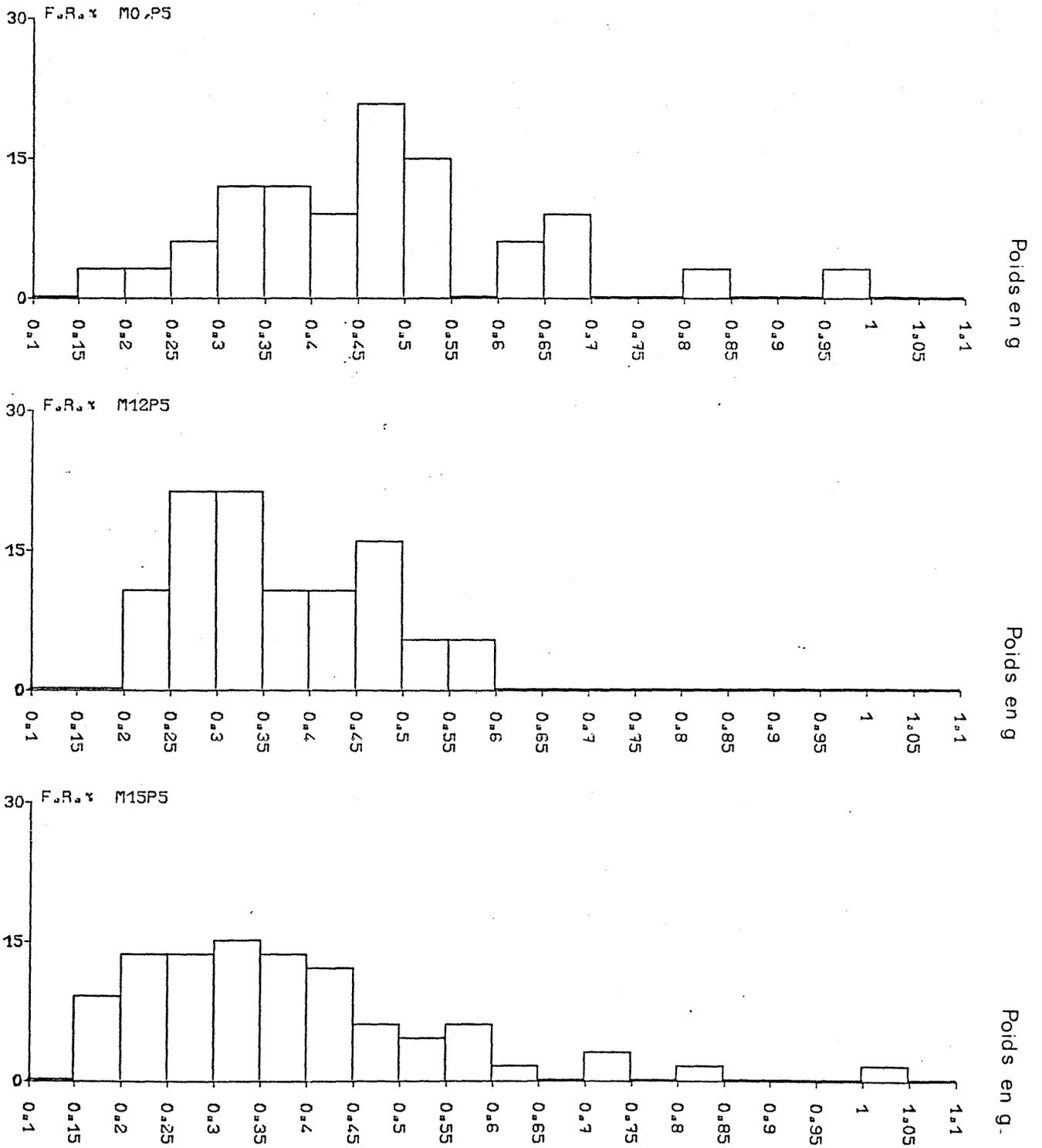


Fig. 27.- Elevage en eau saumâtre (S = 15 %). Distribution des fréquences de poids individuels en fin d'élevage.

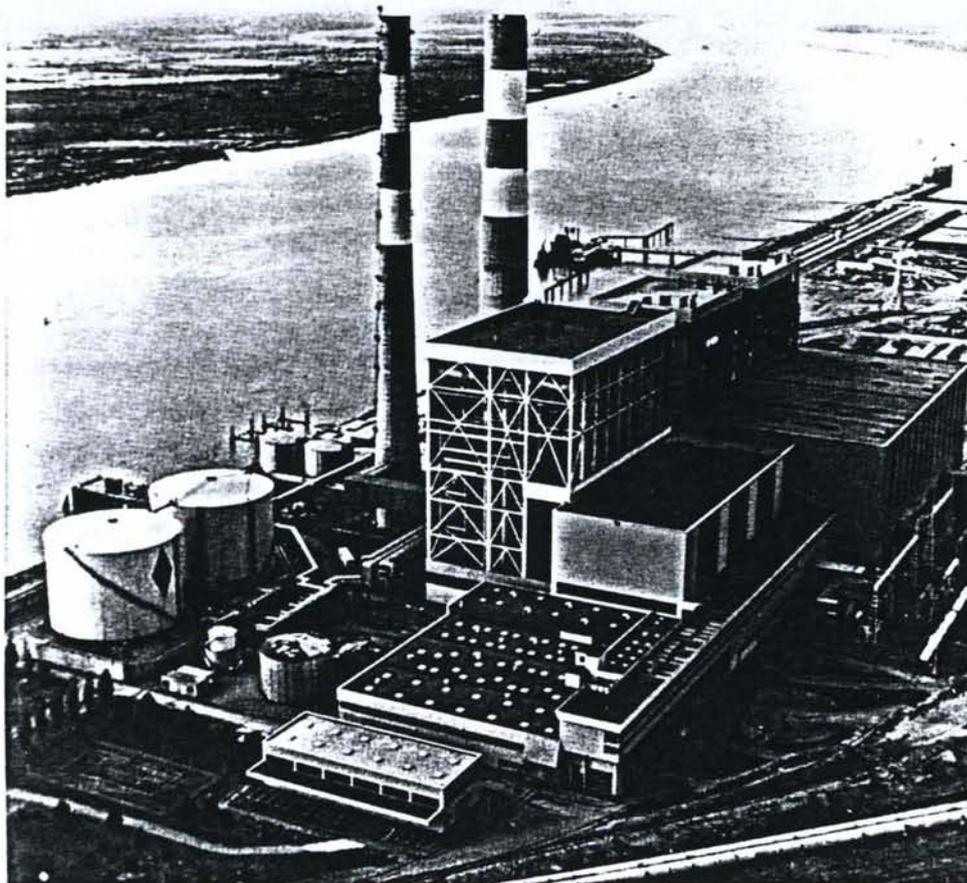


Photo 1.- Vue générale de la centrale de Cordemais.

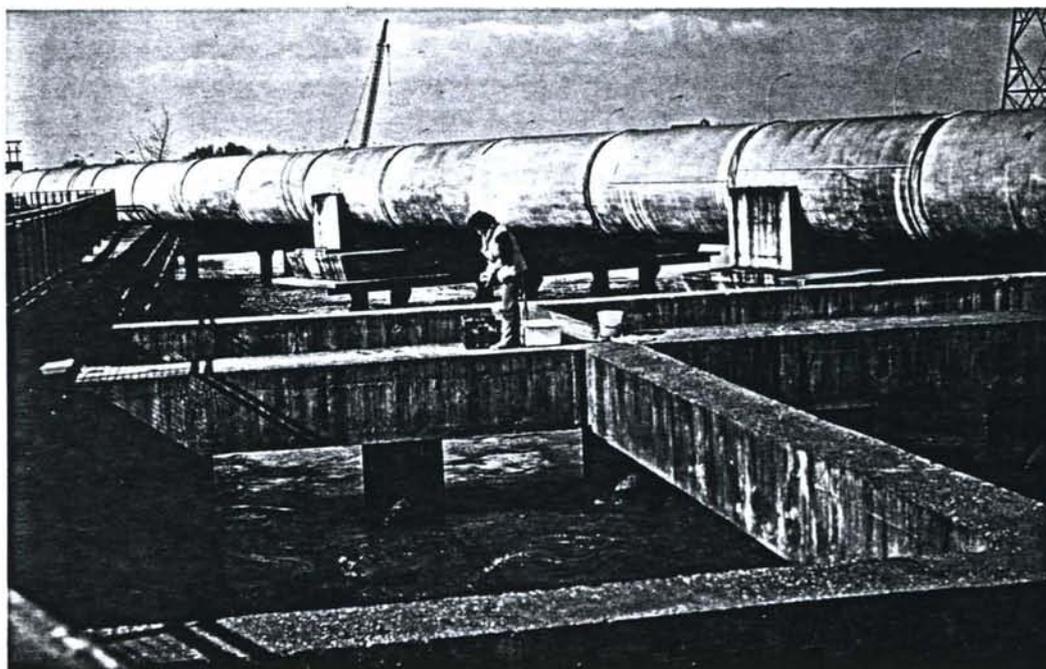


Photo 2.- Rejet de la tranche n° 1

→ point d'ancrage des filets.

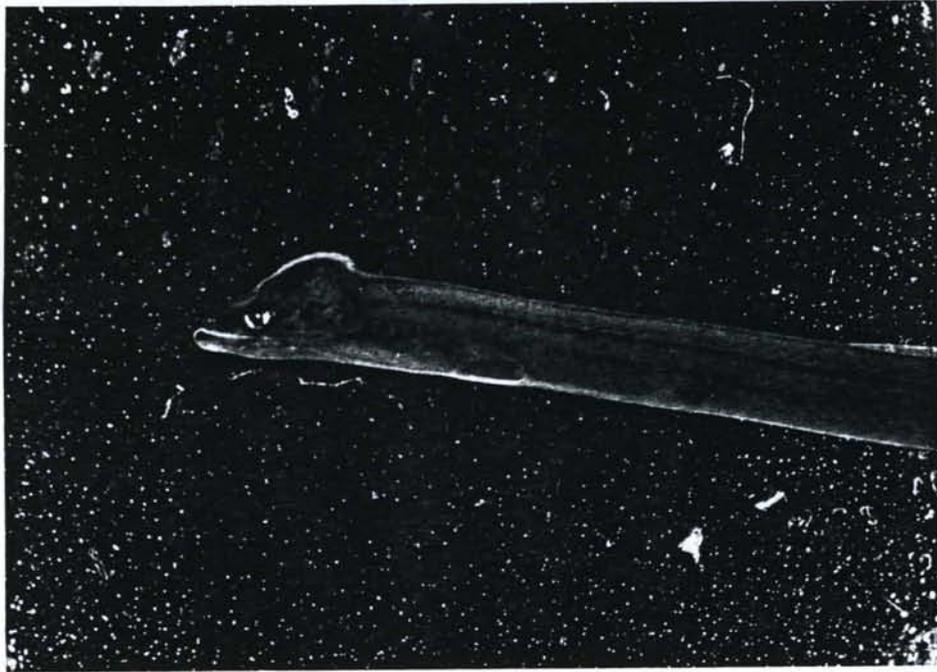


Photo 3.- Dilatation et hémorragie cérébrales consécutives à un choc thermique de 17 °C.



Photo 4.- Civelles en coma thermique ($\Delta T = 17^{\circ}\text{C}$) montrant une torsion anormale de la colonne vertébrale.

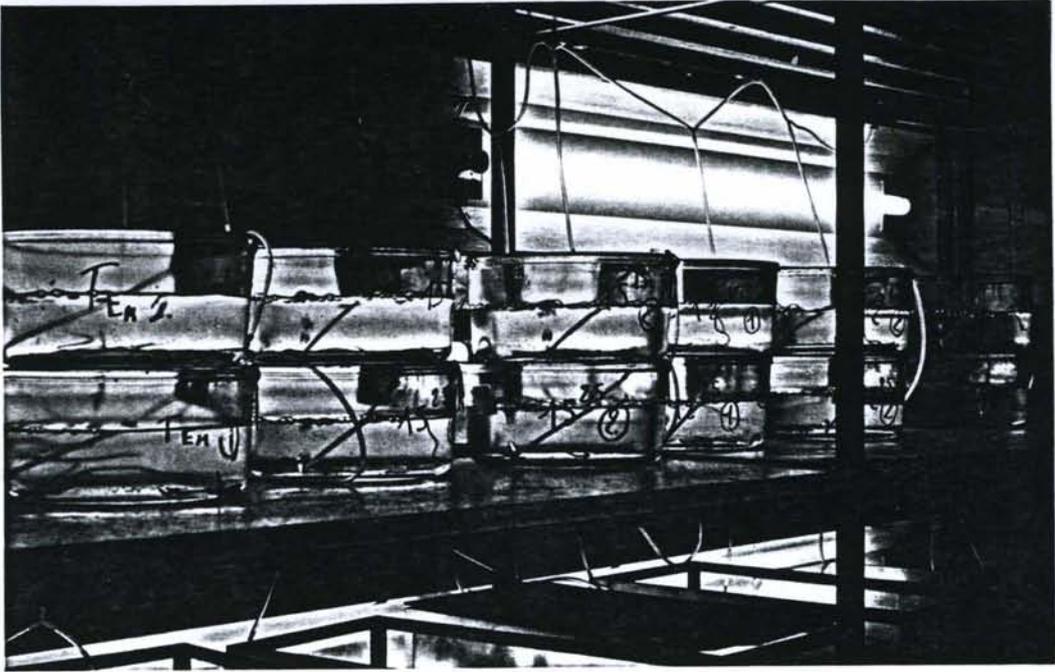


Photo 5.- Etude de survie d'individus ayant subi un stress thermique.

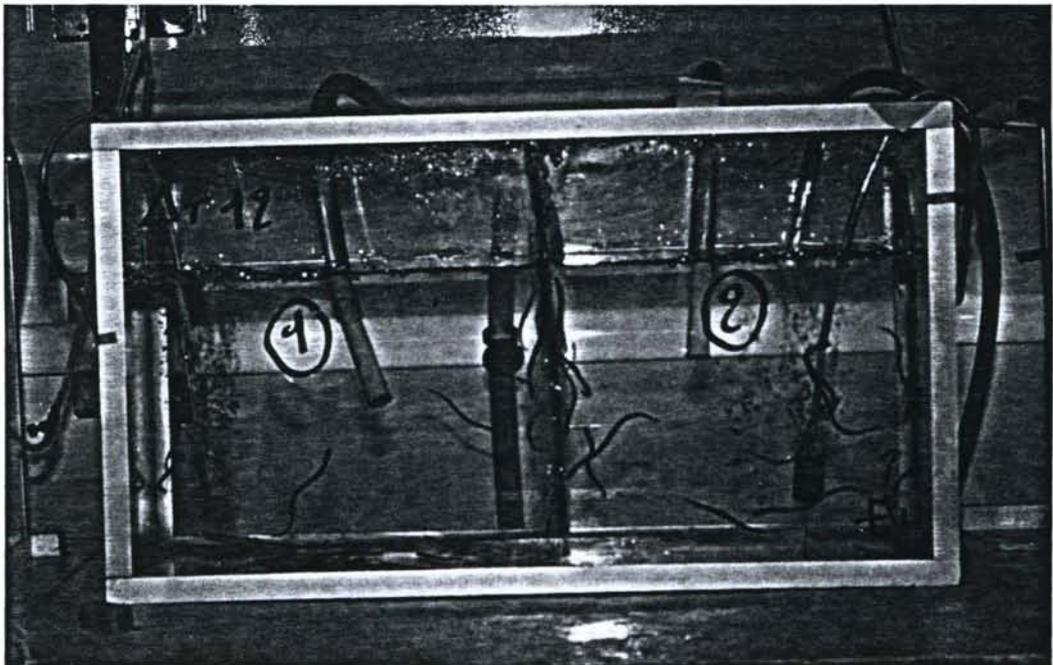


Photo 6.- Suivi de croissance : enceinte d'élevage.

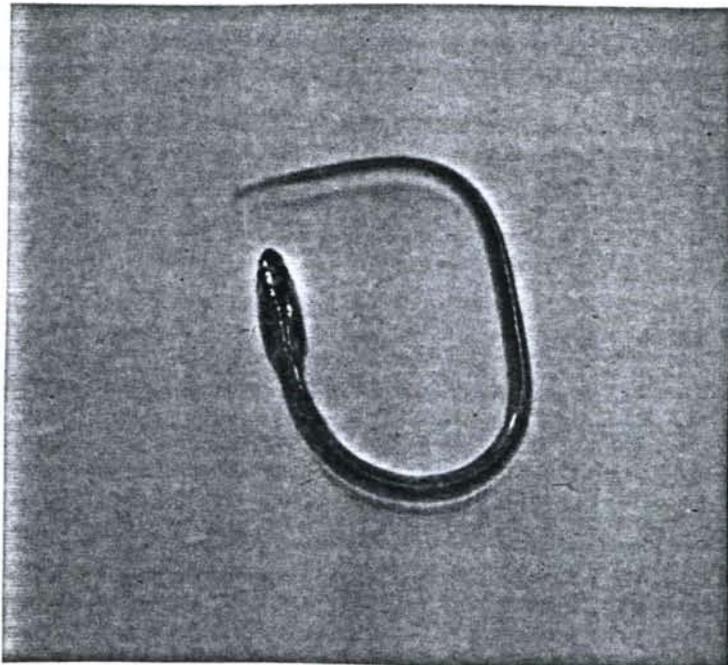


Photo 7.- Civelle atteinte d'aeromonose supposée.

- 1 - hémorragie de la tête et de la cavité branchiale
- 2 - congestion de la nageoire dorsale (peu visible)
- 3 - atteinte de la nageoire caudale.

ADDENDA

La deuxième édition du SOKAL et ROHLF (1981) apporte quelques précisions et modifications concernant l'utilisation du test G.

I-Tests G à deux et trois dimensions.

Les tests réalisés à partir de petits échantillons (25 à 200 individus) tendent à donner des valeurs trop élevées des G calculés. Ces valeurs doivent être alors pondérées par une correction, dite correction de WILLIAM dont la formule est fonction notamment des totaux marginaux des tableaux de contingence étudiés.

II-Tests G à trois dimensions.

L'analyse de tableaux de contingence à trois dimensions est depuis peu basée sur l'étude de modèles linéaires logarithmiques qui sont le pendant de modèles linéaires appliqués à des variables continues tels l'analyse de variance ou la régression multiple.

pour un tableau de contingence à trois dimensions, le modèle de base est le suivant:

$$\ln \hat{f}_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \alpha\beta_{ij} + \alpha\gamma_{ik} + \beta\gamma_{jk} + \alpha\beta\gamma_{ijk}$$

ou: - \hat{f}_{ijk} est la fréquence attendue pour les niveaux i, j, k des facteurs A, B, C respectivement,

- μ est la moyenne des logarithmes des fréquences attendues,

- $\alpha_i, \beta_j, \gamma_k$ sont les contributions respectives propres à chacun des trois facteurs A, B, C,

$-\alpha\beta_{ij}, \alpha\gamma_{ik}, \beta\gamma_{jk}$ sont les termes d'interaction des trois facteurs pris deux à deux,

$-\alpha\beta\gamma_{ijk}$ est le terme d'interaction complète des trois facteurs.

Le test G à trois dimensions s'attache à préciser l'existence ou la non existence de chacun des termes d'interaction définis ci-dessus.

L'étude de la contribution d'un terme d'interaction donné repose sur l'établissement et la comparaison de deux modèles : l'un faisant intervenir ce terme, l'autre duquel ce dernier est exclu. Une valeur de G est calculée pour chacun des deux modèles. La différence existant entre les deux G obtenus sert à déterminer si la contribution du terme d'interaction étudié est significative ou non.

Le calcul systématique des fréquences attendues pour chacune des fréquences observées permet d'examiner la déviation obtenue entre ces deux fréquences (déviations de Freeman et Tukey). L'obtention de déviation(s) significative(s) au sein d'un modèle, même s'il présente un G non significatif suggère la non validité de ce modèle qui doit, donc être rejeté. Une nouvelle partition du tableau de contingence étudié doit être réalisée, suivie des comparaisons orthogonales des nouveaux modèles obtenus.

Dans l'analyse d'un tableau de contingence à trois dimensions, on teste une série hiérarchisée de modèles linéaires logarithmiques en partant du plus complexe (voir figure 1).

1-Test sur l'interaction complète des trois facteurs étudiés.

L'hypothèse nulle testée est: $\alpha\beta\gamma_{ijk} = 0$.

si elle est acceptée, il n'existe pas d'association simultanée des trois facteurs. Les seules associations possibles sont des associations partielles entre paire(s) de variables. Si l'interaction est significative, le degré d'association entre deux facteurs est fonction du niveau du troisième facteur. Il est alors inutile de chercher à simplifier le modèle. Il convient, par contre, de tester l'indépendance de deux facteurs entre eux pour chaque niveau du troisième facteur (tests à deux dimensions).

2-Tests d'indépendance conditionnelle.

L'hypothèse nulle testée est l'indépendance de deux des facteurs pour tous les niveaux du troisième facteur. Si elle est acceptée le terme d'interaction des deux facteurs testé est supprimé du modèle (ex: $\alpha\beta_{ij} = 0$ ou $\alpha\delta_{ik} = 0$ ou $\beta\delta_{jk} = 0$).

3-test d'indépendance totale d'un des facteurs.

Dans ce cas, deux termes d'interaction des facteurs pris deux à deux sont absents du modèle testé ($\alpha\beta_{ij} = 0$ et $\beta\delta_{jk} = 0$ ou $\alpha\beta_{ij} = 0$ et $\alpha\delta_{ik} = 0$ ou $\beta\delta_{jk} = 0$ et $\alpha\delta_{ik} = 0$).

4-Test d'indépendance totale des trois facteurs.

Le modèle linéaire logarithmique alors testé est le modèle le plus simple dans lequel tous les termes d'interaction sont absents.

En pratique, il est inutile de réaliser tous ces tests de façon systématique. Il faut procéder de façon séquentielle, jusqu'à l'obtention du modèle le plus simple possible.

Si l'un des tableaux de contingence à deux dimensions est fixé par le plan expérimental, alors, le terme d'interaction correspondant doit être conservé dans tous les modèles testés. L'effet (significatif ou non, en théorie) de ce terme ne

doit pas être testé. Il est indépendant de l'expérience elle-même puisque sous le contrôle de l'expérimentateur.

Ce cas particulier s'applique à toutes les expériences de l'étude considérée. En effet, les valeurs des tableaux de contingence TE*S, TE*R, T*S etc... sont déterminées par le plan expérimental.

INCIDENCE DES MODIFICATIONS PRESENTÉES CI-DESSUS SUR LES CONCLUSIONS DEGAGÉES DE L'ANALYSE DES DONNÉES SELON LA PREMIÈRE ÉDITION DU SOKAL ET ROHLF.

Toutes les données ont été reprises et analysées par de nouveaux programmes intégrant les modifications présentées ci-dessus.

I- Corrections de WILLIAM.

Les G initiaux sont peu diminués et ne deviennent jamais non significatifs s'ils étaient auparavant significatifs.

II- Tests G à trois dimensions.

Trois exemples montrant l'utilisation de cette nouvelle technique d'analyse figurent ci-dessous.

1- Etude de la mortalité (M), de l'intensité du choc thermique subi (ΔT) et du temps d'exposition (TE). (cf. tab. 6, A18).

a- Pour $T=[0,17]$.

L'interaction simultanée des trois facteurs apparaît significative. ($G=8.38$ à comparer à un $\chi^2_{[3]}=7.81$).

Des tests à deux dimensions TE*M réalisés pour chaque niveau de ΔT montrent que ces deux facteurs ne sont pas indépendants pour un $T > 15^\circ\text{C}$.

b- Pour un $\Delta T = [0, 15]$.

Le diagramme obtenu (figure 2), montre que l'on peut conclure à une indépendance totale de la mortalité vis-à-vis des deux facteurs étudiés TE et ΔT .

2- Etude de la mortalité (M), du stade de développement (S) et du temps d'exposition (TE). (cf. tab. 11, A21).

Le diagramme obtenu (figure 3) montre que l'on peut conclure à une indépendance conditionnelle de la mortalité et du temps d'exposition. La mortalité apparaît cependant fonction du stade de développement.

3- Etude de la mortalité (M), du recyclage (R) et du temps d'exposition (TE). (cf. tab. 13, A22).

Le diagramme obtenu (figure 4) montre qu'il n'existe pas d'interaction totale des trois facteurs. Les tests d'indépendance conditionnelle des trois facteurs pris deux à deux montrent cependant que la mortalité dépend:

- du nombre de recyclages
- du temps d'exposition

Les conclusions établies à partir des résultats de l'ancienne version ne semblent pas devoir être modifiées, tant pour les exemples étudiés ci-dessus que pour les autres tests

réalisées. Ceci est du notamment aux partitions effectuées dans la première analyse. (ex. étude de l'influence d'un facteur donné sur la mortalité - pour un $T \leq 15$
- Pour un $T > 15$.)

Il semblait cependant important de vérifier les résultats obtenus.

Test G à 3 dimensions

modèle de base : $\ln \hat{f}_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \alpha\beta_{ij} + \alpha\gamma_{ik} + \beta\gamma_{jk} + \alpha\beta\gamma_{ijk}$

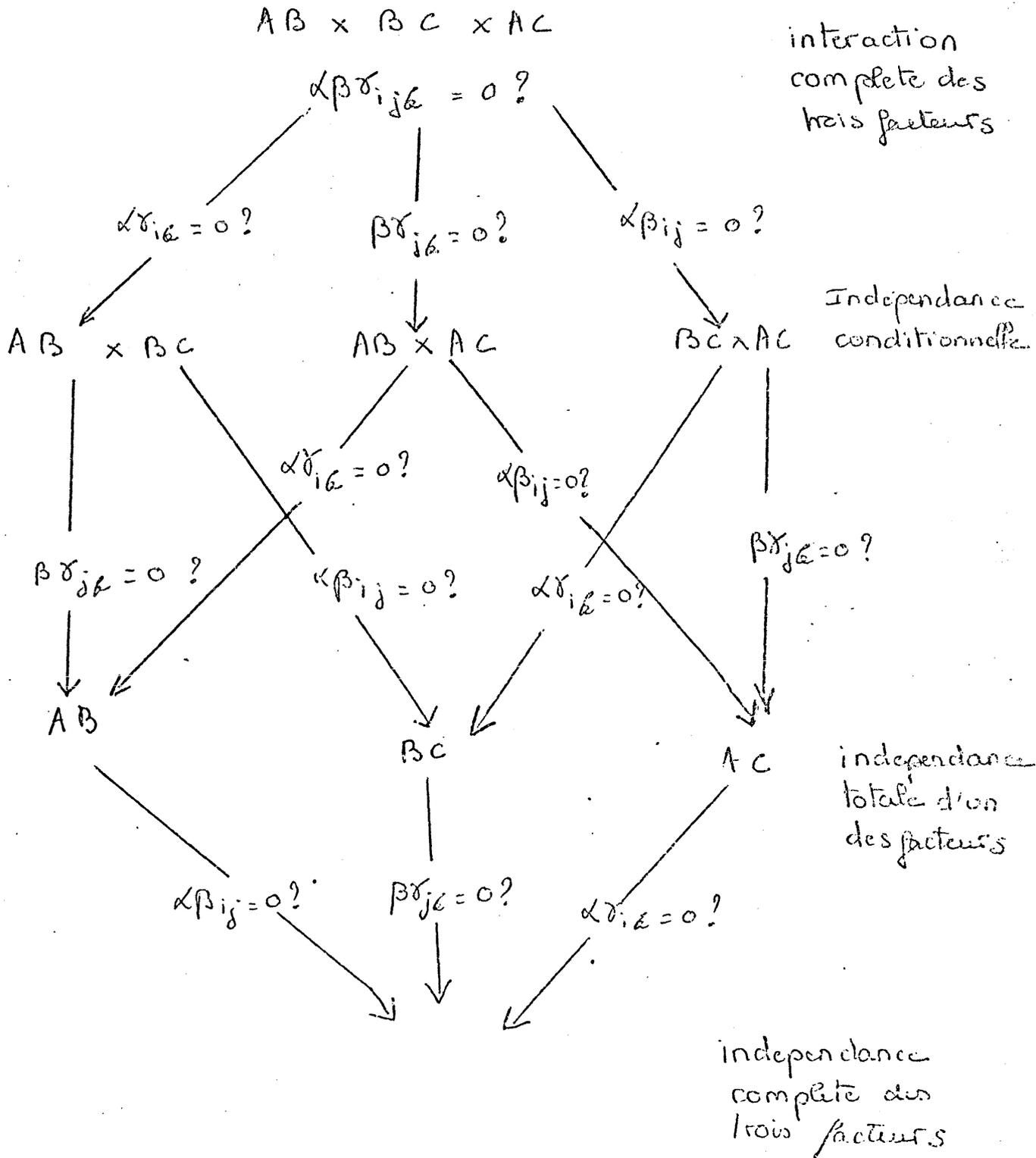


Fig 1 Représentation schématisée de la hiérarchisation des modèles testés dans un test G à 3 dimensions et des hypothèses nulles correspondantes

$\alpha\beta\gamma_{ijk}$ = terme d'interaction des 3 facteurs A, B, C étudiés

$\alpha\beta_{ij}, \alpha\gamma_{ik}, \beta\gamma_{jk}$ = termes d'interactions des 3 facteurs pris deux à deux

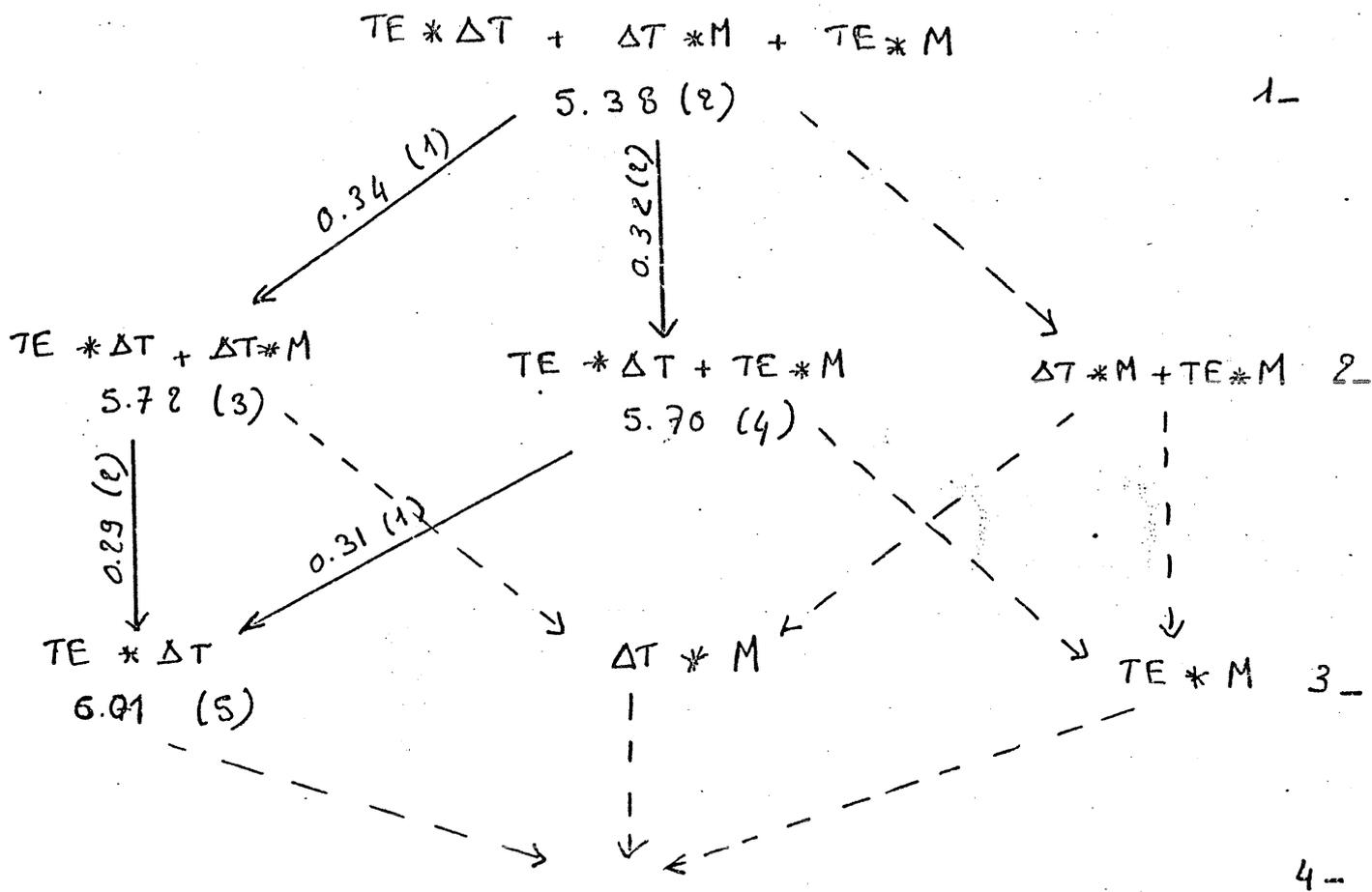


Figure 2 - Relations mortalité (M), temps d'exposition (TE), intensité du choc thermique subi pour un $\Delta T \leq 15^\circ C$.

Les quantités inscrites le long des flèches correspondent à la différence obtenue entre la valeur de G du modèle d'arrivée (tête de la flèche) et celle du modèle de départ. Cette différence correspond à la valeur de G expliquée par la contribution du paramètre d'interaction supprimé dans le modèle d'arrivée. Les valeurs entre parenthèses sont les degrés de liberté associés à la valeur de G correspondante.

Dans le cas présent le modèle le plus simple obtenu est

$$\ln \hat{p}_{ijc} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_c + \alpha\beta_{ij} \quad , \quad \alpha\beta_{ij} \text{ étant un terme d'interaction du à la conception du plan d'expérience.}$$

niveaux des
différents tests

-1-

$$S * TE + S * M + TE * M$$

$$0.228 \text{ (2)}$$

$$6.253 \text{ (1)}$$

$$\frac{63.852}{(2)}$$

$$S * TE + S * M$$

$$0.49 \text{ (3)}$$

$$S * TE + TE * M$$

$$64.080^{**} \text{ (4)}$$

$$S * M + TE * M \text{ -2-}$$

$$\frac{64.77^{**}}{(2)}$$

$$S * TE$$

$$64.77^{**} \text{ (5)}$$

$$S * M$$

$$TE * M \text{ -3-}$$

-3-

-4-

fig 3 - Relation mortalité (M), stades de développement (S),
temps d'exposition (TE) - $\Delta T = 17^\circ C$.

Le modèle le plus simple possible est

$$\ln \hat{p}_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \alpha\beta_{ij} + \alpha\gamma_{jk} -$$

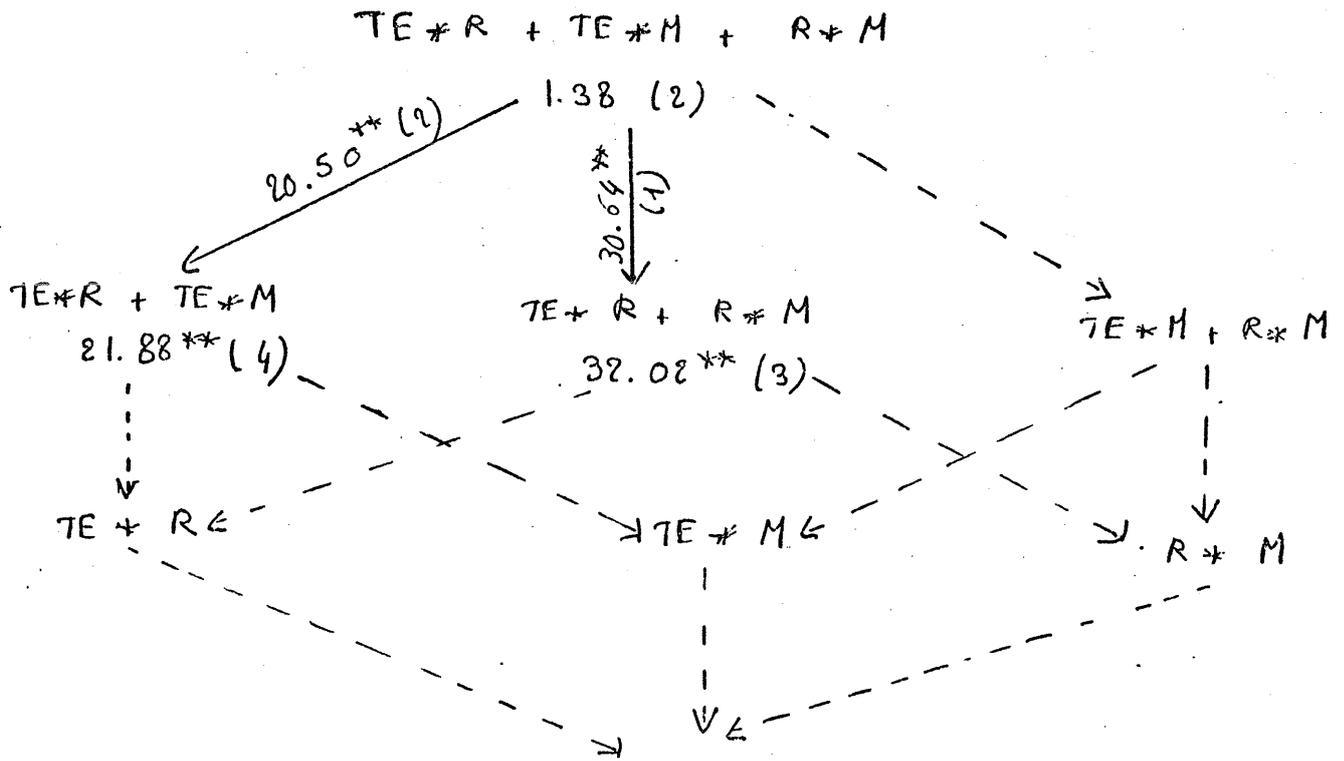


fig 4 - Relations mortalité (M), recyclages (R), temps d'exposition (TE) pour un ΔT de $17^{\circ}C$.

Le modèle le plus simple possible est

$$\ln f_{ijl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_l + \alpha\beta_{ij} + \alpha\gamma_{il} + \beta\gamma_{jl}$$