

**COMPORTEMENT DE POISSONS MARINS
DANS UN CHAMP ELECTRIQUE
PERSPECTIVES D'APPLICATION A LA PECHE**

par René LE MEN

Résumé

Ce travail, divisé en trois parties, constitue une synthèse des connaissances acquises dans le domaine de la pêche électrique en mer. Le premier chapitre traite des seuils de taxie et de tétanie de quelques espèces marines en fonction des stimuli électriques appliqués. Le comportement des poissons dans un champ électrique est étudié dans le deuxième chapitre afin de définir les stimuli réellement efficaces mais aussi les plus économiques du point de vue de la dépense énergétique. Le troisième chapitre présente un système de pêche original par lumière, champ électrique et pompe aspirante, et résume les résultats obtenus à l'I.S.T.P.M. Différents problèmes sont discutés ainsi que le rendement théorique du système pour capturer des sardines, *Sardina pilchardus*. Enfin, le chalut à perche électrifié, largement étudié à l'étranger, est succinctement exposé en annexe.

Abstract

This work, divided in three parts, intends to establish a synthesis of knowledge about electric sea fishing. Taxis and tetanus thresholds for several sea species are studied in the first part for different stimuli. In the second part, fish behaviour in electric field is described to know what sort of stimuli are the most efficient. The third part shows a fishing gear with light, electric field and pump and sums up the results of I.S.T.P.M. studies. Different problems are discussed and theoretical efficiency of the device is evaluated for sardines, *Sardina pilchardus*. At last, foreign studies about electric beam trawl are approached in an annex part.

Introduction.

Très tôt des chercheurs ont pensé à utiliser les effets d'un champ électrique sur les animaux. Dans un historique de la pêche électrique, VIBERT (1966) cite un brevet britannique attribué à BAGGS en 1863. Mais, ce n'est qu'après la première guerre mondiale que l'on s'est sérieusement intéressé à ce type de pêche. Il a alors été démontré qu'il était possible, en appliquant des stimuli électriques appropriés, de faire fuir les poissons ou au contraire de les obliger à nager vers une électrode, de les immobiliser en les paralysant et même de les tuer. Ces différentes réactions ont trouvé rapidement des applications, du moins en eau douce. Des services officiels comme celui du Génie rural des Eaux et Forêts utilisent en effet fréquemment des systèmes de pêche électrique pour identifier les espèces présentes dans les lacs et les rivières, pour permettre leur dénombrement, pour marquer certains poissons comme les truites et les saumons afin de suivre leur migration ou pour supprimer des espèces prédatrices. Les poissons, tout d'abord attirés vers l'électrode positive du système de pêche, sont paralysés à son proche voisinage en raison de la forte densité de courant qui y règne. Il suffit alors de les capturer avec une épuisette.

Bien qu'il soit possible de provoquer les mêmes réactions chez les poissons marins, c'est seulement après 1950 que les chercheurs ont réellement envisagé des applications en mer. Les conditions de travail sont en effet très différentes et beaucoup moins favorables qu'en eau douce, notamment en raison de la haute conductivité de l'eau de mer. Il serait, de ce fait, utopique d'espérer pêcher, de manière rentable, des poissons marins en utilisant seulement l'électricité. Par contre, il est concevable de perfectionner certains engins de pêche classiques ou même d'en définir de nouveaux en utilisant, à un stade du processus de capture, les effets d'un champ électrique sur les poissons. On peut, par exemple, augmenter l'efficacité d'un chalut en créant un champ électrique à l'avant de son ouverture. Les poissons attirés vers l'anode ou paralysés par le courant n'ont plus la possibilité de fuir à l'approche de l'engin.

En fait, le but recherché n'est pas seulement d'accroître les captures mais, bien souvent, l'idée directrice du scientifique est de mettre au point un système de pêche sélectif. Nous verrons en effet que les poissons soumis à un stimulus électrique réagissent différemment selon leur espèce et leur taille. Or, il serait intéressant, alors que la plupart des espèces sont surexploitées, de disposer d'un système de pêche capable d'assurer, pour une espèce donnée, la capture des poissons adultes tout en épargnant les formes juvéniles. C'est cette possibilité qui a surtout motivé les recherches entreprises à l'Institut scientifique et technique des Pêches maritimes sur un système de pêche par lumière, champ électrique et pompe aspirante. Cette technique utilise trois phases attractives de nature différente. Les poissons photophiles sont d'abord regroupés autour d'une source lumineuse immergée, sous les effets du stimulus photique. Le champ électrique est alors établi pour obliger les poissons à nager vers l'embouchure de la pompe qui joue également le rôle d'anode. Les poissons ainsi aspirés à bord du navire sont déversés dans un séparateur qui permet de les recueillir dans une trémie tandis que l'eau est rejetée à la mer.

Des essais furent réalisés, de manière assez empirique, de 1960 à 1963 à bord du "Roselys I", navire de l'I.S.T.P.M. armé à la sardine. Ces premières tentatives, effectuées par KURC (I.S.T.P.M.) et HALSBAND (Institut für Küsten- und Binnenfischerei, Hambourg), démontrèrent la nécessité d'études préliminaires plus poussées.

Il était, d'une part, indispensable de déterminer avec plus de précision les caractéristiques des stimuli électriques capables d'attirer les poissons de manière réellement coercitive.

D'autre part, il fallait calculer un système d'électrodes particulièrement adapté à cette technique, afin d'obtenir, pour une dépense énergétique donnée, une zone de pêche optimale.

Ces études constituent l'essentiel du présent travail qui a été mené dans l'optique permanente d'une application directe à la réalisation d'un système de pêche par lumière, champ électrique et pompe aspirante.

CHAPITRE I

DETERMINATION ET ETUDE DES SEUILS DE TAXIE ET DE TETANIE

1° Réactions des poissons dans un champ électrique et signification des seuils.

1. Généralités.

Les travaux de FESSARD (1936) et de MONNIER *et al.* (1940) sur le nerf et sur le muscle ont montré qu'un courant électrique pouvait donner naissance à des influx nerveux ou musculaires. Or, lorsqu'un animal est placé dans un champ électrique, une différence de potentiel est appliquée à chacune de ses parties constitutives, notamment à ses fibres nerveuses ou musculaires. Des réactions involontaires peuvent donc être ainsi déclenchées et c'est ce phénomène qui est utilisé en pêche électrique.

Un système d'électrodes immergé sous tension crée un champ électrique dans le milieu aquatique. Les réactions d'un poisson dépendent alors des caractéristiques physiques du stimulus électrique à l'endroit où il se trouve. Elles dépendent également des conditions de milieu, de l'espèce et de la taille de l'individu ainsi que de son orientation dans le champ électrique (BLANCHETEAU *et al.*, 1961; LAMARQUE, 1963). En effet, pour un gradient de potentiel donné, qui caractérise l'intensité du champ électrique à l'endroit considéré, la différence de potentiel entre les extrémités d'une fibre est proportionnelle à sa longueur et au cosinus de l'angle qu'elle forme avec le vecteur champ. Cela signifie d'une part que la différence de potentiel à laquelle est soumise la fibre est d'autant plus élevée que la fibre est plus longue. C'est pourquoi les poissons les plus grands sont les plus sensibles à l'action du courant électrique et présentent les seuils de réaction les plus bas. La longueur des fibres nerveuses est en effet le plus souvent en rapport direct avec la taille de l'animal.

D'autre part, cela signifie aussi que l'excitation d'une fibre est nulle lorsqu'elle se présente perpendiculairement au vecteur champ électrique et devient maximale quand la fibre est parallèle aux lignes de courant. Le type des réactions du poisson est donc lié à son orientation dans le champ, car les éléments nerveux mis en cause en dépendent.

Un grand nombre de comportements des poissons dans un champ électrique ont été identifiés. LAMARQUE (1966) en a inventorié une trentaine en laboratoire. Mais leurs explications neuro-physiologiques sont fort complexes et dépassent le cadre de ce travail. C'est pourquoi nous nous limitons à décrire les réactions qui présentent un intérêt pratique pour la pêche dans le milieu

naturel. Nous présentons ces réactions dans l'ordre où elles se manifestent quand la valeur du champ électrique croît. Elles dépendent du type de courant utilisé, continu, interrompu (appelé encore, impulsif, rupté) ou alternatif.

2. Première réaction.

L'établissement d'un champ électrique de faible intensité provoque, le plus souvent, des tressaillements du corps à la fermeture du circuit. Les poissons peuvent alors manifester des réactions de fuite mais pas de manière systématique. Ils présentent plutôt une activité natatoire « circonspecte ». Par contre, si un individu a déjà subi, au moins une fois, un courant assez intense pour qu'il ait mémorisé une impression d'inconfort suffisamment marqué, il tend presque toujours à fuir lorsqu'il ressent de nouveau les effets d'un champ électrique, même de faible valeur.

3. Taxie anodique.

Lorsque le gradient de potentiel dépasse une certaine valeur appelée seuil de taxie anodique, les poissons s'orientent face à l'anode puis nagent en direction de cette électrode. Ce phénomène, mis en évidence par HERMANN (1885), puis confirmé par BLASIUS et SCHWEIZER (1893), NAGEL (1895), SCHEMINZKY (1924), a été observé ensuite par tous les chercheurs qui ont étudié le comportement des poissons dans un champ électrique.

BLANCHETEAU (1971) montre en se référant à BARRON et MATTHEWS (1938) ainsi qu'à SKOGLUND (1949) que l'orientation du poisson face à l'anode est due à une excitation directe des nerfs spinaux moteurs du côté de l'animal orienté vers l'électrode. Il s'ensuit une contraction musculaire unilatérale qui entraîne une courbure du corps, appelée « courbure anodique », car elle présente toujours une concavité orientée vers l'anode.

La nage forcée en direction de l'anode fait suite à cette réaction d'orientation. D'après BLANCHETEAU (1961, 1965, 1971), en courant continu, la taxie anodique requiert la conjonction des influences cérébrales et médullaires pour le déclenchement des réponses réflexes face à l'anode. Par contre, en courant impulsif, la taxie anodique résulte d'une nage réflexe pure dont l'intégration est seulement médullaire.

Dans le cas du courant alternatif, on ne peut évidemment pas parler de taxie anodique. Avec ce type de courant, l'anode et la cathode permutent à chaque demi-période et le poisson qui est alternativement sollicité par chacune des deux électrodes finit par s'immobiliser entre elles.

4. Narcose et tétanie.

Quand le gradient de potentiel est suffisamment élevé pour dépasser le seuil de narcose en courant continu ou le seuil de tétanie en courant rupté ou alternatif, les poissons sont alors immobilisés, soit par une narcose molle, soit par raideur tétanique. D'après BLANCHETEAU (1971), la narcose traduit une paralysie flaccide qui résulte d'une inhibition directe de la commande cérébrale tandis que la tétanie correspond à une hypertonicité musculaire.

Généralement, les poissons ne sont pas endommagés par un tel traitement ; à la coupure du courant électrique, ils reprennent instantanément un comportement normal. Il existe des exceptions cependant, en particulier quand l'état de narcose ou de tétanie est maintenu trop longtemps. Les poissons mettent alors un certain temps à retrouver une nage équilibrée. Dans les cas extrêmes, ils peuvent même mourir par asphyxie. Lorsque le gradient de potentiel atteint des valeurs très élevées, supérieures à plusieurs fois le seuil de tétanie par exemple, les poissons peuvent être tués par électrocution. Ils peuvent également subir des lésions internes, telles que la rupture de la colonne vertébrale, par suite de contractions musculaires trop violentes. Certaines espèces sont d'ailleurs plus sensibles que d'autres à ces effets.

En fait, l'électrocution n'est utilisée que dans des cas bien spéciaux, généralement pour faciliter la mise à bord du navire d'animaux marins déjà capturés par un engin classique (ligne à thon électrifiée, harpon électrifié). Nous verrons que les réactions réellement utilisées en pêche électrique sont les effets de fuite volontairement provoqués, l'attraction des poissons par taxie anodique et leur immobilisation par narcose ou tétanie.

2° *Choix du stimulus électrique en eau de mer.*

Etant donné que le courant alternatif n'a pas d'effet attractif sur les poissons, le choix se limite entre deux sortes de courants polarisés, le courant continu ou le courant interrompu. L'un comme l'autre ont trouvé des applications en eau douce. Nous allons voir que seul le courant impulsionnel peut être raisonnablement utilisé en eau de mer.

1. Considérations énergétiques.

Si la résistivité de l'eau douce peut varier considérablement selon son origine et son degré de pureté, celle de l'eau de mer est rarement supérieure à 20 Ω cm. HALSBAND (1966) estime que la conductivité de l'eau de mer est en moyenne 500 fois plus élevée que celle de l'eau douce. La résistance ohmique opposée au courant électrique entre les électrodes d'un même système varie donc dans ce rapport. D'après la loi d'Ohm, l'établissement d'une certaine tension électrique en mer nécessite une intensité et donc une puissance environ 500 fois plus importante qu'en eau douce.

Cela signifie qu'un appareil de quelques kilowatts, conçu pour travailler en rivière, demanderait, pour produire les mêmes effets en mer, une puissance de l'ordre du mégawatt. Débitier une telle puissance sur une impédance de charge très faible poserait un problème technique pratiquement insurmontable et de toute manière un tel système ne serait pas rentable.

En revanche, il est possible de diminuer sérieusement l'énergie consommée en utilisant un courant rupté. La puissance instantanée émise à chaque impulsion demeure considérable mais l'énergie moyenne dissipée est beaucoup plus faible.

Elle est proportionnelle au produit de la durée des impulsions par leur fréquence, c'est-à-dire au « duty-cycle ». L'énergie dépensée sera d'autant plus faible que les impulsions seront plus courtes et la fréquence plus basse. Mais nous verrons qu'il n'est pas possible de dépasser certaines limites, sinon le stimulus devient inefficace.

Le courant impulsionnel présente un autre intérêt, car les seuils de taxie et de tétanie sont plus bas qu'en courant continu (BLANCHETEAU, 1971). Ils sont donc atteints pour une tension moins élevée, ce qui limite encore la dépense énergétique.

2. Efficacité du stimulus impulsionnel.

Le courant impulsionnel n'est pas seulement préférable au courant continu en ce qu'il consomme moins d'énergie, mais également parce qu'il déclenche des réactions plus efficaces.

En effet, nous avons vu que, d'après BLANCHETEAU, le mécanisme réflexe de la taxie anodique est purement médullaire en courant rupté tandis que la participation du cerveau intervient également en courant continu. La nage provoquée par le courant continu peut donc être contrariée par des réactions cérébrales d'évitement et par des inhibitions provenant d'autres stimuli. Ce serait en particulier à craindre dans le cas du système de pêche par lumière, champ électrique et pompe où les lampes éclairantes sont très proches de l'anode. BLANCHETEAU et KURC (1966, 1967) ont en effet observé qu'un stimulus photique trop intense cesse d'être attractif et devient au contraire répulsif.

Le courant impulsionnel est donc incontestablement le type de courant à utiliser en mer. Mais son efficacité sur les poissons dépend non seulement de la tension-crête des impulsions, mais aussi de leur forme, de leur durée et de leur fréquence. Il importe donc d'étudier ces paramètres.

a) *Forme d'impulsion.*

LOUKASHKIN et GRANT (1954) ont testé cinq formes différentes d'impulsions au cours de leurs travaux sur la sardine du Pacifique, *Sardinops caerulea* (impulsions rectangulaires et triangulaires, courant alternatif redressé simple alternance et quart d'onde, décharges de condensateur). Ils ont constaté qu'elles pouvaient toutes avoir des effets satisfaisants, à condition que la densité de courant soit suffisante.

Mais certaines formes d'impulsion sont plus efficaces que d'autres, à dépense énergétique égale. D'après HALSBAND (1959, 1966) et LAMARQUE (1966), les impulsions qui conviennent le

mieux pour entretenir une taxie anodique sont celles qui présentent une brusque montée de la tension à la fermeture du circuit. C'est en particulier le cas des impulsions rectangulaires et des décharges de condensateur où le maximum de la tension est atteint presque instantanément (fig. 1).

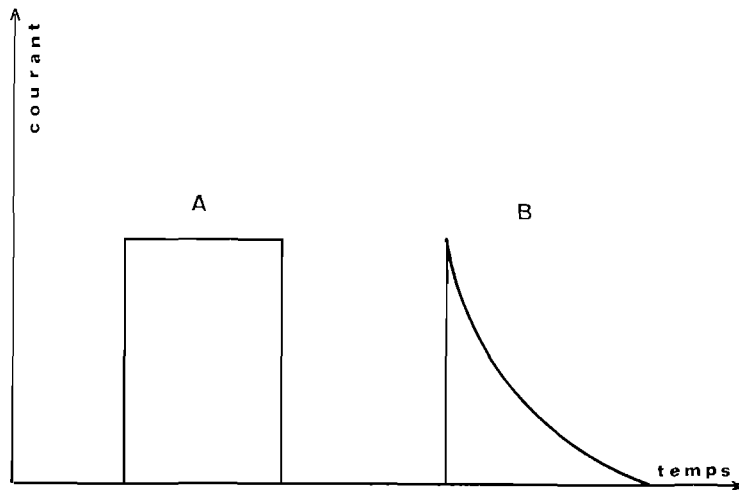


FIG. 1. — Deux types d'impulsion électrique ; A : forme rectangulaire, B : décharge de condensateur.

Lorsque le champ électrique n'est pas homogène, mais croissant et de valeur élevée, LAMARQUE (1966) pense que les impulsions rectangulaires dont la tension reste constante risquent d'être plus tétanisantes que les décharges de condensateur dont la tension décroît exponentiellement. Or, avec le système de pêche par lumière, champ électrique et pompe, nous verrons qu'il est souhaitable que les poissons se rapprochent au maximum de l'anode avant d'être tétanisés. Mais, étant donné la puissance électrique relativement importante nécessaire en mer, des considérations d'ordre technologique nous ont finalement conduits à utiliser les impulsions rectangulaires. Il nous a en effet paru intéressant de pouvoir nous servir d'un générateur très performant mis au point par la Compagnie générale d'Electricité (C.G.E.). Cet appareil de réglage très souple, destiné au déclenchement de rayons laser, est capable de délivrer des impulsions rectangulaires de grande puissance sur une impédance de charge très faible.

b) *Durée d'impulsion.*

Les impulsions les plus courtes sont, a priori, les plus économiques. Mais pour déclencher un influx nerveux, il faut soumettre le nerf à une tension minimale spécifique, appelée rhéobase, et à une durée de passage du courant minimale spécifique. En physiologie du nerf, c'est surtout la chronaxie qui est prise en considération. Elle représente le temps minimum pendant lequel doit agir une tension double de la rhéobase pour qu'un influx se propage à travers la fibre. Les impulsions dont la durée est trop faible par rapport à la chronaxie restent inefficaces.

De plus, HALSBAND (1966) l'explique clairement, il n'est finalement pas intéressant, au point de vue énergétique, d'utiliser les durées efficaces les plus courtes. Nous l'avons constaté également ; les seuils de taxie et de tétanie sont en effet relativement élevés pour ces valeurs liminales. Des durées d'impulsion légèrement plus longues sont en fait plus économiques. BARY (1956), HALSBAND (1966) et KLIMA (1972) sont d'accord pour considérer que les impulsions dont la durée est inférieure à 0,5 milliseconde (ms) ne permettent pas de produire des taxies anodiques dignes d'intérêt pour la pêche.

c) *Fréquence.*

Un stimulus est d'autant plus économique que sa fréquence est plus basse. Mais aux fréquences très faibles, les taxies anodiques sont peu énergiques et les seuils deviennent très élevés. Il n'est pas certain qu'un stimulus de fréquence trop faible ait encore des effets directionnels suffisamment

coercitifs sur les poissons pour les obliger à nager réellement vers l'anode. Ce problème sera étudié dans la deuxième partie de notre travail. Par ailleurs, les seuils de taxie (s) et de tétanie (S) sont directement liés à la fréquence. Or, nous verrons que la zone d'attraction du champ électrique est d'autant plus importante que le rapport $K = \frac{S}{s}$ est plus grand.

Avec des fréquences inférieures à 20 Hertz (Hz), les taxies étaient trop peu marquées, chez les espèces étudiées, pour être significatives. Les taxies deviennent plus énergiques lorsque la fréquence s'élève. De 100 à 200 Hz elles sont généralement très vigoureuses mais les seuils ont alors tendance à croître avec la fréquence. Il est donc inutile d'utiliser des fréquences supérieures à 200 Hz car les taxies ne sont pas meilleures et le stimulus est, en revanche, moins économique. Nous avons donc mesuré systématiquement les seuils de taxie et de tétanie en fonction de la fréquence, entre 20 et 200 Hz, pour différentes durées d'impulsion.

En résumé, un stimulus est d'autant plus satisfaisant qu'il déclenche des taxies plus coercitives et que le rapport $K = \frac{S}{s}$ est plus grand. Par ailleurs, il est d'autant plus économique que les seuils de taxie sont plus bas et que la fréquence et la durée d'impulsion sont plus faibles. Nous verrons qu'il n'est pas simple de concilier ces différents paramètres qui sont à la fois interdépendants et fonction de l'espèce et de la taille du poisson.

3° *Espèces étudiées.*

KURC (1971) rappelle les objectifs de l'I.S.T.P.M. lorsque l'étude d'un système de pêche par lumière, champ électrique et pompe, a été décidée. Cette méthode de capture doit s'appliquer aux espèces pélagiques vivant en bancs près de la surface et photophiles comme les sardines, les anchois, les harengs. Ces poissons, largement représentés, ont une croissance rapide et une reproduction relativement précoce et sont donc, en principe, moins sujets à la surexploitation que les espèces démersales. Cette nouvelle technique de pêche devrait normalement être sélective et par conséquent participer à une bonne gestion des stocks.

Le comportement des poissons dans un champ électrique peut varier sensiblement d'une espèce à une autre. Il faut donc étudier le stimulus électrique et le système de pêche en fonction de l'espèce à capturer. Il a été décidé de s'intéresser d'abord aux clupéidés et en priorité à la sardine, *Sardina pilchardus* (WALBAUM), pour son intérêt économique. Nos études portent donc essentiellement sur le comportement de la sardine dans un champ électrique impulsionnel.

Mais, comme il s'agit d'un poisson fragile, difficile à adapter à la vie en aquarium, nous avons fait des études préliminaires sur d'autres espèces plus résistantes. Elles nous ont permis de tester le matériel expérimental et les méthodes de travail. La nécessité de disposer de poissons vivants et d'eau de mer nous a amenés à travailler dans différents laboratoires côtiers de l'I.S.T.P.M. (à Roscoff en 1972 et début 1973, à l'île d'Yeu en 1973 et à La Trinité-sur-Mer en 1975). Nous n'avons pas choisi les espèces qui nous ont servi pour les premiers tests, mais nous avons utilisé les poissons dont l'approvisionnement posait le moins de problème. Nous avons ainsi mesuré les seuils de taxie et de tétanie de lieus, *Pollachius pollachius* (L.), de bars, *Dicentrarchus labrax* (L.) et de mulets, *Mugil labrosus* (RISSE). Un travail plus complet a été réalisé sur les mulets.

4° *Mesure des seuils en fonction de la fréquence et de la durée d'impulsion.*

1. Matériel.

a) *Rigole expérimentale.*

La « rigole expérimentale » comprend une partie rectiligne à section constante ($0,10 \times 0,10$ m), longue de 1,50 m et deux embouts cylindriques (fig. 2). Les électrodes E_1 et E_2 peuvent coulisser dans un plan vertical, afin de laisser passer le poisson qui est alors aisément récupéré à l'une des extrémités. Etant donné que la section est constante, la tension décroît linéairement de l'anode à la cathode et le gradient de potentiel est le même en chaque point de la rigole (fig. 2). Un

inverseur de tension permet de faire jouer indifféremment le rôle d'anode à l'une ou l'autre des électrodes, ce qui évite de retourner le poisson face à l'anode en cours d'expérience et donc de le perturber au moment de mesurer les seuils.

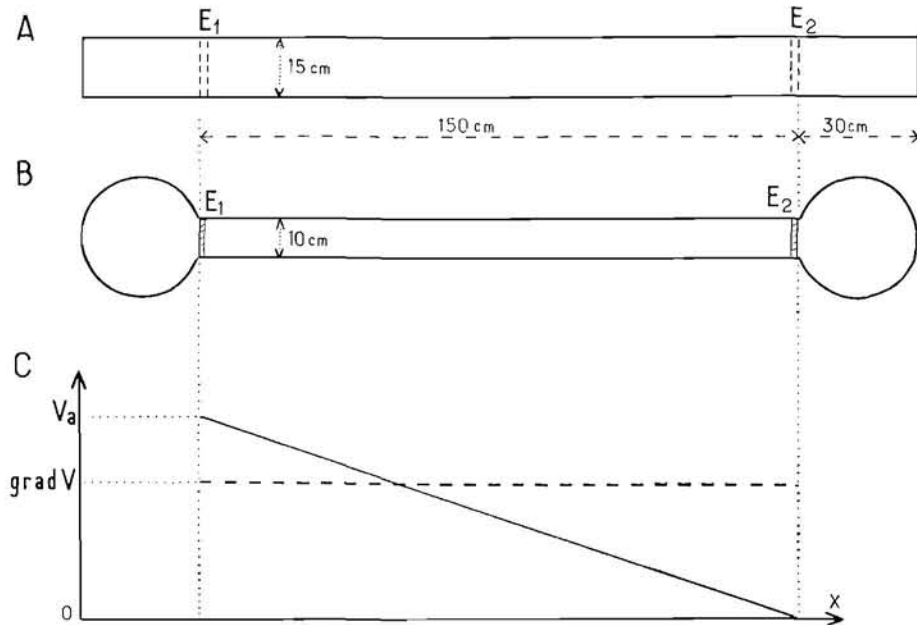


FIG. 2. — Rigole expérimentale utilisée pour la mesure des seuils de taxis et de tétanie ; les extrémités cylindriques servent à recapturer le poisson en fin d'expérience ; pour lui laisser le passage, les électrodes E_1 et E_2 coulissent dans un plan vertical ; A : vue de profil ; B : vue de dessus ; C : variation du potentiel V (trait continu) et du gradient de potentiel $\text{Grad}V$ (tirets) entre les électrodes ; ci-dessous, un mulot se trouve en taxis anodique.



Ce bac a été maintenu en eau en circuit ouvert pour empêcher l'accumulation de produits électrolytiques. Ces produits, dus à la décomposition de l'eau de mer par le courant électrique, auraient pu avoir des effets nocifs sur le poisson et modifier ses réactions. De même, afin d'éviter la production de sels toxiques, les anodes métalliques ont été rejetées au profit d'électrodes en graphite. Ces dernières remarques sont valables pour tous les bacs expérimentaux que nous avons utilisés au cours de nos travaux.

Pour connaître le gradient de potentiel subi par le poisson dans la rigole, la méthode la plus simple en champ électrique homogène est de diviser la tension entre les électrodes par la distance qui les sépare. Mais le phénomène de polarisation sur les électrodes peut être une cause d'erreur. C'est pourquoi nous avons préféré mesurer directement la valeur du gradient en relevant la différence de potentiel entre deux électrodes passives dont l'écartement est connu. Cette tension est lue sur l'écran d'un oscilloscope.

b) Générateur électrique.

Etant donné que nous avons prévu d'utiliser à la

mer un générateur qui délivre des impulsions rectangulaires, il nous fallait disposer pour les études en laboratoire d'un appareil qui débite des impulsions identiques. Comme cet appareil devait pouvoir être transporté facilement d'un laboratoire à un autre, nous avons limité sa puissance à 5 kw. Il n'est pas prévu pour débiter en milieu marin infini mais seulement dans des bacs de volumes relativement modestes puisque le plus grand atteint 2 m³.

Ce générateur impulsif a été construit, suivant nos instructions, par les Ateliers et Chantiers de Bretagne (A.C.B.) à Nantes. Il délivre son énergie sous forme d'impulsions rectangulaires dont la tension-crête est réglable de 0 à 110 V, continûment ou par plots au pas de 1 V. La fréquence et la durée des impulsions peuvent varier suivant deux plages distinctes, respectivement de 10 à 50 Hz et 0,1 à 10 ms ou 50 à 200 Hz et 0,1 à 4 ms. De plus, il est possible de moduler un stimulus de fréquence donnée par une fréquence plus basse et dans un rapport variable afin d'obtenir des trains d'impulsions (fig. 8). Un inverseur permet de changer la polarité des bornes de sortie. Les commandes de mise sous tension, de variation du potentiel, de réglage de la fréquence, de la durée d'impulsion et de la modulation ainsi que du changement de polarité sont disposées sur un pupitre transportable, relié au générateur par un câble multi-conducteur de 6 m de long.

2. Méthode.

Le poisson est placé dans la rigole expérimentale, face à l'anode. La fréquence et la durée d'impulsion qui caractérisent le stimulus étudié ont été affichées au préalable au pupitre de commande. La valeur du gradient de potentiel ne dépend que de la valeur de la tension appliquée entre les électrodes. Cette tension est systématiquement augmentée, volt par volt, jusqu'à ce que la valeur du seuil soit atteinte.

Le seuil de taxie correspond à la valeur minimale du gradient de potentiel capable de déclencher des réactions natatoires coercitives suffisamment soutenues pour obliger le poisson à traverser la rigole. Au contraire, le seuil de tétanie est la valeur minimale du gradient de potentiel capable d'immobiliser le poisson par raideur tétanique à la mise sous tension de la rigole.

Pendant les réglages de tension, la rigole est mise hors circuit pour que les poissons se trouvent au repos. Les expériences n'ont été effectuées que sur des poissons bien adaptés à la vie en aquarium. En faisant plusieurs mesures espacées dans le temps, sur de mêmes individus, nous avons vérifié que les résultats sont répétitifs.

Afin de tenir compte du facteur taille, des lots de poissons de même longueur ont été sélectionnés. Les résultats correspondent à des valeurs moyennes, chaque stimulus ayant été testé sur deux individus au moins.

La température et la conductivité de l'eau ont été relevées avant chaque série de mesures, ce qui permet de déduire la salinité. Pour chaque espèce, les expériences ont été réalisées à température et salinité sensiblement constantes.

3. Résultats.

Pour chaque espèce étudiée, nous présentons, sous forme de courbes, la valeur des seuils de taxie et de tétanie en fonction de la fréquence pour différentes durées d'impulsion (les seuils sont exprimés en volts par mètre (V/m)). Nous indiquons, par des commentaires succincts, les observations que nous avons notées au moment des expériences.

a) Lieux jaunes *Pollachius pollachius* (L.).

Nous avons disposé d'individus jeunes qui mesuraient 14 cm (\pm 0,5 cm). Les seuils ont été mesurés pour trois fréquences : 25 - 50 - 100 Hz et pour cinq durées d'impulsion : 0,25 - 0,5 - 1 - 2 - 4 ms (fig. 3). La température, la résistivité et la salinité de l'eau avaient pour valeurs respectives 10°7 C - 25,8 Ω . cm et 35 ‰.

A 50 et 100 Hz, nous avons observé de belles taxies, tandis qu'à 25 Hz, la nage semblait moins coordonnée, était peu ondulée et manquait d'énergie. A 100 Hz, le phénomène de tétanie

provoquait l'ouverture des ouïes et une cambrure très marquée de la colonne vertébrale au niveau des vertèbres cervicales.

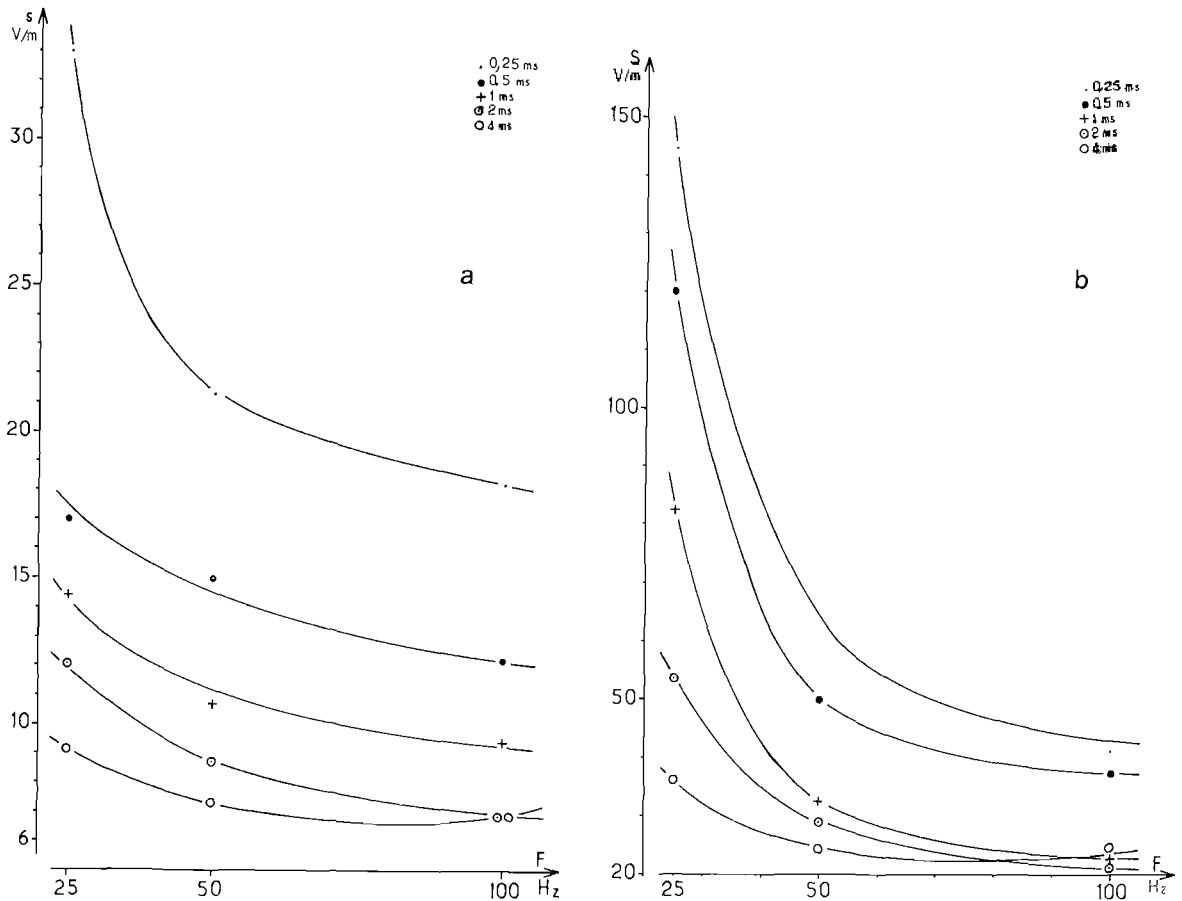


FIG. 3. — Variation des seuils de taxie (a) et de tétanie (b) de lieux jaunes de 14 cm de long en fonction de la fréquence pour différentes durées d'impulsion.

b) Bars *Dicentrarchus labrax* (L.).

Les poissons sélectionnés mesuraient 18 cm ($\pm 0,5$ cm). Les caractéristiques de l'eau de mer étaient les mêmes que pour les lieux. La gamme des fréquences étudiées a été étendue de 12,5 à 200 Hz. Les seuils ont été mesurés pour : 12,5 - 25 - 50 - 100 - 200 Hz et pour les durées d'impulsion : 0,25 - 0,5 - 1 - 2 - 4 ms (fig. 4).

A 12,5 Hz, les réactions étaient trop peu marquées pour pouvoir en tenir compte. Si nous excluons la courbe correspondant à la durée d'impulsion 4 ms, nous constatons que, comme pour les lieux entre 25 et 100 Hz, les seuils de taxie et de tétanie décroissent lorsque la durée d'impulsion ou la fréquence augmente. Entre 100 et 200 Hz, les seuils de taxie restent sensiblement constants tandis que les seuils de tétanie tendent à s'élever légèrement. Les courbes pour 4 ms diffèrent des autres. Les seuils de taxie présentent un minimum vers 80 Hz et les seuils de tétanie vers 50 Hz. Leurs valeurs remontent ensuite assez fortement jusqu'à 200 Hz.

La mesure des seuils de tétanie s'est révélée délicate pour les bars. L'ouverture des ouïes, que nous avons constatée pour les lieux à 100 Hz, s'est produite de façon beaucoup plus marquée, quel que soit le stimulus appliqué. Dans certains cas, les opercules sont même restés bloqués en position ouverte après la coupure du courant, ce qui a généralement entraîné la mort du poisson

dans l'heure qui suivait. Seul le bar, parmi les espèces que nous avons étudiées, a présenté ce type de réaction.

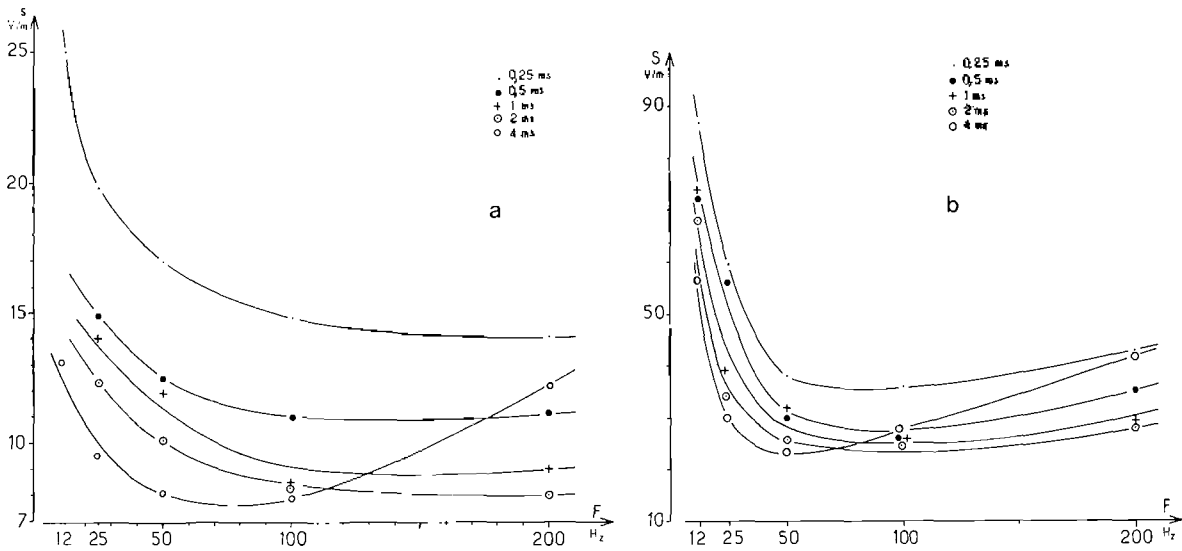


FIG. 4. Variation des seuils de taxie (a) et de tétanie (b) de bars de 18 cm de long en fonction de la fréquence pour différentes durées d'impulsion.

c) Mulets *Mugil labrosus* (RISSO).

Les mesures ont été effectuées sur un lot de poissons mesurant 20 cm (± 1 cm). La température, la résistivité et la salinité de l'eau avaient pour valeurs moyennes respectives 10° C, 26,3 Ω . cm et 35‰. Les seuils ont été mesurés pour les fréquences 20 - 30 - 40 - 50 - 100 - 150 - 200 Hz et pour les durées d'impulsion 0,5 - 0,75 - 1 - 2 - 3 - 4 ms. 48 stimuli différents ont donc été testés sur ces poissons. Nous avons abandonné l'étude de la durée d'impulsion 0,25 ms. Les taxies manquaient d'efficacité pour cette valeur et les seuils étaient trop élevés pour présenter de l'intérêt.

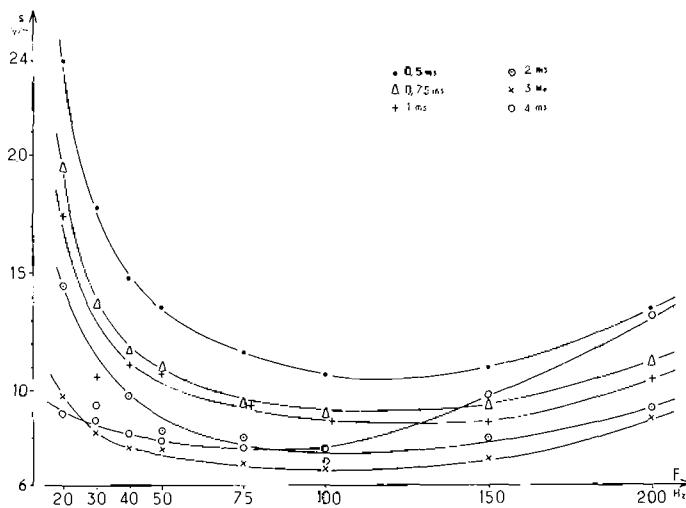


FIG. 5. — Variation des seuils de taxie de mulets de 20 cm de long en fonction de la fréquence pour différentes durées d'impulsion.

Les courbes des seuils de taxis en fonction de la fréquence présentent un minimum vers 125 Hz, à l'exception de la courbe 4 ms qui, comme pour les bars, passe par un minimum vers 80 Hz (fig. 5). Pour les durées d'impulsion inférieures à 3 ms, les seuils remontent très rapidement aux basses fréquences.

A 20 Hz, les taxis diffèrent de celles observées pour les fréquences supérieures à 30 Hz. La nage est peu ondulée et le poisson ne semble pas perdre tout à fait le contrôle de sa motricité. Il n'est pas certain qu'à 20 Hz les taxis soient vraiment directionnelles, bien que pour des durées d'impulsion supérieures ou égales à 3 ms, elles deviennent relativement énergiques.

Entre 40 et 200 Hz, les seuils de tétanie varient très peu. Seule, la courbe 4 ms croît légèrement avec la fréquence (fig. 6). Par contre, pour les fréquences inférieures à 30 Hz, les seuils de tétanie augmentent très rapidement quelle que soit la durée d'impulsion.

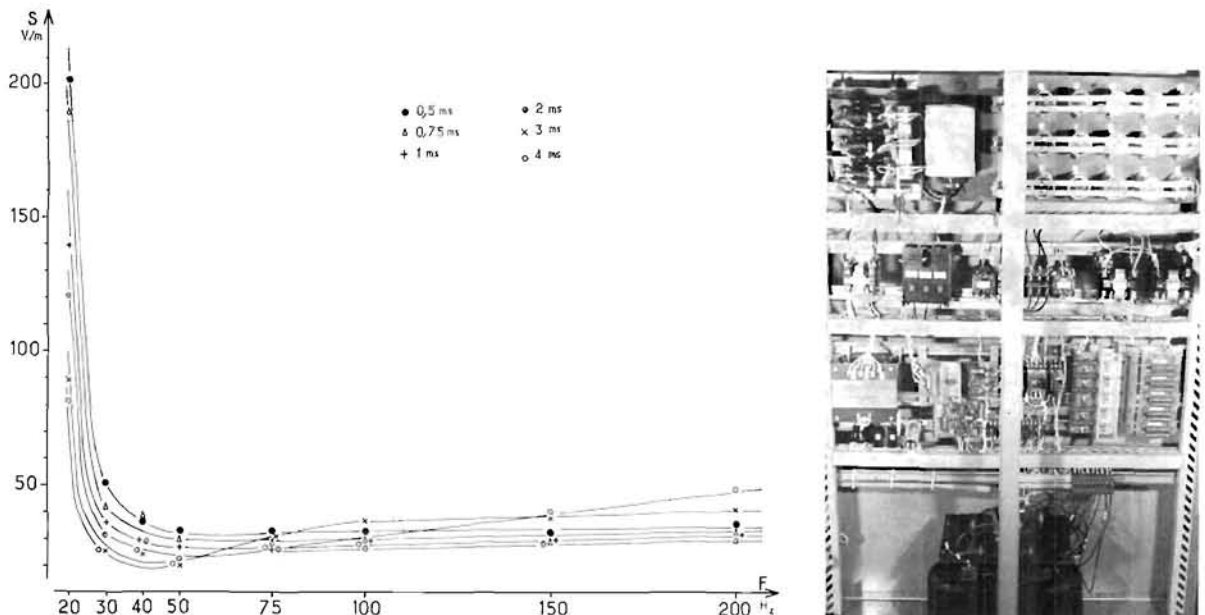


FIG. 6. — Variation des seuils de tétanie de mullets de 20 cm de long en fonction de la fréquence pour différentes durées d'impulsion; à droite, générateur impulsif utilisé au cours des expériences.

d) Sardines *Sardina pilchardus* (WALBAUM).

Les sardines étudiées mesuraient 12 cm ($\pm 0,5$ cm) et correspondaient à un « moule » de 70 individus par kilogramme. La température, la résistivité et la salinité de l'eau avaient pour valeurs respectives 20° C - 21,6 Ω . cm et 33 ‰.

Pour ces poissons, les stimuli aux basses fréquences manquent d'efficacité et à 20 Hz aucun phénomène marqué n'a pu être observé. De même la durée d'impulsion 0,5 ms n'a donné de résultat appréciable que pour les fréquences supérieures à 100 Hz; nous n'avons donc pas tracé de courbe pour cette valeur. Nous avons mesuré les seuils des sardines pour les fréquences 25 - 30 - 40 - 50 - 100 - 200 Hz et pour les durées d'impulsion 1 - 2 - 3 - 4 ms. D'une manière générale, les taxis étaient moins énergiques que pour les autres espèces étudiées, sauf aux fréquences les plus élevées.

Nous constatons une forte élévation de la valeur des seuils pour les fréquences inférieures à 40 Hz. Les seuils varient assez peu entre 50 et 200 Hz pour une même durée d'impulsion (fig. 7).

Nous avons observé un changement dans le comportement natatoire des sardines lorsque, pour des fréquences inférieures à 100 Hz, le gradient de potentiel dans la rigole atteignait une valeur sensiblement égale à deux fois celle du seuil de taxis. Brusquement, les poissons entraînaient

en vibration. Ils continuaient néanmoins à se mouvoir rapidement en direction de l'anode, bien que cette nage « vibrée » semblait plus éprouvante qu'une taxis normale, telle qu'on peut l'observer à 200 Hz par exemple.

En résumé, ces études montrent que les valeurs des seuils de réaction varient en fonction de la fréquence et de la durée des impulsions d'une manière semblable pour toutes les espèces étudiées. Les courbes qui traduisent ces résultats sont, en effet, du même type. La durée d'impulsion, pourvu qu'elle soit supérieure à 1 ms, intervient peu sur la qualité des taxis, sauf peut-être aux fréquences les plus basses.

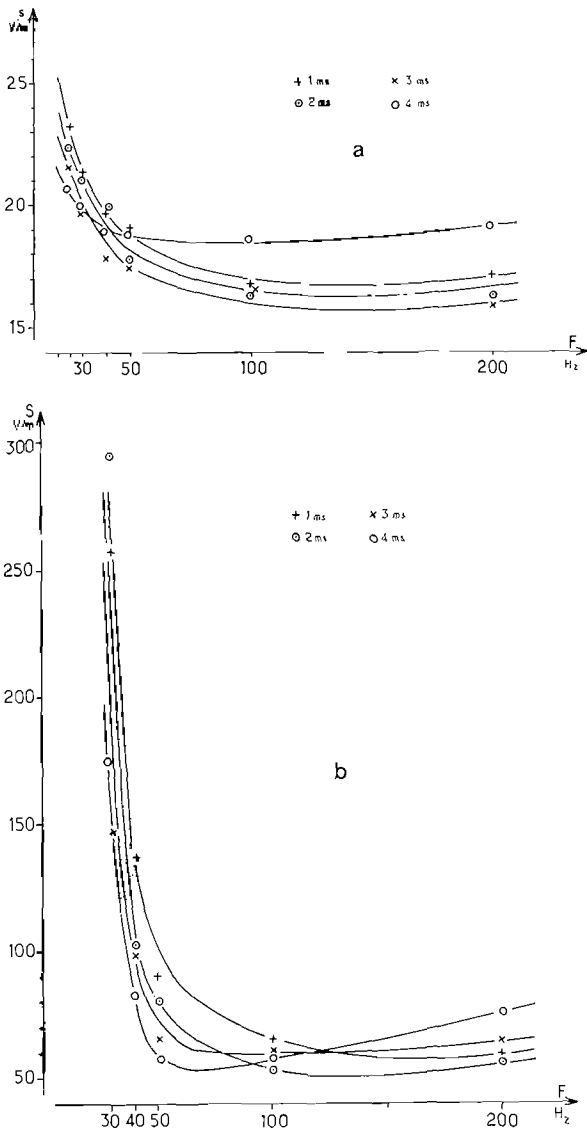


FIG. 7. — Variation des seuils de taxis (a) et de tétanie (b) de sardines de 12 cm de long en fonction de la fréquence pour différentes durées d'impulsion.

très nettement, la taxis, par contre, devient médiocre. Nous rejoignons, en fait, le cas des taxis aux basses fréquences.

Par contre, la fréquence joue un rôle important sur la qualité des taxis, sur la valeur des seuils et donc sur le rapport $K = \frac{S}{s}$. Calculons,

par exemple, les valeurs du rapport K pour les deux fréquences, 25 et 100 Hz. Nous trouvons, respectivement pour les lieus, les bars, les mulets et les sardines : $K = 2,6 - 2,7 - 3,2 - 4$ à 100 Hz et $K = 5,7 - 3,2 - 7 - 12$ à 25 Hz. Nous constatons que la valeur de K ne dépend pas seulement de la fréquence mais aussi de l'espèce des poissons. Une étude plus systématique confirme que les valeurs de K les plus élevées correspondent aux fréquences les plus basses. Les faibles fréquences sont donc favorables à une grande zone de pêche, mais elles déclenchent le plus souvent des taxis de qualité médiocre. Certains auteurs, comme BURNET (1959), BLANCHETEAU *et al.* (1961) ont pensé, avec logique, qu'il pourrait être intéressant de combiner deux ordres de fréquence en émettant à basse fréquence des volées de stimulations de fréquence élevée. C'est pourquoi nous avons étudié les trains d'impulsions obtenus en modulant une haute fréquence par une fréquence plus basse et dans un rapport donné (fig. 8).

4. Etude des trains d'impulsions.

Pour les mulets, le seuil de tétanie augmente en effet de manière très sensible, tandis que le seuil de taxis reste pratiquement constant. Par exemple, si nous modulons le stimulus 50 Hz - 2 ms ($s = 9$ V/m, $S = 23$ V/m et $K = 2,8$ pour les mulets de 20 cm) à la fréquence 5 Hz et avec un rapport 1/2, c'est-à-dire en ne conservant que la moitié des impulsions, nous obtenons les valeurs suivantes : $s' = 10$ V/m, $S' = 51,5$ V/m et $K' = 5,2$.

Ce résultat semble positif ; en réalité, il n'en est rien. En effet, si le rapport K augmente

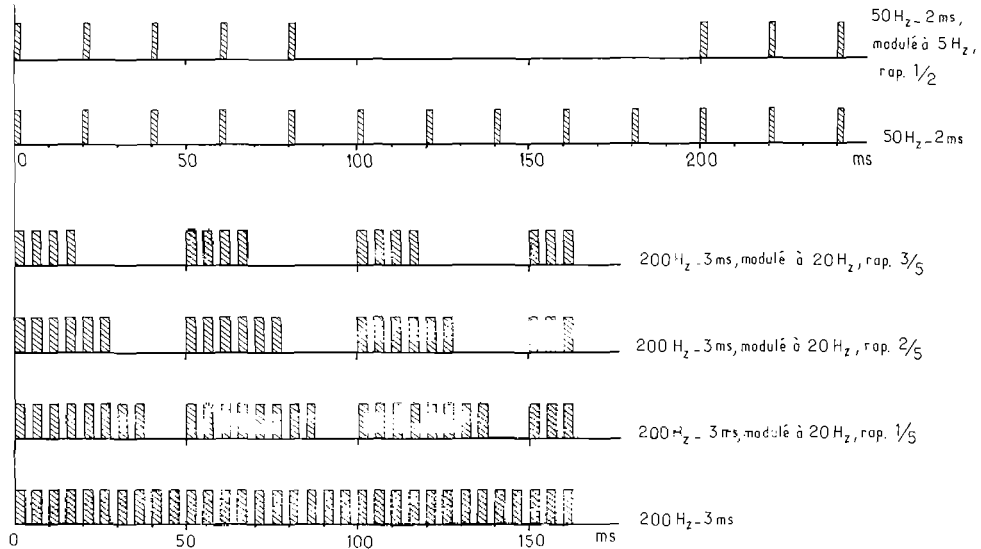


FIG. 8. — Trains d'impulsions électriques obtenus en modulant un stimulus par une fréquence plus basse dans un rapport donné.

Pour les sardines, le rapport K n'augmente pratiquement pas car leur seuil de taxie croît en même temps que leur seuil de tétanie. Par exemple, pour le stimulus 200 Hz - 3 ms ($s = 16.6$ V/m, $S = 64$ V/m, $K = 3,9$) modulé à 20 Hz avec différents rapports, nous avons obtenu les résultats présentés dans le tableau 1.

Seuil de taxie (s')	Seuil de tétanie (S')	Rapport $K' = \frac{S'}{s'}$	Rapport de modulation
16	66	4,1	1/5
16,7	68	4,1	2/5
19	70	3,7	3/5
19,5	75	3,8	4/5

TABL. 1. — Influence du rapport de modulation du stimulus 200 Hz - 3 ms par la fréquence 20 Hz sur les seuils de taxie et de tétanie des sardines de 12 cm.

Les trains d'impulsions n'améliorent donc pas, dans tous les cas, la valeur du rapport K de façon sensible d'une part, et ne sont pas intéressants au point de vue de la qualité des taxies, d'autre part, par rapport aux basses fréquences. Moduler un stimulus à haute fréquence par une fréquence plus faible nous semble donc sans intérêt.

5° Mesure des seuils en fonction de la température et de la salinité.

La résistivité électrique de l'eau de mer dépend de sa température et de sa salinité qui varient selon l'époque et le secteur géographique. Nous avons donc étudié l'influence de ces paramètres sur la valeur des seuils.

1. Température.

L'influence de ce facteur a été étudiée pour un lot de 10 mulets de 18 cm, en utilisant le stimulus 50 Hz - 2 ms. Les poissons ont été conditionnés dans un bac dont le trop-plein alimentait

la rigole expérimentale utilisée pour la mesure des seuils. L'eau de ce bac, dont la salinité s'élevait à 35 ‰, a été réchauffée grâce à 3 chauffe-bains de 1 000 watts chacun, commandés à l'aide d'un thermomètre à contact par l'intermédiaire d'un relais à thyristors. La température a été élevée de 9°6 à 18°8 C par paliers d'environ 2° C par 24 heures. Chaque jour, les seuils de taxie et de tétanie ont été mesurés sur 2 lots de 5 mulets. Les résultats moyens obtenus sont représentés sur la figure 9.

La température n'influe pas sur le seuil de taxie. Par contre, le seuil de tétanie varie linéairement de 22,3 à 44,4 V/m lorsque la température s'élève de 9°6 à 18°8 C et la valeur du rapport K passe donc de 2,5 à 4,9.

2. Salinité.

Le bac précédent, contenant 10 mulets de 17 cm cette fois, a été alimenté grâce à un mélangeur pourvu d'arrivées d'eau douce et d'eau de mer dont on pouvait faire varier les débits respectifs. Le dessalement de l'eau de mer a été effectué progressivement par paliers de 5 ‰, en moyenne chaque jour. La température de l'eau a été maintenue à 10°5 C et le stimulus employé était de 50 Hz - 2 ms. Les résultats moyens obtenus sont résumés sur la figure 9. Un dessalement de 35 à 12 ‰, n'a fait apparaître aucune influence sur la valeur des seuils de taxie et de tétanie.

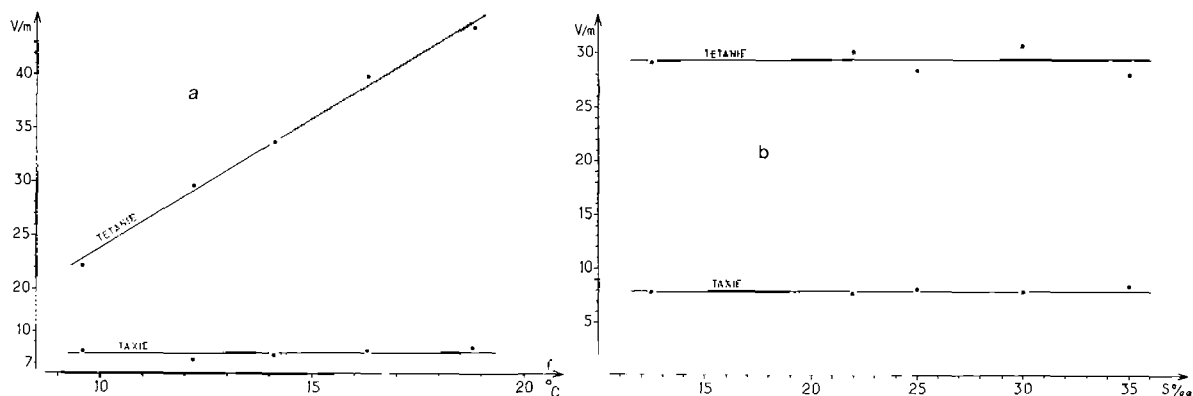


FIG. 9. — Influence de la température (a) et de la salinité (b) sur les seuils de taxie et de tétanie de mulets de 18 cm de long pour le stimulus 50 Hz - 2 ms.

Ces observations montrent que la température et la salinité, du moins dans les gammes étudiées, n'ont aucune influence sur les seuils de taxie et que seule la température agit sur les seuils de tétanie. Il faut cependant noter que nos résultats ne concordent pas avec ceux de BARY (1956) qui a trouvé que la température n'avait pas d'influence sur les seuils de tétanie des mulets, *Mugil auratus* (Risso). Nous n'expliquons pas cette divergence dans les résultats.

6° Etude des seuils en fonction de la longueur et de l'espèce des poissons.

Cette étude est destinée à mettre en évidence le fait que l'attraction anodique des poissons par un stimulus électrique est sélective en fonction des tailles et des espèces.

1. Longueur.

Nous avons réussi à adapter plusieurs centaines de sardines à la vie en aquarium. Mais ces poissons, capturés à la senne tournante, provenaient de bancs constitués d'individus de tailles homogènes et mesuraient soit 12 cm, soit 18,5 cm ($\pm 0,5$ cm). Ils ne se prêtaient donc pas à ces observations, ce qui nous a conduits à utiliser des mulets.

Les seuils de taxie et de tétanie des mulets dont les tailles variaient de 4,5 à 22 cm ont été relevés pour deux stimuli : 20 Hz - 3 ms et 50 Hz - 2 ms (fig. 10). Les courbes de la figure 10 a mettent en évidence la sélectivité de l'attraction électrique. A 50 Hz et 2 ms par exemple, un gradient de 35 V/m est nécessaire pour attirer des mulets de 4,5 cm, tandis que 7 V/m suffit pour des poissons de 22 cm. Si le gradient, à la périphérie de la zone de pêche, s'élève à 10 V/m, seuls les individus dont la taille dépasse 15,5 cm seront attirés tandis que les mulets de taille inférieure pourront s'échapper.

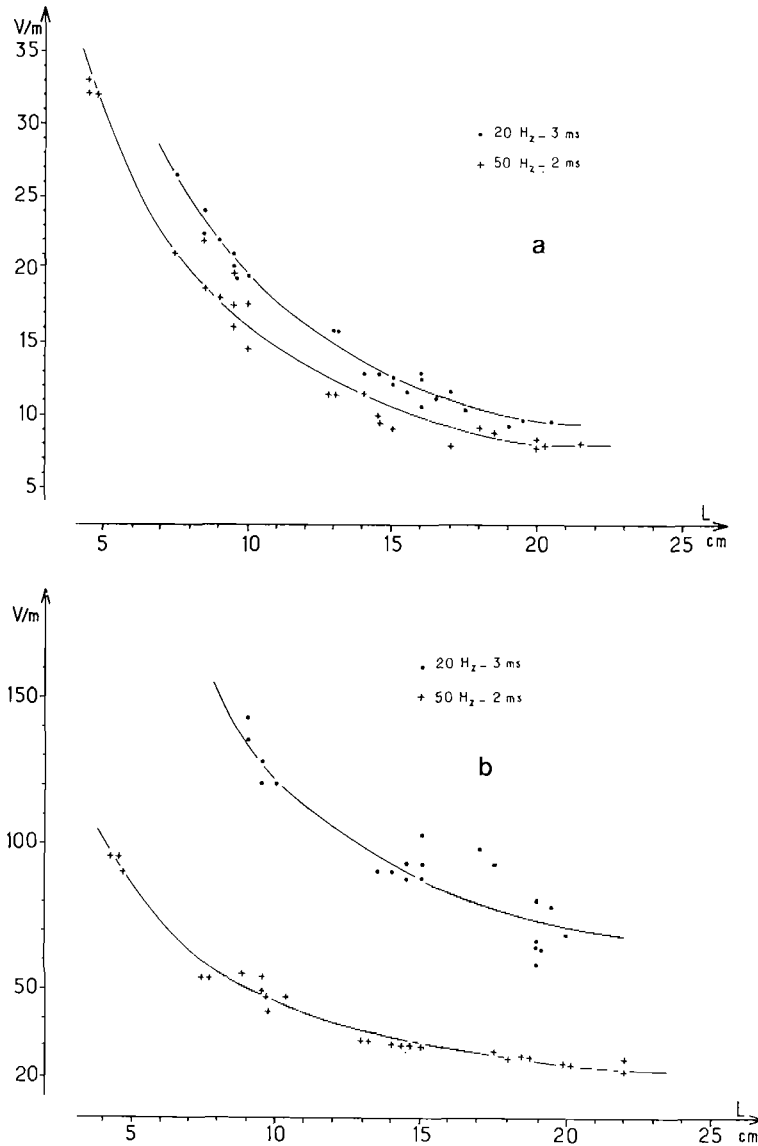


Fig. 10. — Variation des seuils de taxie (a) et de tétanie (b) de mulets en fonction de leur longueur pour les deux stimuli 20 Hz - 3 ms et 50 Hz - 2 ms.

Traduites en coordonnées logarithmiques, les courbes des figures 10 a et b deviennent des droites (fig. 11). Leurs équations ont été calculées par la méthode des régressions linéaires. En exprimant les seuils s et S en V/m et la longueur des poissons l en cm, nous avons obtenu les résultats suivants :

à 20 Hz - 3 ms, taxie : $\log s = - 1,05 \log l + 2,33$,
 soit encore : $s = 214 (l)^{-1,05}$,
 coefficient de corrélation = $- 0,99$;
 tétanie : $\log S = - 0,84 \log l + 2,93$,
 soit encore : $S = 851 (l)^{-0,84}$,
 coefficient de corrélation = $- 0,91$;

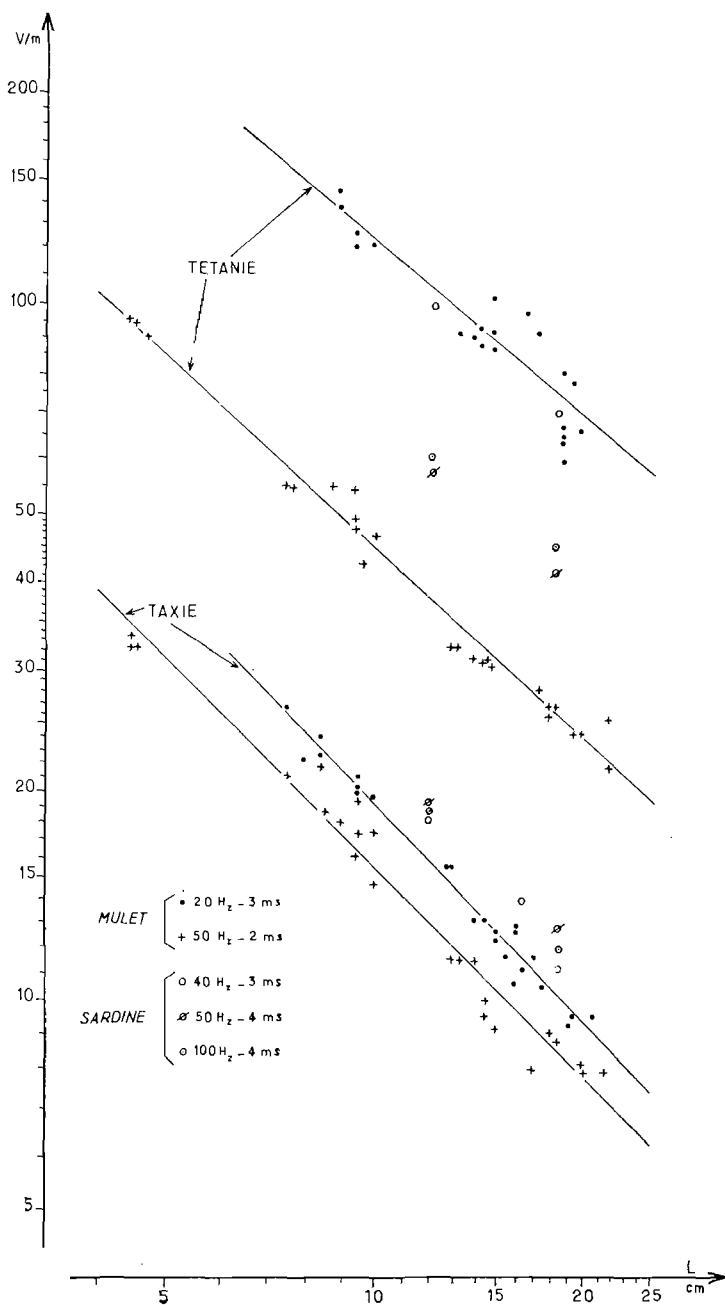


FIG. 11. — Traduction en coordonnées logarithmiques de la variation des seuils de taxie et de tétanie des mulets et des sardines, en fonction de leur longueur, pour les stimuli indiqués.

à 50 Hz - 2 ms, taxie : $\log s = -0,99 \log l + 2,19$,

soit encore : $s = 155 (l)^{-0,99}$,

coefficient de corrélation = $-0,98$;

tétanie : $\log S = -0,91 \log l + 2,56$,

soit encore : $S = 263 (l)^{-0,91}$,

coefficient de corrélation = $-0,99$.

Dans le cas des taxies, ces droites présentent une pente très voisine de -1 et ces équations peuvent alors s'écrire avec une bonne approximation : $s \times l = \text{constante}$. La valeur du produit $s \times l$ représente la différence de potentiel qu'il est nécessaire d'établir entre la tête et la queue d'un poisson pour qu'il entre en taxie. Cette valeur ne dépend donc pas de la taille du mulet.

Pour la tétanie, en revanche, le produit $S \times l$ n'est plus une constante mais croît avec la taille (fig. 12). Pour les droites expérimentales représentées sur cette figure, nous avons calculé les équations suivantes (seuils en V/cm et longueur en cm) :

à 50 Hz - 2 ms, taxie : $s \times l = 1,55 \text{ V} = \text{constante}$,

tétanie : $S \times l = 0,04 l + 4,05$.

Le produit $S \times l$ augmente donc de 4,20 à 5,04 V lorsque la taille du poisson croît de 4 à 25 cm.

à 20 Hz - 3 ms, taxie : $s \times l = 1,89 \text{ V} = \text{constante}$.

tétanie : $S \times l = 0,17 l + 10,8$.

Le produit $S \times l$ augmente donc de 11,5 à 15,0 V quand la taille du poisson croît de 4 à 25 cm.

Quelques mesures sur les sardines confirment la sélectivité de l'attraction anodique. Les seuils, mesurés pour trois stimuli différents, sont en effet nettement plus bas pour les poissons de 18,5 cm que pour ceux de 12 cm (tabl. 2).

l cm		40 Hz - 3 ms	50 Hz - 4 ms	100 Hz - 4 ms
12	s	18	18,9	18,6
	S	98	57	60
18,5	s	11,0	12,6	11,8
	S	69	41	45

TABL. 2. — Seuils de taxie et de tétanie de sardines de 12 et 18,5 cm de longueur pour différents stimuli.

Nous avons reporté sur la figure 11 les mesures faites sur les sardines. Les droites qui passent par les points ainsi obtenus ont des pentes très voisines de celles des mullets. Les résultats pour ces deux espèces semblent donc cohérents. Mais le manque de données pour les sardines ne permet pas de tirer des conclusions plus complètes pour cette espèce.

2. Espèce.

Nous venons de voir que, pour les mullets, la différence de potentiel « tête-queue » nécessaire à la taxie ne dépend pas de la taille du poisson. De plus, leurs seuils de taxie restent constants quand la température et la salinité varient. Si l'on admet, comme hypothèse de travail, que ceci reste vrai pour les autres poissons, il est possible de comparer les seuils de taxie des différentes espèces étudiées en les calculant pour des individus d'une même longueur, indépendamment de la température et de la salinité.

Nous avons effectué ce travail pour des poissons dont la taille a été fixée arbitrairement à

16 cm. A titre d'exemple, nous avons représenté sur la figure 13 les seuils de taxie théoriques pour des individus de 16 cm de chaque espèce étudiée. Ils ont été calculés en fonction de la fréquence pour la durée d'impulsion 1 ms. Si nous classons les espèces étudiées dans l'ordre des seuils de taxie croissants, nous obtenons : lieu, bar, mullet, sardine. A 100 Hz, par exemple, le seuil des taxies des sardines atteint 1,6 fois celui des lieus.

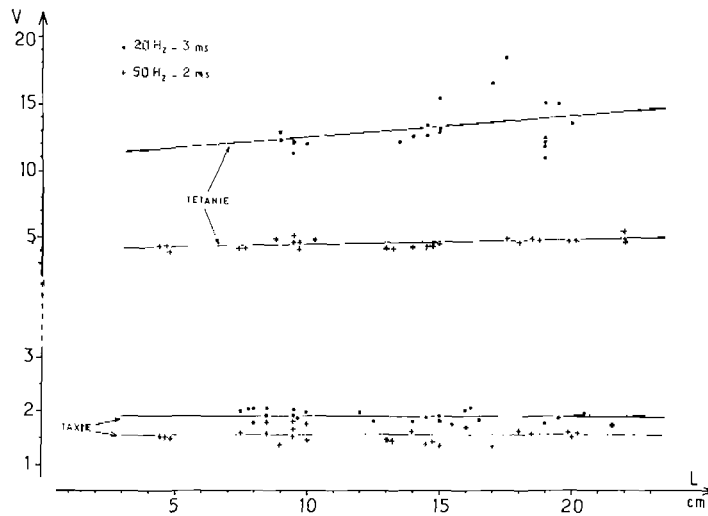


FIG. 12 — Le voltage minimum qu'il faut établir entre la tête et la queue d'un mullet pour obtenir une taxie anodique est indépendant de la longueur du poisson; par contre, pour la tétanie, il augmente légèrement avec la taille.

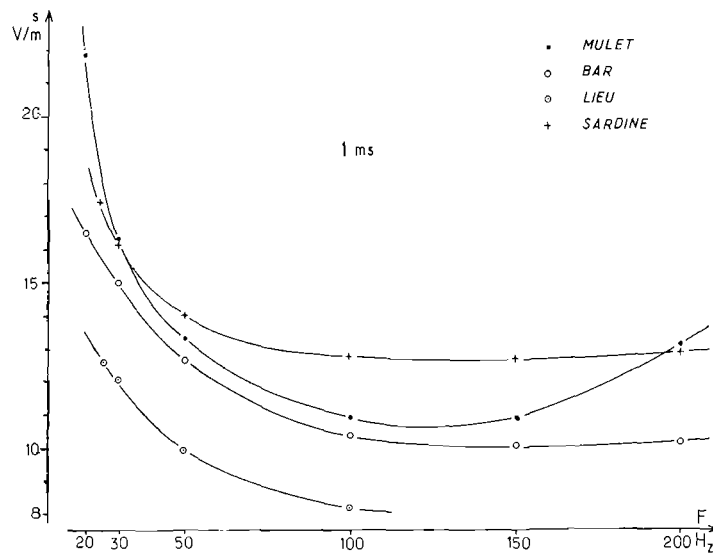


FIG. 13. — Comparaison, pour différentes espèces, de la variation des seuils de taxie théoriques, calculés pour des poissons de 16 cm de long, en fonction de la fréquence pour la durée d'impulsion 1 ms.

Il est donc important d'adapter la distribution spatiale du gradient de potentiel et par conséquent le système d'électrodes de pêche à l'espèce qui doit être capturée. Ce travail fait l'objet du chapitre III. Auparavant, nous avons étudié le comportement des poissons en nous efforçant de reproduire en laboratoire la configuration d'un champ électrique dans le milieu naturel.

CHAPITRE II

COMPORTEMENT DE POISSONS DANS UN CHAMP ELECTRIQUE IMPULSIONNEL NON UNIFORME

Avant d'entreprendre l'étude d'un système d'électrodes adapté à la capture des sardines, il nous a paru nécessaire d'observer plus en détail leur comportement dans un champ électrique impulsionnel. En effet, aucune étude de ce type n'a été réalisée, à notre connaissance, sur *Sardina pilchardus*. Certains chercheurs ont travaillé en laboratoire, sur des espèces voisines, comme GROODY *et al.* (1952), LOUKASHKIN et GRANT (1954) sur des sardines du Pacifique, *Sardinops caerulea*, KLIMA (1972) sur des sardinelles, *Sardinella anchovia*, et sur des anchois argentés, *Engraulis eurystole*. Mais bien qu'ils aient opéré dans des bassins de dimensions relativement importantes, la forme et la disposition des électrodes étaient telles que le champ électrique était homogène. Or, en milieu marin infini, le champ électrique n'est pas uniforme mais présente des valeurs croissantes lorsqu'on se rapproche de l'anode. C'est pourquoi nous avons étudié les réactions des poissons dans un champ électrique croissant.

1° *Configuration d'un champ électrique dans le milieu marin.*

Pour créer un champ électrique dans un milieu conducteur liquide, il suffit d'y plonger deux électrodes portées à des potentiels différents. Elles assurent la répartition de l'énergie électrique dans le milieu conducteur. L'électrode présentant le potentiel le plus élevé est l'anode, l'autre la cathode. La variation des potentiels rencontrés lorsqu'on passe de l'anode à la cathode peut être commodément exprimée par une succession de surfaces, chacune ayant tous ses points au même potentiel. Ces surfaces équipotentielles traduisent la répartition du champ électrique. Les lignes de courant, toujours orientées dans le sens des potentiels décroissants, coupent perpendiculairement les surfaces équipotentielles, en particulier elles quittent l'anode et aboutissent à la cathode orthogonalement à leur surface.

Dans le cas de la pêche électrique, la variation idéale du potentiel serait une chute linéaire de la tension entre l'anode et la cathode. Le champ électrique serait alors uniforme et il suffirait de déterminer la tension anodique et la distance entre les électrodes pour que la valeur du gradient de potentiel soit égale au seuil de taxie. Les poissons situés entre les électrodes au moment de la fermeture du circuit électrique seraient obligés de nager jusqu'à toucher l'anode, avec une dépense énergétique minimale.

Mais, dans un milieu conducteur infini, comme la mer, la répartition des surfaces équipotentielles ne permet pas une telle configuration du champ électrique. Pour le comprendre, il suffit de considérer le cas simple de deux électrodes rectangulaires identiques immergées face à face (fig. 14). Les surfaces équipotentielles, de forme ovoïde, sont sensiblement concentriques autour de l'une ou l'autre des électrodes. La figure 14 représente l'intersection de ces surfaces

par le plan de symétrie horizontal du système d'électrodes. Nous avons considéré deux lignes de courant qui, nous l'avons vu, coupent les lignes équipotentiellles à angle droit. Elles divergent donc à partir de l'anode puis convergent vers la cathode, si bien que le champ électrique ne peut pas être uniforme.

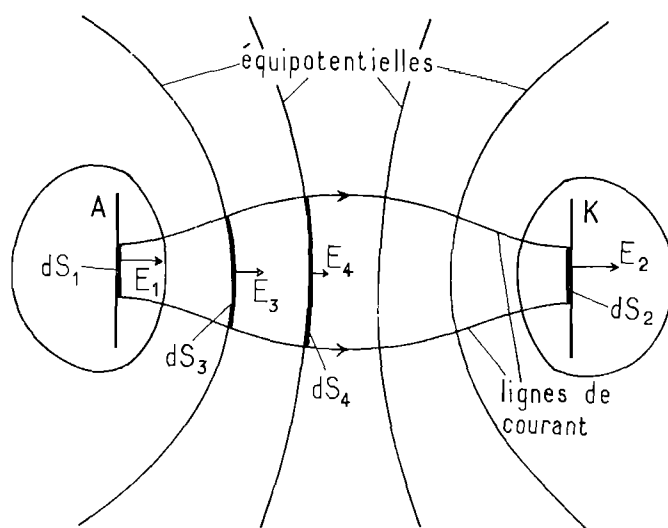


FIG. 14. — Configuration du champ électrique E en mer ; son flux est conservatif et le produit $E.ds$ est donc constant ; les lignes de courant n'étant pas parallèles entre elles, le champ électrique n'est pas homogène.

En effet, les lignes de courant qui, dans l'espace, passent au travers des éléments de surface dS_1 , dS_2 , dS_3 , dS_4 , constituent en électricité un tube de force. Or, on démontre en physique que le flux d'un champ dans un tube de force est conservatif. Ce qui peut s'écrire, dans le cas considéré, sous la forme :

$$E_1 dS_1 = E_2 dS_2 = E_3 dS_3 = E_4 dS_4,$$

et comme $dS_1 = dS_2 < dS_3 < dS_4$,
on en déduit $E_1 = E_2 > E_3 > E_4$.

Plus la section dS traversée par les lignes de courant est grande, plus le champ électrique E est faible au lieu considéré.

Ceci explique pourquoi le champ électrique était uniforme dans la rigole expérimentale à section constante où ont été mesurés les seuils des réactions. Les lignes de courant, canalisées par les parois du bac, étaient parallèles entre elles et traversaient donc des sections identiques. En pleine mer, ce n'est plus le cas et les poissons qui se rapprochent de l'anode rencontrent des gradients de potentiel de plus en plus élevés. C'est d'autant plus vrai que nous avons été amenés à utiliser une anode dont la surface est beaucoup plus faible que celle de la cathode. Si bien que le champ électrique, d'abord sensiblement constant lorsqu'on s'écarte de la cathode, croît très fortement au voisinage de l'anode. Les poissons risquent donc d'être tétanisés avant d'atteindre cette dernière. Nous avons reproduit ces conditions expérimentales dans différents bacs où nous avons étudié le comportement des poissons.

2° Etude des tétanies et des taxies dans un champ électrique croissant.

1. Bac expérimental.

Ce bac, réalisé en P.V.C., est de forme sensiblement trapézoïdale. Sa longueur atteint 1,90 m, les largeurs respectives de l'anode et de la cathode étant 0,06 m et 1 m (fig. 15). Le gradient de potentiel croît de manière logarithmique de la cathode vers l'anode au voisinage de laquelle

il est environ dix fois plus élevé que sur la cathode. Il est donc possible de régler la différence de potentiel entre les électrodes de manière à obtenir trois zones présentant des caractéristiques différentes. Dans la première, proche de la cathode, le gradient de potentiel est inférieur au seuil de taxie, dans la deuxième, qui correspond à la partie centrale, il se trouve compris entre les seuils de taxie et de tétanie et dans la troisième, proche de l'anode, le gradient dépasse le seuil de tétanie.

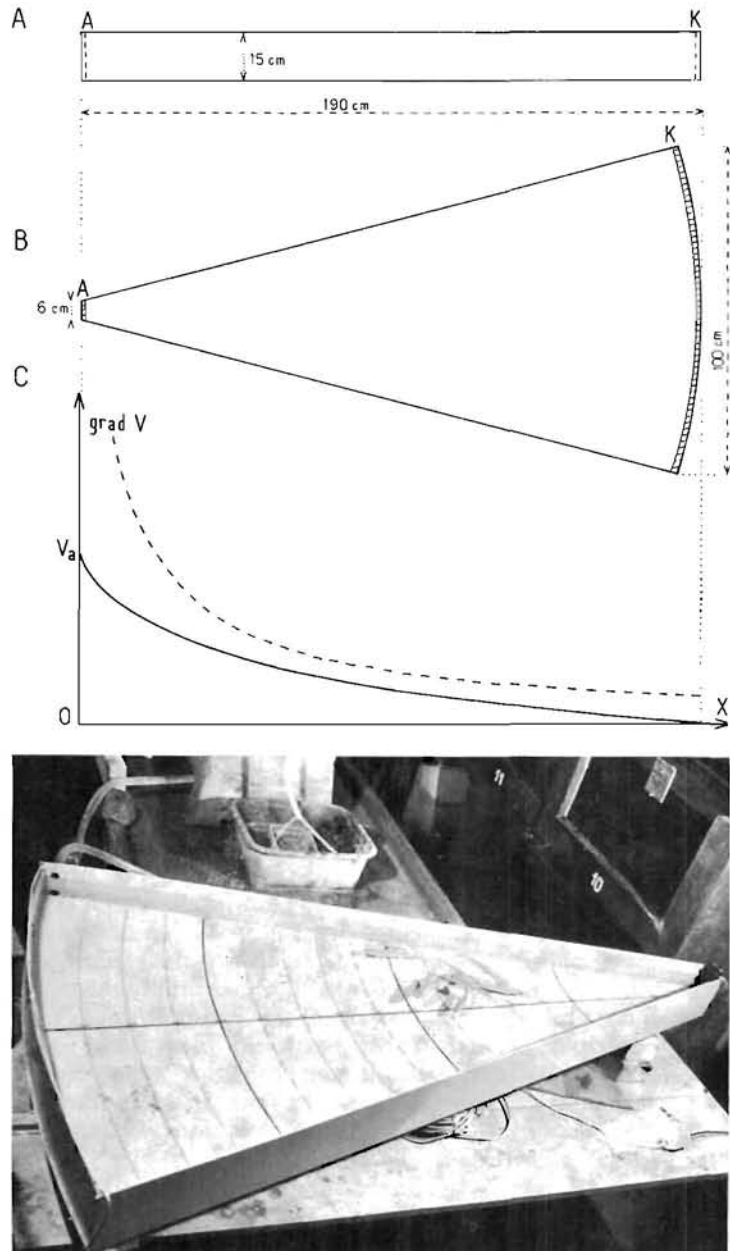


FIG. 15. — Bac sensiblement trapézoïdal utilisé pour l'étude du comportement des poissons dans un champ électrique croissant ; A : vue de profil ; B : vue de dessus ; C : variation du potentiel V (trait continu) et du gradient de potentiel $\text{Grad}V$ (tirets) entre l'anode A et la cathode K ; en bas, les mulots nagent librement car les électrodes ne sont pas sous tension.

2. Résultats.

a) *Tétanies.*

Le gradient de potentiel était mesuré en relevant sur l'écran d'un oscilloscope la différence de tension entre deux électrodes passives séparées de 10 cm. A pleine tension du générateur, 180 V/m étaient atteints à 10 cm de l'anode avec 19 V/m sur la cathode.

Le résultat le plus important enregistré dans le cadre de cette étude est un net recul du seuil de tétanie S' , mesuré en champ croissant, par rapport au seuil S obtenu en champ uniforme.

En effet, un mulot de 18 cm, avec le stimulus 20 Hz et 3 ms, a pu nager jusqu'à l'anode sans être tétanisé. Dans ce cas, S' est donc supérieur à 180 V/m alors que le seuil de tétanie S théorique en champ uniforme est égal à 75 V/m. Les études effectuées sur les sardines confirment le phénomène précédent. Pour des individus de 12 cm, nous avons obtenu :

100 Hz - 3 ms :	$S = 60$ V/m	$S' = 130$ V/m
50 Hz - 3 ms :	$S = 70$ V/m	$S' = 140$ V/m
50 Hz - 1 ms :	$S = 90$ V/m	$S' > 180$ V/m

Pour le stimulus 200 Hz - 1 ms, nous avons observé que les poissons subissaient un premier blocage à environ 50 cm de l'anode A. Le gradient à cet endroit était de l'ordre de 60 V/m et correspondait donc au seuil de tétanie théorique des sardines de 12 cm. Les poissons, après avoir manifesté une courte halte, reprenaient cependant une sorte de nage « vibrée » qui les amenait jusqu'à A. Mais nous avons remarqué, qu'au cours de cette nage très spéciale, les sardines venaient parfois toucher le fond du bac. On peut penser qu'en pleine eau certains individus auraient coulé avant d'atteindre A.

Afin d'observer le comportement des poissons dans un champ électrique de valeur encore plus élevée, nous avons rapproché la cathode K de l'anode A de façon à avoir $AK = 1$ mètre. Dans ce cas, à pleine tension, nous obtenions 50 V/m à 10 cm de K et 250 V/m à 10 cm de A. Pour le stimulus 50 Hz - 1 ms, nous avons retrouvé le phénomène précédent, bien qu'il soit moins net qu'à 200 Hz. Les poissons marquaient généralement un temps d'arrêt à environ 45 cm de A. Le gradient de potentiel à cet endroit correspondait bien au seuil de tétanie théorique des sardines étudiées pour ce stimulus, soit 90 V/m. Même quand l'arrêt n'était pas net, nous observions une certaine modification de la nage des poissons qui finalement atteignaient A. Parfois, les poissons se mettaient sur le côté et semblaient glisser sur le fond du bac tout en vibrant fortement. Des sardines reprises à 200 Hz - 1 ms avec ces gradients élevés nagèrent également, jusqu'à toucher A dans la plupart des cas, grâce à cette nage « vibrée ». Il faut signaler que pour 200 Hz - 1 ms presque toutes les sardines qui ont été soumises à des gradients supérieurs à 200 V/m n'ont pas survécu, contrairement à celles qui ont subi le stimulus 50 Hz - 1 ms.

Il est donc certain qu'un poisson soumis à un champ croissant et non plus uniforme dépasse le seuil théorique de tétanie. C'est peut-être dû à ce qu'il ne ressent que progressivement la totalité de la tension électrique. Ce résultat est important, car pour savoir si les poissons pénétreront ou non dans la zone soumise à l'attraction hydrodynamique de la pompe du système de pêche étudié, il est indispensable de connaître les limites d'approche de l'anode qui sont, bien entendu, directement liées au phénomène de tétanie.

b) *Taxies.*

Dans un champ électrique croissant, les taxis anodiques sont plus énergiques que dans un champ uniforme et elles tendent à s'accélérer jusqu'à ce que la tétanie soit atteinte. Contrairement aux seuils de tétanie, les seuils de taxie gardent les mêmes valeurs dans les deux cas.

L'énergie cinétique acquise par le poisson au cours de la taxie anodique lui permet, une fois tétanisé, de se rapprocher encore de l'anode. Par exemple, une sardine de 12 cm, soumise au stimulus 200 Hz - 3 ms, a pu atteindre l'anode, grâce à sa vitesse acquise, bien qu'elle ait été tétanisée à 30 cm de l'électrode.

Les réactions des poissons soumis à un gradient de potentiel inférieur au seuil de taxie ont été également étudiées. Nous avons observé une très nette différence de comportement entre les individus qui n'avaient jamais subi d'expérience et ceux qui avaient déjà servi à des mesures dans un champ électrique. Les premiers semblaient peu disposés à fuir et nageaient plutôt dans

le sens des gradients croissants, jusqu'à pénétrer dans la zone de taxie. Les autres, par contre, faisaient le plus souvent demi-tour lorsqu'ils atteignaient la zone où la valeur du gradient de potentiel devenait égale au seuil de taxie.

Des études sur la directionnalité des taxies ont également été tentées pour différents stimuli. Les poissons ont souvent nagé droit vers l'anode, jusqu'à toucher l'électrode, même aux basses fréquences. Mais, il est honnêtement impossible de tirer des conclusions de ces essais. En effet, des séries d'expériences nous ont démontré que le bac trapézoïdal était mal adapté à ce type d'étude. Ses dimensions étaient trop réduites et sa forme avait vraisemblablement tendance à guider les poissons vers l'anode. De plus, il ne possédait pas de zone présentant un gradient de potentiel suffisamment faible où les poissons auraient pu se réfugier. Ces expériences ont donc été recommencées dans des bacs mieux conçus.

3° Vitesse de nage des poissons au cours des taxies.

Avant d'étudier si les stimuli à basse fréquence sont suffisamment coercitifs pour provoquer des taxies réellement directionnelles, il nous a paru intéressant d'observer la nage des poissons dans un champ électrique, sur une distance relativement longue.

1. Rigole expérimentale.

Nous verrons qu'avec le système d'électrodes finalement retenu pour le système de pêche par lumière, champ électrique et pompe, le gradient de potentiel, d'abord sensiblement constant à partir de la cathode, croît très rapidement à proximité de l'anode.

Nous avons essayé de nous rapprocher des conditions réelles de pêche en utilisant une rigole expérimentale constituée d'une partie à section constante (0,30 m × 0,30 m), longue de 4 m, à laquelle est fixé un embout triangulaire de 1 m de longueur (fig. 16 et 17). Le champ électrique est donc uniforme sur 4 m, puis croît dans la partie terminale à l'extrémité de laquelle est placée l'anode.

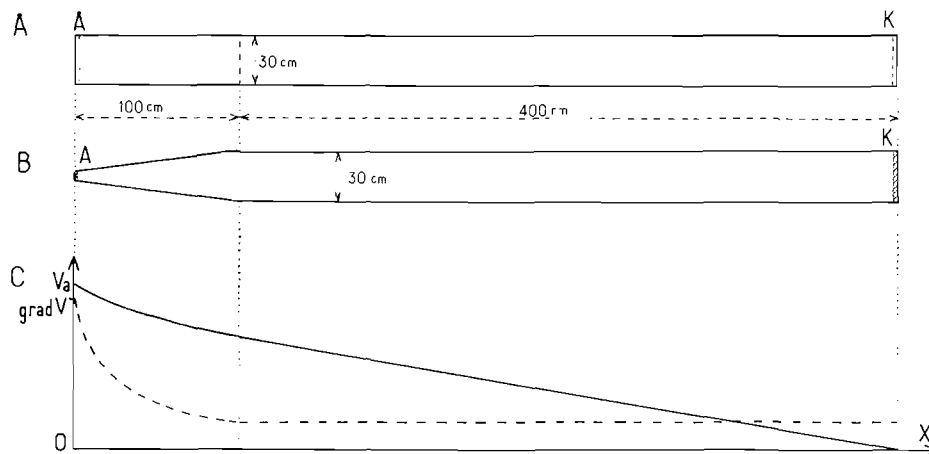


FIG. 16. — Bac expérimental comprenant une partie rectiligne à section constante et un embout triangulaire à l'extrémité duquel est fixée l'anode A; A: vue de profil; B: vue de dessus; C: variation du potentiel V (trait continu) et du gradient de potentiel $GradV$ (tirets) entre l'anode A et la cathode K; cette rigole permet de mesurer la vitesse de nage des poissons et d'étudier leur tétanie dans l'embout après qu'ils aient nagé en taxie sur 4 mètres.

2. Résultats.

Nous avons essentiellement mesuré des vitesses de nage et procédé à des observations qualitatives de la fatigue manifestée par les poissons soumis au champ électrique. Ces expériences montrent que les vitesses qui, bien entendu, sont fonction de l'état de fatigue des poissons,

dépendent de la distance déjà parcourue, du gradient de potentiel et du stimulus appliqués ainsi que de l'espèce et de la taille des individus. Quelques résultats sont représentés dans le tableau 3, à titre indicatif. Pour une espèce donnée, et pour une même excitation électrique, une forme juvénile est évidemment moins rapide qu'un individu de grande taille et se fatigue également plus vite. C'est pourquoi nous avons exprimé les vitesses en cm/s, mais aussi en nombre de longueurs de poisson franchies par seconde, ce qui permet des comparaisons même lorsque les poissons présentent des tailles différentes.

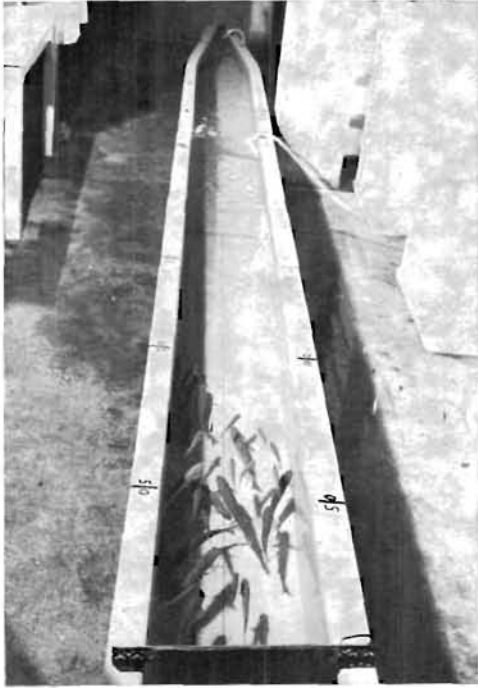


FIG. 17. — Mulets nageant librement dans la rigole expérimentale, car les électrodes ne sont pas sous tension.

D'une manière générale, la vitesse tend à décroître après quelques mètres de nage et cette diminution de la motricité apparaît d'autant plus rapidement que le gradient de potentiel appliqué dans la rigole est plus proche du seuil de tétanie. Par ailleurs, cette fatigue, provoquée par le stimulus électrique, a pour effet d'abaisser la valeur du gradient de potentiel nécessaire pour produire la tétanie dans l'embout triangulaire. Dans cet élément terminal, un poisson rencontre des gradients croissants, comme dans le bac trapézoïdal de la figure 15, mais après avoir nagé sur 4 m dans un champ constant, son seuil de tétanie (S') n'est plus aussi élevé. Il n'atteint plus en moyenne que 1,3 fois la valeur du seuil théorique (S) mesuré dans un champ uniforme, ce qui est encore appréciable.

Ces observations ont montré qu'un poisson peut nager, sous l'effet d'un champ électrique impulsionnel, sur une distance relativement grande. Un même individu a en effet été généralement capable de franchir, jusqu'à trois fois consécutives, la rigole de 5 m sur toute sa longueur. De plus, nous avons constaté que les gradients croissants, établis dans l'embout terminal, provoquaient une nette accélération de la nage des poissons jusqu'à ce qu'ils soient tétanisés. Par ailleurs, les vitesses de nage mesurées au cours de ces expériences sont sensiblement du même ordre que celles qui peuvent être enregistrées dans la nature. En effet, d'après MARSHALL (1970), la vitesse maximum qu'un poisson fusiforme puisse soutenir pendant une minute environ est de l'ordre de dix fois sa longueur par seconde.

L'influence d'un stimulus photique sur des taxies provoquées par un champ électrique impulsionnel a également été étudiée. Les poissons rencontreront, en effet, des gradients lumineux croissants au cours de leur taxie vers l'anode, située à proximité des lampes de pêche. Or, nous avons indiqué qu'un éclairage trop intense avait des effets répulsifs sur les poissons. Nous avons donc étudié, de nuit, la taxie anodique en éclairant fortement la rigole au voisinage de l'anode. On a ainsi pu constater que le stimulus photique ne constituait plus une barrière. Au contraire, en présence de la source lumineuse, les poissons subissaient plus passivement le stimulus électrique. Les vitesses de nage semblaient légèrement plus faibles mais les tentatives de retournement étaient moins nombreuses.

4° Etude de l'attraction anodique des sardines.

Les expériences ont été réalisées jusqu'à présent, soit dans un bac de dimensions trop réduites, soit dans des rigoles. Si bien que les réactions de fuite ou d'évitement qu'auraient pu manifester les poissons n'apparaissaient pas avec netteté, car elles étaient le plus souvent masquées ou perturbées par la proche présence des parois. C'est pourquoi nous avons décidé de procéder à de nouveaux travaux, dans des bacs plus grands et donc mieux adaptés à l'étude de la qualité des attractions par taxies anodiques. Il s'agissait avant tout de déterminer si les fréquences les

plus basses et donc les plus économiques sur le plan énergétique étaient aussi capables de déclencher des taxies suffisamment coercitives pour être utilisées dans un système de pêche par lumière, champ électrique et pompe.

Espèce	Taille	Stimulus	Seuil taxie	Seuil tétanie	Gradient appliqué	Vitesse (cm/sec.)	Vitesse (Long./sec.)
Bars	16 cm	50 Hz - 4 ms	9	25,9	12,4	56	3,5
					16,9	54	3,4
	17 cm	100 Hz - 4 ms	8,4	28,6	9,0	58	3,4
					11,3	39	2,3
Mulets	20 cm	20 Hz - 3 ms	9,8	89,3	10,6	76	3,8
					28,0	130	6,5
					34,5	72	3,6
	17 cm	50 Hz - 2 ms	9,8	26,2	10,0	56	3,3
					13,1	95	5,6
					19,6	44	2,6
Sardines	12 cm	40 Hz - 3 ms	17,9	98	20,3	41	3,4
					30,0	28	2,3
	12 cm	200 Hz - 3 ms	16,0	64	17,0	54	4,5
					19,6	101	8,4
					24,6	126	10,5

TABLE. 3. — Exemples de vitesses de nage moyennes exprimées en cm/sec. et en nombre de longueurs de poisson franchies par seconde, pour des individus d'espèce et de taille différentes et pour plusieurs stimuli et gradients de potentiel appliqués.

Nous avons rencontré de grandes difficultés pour approvisionner des aquariums en sardines vivantes. Nous avons donc limité l'utilisation de celles-ci aux expériences que nous jugeons les plus importantes. C'est la raison pour laquelle des mulets ont été utilisés pour définir une méthodologie qui permette d'apprécier l'efficacité pratique de l'attraction des poissons par un champ électrique. Mais, les expériences ont porté ensuite uniquement sur des sardines de 12 cm.

1. Bacs expérimentaux.

a) Réalisations.

Le système nerveux d'un poisson ne présente pas une symétrie cylindrique. Il n'est donc

pas certain que les réactions d'un poisson soumis à un champ électrique soient les mêmes dans un plan vertical et dans un plan horizontal. Or, jusqu'à présent, toutes nos études ont porté sur des poissons placés dans des bacs de faible profondeur. C'est-à-dire que seules les réactions dans un plan horizontal ont pu être observées. Par ailleurs, la puissance électrique du générateur dont nous disposons pour nos expériences ne nous permettait pas de travailler à une échelle suffisamment grande dans un volume d'eau de mer à trois dimensions. Pour apporter une solution à ce problème, nous avons été amenés à opérer d'abord dans un « bac horizontal » avec une hauteur d'eau réduite, puis dans un « bac vertical » contenant une tranche d'eau relativement profonde mais de faible largeur.

Le « bac horizontal » ($4\text{ m} \times 2\text{ m} \times 0,25\text{ m}$), réalisé en version démontable, est constitué d'une armature en cornières et contreplaqué recouverte par une feuille de butyl (fig. 18). Le « bac

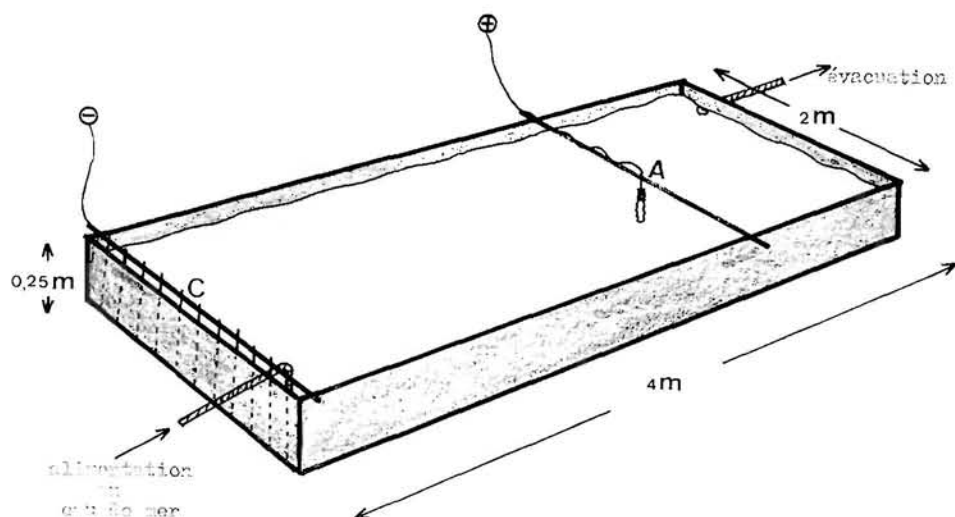


FIG. 18. — Bac utilisé pour l'étude du comportement des poissons dans un plan horizontal; sur la photo on distingue le pupitre de commande du générateur d'impulsion et la caméra qui a permis de filmer les expériences les plus intéressantes.

vertical » ($3,50\text{ m} \times 0,25\text{ m} \times 1,10\text{ m}$) a été construit en deux parties jointives par un système de serrage étanche afin d'en faciliter le transport. Deux faces sont en P.V.C. et les deux autres sont en plexiglas pour permettre des observations latérales. Des renforts lui assurent une bonne rigidité (fig. 19).

b) Configurations des champs électriques.

Les lignes équipotentielles ont été relevées, dans chacun des bacs, à l'aide d'une sonde mobile repérable par rapport à deux axes orthogonaux. La tension était mesurée, à l'aide d'un oscilloscope, entre le point où se trouvait la sonde et la cathode C dont le potentiel était pris comme référence 0.

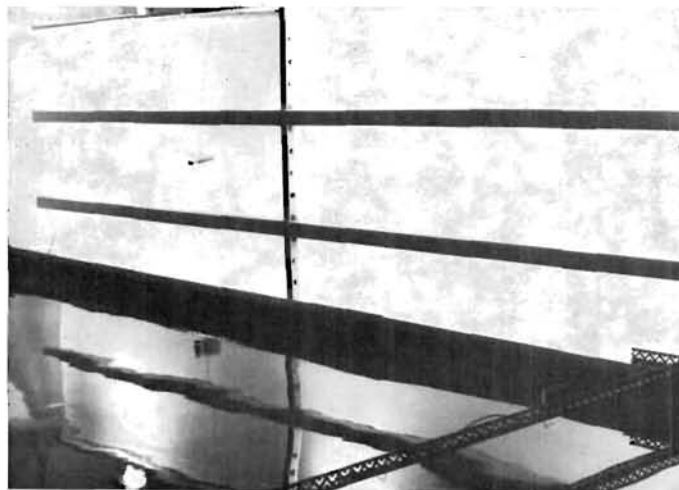
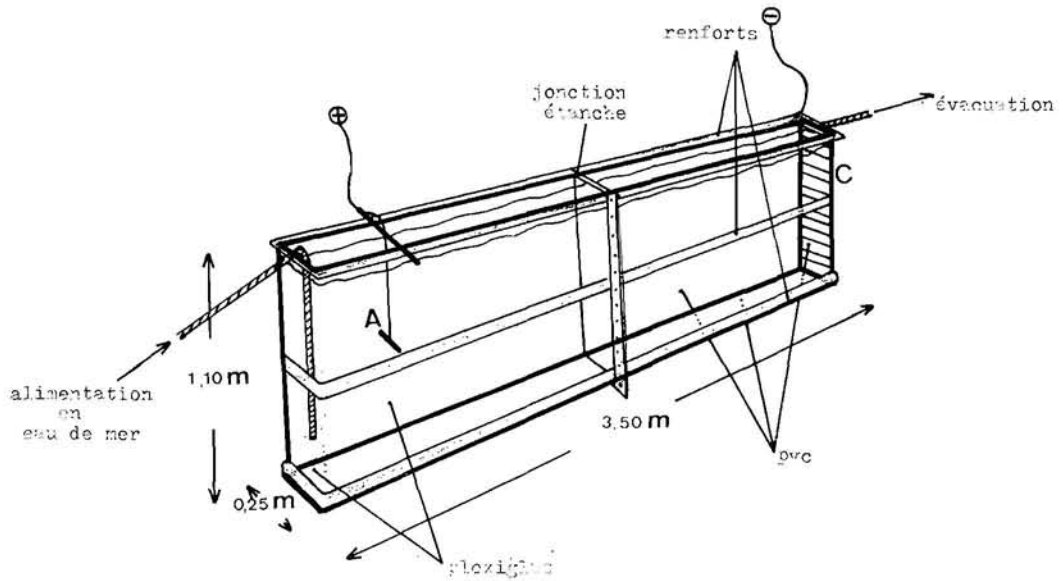


FIG. 19. — Bac utilisé pour l'étude du comportement des poissons dans un plan vertical; sur la photo, une partie du «bac horizontal» apparaît en premier plan, on distingue une vingtaine de sardines ainsi que l'anode cylindrique suspendue à son câble d'alimentation.

Les cathodes ont été réalisées avec des morceaux de fil de cuivre dénudé, soudés entre eux à l'étain. Nous avons constaté que la forme et les dimensions de l'anode avaient une influence sur la distribution des lignes équipotentielles et par conséquent sur la valeur des gradients de potentiel. Par exemple, les figures 20 et 21 représentent les lignes équipotentielles et les valeurs des gradients relevés sur l'axe médian des électrodes dans le «bac horizontal», pour une différence de potentiel de 80 V et pour les anodes respectives suivantes : une plaque de graphite

rectangulaire (16,5 cm × 22 cm), la même plaque isolée au dos et enfin un barreau de graphite ($\varnothing = 2$ cm) isolé au dos. Nous constatons que c'est dans ce dernier cas que les lignes équipotentielles se resserrent le plus sur l'anode et que les gradients sont donc les plus élevés au proche voisinage de celle-ci. Nous verrons que c'est cette configuration qui se rapproche le plus de celle du champ électrique en mer et nous l'avons donc utilisée pour les expériences sur les sardines. Sur l'axe médian des électrodes, le champ est uniforme sur 2,50 m, puis commence à croître très fortement à 60 cm en avant de l'anode. La valeur du gradient décroît brutalement derrière l'électrode et s'annule à environ 70 cm au-delà de celle-ci.

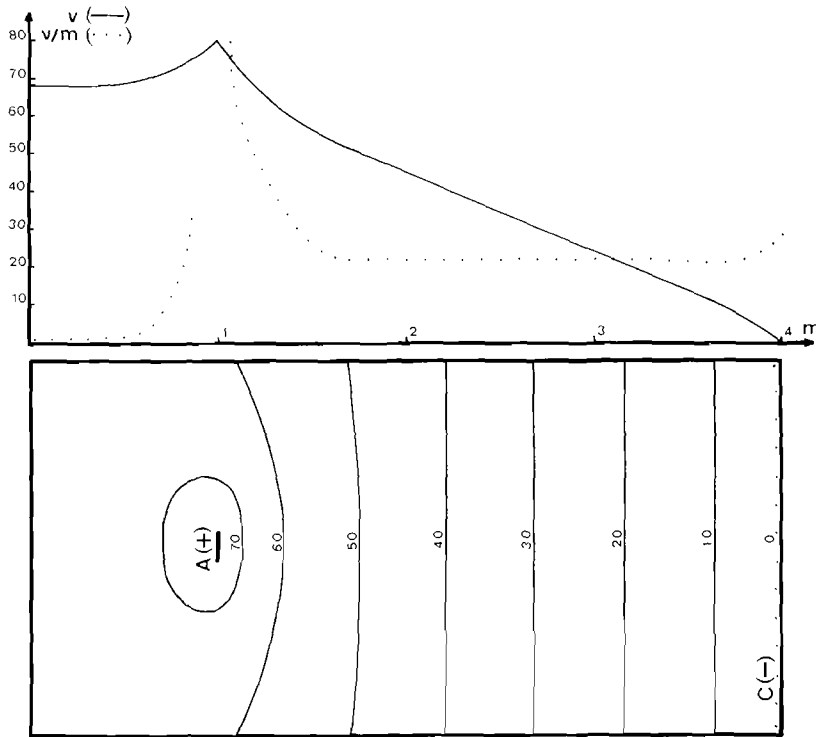


FIG. 20. — « Bac horizontal » vu de dessus : la distribution des lignes équipotentielles est indiquée pour une anode constituée par une plaque de graphite rectangulaire (16,5 cm × 22 cm) et pour une différence de potentiel de 80 V entre les électrodes ; le graphique indique la variation du potentiel (—) et du gradient de potentiel (....) sur l'axe médian des électrodes.

Les mêmes relevés ont été effectués dans le « bac vertical ». La figure 22 représente les lignes équipotentielles ainsi que les valeurs des gradients sur l'axe médian des électrodes pour une différence de potentiel de 80 V et pour une anode constituée par un barreau de graphite ($\varnothing = 2$ cm) isolé au dos. Comme dans le cas précédent, le champ est uniforme sur 2,50 m, puis commence à croître très vite à 50 cm en avant de l'anode. Il chute brutalement derrière l'électrode et s'annule à environ 30 cm derrière celle-ci.

Pendant les expériences, ces bacs étaient alimentés en eau de mer courante qui était ensuite évacuée par un trop plein. Au cours de nos études, la température de l'eau était comprise entre 18° et 19° et la salinité entre 33,5‰ et 35,6‰.

2. Méthode de travail.

Le but de nos expériences est de connaître statistiquement en pourcentage, pour un stimulus donné, quels sont les poissons qui sont effectivement attirés par l'anode ou qui, au contraire, tendent à fuir.

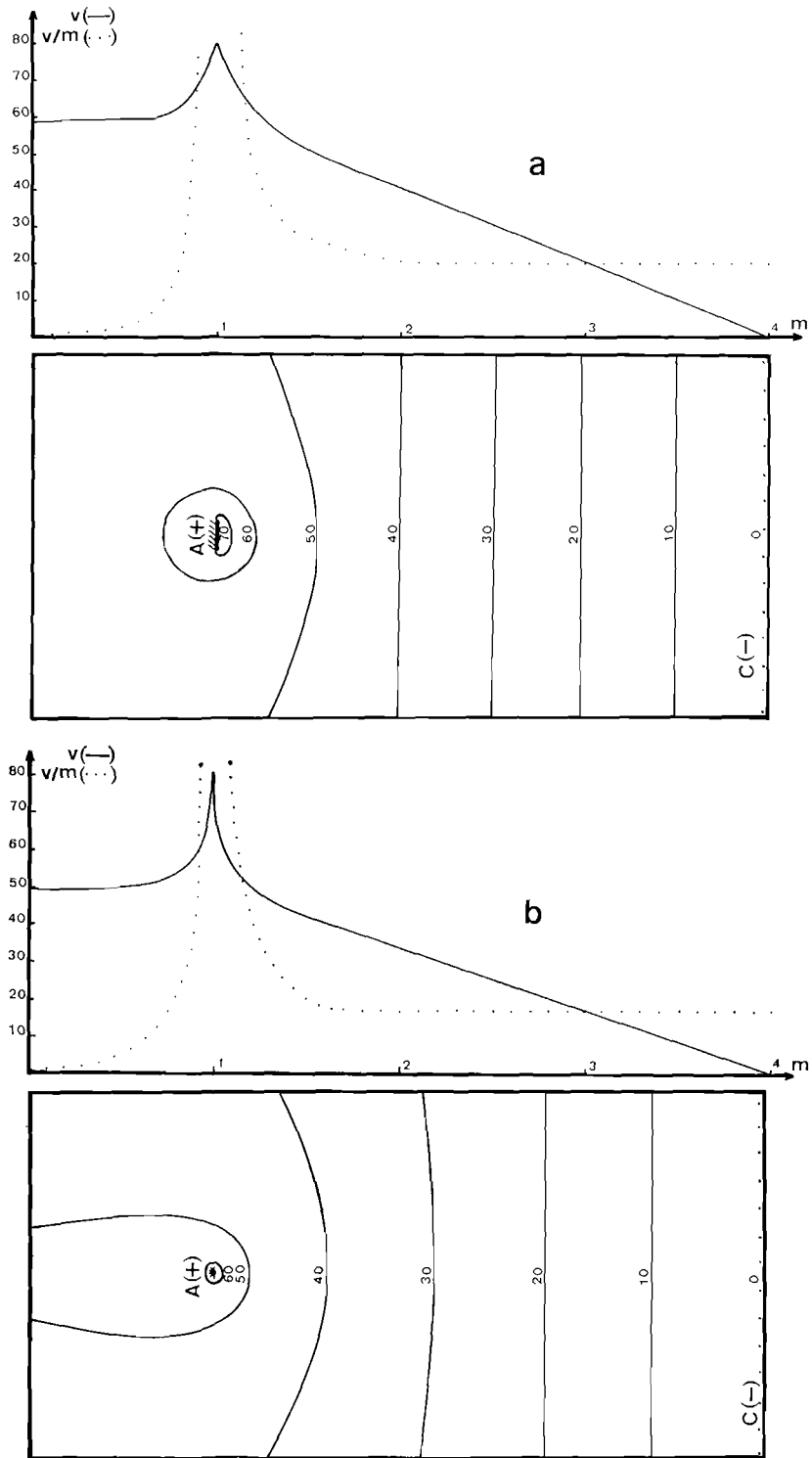


FIG. 21. — « Bac horizontal » vu de dessus ; les conditions expérimentales sont les mêmes que pour la figure 20, mais l'anode est isolé au dos (a) puis remplacée par un barreau de graphite ($\varnothing = 2$ cm) également isolé au dos (b).

a) *Essais préliminaires sur des mulets.*

Méthode expérimentée.

Au cours d'expériences sur des mulets, une première méthode, qui distinguait trois cas, a été testée :

le poisson venait toucher l'anode ; l'attraction était alors considérée bonne et le coefficient 1 lui était attribué ;

le poisson passait à moins de 10 cm des bords de l'anode (à ce stade du travail, nous utilisons l'anode rectangulaire de la figure 21 a ; l'attraction était jugée moyenne et le coefficient 0,5 lui était attribué ;

le poisson passait à plus de 10 cm des bords de l'anode ; l'attraction était estimée mauvaise et le coefficient 0 lui était attribué.

La limite était matérialisée à 10 cm de part et d'autre de l'anode par 2 fils métalliques isolés suspendus à la barre transversale supportant l'électrode. Ces fils affleuraient la surface mais ne plongeaient pas dans l'eau afin d'éviter de perturber le comportement des poissons. On notait à chaque fois, si le poisson était tétanisé (+) ou non (—) et si, au moment de la mise sous tension des électrodes, il se trouvait au milieu de la cathode (M) ou, au contraire, à l'une de ses extrémités (E). Chaque individu était testé successivement 3 fois (1°, 2°, 3°) pour déterminer si après avoir subi une première fois le courant électrique, il réagissait différemment par la suite.

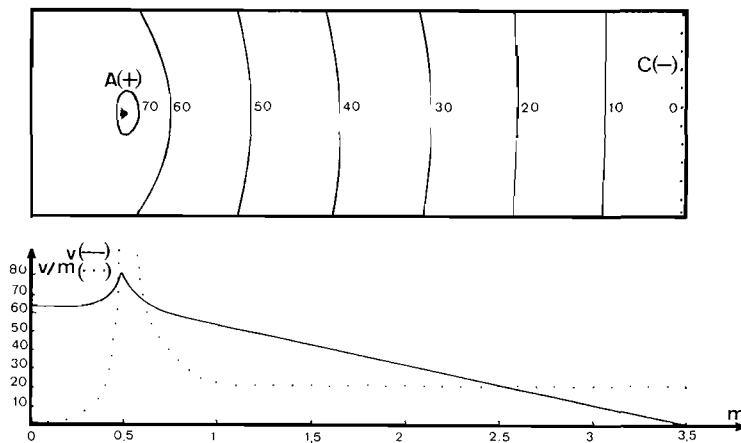


FIG. 22. — « Bac vertical » vu de profil ; la distribution des lignes équipotentielles est indiquée pour une anode constituée par un barreau de graphite ($\varnothing = 2$ cm), isolé au dos, et pour une différence de potentiel de 80 V entre les électrodes ; le graphique indique la variation du potentiel (—) et du gradient de potentiel (.....) sur l'axe médian des électrodes.

Résultats.

Les tableaux 4 et 5 sont donnés à titre d'exemples. Les résultats indiqués ont été obtenus dans le « bac horizontal » avec la configuration de la figure 21 a, en utilisant le stimulus 20 Hz - 3 ms sur des mulets dont les tailles ont été à chaque fois notées. Dans le tableau 4, le voltage entre les électrodes était réglé pour chaque poisson, afin que le gradient de potentiel soit égal à son seuil de taxie (s) à 50 cm en avant de la cathode. Dans le cas du tableau 5, le voltage était réglé de manière à obtenir une fois et demie le seuil de taxie ($s \times 1,5$) à 50 cm en avant de la cathode C.

En faisant le bilan de ces deux séries d'expériences, nous trouvons pour le tableau 4 :

$$\begin{aligned} 1^\circ) & 3 \times 1 + 2 \times 0,5 + 5 \times 0 = 4 \\ 2^\circ) & 1 \times 1 + 2 \times 0,5 + 7 \times 0 = 2 \\ 3^\circ) & 2 \times 1 + 3 \times 0,5 + 5 \times 0 = 3,5 \end{aligned}$$

Ceci signifierait, d'après nos conventions, que sur 10 poissons testés successivement chacun 3 fois, il y aurait respectivement 4 - 2 - 3,5 attractions positives.

Taille (cm)	Cas	E	M	Coefficient 1	Coefficient 0,5	Coefficient 0	+	—
12,5	1°	×				×		×
	2°	×				×		×
	3°		×		×			×
14	1°		×		×			×
	2°	×			×			×
	3°	×		×				×
12,5	1°	×			×			×
	2°		×		×			×
	3°	×			×			×
12,5	1°		×	×				×
	2°	×				×		×
	3°	×				×		×
13,5	1°		×			×		×
	2°	×				×		×
	3°	×				×		×
16	1°	×		×				×
	2°	×				×		×
	3°	×				×		×
12,5	1°		×			×		×
	2°	×				×		×
	3°		×			×		×
15,5	1°	×				×		×
	2°		×			×		×
	3°	×			×			×
22	1°	×				×		×
	2°		×	×				×
	3°	×		×				×
13	1°		×	×				×
	2°		×			×		×
	3°		×			×		×
Bilan	1°	5	5	3	2	5	0	10
	2°	6	4	1	2	7	0	10
	3°	7	3	2	3	5	0	10

TABL. 4. — Efficacité, dans un plan horizontal, de l'attraction anodique de mulets soumis au stimulus 20 Hz - 3 ms. La tension entre les électrodes était réglée, pour chaque taille de poisson, de manière à ce que le gradient de potentiel soit égal à la valeur du seuil de taxis à 50 cm en avant de la cathode dans le bac de la figure 18.

Pour le tableau 5, nous obtenons :

- 1°) $8 \times 1 + 0 \times 0,5 + 2 \times 0 = 8$
- 2°) $4 \times 1 + 1 \times 0,5 + 5 \times 0 = 4,5$
- 3°) $4 \times 1 + 0 \times 0,5 + 6 \times 0 = 4$

Soit respectivement 8 - 4,5 - 4 attractions positives sur 10 poissons testés successivement 3 fois chacun. Ces deux séries d'expériences fournissent, en plus des résultats chiffrés, un certain nombre de renseignements.

Le stimulus étudié était nettement plus efficace quand le gradient de potentiel appliqué au voisinage de la cathode dépassait le seuil de taxie d'une demi-fois sa valeur. Il était exactement 2 fois plus efficace lorsque les poissons étaient testés pour la première fois. De plus, les attractions étaient soit bonnes, soit mauvaises. Le coefficient 0,5 ne figure, en effet, qu'une seule fois dans le tableau 5.

Sur un aussi petit nombre d'expériences, la place occupée par le poisson, au milieu ou à une extrémité de la cathode au moment où le courant est établi, ne donne pas de résultat statistiquement significatif.

Dans la deuxième série d'expériences, où le voltage était le plus élevé, les poissons n'étaient pas tétanisés au proche voisinage de l'anode. Ce fait concorde bien avec nos résultats antérieurs puisqu'à 10 cm de l'électrode, le gradient, mesuré *in situ*, était sensiblement égal à $s \times 8$, alors que nous avons établi que le seuil de tétanie théorique S à 20 Hz - 3 ms était supérieur à $s \times 9$ pour les mulets.

Critique.

Cette méthode constituait donc une source d'informations et présentait l'avantage de se prêter à une interprétation systématique. Mais, après un certain nombre d'expériences, nous l'avons abandonnée. En effet, les résultats chiffrés ne permettaient pas d'aboutir à des conclusions concrètes pour plusieurs raisons :

il ne suffisait pas qu'un poisson nage jusqu'à toucher l'anode ; il pouvait parfois faire demi-tour avant de nager en direction de l'électrode positive ou manifester des tentatives d'évitements latéraux qui, dans certains cas, l'amenaient à frôler ou même à heurter une des parois du bac ; il ne pouvait pas alors être classé dans les cas favorables, même si finalement il venait se tétaniser sur l'anode, car dans des conditions réelles de pêche, il aurait très probablement fui ;

il arrivait, par ailleurs, d'observer des poissons qui dépassaient l'anode au-delà des 10 cm, puis revenaient derrière l'électrode où ils étaient tétanisés ; ces poissons qui auraient normalement dû être affectés d'un coefficient 0, d'après nos conventions, subissaient en fait une attraction positive ;

s'il était relativement aisé de tenir compte des remarques précédentes, un autre paramètre intervenait, beaucoup plus difficile à traduire rationnellement, et directement lié au phénomène de la tétanie ; en effet, le voltage entre les électrodes était réglé le plus souvent de manière à obtenir un gradient de potentiel égal au seuil de taxie, pour chaque stimulus, au voisinage de la cathode ; or, le seuil de tétanie dépend lui aussi de la durée d'impulsion et surtout de la fréquence ; si bien qu'aux fréquences les plus élevées, il était atteint à une certaine distance de l'anode, ce qui était favorable à une bonne concentration et finalement à une immobilisation des poissons sur l'électrode ; au contraire, aux basses fréquences, le seuil était rarement atteint, comme nous l'avons vu pour le stimulus 20 Hz - 3 ms et la concentration finale des poissons sur l'électrode n'était pas toujours sensible.

Il fallait donc imaginer une autre méthode qui permette la comparaison des différents stimuli de façon plus équitable, quelle que soit la fréquence ; c'est ce que nous verrons ultérieurement.

b) Remarques.

Pour comparer correctement deux stimuli, il faudrait pouvoir dissocier l'étude des réactions des poissons, dans la zone où le gradient est sensiblement constant, de celle de leurs conduites au voisinage de l'anode, où le champ croît rapidement. Les expériences décrites jusqu'à présent, avec un gradient de potentiel sensiblement égal au seuil de taxie près de la cathode, sont essen-

Taille (cm)	Cas	E	M	Coefficient 1	Coefficient 0,5	Coefficient 0	+	-
12,5	1°		×	×				×
	2°		×			×		×
	3°	×		×				×
16	1°	×		×				×
	2°	×				×		×
	3°		×	×				×
13	1°		×	×				×
	2°		×	×				×
	3°	×				×		×
16	1°	×		×				×
	2°	×				×		×
	3°		×			×		×
13	1°		×			×		×
	2°	×				×		×
	3°	×				×		×
13	1°	×		×				×
	2°		×			×		×
	3°	×		×				×
14,5	1°		×	×				×
	2°	×		×				×
	3°	×		×				×
13	1°	×		×				×
	2°		×		×			×
	3°	×				×		×
16	1°		×	×				×
	2°	×		×				×
	3°	×				×		×
13	1°		×			×		×
	2°	×		×				×
	3°		×			×		×
Bilan	1°	5	5	8	0	2	0	10
	2°	6	4	4	1	5	0	10
	3°	7	3	4	0	6	0	10

TABL. 5. — Efficacité, dans un plan horizontal, de l'attraction anodique de mulets soumis au stimulus 20 Hz - 3 ms ; la tension entre les électrodes était réglée, pour chaque taille de poisson, de manière à ce que le gradient de potentiel soit égal à une fois et demie la valeur du seuil de taxis à 50 cm en avant de la cathode dans le bac de la figure 18.

tiellement destinées à apprécier la qualité des taxies des poissons nageant vers les champs croissants et à noter les tentatives de fuite qu'ils pourraient manifester. Une autre série d'expériences, où le voltage serait cette fois réglé de façon à atteindre le seuil de tétanie, systématiquement à une même distance en avant de l'anode, quel que soit le stimulus étudié, permettrait d'étudier la concentration finale des poissons sur l'électrode dans des conditions comparables. Mais la tension de notre générateur, limitée à 110 V, ne permettrait pas d'atteindre le seuil de tétanie à une distance suffisante de l'anode aux basses fréquences, à moins de rapprocher les électrodes l'une de l'autre. Dans ce dernier cas, la zone de pêche aurait été trop réduite pour des observations correctes et par surcroît l'intensité débitée, alors trop élevée, aurait risqué d'entraîner la destruction du générateur.

c) *Définition de la méthode appliquée sur les sardines.*

Nous avons été amenés à définir de nouveaux critères qui tiennent compte à la fois des observations préliminaires et des performances de notre générateur. Aux hautes fréquences, nous avons constaté qu'un poisson qui pénétrait dans la zone où le gradient de potentiel commençait à croître ne pouvait pratiquement plus fuir et finissait, dans la très grande majorité des cas, par être tétanisé. C'est pourquoi, nous avons décidé de classer parmi les cas favorables tous les poissons qui nageraient correctement vers les champs croissants, sans retournement ou tentative de fuite, même s'il n'y avait pas de concentration finale sur l'anode, faute d'un gradient suffisant. Les poissons se verront alors attribuer le coefficient 1. Au contraire, les poissons qui manifesteraient, d'une manière ou d'une autre, des tentatives de fuite, seront notés 0. Dans certains cas douteux, nous nous sommes réservés la possibilité d'utiliser le coefficient 0,5.

Pour chaque stimulus, 10 poissons ont été successivement testés. Au cours de ces expériences, les sardines ont été systématiquement prises au milieu de la cathode au moment de la mise sous tension des électrodes. Chaque cas était ainsi exactement comparable aux autres.

3. Résultats.

a) *Dans un plan horizontal.*

Stimulus	Seuil de taxie (s) V/m	Grad. V à 50 cm devant C V/m	Résultats
200 Hz - 1 ms	17	20	10/10
200 Hz - 1 ms	17	17	10/10
200 Hz - 0,5 ms	17,5	20	5/10
100 Hz - 1 ms	17	20	10/10
100 Hz - 1 ms	17	17	8/10
100 Hz - 1 ms	17	15	4/10
100 Hz - 0,5 ms		20	6/10
50 Hz - 2 ms	18	18	5,5/10
50 Hz - 1 ms	19	19	5/10
50 Hz - 0,5 ms		20	2,5/10
40 Hz - 1 ms	20	20	3/10

TABLE. 6. — Efficacité, dans un plan horizontal, de l'attraction anodique des sardines pour différents stimuli.

En utilisant le bassin de la figure 18, le système d'électrodes de la figure 21 et la méthode présentée au chapitre précédent, nous avons obtenu les résultats indiqués dans le tableau 6.

Nous constatons qu'à 200 Hz - 1 ms, les résultats sont excellents, les réactions déclenchées par la fréquence 200 Hz étant très vives. C'est sans doute pourquoi les résultats à 200 Hz - 0,5 ms sont moins bons, car une durée de 0,5 ms doit être insuffisante pour contrôler des réactions aussi énergiques. On observait des mouvements de retournement comparables aux « loopings ».

A 100 Hz - 1 ms, les résultats sont encore très bons. Avec 20 V/m, les taxies ne semblaient pas meilleures qu'avec 17 V/m, mais d'après les résultats, le stimulus était alors plus coercitif. Avec 15 V/m, nous avons encore quelques attractions positives. Ce gradient devrait être suffisant pour des sardines de plus grande taille. A 100 Hz - 0,5 ms, les résultats sont comparables à ceux enregistrés pour 200 Hz - 0,5 ms.

A 50 Hz - 1 ms, les taxies devenaient moins nettes, mais l'attraction était encore efficace dans 50 % des cas. Il n'était pas toujours facile de classer les réactions comme « bonnes ou mauvaises », ce qui explique l'utilisation du coefficient 0,5 pour la fréquence 50 Hz.

Les stimuli, 50 Hz - 0,5 ms et 40 Hz - 1 ms, produisaient des taxies très médiocres, même dans les cas apparemment favorables.

b) *Dans un plan vertical.*

Avec un système d'électrodes à axe horizontal.

En utilisant le bac de la figure 19 et le système d'électrodes de la figure 22, nous obtenons les résultats indiqués dans le tableau 7.

Stimulus	Seuil de taxie (s) V/m	Grad. V à 50 cm devant C V/m	Résultats
200 Hz - 1 ms	17	25	10/10
200 Hz - 1 ms	17	20	4/10
200 Hz - 1 ms	17	17	5/10
200 Hz - 1 ms	17	17 ⁽¹⁾ ₍₂₎	5,5/10
100 Hz - 1 ms	17	25	10/10
100 Hz - 1 ms	17	17	2/10
50 Hz - 1 ms	19	30 (2)	8,5/10
50 Hz - 1 ms	19	25	2/10
50 Hz - 1 ms	19	25 (2)	2/10
50 Hz - 1 ms	19	19 (1)	3/10
50 Hz - 1 ms	19	19	2/10
50 Hz - 1 ms	19	15	×

TABLE. 7. — *Efficacité, dans un plan vertical, de l'attraction anodique des sardines pour différents stimuli.*

Certains des résultats du tableau 7 ont été obtenus avec une électrode rectangulaire isolée au dos (14 cm × 10 cm) au lieu du barreau de graphite, ou avec des électrodes distantes de 2,50 m au lieu de 3 m. Ces légères différences, lors des toutes premières mesures, ou rendues nécessaires par la suite pour obtenir des gradients élevés, sont respectivement signalées par (1) et (2) dans le tableau. Il est intéressant de constater que les résultats obtenus avec ces systèmes

d'électrodes légèrement modifiés concordent parfaitement avec les autres mesures, ce qui démontre la cohérence de la méthode employée.

Dans un plan vertical, un phénomène nouveau apparaît. Les poissons ont une nette tendance à nager vers la surface, ce qui explique la médiocrité de certains résultats : pour 17 V/m, devant C, nous trouvons 5/10 à 200 Hz - 1 ms et 2/10 à 100 Hz - 1 ms au lieu de 10/10 pour ces deux stimuli appliqués dans le « bac horizontal ».

Afin d'obtenir de meilleurs résultats, il a été nécessaire d'augmenter le gradient de potentiel appliqué. Pour atteindre 10/10 à 200 Hz - 1 ms ou 100 Hz - 1 ms, il a fallu monter à 25 V/m devant C. A 50 Hz - 1 ms, 30 V/m ne permettait d'obtenir que 8,5/10 et 25 V/m seulement 2/10.

Il est curieux de noter qu'à 200 Hz - 1 ms, les résultats sont légèrement meilleurs pour 17 V/m que pour 20 V/m. A 50 Hz - 2 ms, nous avons également obtenu parfois des résultats sensiblement meilleurs avec 19 V/m qu'avec 25 V/m. Il s'agit peut-être d'une coïncidence, à moins que des gradients légèrement supérieurs au seuil de taxie ne favorisent d'abord les remontées des poissons vers la surface et tendent à les supprimer seulement à partir d'une augmentation plus sensible du gradient.

Quelques expériences à 50 Hz - 1 ms avec 15 V/m sur la cathode n'ont donné aucun résultat positif sur des sardines de 12 cm.

Plutôt que d'augmenter le gradient de potentiel pour supprimer la remontée des sardines vers la surface, nous avons pensé qu'il était peut-être possible d'utiliser ce phénomène en employant un système d'électrodes à axe vertical.

Avec un système d'électrodes à axe vertical.

Il n'avait pas été prévu de bac spécialement conçu pour cette étude. Nous avons donc utilisé le « bac vertical » comme le montre la figure 23, avec la cathode posée sur le fond et l'anode maintenue en surface. Le champ était sensiblement uniforme sur 70 cm à partir du fond, puis

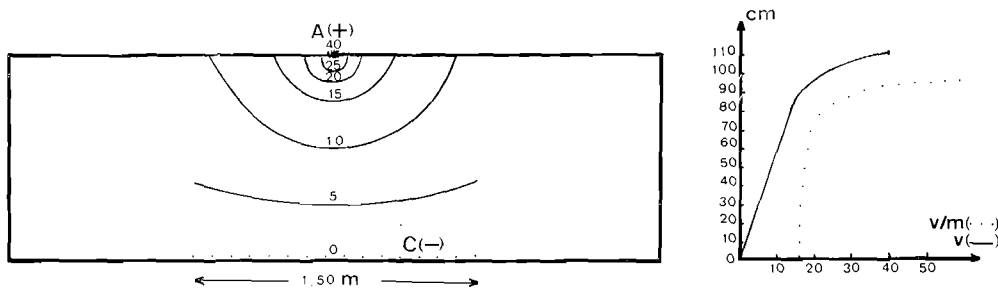


FIG. 23. — « Bac vertical » vu de profil ; la distribution des lignes équipotielles est indiquée pour un système d'électrodes à axe vertical et pour une différence de potentiel de 40 V entre les électrodes ; la cathode, composée par un grillage en cuivre long de 1,50 m, est posée sur le fond ; l'anode, constituée d'un barreau de graphite ($\varnothing = 2$ cm) isolé au dos, est maintenue en surface ; le graphique indique la variation du potentiel (— —) et du gradient de potentiel (... ..) sur l'axe médian des électrodes.

Stimulus	Seuil de taxie (s) V/m	Grad. V à 50 cm devant C V/m	Résultats
200 Hz - 1 ms	17	17	10/10
200 Hz - 1 ms	17	15	10/10
50 Hz - 1 ms	19	19	10/10
50 Hz - 1 ms	19	15	8,5/10

TABL. 8. — Observations dans le bac de la figure 23 de l'attraction anodique des sardines avec un système d'électrodes à axe vertical.

croissait très rapidement jusqu'à la surface. Les résultats obtenus avec ce montage sont indiqués dans le tableau 8.

Ces résultats sont très favorables, car il apparaît que, pour des taxies verticales, un gradient inférieur au seuil de taxie provoque encore de bonnes attractions : 10/10 à 200 Hz - 1 ms et 8,5/10 à 50 Hz - 1 ms pour seulement 15 V/m devant C.

Il serait bon de vérifier ces expériences en vraie grandeur, sur des distances plus longues. Mais, ces premières observations sont très encourageantes car des sardines prises sur le fond, au milieu de la cathode, montaient franchement jusqu'à l'anode lorsque le courant était établi. Cette conduite est très nettement visible sur les prises de vues réalisées au cours de ces expériences.

5° Pénétration des sardines dans la zone d'attraction du champ électrique.

Le dispositif de pêche étudié est prévu pour fonctionner « au coup par coup ». C'est-à-dire que la tension ne doit être établie qu'après que les poissons aient été concentrés entre les électrodes sous l'influence d'un stimulus lumineux. Une fois ces poissons attirés vers l'anode, puis aspirés, le courant électrique est coupé, le temps qu'une nouvelle concentration se reforme.

Il nous a semblé intéressant de chercher à savoir si le système de capture était également capable de fonctionner en continu. Nous avons donc essayé de déterminer si les poissons pénétraient dans la zone de pêche, c'est-à-dire dans la zone située entre les électrodes, lorsque celles-ci étaient déjà sous tension. Pour cette étude, nous avons fait subir une translation au système d'électrodes dans le « bac horizontal » ainsi que dans le « bac vertical », afin de ménager un espace libre entre la cathode et l'extrémité du bac (fig. 24). Dans cet espace, le gradient de potentiel était très faible, de l'ordre de 0,6 V/m pour le « bac horizontal » lorsque

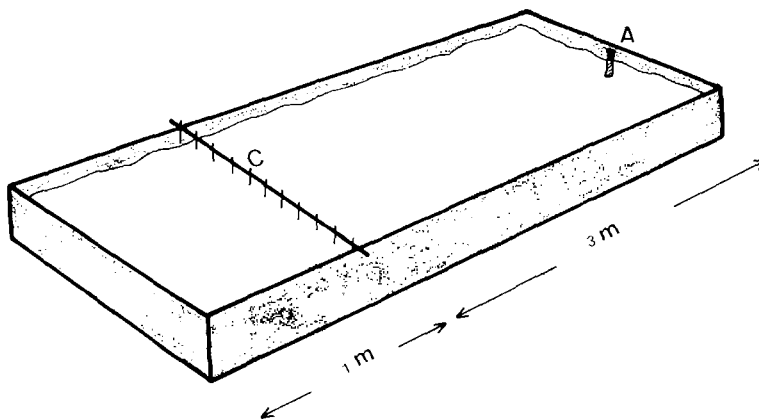


FIG. 24. — Nouvelle disposition des électrodes dans le « bac horizontal » pour étudier la pénétration des poissons dans la zone de pêche, la tension électrique étant déjà établie.

17 V/m étaient appliqués près de la cathode du côté de la zone de pêche et ne semblait pas avoir d'influence sur le comportement des poissons. Lorsqu'un poisson atteignait la cathode, ou bien il la traversait et était alors brutalement soumis à un gradient de potentiel de l'ordre du seuil de taxie, ou bien il parvenait à faire demi-tour avant d'entrer en taxie et retournait dans la zone non soumise au champ électrique.

1. Observations dans un plan horizontal.

Une fois le voltage correctement réglé pour chaque expérience et la tension établie, le poisson était placé dans la zone non soumise au champ électrique. Trois cas ont alors été envisagés :

- a) le poisson pénétrait franchement dans la zone de pêche et entrait en taxie. Le coefficient 1 lui était attribué ;
- b) le poisson y pénétrait après quelques hésitations au niveau de la cathode ou seulement après plusieurs tentatives. Le coefficient 0,5 lui était attribué ;
- c) au bout de trois minutes, le poisson n'avait pas franchi la cathode. Le coefficient 0 lui était attribué.

Avec ces conventions, et en testant successivement plusieurs sardines de 12 cm, nous avons obtenu les résultats du tableau 9. D'une façon générale, les poissons traversaient plus facilement la cathode à 50 Hz qu'à 200 Hz. Ce résultat s'explique car à 200 Hz, le stimulus électrique était plus rudement ressenti et donc plus rapidement détecté qu'à 50 Hz. Par ailleurs, le dégagement gazeux d'hydrogène sur la cathode est beaucoup plus dense à 200 Hz qu'à 50 Hz. Or, un tel dégagement peut avoir des effets répulsifs ; en effet, de véritables rideaux de bulles d'air ont parfois été utilisés comme barrières à poissons, notamment dans certains fjords norvégiens.

Stimulus	Seuil de taxie (s) V/m	Grad. V à 50 cm devant C V/m	Résultats
200 Hz - 1 ms	17	s = 17	3,5/5
50 Hz - 1 ms	19	s = 19	4,5/5
200 Hz - 1 ms	17	s/2 = 8,5	1,5/2
50 Hz - 1 ms	19	s/2 = 9,5	2/2
50 Hz - 1 ms	19	15	4,5/5

TABL. 9. — *Pénétration des sardines dans la zone d'attraction du champ électrique (observations dans un plan horizontal).*

Nous avons également étudié la pénétration des sardines dans la zone de pêche avec seulement $s/2$ sur la cathode. Dans ce cas, les poissons traversaient plus facilement la cathode et nageaient vers les champs de valeurs croissantes. Mais lorsqu'ils atteignaient un gradient sensiblement égal au seuil de taxie, dans la grande majorité des cas, ils fuyaient latéralement ou faisaient demi-tour et sortaient de la zone de pêche, où ils revenaient parfois de façon aléatoire. Ces poissons nageaient en fait assez librement et évitaient de pénétrer dans la zone où le gradient devenait supérieur à s .

Le stimulus 50 Hz - 1 ms a été aussi testé avec 15 V/m sur la cathode. Ce gradient compris entre $s/2$ et s était déjà suffisant pour éviter des retours francs vers la cathode, mais dans certains cas, les poissons avaient encore tendance à fuir latéralement lorsqu'ils atteignaient la valeur du champ égale au seuil de taxie. Il semble donc que, même pour un système de pêche en continu, il soit nécessaire d'appliquer un gradient de potentiel au moins égal au seuil de taxie sur la cathode.

2. Observations dans un plan vertical.

En procédant dans le « bac vertical » comme précédemment, nous avons obtenu les résultats du tableau 10.

A 50 Hz - 1 ms, les résultats sont sensiblement comparables à ceux enregistrés dans le « bac horizontal », même quand le gradient de potentiel sur la cathode est nettement plus élevé (1/1 pour 34 V/m et 5/5 pour 30 V/m).

Afin de savoir si des poissons qui avaient déjà subi des effets électriques traversaient encore la cathode, des sardines déjà testées à 50 Hz ont été reprises à 200 Hz. Le deuxième stimulus étant plus « dur », les poissons étaient beaucoup plus réticents pour pénétrer de nouveau dans la zone de pêche. Mais, dans le « bac vertical », d'après la disposition des brins de la cathode (fig. 19), le dégagement gazeux sur l'électrode était continu et non plus ponctuel, comme dans

le « bac horizontal » (fig. 24). L'influence de ce rideau, beaucoup plus intense à 200 Hz qu'à 50 Hz, était sans doute plus sensible pour cette raison dans le « bac vertical » que dans le « bac horizontal ».

L'accoutumance et le passage d'un certain stimulus à un stimulus plus dur ou réciproquement jouent cependant certainement un rôle car une nouvelle série d'expériences avec 200 Hz en premier et 50 Hz en second a donné des résultats différents des précédents. Les derniers résultats pour 25 V/m sont indiqués avec réserve. En effet, l'eau ayant été insuffisamment renouvelée au cours de ces expériences, les derniers poissons testés ont présenté des signes d'intoxication, ce qui a probablement perturbé leur comportement et faussé les résultats.

Stimulus	Seuil de taxie (s) V/m	Grad. V à 50 cm devant C V/m	Résultats
50 Hz - 1 ms	19	19	4/5
50 Hz - 1 ms	19	34	1/1
50 Hz - 1 ms	19	30	5/5
— puis —			
200 Hz - 1 ms	17	30	1/5
— — —			
200 Hz - 1 ms	17	30	2,5/5
— puis —			
50 Hz - 1 ms	19	30	4/5
— — —			
200 Hz - 1 ms	17	25	(2,5/5) ?
— puis —			
50 Hz - 1 ms	19	25	(2,5/5) ?

TABL. 10. — *Pénétration des sardines dans la zone d'attraction du champ électrique (observations dans un plan vertical).*

En résumé, il apparaît que la pêche en continu mérite d'être tentée avec le seuil de taxie appliqué sur la cathode. Il semble établi que les poissons pénétreront d'autant plus facilement dans la zone de pêche que la fréquence utilisée sera plus basse. Il faut noter que dans des conditions réelles de pêche, les effets attractifs du stimulus lumineux sur les poissons devraient favoriser leur pénétration dans le champ électrique. De plus, en vraie grandeur, les brins de la cathode seront écartés d'au moins 1 mètre et il est possible que d'éventuels effets de barrière visuels, déclenchés par les brins très rapprochés des cathodes employées au cours de nos expériences, soient alors considérablement atténués. Par contre, le dégagement gazeux sur la cathode en grandeur réelle risque d'être considérable. Si un bouillonnement trop important se produisait sur les brins de la cathode, même espacés de 1 mètre, l'efficacité d'un système de pêche en continu pourrait être compromise. Seuls des essais en vraie grandeur permettraient d'apporter une réponse à cette question.

6° *Quelques précisions sur la tétanie des sardines.*

Les expériences réalisées dans le « bac horizontal » ainsi que dans le « bac vertical » nous ont permis de préciser les limites d'approche de l'anode par des sardines de 12 cm, pour différents stimuli.

A 200 Hz, les sardines peuvent nager jusqu'à toucher l'électrode, même lorsque le gradient de potentiel atteint 100 V/m à 10 cm de celle-ci. Dans le « bac vertical », les poissons ne

peuvent évidemment plus glisser sur le fond, comme c'était parfois le cas dans le bac trapézoïdal. Le gradient dépasse certainement 200 V/m sur l'anode. Mais, les points soumis à 100 V/m et 200 V/m ne sont séparés que par 10 cm environ et même si un poisson est complètement tétanisé à 150 V/m, par exemple, il est bien évident qu'il viendra quand même toucher l'électrode grâce à l'énergie cinétique acquise. On peut donc seulement affirmer, qu'avec le stimulus 200 Hz - 1 ms, une sardine de 12 cm est capable d'atteindre, dans un champ électrique croissant et en pleine eau, des gradients de 100 V/m, pour le moins, bien que son seuil de tétanie théorique, mesuré en champ uniforme, ne dépasse pas 60 V/m.



FIG. 25. — Sardines *Sardina pilchardus*, de 12 cm de long, photographiées à travers la face de plexiglas du « bac vertical ».

Sur les vues filmées à 50 Hz - 1 ms, les sardines ne subissent pratiquement jamais de tétanie anodique. Les poissons tétanisés sont généralement ceux qui, après avoir tournoyé autour de l'anode, se sont trouvés à certains moments la tête orientée vers la cathode. Or, il est bien connu que le seuil de tétanie cathodique est plus vite atteint que celui de la tétanie anodique. A 50 Hz - 1 ms, les sardines de 12 cm, dans un champ croissant et en pleine eau, peuvent certainement atteindre des gradients de 150 V/m et probablement même des champs plus élevés. Il est clair, cependant, que ces règles ne s'appliquent qu'à des champs présentant des configurations comparables à celles de nos expériences. Dans ce genre d'étude, de nombreux paramètres sont étroitement liés et il est parfois difficile de traduire les résultats de nombreuses observations par de simples valeurs numériques. En effet, un poisson qui aurait nagé à 50 V/m sur 10 m, par exemple, n'aurait peut être plus la force d'atteindre 150 V/m et pourrait alors être tétanisé à 100 V/m seulement.

Notons enfin, qu'au cours de ces expériences, les sardines tétanisées avaient tendance à couler et non pas à remonter en surface. Ceci apparaît très nettement sur nos vues filmées lorsque nous avons utilisé le système d'électrodes à axe vertical dans le « bac vertical ». On y remarque que les poissons fortement tétanisés coulent au bout de 20 secondes environ. Ils sortent alors de la zone où le champ est le plus intense et ceux qui « récupèrent » le plus rapidement entrent de nouveau en taxie vers l'anode.

7° *Résumé et conclusions du chapitre III.*

Nous disposons désormais de renseignements précis sur les valeurs des gradients de potentiel nécessaires à l'attraction anodique des sardines de 12 cm, pour différents stimuli. A la suite de nos dernières expériences, il serait tentant d'utiliser le stimulus 200 Hz - 1 ms avec 25 V/m sur la cathode. Mais, dans ce cas, la puissance consommée risquerait d'être considérable à moins que l'on se contente d'une zone de pêche très réduite. Or, nous avons vu qu'à 100 Hz, les résultats étaient sensiblement aussi bons qu'à 200 Hz. La puissance consommée se trouve alors divisée par deux. Dans un plan d'eau horizontal, 17 V/m sur la cathode devrait déjà donner d'excellents résultats, avec des sardines de 12 cm. Si en pleine eau les sardines manifestaient, comme dans le « bac vertical », des tendances à nager vers la surface, il faudrait augmenter le gradient sur la cathode jusqu'à 25 V/m environ. La dépense énergétique entre les électrodes se trouverait alors accrue dans le rapport $\left(\frac{25}{17}\right)^2 = 2,16$. La valeur des gradients de potentiel est en effet proportionnelle à la tension tandis que la puissance dissipée augmente avec le carré de la tension. On peut d'ailleurs se demander si la remontée des sardines vers la surface n'est pas en partie due à l'étroitesse du bac. Il est possible que les poissons s'y sentent piégés et que lorsqu'ils perçoivent le stimulus électrique, ils tendent à s'échapper. Comme le fond est opaque, ils fuient dans la seule direction apparemment libre, c'est-à-dire vers la surface. Ceci supposerait que les poissons détectent la face transparente en plexiglas car ils ne viennent pas la heurter. En l'absence de champ électrique, certaines sardines très agitées manifestaient parfois un tel comportement. Cela signifierait alors qu'un gradient de potentiel égal au seuil de taxie n'est pas tout à fait coercitif, mais qu'il le devient s'il est augmenté de quelques volts par mètre.

Si l'étroitesse du bac se révélait hors de cause, il serait préférable d'utiliser un système d'électrodes à axe vertical. Nous avons vu que dans ce cas, 15 V/m sur la cathode semblait suffire. La puissance consommée serait alors diminuée dans le rapport $\left(\frac{25}{15}\right)^2 = 2,78$, ce qui est considérable. De plus, en remplaçant le stimulus de 100 Hz - 1 ms par celui de 50 Hz - 1 ms, qui, dans ce cas, provoque 8,5 attractions favorables sur 10, la puissance se trouverait encore divisée par 2. Il est, cependant, très probable qu'à consommation énergétique égale 100 Hz - 0,5 ms donnerait de meilleurs résultats que 50 Hz - 1 ms.

Avec un système d'électrodes à axe horizontal, le stimulus 50 Hz - 1 ms paraît nettement moins coercitif que 100 Hz - 1 ms. Dans le « bac vertical », 50 Hz - 1 ms ne donne que 8,5 attractions positives sur 10 avec 30 V/m sur la cathode, tandis que 100 Hz - 1 ms produit 10 attractions positives sur 10 avec seulement 25 V/m. Le gain de puissance se traduit alors par $2 - \left(\frac{30}{25}\right)^2 = 0,56$. Mais, il se fait au prix de résultats moins bons et surtout plus douteux.

Il est important de rappeler que nos expériences ont porté sur des sardines qui mesuraient seulement 12 cm. Avec des sardines plus longues, les seuils de taxie seront moins élevés. Par exemple, pour 100 Hz - 4 ms, nous avons mesuré $s = 18,6$ V/m pour des sardines de 12 cm et $s = 11,8$ V/m pour des sardines de 18,5 cm. La dépense énergétique nécessaire à la capture de sardines de 18,5 cm serait donc pour ce stimulus $\left(\frac{18,6}{11,8}\right)^2 = 2,48$ fois plus faible que pour la capture des sardines de 12 cm.

De plus, dans le milieu naturel, les poissons n'auront pas subi les perturbations qu'ont pu entraîner la pêche proprement dite, le changement de milieu et plusieurs recaptures à l'aide d'une épuisette. En mer, les sardines devraient réagir plus favorablement au stimulus électrique. Par ailleurs, quelques observations faites à l'île d'Yeu en 1973 semblaient bien montrer qu'en présence d'un stimulus photique les poissons subissaient avec plus de passivité les effets du champ électrique.

C'est pourquoi nous estimons que 15 V/m dans la zone de pêche devrait suffire pour assurer la capture de sardines d'un « moule » relativement gros, mais d'intérêt commercial. Si les résultats des expériences réalisées, en laboratoire, avec un système d'électrodes à axe vertical

se trouvaient confirmés en pleine eau, 10 V/m sur la cathode pourrait même suffire. Notons pour conclure que la fréquence 50 Hz mérite certainement d'être expérimentée et qu'elle peut donner de bons résultats en vraie grandeur mais que le stimulus 100 Hz - 1 ms semble nettement plus coercitif. Notre estimation à 50 Hz comme limite inférieure des fréquences utilisables est vraisemblablement pessimiste. En effet, des sardines plus longues, dans le milieu naturel, risquent de mieux réagir à des fréquences plus basses. Par ailleurs, SEIDEL et KLIMA (1974) ont étudié le comportement de six espèces pélagiques du golfe du Mexique, en pleine eau, le long de la coque d'un navire, et ils estiment que les limites inférieures d'un stimulus convenable pour des poissons de 10 cm de longueur sont 0,5 ms, 15 V/m, 20 à 35 Hz. Nos résultats sur *Sardina pilchardus* concordent donc assez bien avec les leurs, bien que nos exigences théoriques finales soient plus sévères. Cette base de travail nous a permis d'entreprendre la définition d'un système de pêche qui utilise, à un stade du processus de capture, les réactions des sardines soumises aux effets d'un champ électrique.

CHAPITRE III

DEFINITION ET ETUDE D'UN SYSTEME DE PECHE A L'ELECTRICITE AVEC LUMIERE ARTIFICIELLE ET POMPE ASPIRANTE

1° *Historique.*

D'après VIBERT (1966), c'est le Soviétique CHERNIGIN qui a mis au point pour la première fois, en 1946, une méthode de capture associant l'électricité au pompage, en eau douce.

En mer, des pompes ont d'abord été utilisées seules, pour embarquer les poissons pêchés à la senne tournante. En effet, les captures importantes sont longues à mettre à bord du navire par le moyen classique des salabardes (sorte de grandes épuisettes). Les poissons emprisonnés dans la senne finissent par couler au fond du filet, au risque de le déchirer ou de faire chavirer le bateau. BURGOON (1959) indique que dès 1949 les senneurs de la compagnie américaine SMITH commencèrent à s'équiper de pompes pour vider leurs filets. Ces bateaux pêchaient surtout le menhaden, *Brevoortia tyrannus*, mais aussi des sardinelles, des harengs et des maquereaux. KREUTZER (1964) signale qu'à partir de 1959, les buses des pompes furent électrifiées pour augmenter leur efficacité.

SMITH (1955) rend compte d'essais de capture de harengs du pacifique, *Clupea pallasii*, sans faire usage de la senne. Les poissons, attirés par une lampe immergée de 1 000 watts, étaient aspirés à l'aide d'une pompe électrifiée. Les résultats ont été jugés insuffisants pour présenter un intérêt commercial. Mais la tension n'atteignait pas 100 volts, la fréquence des impulsions était seulement de 9 Hertz et le débit de la pompe ne dépassait pas 50 m³/heure. Il est intéressant de noter qu'avec ce matériel peu performant, plusieurs centaines de kilogrammes de petits harengs de 7,5 cm ont pu être capturés par heure de pêche, lorsque les conditions étaient bonnes.

Les premières pêches industrielles sans filet, avec pompe et lumière artificielle, furent réalisées en mer Caspienne (NIKONOROV, 1959). Le kilka, *Clupeonella engrauliformis*, était pêché depuis 1952 à l'aide de lampes immergées et de filets. A partir de 1954, les filets furent parfois remplacés par des pompes aspirantes. Mais, le kilka a un comportement bien spécifique. Extrêmement photophile, il recherche l'éclairage maximum et nage jusqu'à toucher les lampes. Il suffit donc de disposer une lampe immergeable près de l'embouchure d'une pompe pour réaliser des captures importantes.

Cette méthode ne peut pas être étendue aux autres espèces qui, à la différence du kilka, ne recherchent pas une intensité lumineuse maximale. Les poissons occupent alors un volume très supérieur à celui soumis à l'attraction hydrodynamique de la pompe. C'est pourquoi, les premiers essais de capture, en 1957, du saury, *Cololobis saira*, en mer d'Okhotsk, furent un échec. NIKONOROV (1964) fit alors électrifier la buse de la pompe pour obliger les poissons à nager vers son embouchure. Dans la nuit du 2 décembre 1962, 4,5 tonnes de saury furent ainsi pêchées en 1 heure et 25 minutes dont 1,5 tonne en 9 minutes.

L'Allemand DETHLOFF (1964) signale également l'utilisation d'une pompe électrifiée associée à une source lumineuse. Douze tonnes de harengs auraient été ainsi pêchées, en 1958, au cours d'essais à Terre-Neuve, leur nombre et leur durée n'étant pas précisés.

Ces informations intéressèrent d'autant plus l'I.S.T.P.M. que des études sur la pêche à la lumière y étaient entreprises depuis plusieurs années (KURC, 1963). Mais si les articles publiés décrivent parfois succinctement les systèmes d'électrodes, ils ne précisent pas la configuration exacte des champs électriques. Or, nous estimons qu'il est important de connaître la distribution spatiale des gradients du potentiel pour prévoir la zone de pêche effective. Nous verrons qu'il est intéressant de la faire coïncider au mieux avec l'endroit où la concentration des poissons attirés par la lumière est maximale. Aussi, avant d'aborder l'étude du système d'électrodes, il est nécessaire, pour une meilleure compréhension de notre travail, de préciser les réactions des poissons mis en présence d'une source de lumière. Nous nous limitons à un rappel succinct des travaux réalisés à l'I.S.T.P.M. qui ont porté essentiellement sur les sardines et les anchois.

2° *Attraction des poissons par une lumière artificielle.*

La pêche à la lumière est fort ancienne. Mais son application, largement répandue en Méditerranée, reste très occasionnelle en Atlantique. C'est pour essayer de la développer que l'I.S.T.P.M. a entrepris des essais de pêche à la lumière. Un lamparo immergeable a été mis au point à cet effet (KURC et PERCIER, 1959). Il est constitué par quatre lampes à incandescence de 500 watts chacune, alimentées sous 24 volts ; leur niveau d'immersion est réglable jusqu'à 50 m, mais reste le plus souvent compris entre 1 et 3 m. Des lampes à vapeur de mercure ont également été testées et ont donné des résultats satisfaisants.

Le mode de formation des concentrations de poissons et le comportement de ces derniers au voisinage des lampes ont pu ainsi être observés. Ce type de réaction des poissons a fait l'objet de nombreuses études. Certains auteurs pensent que les poissons se rapprochent de la source lumineuse pour s'alimenter, car le plancton se concentre également autour des lampes. Il est possible, en effet, que la présence du plancton soit une des causes qui retiennent les poissons auprès du lamparo. Mais, il semble que l'attraction primaire est avant tout due à une conduite phototropique innée, à une réaction instinctive (KURC et BLANCHETEAU, 1966).

La lumière artificielle a des effets différents selon les espèces. Les poissons photophiles présentent des réactions à appétence active, déclenchées par le signal photique. Il s'ensuit une motricité orientée dans le sens des gradients lumineux croissants. Un poisson photophobe, au contraire, manifeste des réactions de fuite et d'évitement devant ce phénomène anormal. Certains individus, comme l'orphie par exemple, présentent des conduites intermédiaires. Ils se rapprochent des lampes mais gardent un comportement inquiet, malhabile et finalement ressortent rapidement du champ d'observation.

La pêche au lamparo est en partie conditionnée par les facteurs de milieu qui jouent un rôle important. En effet, la rapidité avec laquelle « montent » les poissons, l'importance de la concentration ainsi formée et sa stabilité dans le temps sont fonction de nombreux facteurs tant hydrologiques que météorologiques. Ces derniers ont été longuement étudiés à l'I.S.T.P.M. (DINER, 1969). Il est évident qu'un poisson perçoit mieux la lumière des lampes par nuit noire et eaux claires qu'en période de pleine lune ou dans des eaux turbides. Une thermocline très marquée équivaut le plus souvent à une barrière et un courant trop fort ou la présence de prédateurs nuit à une bonne stabilité de la concentration.

Afin de situer les poissons par rapport au lamparo, nous avons procédé à des observations visuelles. Un sondeur ultra-sonore a, en outre, été monté à bord d'un canot et a permis d'étudier les concentrations les plus profondes et donc invisibles. Nous avons ainsi constaté que les sardines ne viennent pas jusqu'au contact des lampes mais restent à une certaine distance, rarement inférieure à 2 m. Les individus les plus proches sont généralement des formes juvéniles qui présentent des conduites cinétiques désordonnées et sont rarement très nombreuses. La majorité des sardines se maintient à l'intérieur d'une zone dite de « photopréférendum » où l'intensité de l'éclairement ne dépasse pas un certain seuil ; pour des valeurs supérieures, les effets du gradient lumineux ne sont plus attractifs mais, au contraire, répulsifs. Cette zone de photopréférendum a tendance, au cours du temps, à se resserrer autour de la source lumineuse car il se produit un phénomène d'accoutumance. Un résultat identique est obtenu en sous-voltant les lampes, mais il faut éviter toute diminution brusque de l'intensité lumineuse car de telles variations peuvent provoquer des réactions de fuite.

La zone de photopréférendum ne présente pas une symétrie hémisphérique autour du lamparo comme on pourrait le penser. Les poissons se maintiennent le plus souvent sous le halo lumineux afin d'être éclairés, « par en haut » ; il y a ainsi identité avec leur mode d'éclairage naturel, soit solaire, soit lunaire. Lorsqu'un individu s'aventure au niveau de la source lumineuse, il se couche généralement sur le flanc en présentant son dos à la lumière. Par ailleurs, en mer, les poissons doivent lutter contre le courant pour se maintenir dans la zone d'éclairage, face aux lampes de préférence. C'est ce qui explique que les concentrations les plus importantes sont le plus souvent détectées au-dessous du niveau d'immersion des lampes et en aval de celles-ci par rapport au courant. Bien entendu, il s'agit ici d'un comportement moyen et la position des poissons ne manque pas de fluctuer au cours du temps. Notons cependant qu'ils sont le plus fréquemment répartis entre 2 et 25 m en aval des lampes ; la largeur de cette zone est variable et atteint 15 à 20 m. De nombreuses observations nous permettent de préciser le volume où la probabilité de présence des poissons semble être maximale. De forme sensiblement ellipsoïdale, il se situe approximativement entre 2 et 15 m en aval de la source lumineuse et sa largeur dépasse rarement 7 à 8 m (fig. 26). Le niveau de cette concentration varie au cours de la nuit en liaison avec les facteurs de milieu.

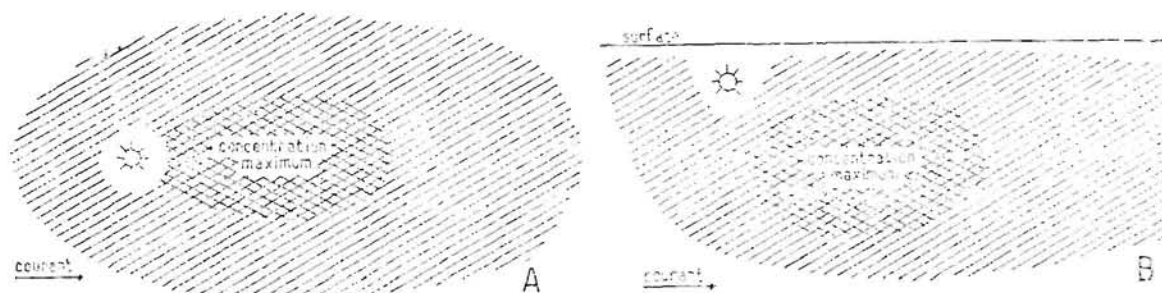


FIG. 26. — Répartition approximative des poissons attirés par la lumière des lampes immergées : A vue de dessus, B vue de profil ; la concentration est particulièrement dense en dessous et en aval du lamparo par rapport au courant marin.

La pêche au lamparo consiste donc en une phase d'attraction des poissons au moyen de lumière artificielle, puis en une seconde phase au cours de laquelle on cale classiquement une senne autour des lampes. La lumière fait office d'appât et peut donc remplacer la røge de morue qui était habituellement utilisée en Atlantique mais qui tend à être abandonnée en raison de son coût de plus en plus élevé. Mais, un filet tournant n'est pas d'une manœuvre simple, notamment la nuit. De plus, son efficacité n'est pas totale et une fraction non négligeable des poissons peut s'en échapper avant qu'il ne soit complètement fermé. Or, un observateur qui étudie le comportement des sardines au voisinage du lamparo est généralement frappé par la stabilité de leur concentration et par leur proximité. Il est alors tout naturellement conduit à imaginer de nouveaux modes de capture et notamment une pompe qui aspirerait les poissons à bord. La zone de suction est cependant trop réduite pour assurer des captures dignes d'intérêt. C'est ici que la taxie anodique peut trouver une application, comme relais entre l'attraction de la lumière à grand rayon d'action et le champ hydrodynamique de la pompe dont la portée efficace est limitée. Mais, pour que les caractéristiques du champ électrique conviennent, l'étude détaillée d'un système d'électrodes est nécessaire.

3° Etude du système d'électrodes.

Il serait long et fastidieux de reproduire la totalité de nos études sur les électrodes. Une partie a d'ailleurs déjà été publiée (DINER et LE MEN, 1971 ; LE MEN, 1971). Ces expériences préliminaires nous ont servi de base de travail pour définir le système définitif. Nous rappelons donc les données essentielles qui ont guidé nos études, nous indiquons ensuite la méthode expérimentale utilisée puis nous présentons les résultats retenus.

1. Bases de travail.

Notre but est la mise au point d'un système de pêche pouvant être exploité par des bateaux artisanaux de puissance moyenne. Il ne faut donc pas que la tension électrique appliquée soit trop élevée. En effet, l'impédance entre les électrodes est très faible et une forte tension implique une intensité importante et donc une grande dépense énergétique. Nous avons estimé qu'il ne fallait pas dépasser 500 volts.

Le bateau devra travailler, soit au mouillage, soit en dérive si la sonde est trop importante, pour que son énergie motrice soit disponible au moment de la pêche pour entraîner l'alternateur qui fournira la puissance électrique nécessaire.

Nous avons établi que le gradient de potentiel doit être voisin de 15 V/m pour être efficace. Il s'agit donc de définir une zone de pêche aussi grande que possible en jouant sur les dimensions et la disposition des électrodes.

a) *Anode.*

La zone de pêche doit coïncider avec le volume où la concentration des poissons est la plus dense. Il ne convient donc pas de placer l'anode, qui se confond avec l'embouchure de la pompe, près de la source lumineuse, au voisinage immédiat de laquelle les poissons ne se regroupent pas. Il est plus judicieux de placer l'anode à environ deux mètres en aval des lampes, par rapport au courant marin et au niveau de la concentration maximum.

Les dimensions de l'anode ne peuvent pas dépasser certaines limites car le rayon d'attraction d'une pompe est très faible et ne dépasse guère cinquante centimètres dans les meilleures conditions. Dans ce cas, le diamètre d'une anode circulaire, centrée sur l'orifice de la pompe, ne doit pas être supérieur à un mètre, sinon, les poissons attirés par les bords de l'électrode échapperaient à l'aspiration.

Nous avons vu que la chute de tension au voisinage d'une électrode est d'autant plus forte que sa surface est plus faible. Les gradients de potentiel seront donc élevés près de l'anode et les poissons risqueront d'être tétanisés avant de l'atteindre. Ils subiront alors passivement l'attraction de la pompe sans pouvoir tenter de fuir. Mais si un poisson est tétanisé avant de pénétrer dans la zone de succion, il coulera ou dérivera avec le courant et sera perdu pour le pêcheur. Il faut donc réduire au maximum la zone de tétanie en utilisant, aussi paradoxal que cela puisse paraître, une anode de petite surface. Dans ce cas, la chute de potentiel est très importante, si bien que le gradient atteint rapidement une valeur inférieure au seuil de tétanie à une distance relativement faible de l'électrode. Il n'est cependant pas possible de trop réduire la surface de l'anode car la chute de potentiel anodique devient alors considérable. Il s'ensuit que la valeur du gradient de potentiel dans la zone de pêche devient trop faible pour attirer les poissons. Après de nombreuses mesures, nous avons retenu une solution intermédiaire, c'est-à-dire une anode circulaire d'un mètre de diamètre (DINER et LE MEN, 1971). La face utile de l'anode est celle qui est orientée vers la cathode (fig. 27). Afin de concentrer les lignes de courant vers cette face et pour diminuer de ce fait la dispersion de l'énergie vers une zone où les poissons sont peu nombreux, nous avons isolé le dos de l'anode.

b) *Cathode.*

Il reste à définir les dimensions de la cathode et la distance qui la sépare de l'anode. Ces paramètres ne déterminent pas seulement la zone de pêche effective mais ils ont également une influence sur l'importance de la zone de tétanie qui entoure l'anode ainsi que sur la valeur de l'impédance entre les électrodes. Ils ont donc été étudiés systématiquement.

Nous avons constaté, au cours de nos expériences, qu'en ce qui concerne le champ électrique, un grillage métallique à larges mailles avait des effets comparables à ceux d'une plaque de même dimension. C'est pourquoi nous avons utilisé des cathodes composées de tiges métalliques suspendues verticalement dans l'eau. Elles offrent en effet peu de résistance au courant marin et, de plus, elles sont beaucoup moins encombrantes que des plaques métalliques.

En 1971, nous pensions encore qu'un gradient de potentiel voisin de 10 V/m devait suffire dans la zone de pêche. Pour obtenir cette valeur, nous avons alors défini une cathode constituée

de cinq tiges conductrices équidistantes, fixées à une boucle porteuse faisant sensiblement un arc de cercle et centrée sur l'anode. La hauteur de chaque tige était de 4,50 m et l'écartement entre les brins extrêmes de 6,50 m (fig. 27). Avec l'anode décrite précédemment, et pour une tension de 350 V, le gradient de potentiel dans la partie centrale de la zone de pêche avait pour valeurs respectives 13,5 - 12,3 - 10,5 - 9,5 - 8,8 - 8,3 - 7,5 V/m quand la distance entre les électrodes était de 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 m.

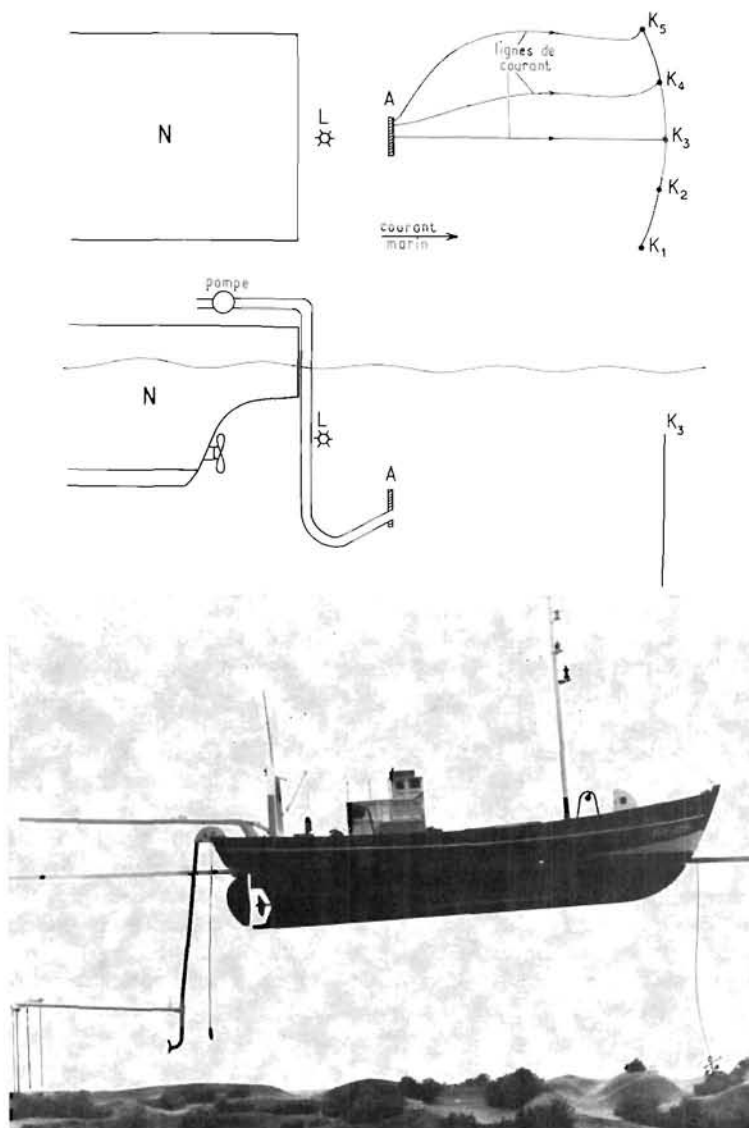


FIG. 27. — Vue de dessus et de profil du dispositif de pêche par lumière, champ électrique et pompe. N: navire, L: lamparo, A: anode. K_1 à K_5 : cathode répartie; le navire représenté sur la maquette est au mouillage afin que son énergie motrice soit entièrement disponible pour produire le courant électrique impulsif nécessaire; de plus, le navire s'oriente ainsi face au courant marin.

c) Dispositif général.

Nous avons vu que le champ électrique présente une efficacité maximale lorsque le corps du poisson est parallèle aux lignes de courant, la tête orientée vers l'anode. Or, les poissons se

maintiennent dans la zone de photopréférendum en nageant contre le courant marin. L'axe anode-cathode, c'est-à-dire la direction moyenne des lignes de courant, doit donc être parallèle au courant marin. Comme le bateau, au mouillage ou à la cape, fait face au courant, le système d'électrodes est disposé de manière à ce que son axe coïncide avec celui du navire (fig. 27).

Après avoir étudié différents procédés, nous avons défini, avec la collaboration des Ateliers et Chantiers de Bretagne (A.C.B.), un portique hydraulique qui, placé à l'arrière du navire, permet de déborder les électrodes. Leur distance est prévue réglable ainsi que leur niveau d'immersion, de manière à pouvoir les placer à la profondeur où se maintiennent les poissons. Un sondeur à ultra-sons indiquera cette position ainsi que l'importance de la concentration.

2. Méthode expérimentale.

Il est nécessaire de connaître la valeur du champ électrique en chaque point afin de déterminer la zone de pêche théorique. Cette valeur peut être calculée le long des lignes de courant, celles-ci étant déterminées par la répartition des surfaces équipotentielles. La répartition de l'énergie potentielle dans un certain volume obéit à la loi de Laplace :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$$

V étant la fonction potentielle et x, y et z, les trois coordonnées de l'espace. Or, la résolution de cette équation n'est aisée que pour quelques problèmes simples (conducteur linéaire, par exemple), ce qui n'est pas le cas de la pêche électrique. Il faut donc avoir recours à une méthode expérimentale pour analyser la répartition de l'énergie électrique, c'est-à-dire pour déterminer le potentiel en chaque point du liquide conducteur.

a) Maquette et lois de similitude.

Il serait peu pratique de déterminer directement en vraie grandeur la configuration spatiale du champ électrique créé par un système d'électrodes de grande dimension et les moyens dont nous disposons ne nous le permettraient pas. C'est pourquoi nous avons travaillé sur des maquettes.

Le montage expérimental comprend une sonde mobile repérable par rapport à trois axes fixes orthogonaux. Les coordonnées dans l'espace de l'extrémité de la sonde peuvent ainsi être appréciées au 1/10^e de millimètre dans les trois dimensions. Le potentiel correspondant à chaque position de la sonde est lu sur l'écran d'un oscilloscope en prenant pour potentiel de référence 0, celui de la cathode. En déplaçant la sonde point par point, il est possible de relever les surfaces équipotentielles et de dresser une « carte » spatiale du potentiel pour chaque système d'électrodes étudié et pour une différence de potentiel donnée entre les électrodes.

Il est ensuite nécessaire de transposer à l'échelle 1 les résultats obtenus sur la maquette. Pour cela, nous utilisons des formules de similitude que nous avons établies à partir de la loi d'Ohm, $V = R.I$, V est la différence de potentiel appliquée, R la résistance entre les électrodes et I l'intensité qui traverse le circuit. Cette formule est valable pour la maquette comme pour le prototype à l'échelle 1. Une résistance présente la dimension d'une résistivité multipliée par l'inverse d'une longueur. Soient R la résistance présente entre les électrodes en grandeur réelle, e la résistivité de l'eau de mer, R' et e' les grandeurs correspondantes de la maquette à l'échelle 1/k. Nous pouvons écrire la relation :

$$R/R' = e/e' \cdot 1/k \text{ ou encore } R = R' \cdot e/e' \cdot 1/k \text{ (a)}$$

Par ailleurs, le champ électrique est égal à une différence de potentiel par unité de longueur. Soient V la tension anodique et E le champ électrique en un point donné et soient V' et E' les grandeurs correspondantes de la maquette. Nous avons la relation :

$$E/E' = V/V' \cdot 1/k \text{ ou encore } E = E' \cdot V/V' \cdot 1/k \text{ (b)}$$

Les formules (a) et (b) permettent d'extrapoler à l'échelle 1 les résultats obtenus à partir des mesures faites sur la maquette. A l'aide de la formule (b), il est également possible de prévoir les nouvelles valeurs du champ électrique lorsque la tension appliquée entre les électrodes varie. Ces formules ont été utilisées avec des eaux douces et des eaux de mer présentant des résistivités très variées et nous avons pu vérifier leur parfaite validité.

Mais, les expériences antérieures ont montré qu'il est très important que les dimensions du système d'électrodes étudié soient suffisamment faibles par rapport au volume d'eau contenu dans le bassin expérimental. Ce volume d'eau doit en effet pouvoir être considéré infini, comme si le système d'électrodes se trouvait en pleine mer. Sinon, la répartition des équipotentielles n'est pas exactement la même dans les deux cas et si la maquette est trop grande, par rapport aux dimensions du bac expérimental, les gradients de potentiel mesurés sont surestimés.

b) *Détermination de l'échelle maximale de la maquette en fonction des dimensions du bac expérimental.*

Les mesures ont été réalisées dans un bac en plastique cylindrique de 600 l présentant une hauteur de 60 cm et un rayon de 56 cm. Afin de se placer avec certitude dans des conditions de travail correctes, nous avons imaginé un système d'électrodes simple comprenant une anode circulaire isolée au dos ($\varnothing = 1$ m) et une cathode rectangulaire (4 m \times 2 m) distante de 4 m de l'anode (fig. 28). Ce système a été réalisé aux échelles $1/5$, $1/7$, $1/12$, $1/25$, $1/36$, et dans

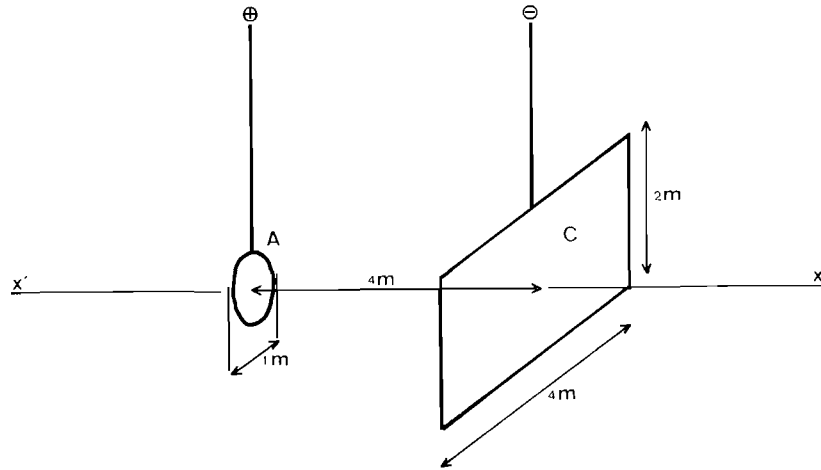


Fig. 28. — Système d'électrodes réalisé à différentes échelles pour déterminer, en fonction du volume du bac expérimental, le taux de réduction à donner à la maquette étudiée.

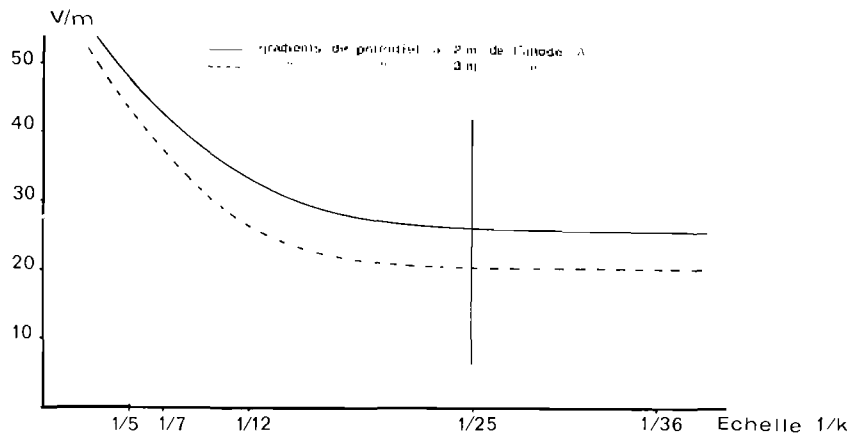


Fig. 29. — Résultats extrapolés en vraie grandeur à partir de mesures réalisées sur le montage de la figure 28 ; au-delà de l'échelle $1/25$, les valeurs du gradient de potentiel restent constantes quand les dimensions de la maquette diminuent ; au point de vue de la répartition énergétique, le bac expérimental peut être alors assimilé à un milieu aquatique infini ; tension anodique $V_{AC} = 400$ V.

chacun des cas, le gradient de potentiel a été mesuré à 2 m et à 3 m de l'anode sur l'axe correspondant à l'intersection des deux plans de symétrie du système d'électrodes. En calculant à chaque fois à l'aide de la formule (b) les gradients correspondants pour l'échelle 1 et pour une différence de potentiel entre les électrodes égale à 400 V, nous avons obtenu les résultats de la figure 29. Nous constatons que dans le bac utilisé, à partir d'une échelle inférieure à environ 1/25", les gradients de potentiel demeurent constants. Cela signifie que les résultats sont identiques à ceux qui seraient mesurés en pleine eau alors que pour des échelles supérieures à 1/25", les gradients de potentiel relevés auraient été surestimés. Mais, comme nous allons le voir, nous avons finalement adopté un système d'électrodes légèrement plus grand que celui qui nous a servi de test. Pour cette raison, et afin de garder une marge de sécurité, nous avons décidé d'adopter l'échelle de réduction 1/50" pour toutes les expériences qui vont suivre.

3. Définition du système d'électrodes.

Avec le système d'électrodes qui a servi de test (fig. 28) et pour une tension anodique de 400 V, le gradient de potentiel était sensiblement égal à 20 V/m à 1 m de la cathode sur l'axe des électrodes. C'est parfaitement en accord avec les résultats que nous avons obtenus en 1971. Comme nous désirons avoir 15 V/m pour le moins, non seulement sur l'axe, mais également dans un volume aussi grand que possible, nous avons porté la distance des électrodes à 5 m et nous avons donné pour dimensions à la cathode 6 m × 4 m.

a) Anode circulaire et cathode rectangulaire.

Dans un premier stade, nous avons repris pour cathode celle déjà utilisée lors d'essais antérieurs. Il s'agit, nous l'avons vu, d'une cathode répartie, constituée de tiges métalliques verticales suspendues à un support horizontal isolant. Mais, cette fois, au lieu de disposer ces tiges sur une circonférence sensiblement centrée sur l'anode, nous les avons simplement alignées afin qu'elles forment un rectangle de 6 m de large et de 4 m de haut (fig. 30). A l'échelle de réduction 1/50", les dimensions de la maquette étaient donc : anode circulaire A- \varnothing = 2 cm, cathode rectangulaire C-12 cm × 8 cm, distance AC = 10 cm.

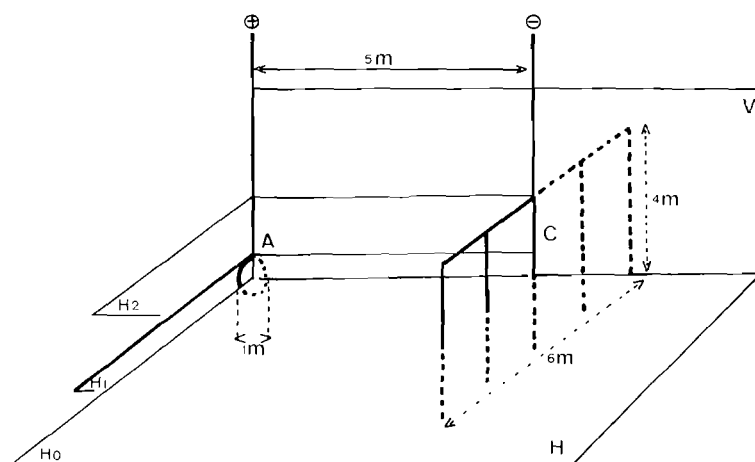


FIG. 30. — Le système d'électrodes étudié présente deux plans de symétrie H et V ; pour connaître la configuration des surfaces équipotentielles, il suffit donc d'en faire le relevé dans un quart de l'espace seulement.

Comme nous pouvons le voir sur la figure 30, ce système d'électrodes présente deux plans de symétrie, H et V. Pour connaître la répartition spatiale totale du potentiel, il suffit donc de la mesurer dans 1/4 de l'espace. Notre travail a consisté à relever les lignes équipotentielles dans une série de demi-plans horizontaux situés à différents niveaux, H₀, H₁, H₂, ... Nous avons ainsi obtenu une représentation spatiale du potentiel correcte mais dont l'exploitation est complexe car elle doit se faire à partir de « cartes » planes séparées. Il est difficile dans ce cas d'évaluer exactement le volume de la zone de pêche effective.

Or, les expériences préliminaires ont montré que la forme de la cathode et même ses dimensions, dans certaines limites, n'avaient aucune influence sensible sur la distribution spatiale du champ électrique, sauf peut-être au voisinage immédiat des bords de l'électrode. C'est pourquoi nous avons pensé à utiliser une cathode circulaire, de surface sensiblement égale à celle de l'électrode précédente. Elle a en effet l'avantage de constituer avec l'anode également circulaire un système qui présente non plus seulement deux plans de symétrie mais un véritable axe de symétrie de révolution.

b) *Anode et cathode circulaires.*

Ce système est représenté sur la figure 31 avec une cathode de 6 m de diamètre. Dans ce cas, un relevé unique du réseau des lignes équipotentielles dans le demi-plan P permet de connaître la représentation spatiale complète du champ électrique. Il suffit de faire tourner le demi-plan P autour de l'axe de révolution X'X. Nous verrons qu'en décomposant la zone de pêche relevée dans le demi-plan P en rectangles élémentaires, il est possible de calculer dans l'espace les volumes des cylindres correspondants. La somme de ces volumes représente le volume total de la zone de pêche en mètres cubes.

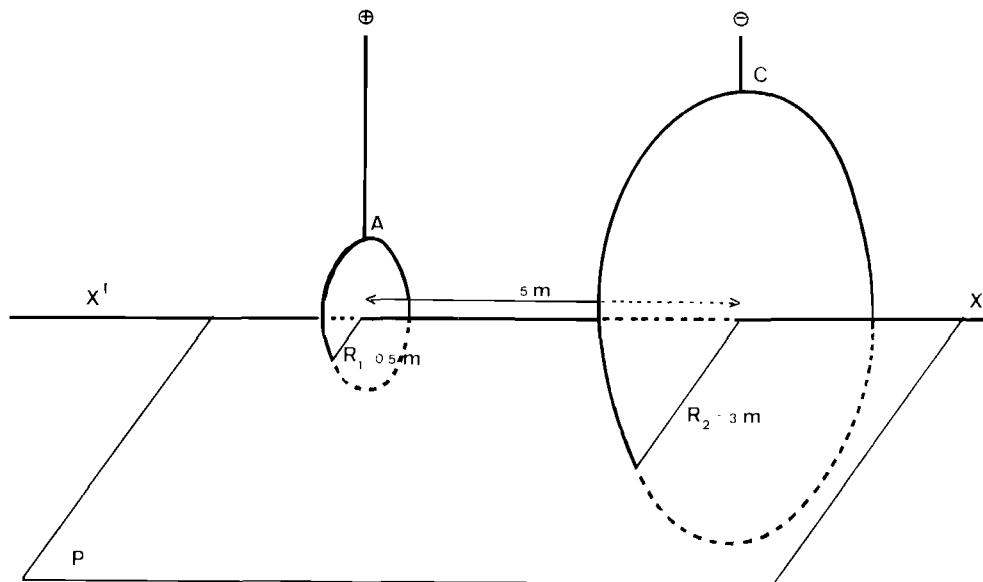


FIG. 31. — Avec une anode et une cathode circulaires, le système d'électrodes présente un axe de symétrie de révolution X'X; un simple relevé des lignes équipotentielles dans le demi-plan P permet donc de connaître la répartition spatiale complète du champ électrique.

À l'échelle 1/50^e, la maquette était constituée par une anode circulaire $\varnothing = 2$ cm et une cathode circulaire $\varnothing = 12$ cm, les deux électrodes étant séparées de 10 cm. Si des essais devaient être réalisés en mer en vraie grandeur, il n'y aurait aucun inconvénient à conserver l'ancienne cathode répartie rectangulaire. Les captures devraient être sensiblement les mêmes dans les deux cas. L'avantage essentiel d'une cathode circulaire est de permettre de raisonner plus simplement et de mener des calculs rigoureux. À la limite, une cathode circulaire pourrait très bien être réalisée en vraie grandeur, en utilisant un grillage métallique à grandes mailles afin qu'il n'offre pas une trop grande prise au courant marin.

4. Résultats.

a) *Evaluation du volume de la zone de pêche.*

La figure 33 montre les lignes équipotentielles relevées (à l'aide du montage (fig. 32)) dans le demi-plan P de la figure 31. Les lignes de courant, perpendiculaires aux équipotentielles, sont

représentées en pointillés. Pour calculer les gradients de potentiel, il faut, en principe, tracer la courbe qui traduit la tension en fonction de la distance à l'anode pour chaque ligne de courant. C'est ce qui a été fait par exemple sur la figure 35 pour la ligne de courant X'X. Le gradient de potentiel en un point est égal à la pente de la tangente à la courbe au point considéré. Mais, dans le cas présent, les lignes équipotentiellles sont assez rapprochées pour se contenter de mesurer directement au compas leur écartement. Nous obtenons ainsi le gradient moyen sur une ligne de courant donnée entre deux équipotentiellles. Les résultats, extrapolés en vraie grandeur à l'aide de la formule (b) pour une tension anodique de 350 V, sont indiqués sur la figure 34. Lorsqu'on se rapproche des électrodes, le potentiel croît très rapidement, si bien qu'un gradient moyen n'a plus aucune signification. C'est la raison pour laquelle les gradients de potentiel ne sont pas indiqués au très proche voisinage de l'anode et de la cathode.



FIG. 32. — Montage expérimental permettant, sur des maquettes, de relever les lignes équipotentiellles pour les différents systèmes d'électrodes étudiés.

Il était cependant nécessaire de déterminer la zone de tétanie. Nous avons estimé que des sardines de 12 cm atteindraient 100 V/m dans un champ électrique croissant. Pour placer exactement cette valeur du gradient de potentiel, nous avons représenté le profil en tension de la ligne de courant X'X (fig. 35). Nous voyons que la valeur 100 V/m est atteinte à 65 cm de l'anode sur X'X. Cela signifie que la limite de la zone de tétanie, où le gradient de potentiel est supérieur à 100 V/m, se situe au plus à 65 cm de l'anode. C'est en effet sur l'axe X'X que le point où cette valeur est atteinte se trouve le plus éloigné de l'anode.

A partir de la « carte », où sont indiqués les gradients de potentiel, il est facile de tracer la zone de pêche en reliant les points où le gradient de potentiel est égal à 15 V/m. C'est ce qui a été fait sur la figure 36, en trait noir pour la tension anodique 350 V. Les mêmes calculs ont été effectués, à titre indicatif, pour la tension 500 V, et la zone de pêche correspondante est indiquée en pointillés. Il faut noter que pour la tension 500 V, la zone de pêche devrait sans doute pouvoir être agrandie en écartant d'avantage les électrodes. Si cette tension, déjà élevée, devait être utilisée, il serait possible de refaire une étude plus poussée avec un écartement supérieur des électrodes.

Une fois la zone de pêche tracée, dans le demi-plan, il est possible de styliser son contour de façon à obtenir des rectangles élémentaires de surfaces équivalentes (fig. 36). Pour connaître le volume de la zone de pêche, il suffit alors de calculer les volumes des cylindres élémentaires correspondants et de les additionner. Pour la tension anodique 350 V nous avons obtenu :

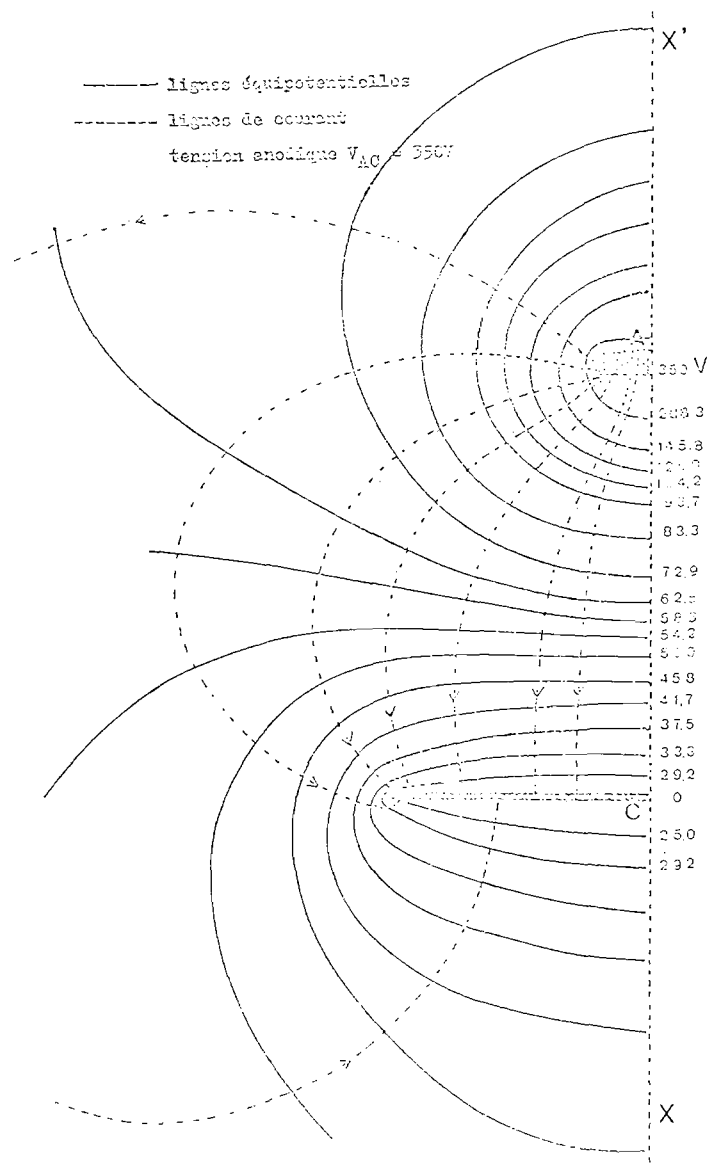


FIG. 33. — Configuration, en vraie grandeur, du champ électrique dans le demi-plan P de la figure 31.

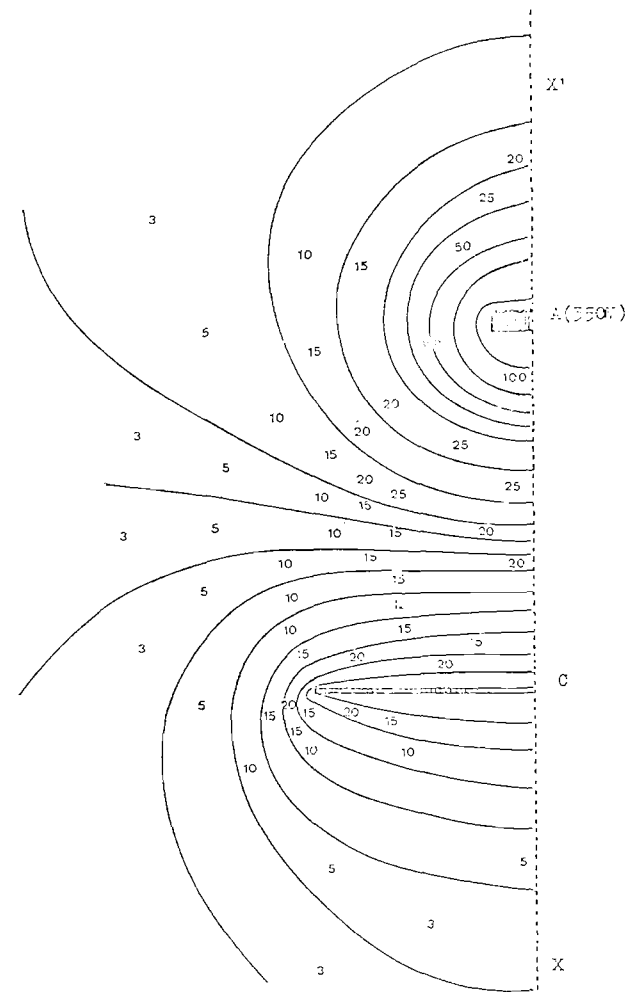


FIG. 34. — Valeurs en V/m du gradient de potentiel dans le demi-plan P de la figure 31 pour une tension anodique $V_{AC} = 350V$.

$$V = \sum_{i=1}^{i=6} \pi R_i^2 h_i;$$

$$V = \pi R_1^2 h_1 + \pi R_2^2 h_2 + \pi R_3^2 h_3 + \pi R_4^2 h_4 + \pi R_5^2 h_5 + \pi R_6^2 h_6;$$

$$V = 3,14 [(1,35)^2 \times 1 + (2,55)^2 \times 1,5 + (3,05)^2 \times 2 + (2,7)^2 \times 1 + (2,1)^2 \times 1,35 + (3,5)^2 \times 1,75];$$

$$V = 204 \text{ m}^3.$$

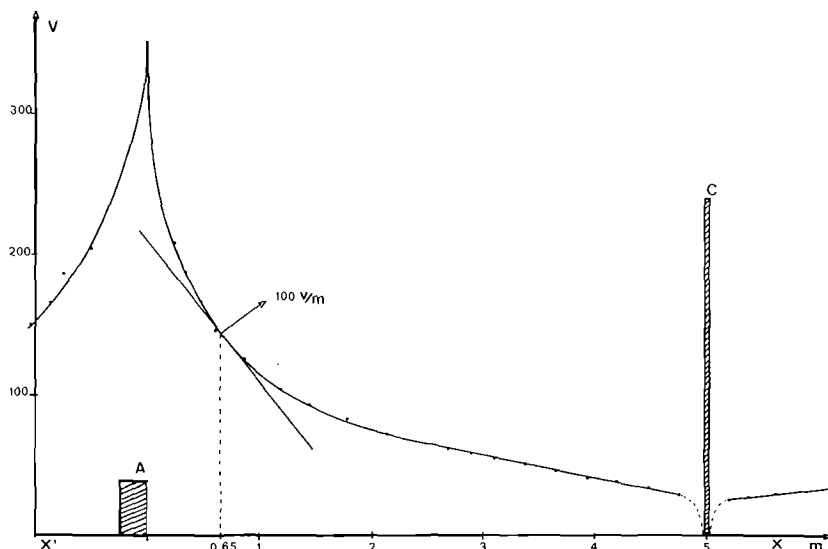


FIG. 35. — Variation du potentiel le long de la ligne de courant X'X pour une tension anodique de 350 V; le gradient de potentiel en un point est égal à la pente de la tangente à la courbe; la valeur 100 V/m est atteinte à 65 cm de l'anode.

Pour $V_{AC} = 150 \text{ V}$ (—) $W = 204 \text{ m}^3$
 Pour $V_{AC} = 500 \text{ V}$ (- - -) $W = 300 \text{ m}^3$

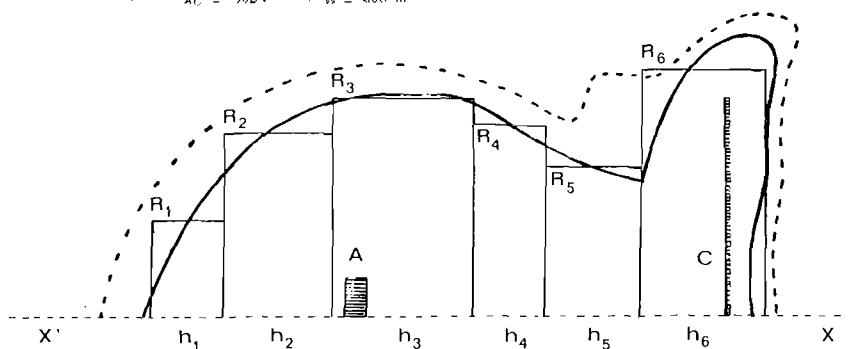


FIG. 36. — Délimitation, dans le demi-plan P de la figure 31, de la surface où le gradient de potentiel est supérieur ou égal à 15 V/m pour les deux tensions indiquées; le contour de ces limites a été stylisé de manière à définir des rectangles de surfaces équivalentes; la sommation des volumes des cylindres obtenus par révolution autour de X'X des rectangles élémentaires correspondants indique le volume total W de la zone où théoriquement les sardines subiront l'attraction du champ électrique.

Pour la tension anodique 500 V, un calcul identique a été effectué en décomposant le tracé de la zone de pêche (dans le demi-plan P) en 8 rectangles élémentaires :

$$V = \sum_{i=1}^{i=8} \pi R_i^2 h_i;$$

$$V = 3,14 [(1)^2 \times 0,75 + (2,25)^2 \times 1 + (3,15)^2 \times 1,5 + (3,5)^2 \times 2 + (3,15)^2 \times 1 + (2,7)^2 \times 0,5 + (3,25)^2 \times 1,25 + (3,95)^2 \times 1,5] : V = 300 \text{ m}^3.$$

b) *Puissance électrique consommée.*

Lorsqu'un circuit électrique de résistance R est soumis à une différence de potentiel V, il est traversé par un courant I. Nous avons vu que la loi d'Ohm s'écrit : $V = RI$. En courant continu, la puissance consommée est alors :

$$P = V \cdot I = \frac{V^2}{R}$$

Avec un courant impulsionnel, il faut tenir compte de la durée t et de la fréquence F des impulsions rectangulaires, c'est-à-dire du duty-cycle. Dans ce cas, la puissance consommée devient :

$$P = \frac{V^2}{R} \cdot F \cdot t$$

Nous connaissons la fréquence et la durée des impulsions ainsi que la tension anodique. Il reste donc à mesurer la résistance R' entre les électrodes sur la maquette en eau douce et à calculer grâce à la formule (a) la résistance R que présentera le système à l'échelle 1 en eau de mer. Comme les effets de polarisation dans le milieu liquide empêchent de mesurer directement R' à l'ohmètre, nous avons eu recours à une résistance supplémentaire r connue. Cette résistance r a été mise en série avec R' et les différences de potentiel respectives à leurs bornes, v et V', ont été mesurées sur l'écran de l'oscilloscope. Étant donné que ces deux résistances sont traversées par le même courant I, nous pouvons écrire :

$$I = \frac{v}{r} = \frac{V'}{R'} \text{ d'où } R' = r \cdot \frac{V'}{v}$$

Nous avons ainsi trouvé $R' = 603,65 \Omega$.

La résistivité de l'eau douce du bac, mesurée à l'aide d'un conductimètre, était $e' = 2124 \Omega \cdot \text{cm}$. Celle de l'eau de mer, pour une salinité de 35 ‰ et pour une température de 20°, est $e = 20,89 \Omega \cdot \text{cm}$.

Appliquons la formule (a) pour connaître la résistance R entre les électrodes du système à l'échelle 1 en eau de mer :

$$R = R' \cdot \frac{e}{e'} \cdot \frac{1}{k} = 603,65 \cdot \frac{20,89}{2124} \cdot \frac{1}{50}$$

$$R = 0,119 \approx 0,12 \Omega.$$

Il est maintenant possible de calculer la puissance consommée entre les électrodes, suivant les stimuli utilisés et les tensions appliquées. Ces puissances sont indiquées en kilowatts dans le tableau 11.

Connaissant, pour 350 V et 500 V, le volume de la zone de pêche obtenu avec le système d'électrodes considéré et la puissance consommée, il est possible d'évaluer la puissance consommée par unité de volume de la zone de pêche. Par exemple, pour le stimulus 100 Hz - 1 ms et pour la tension anodique 350 V, nous trouvons :

$$\frac{102,0}{204} = 0,50 \text{ kw/m}^3$$

Pour le même stimulus, et pour la tension 500 V, nous obtenons :

$$\frac{208,4}{300} = 0,69 \text{ kw/m}^3$$

Cette valeur apparaît moins intéressante que la précédente. Bien que nous ayons vu qu'avec 500 V, il est sans doute possible d'améliorer la zone de pêche en écartant davantage les élec-

trodes, il ne semble pas intéressant d'utiliser une tension supérieure à 350 V, avec le système d'électrodes que nous avons défini. La puissance consommée augmente en effet avec le carré de la tension. Par ailleurs, la zone de tétanie est d'autant plus importante que la tension est plus élevée.

Tension V	350 V	400 V	450 V	500 V
Stimulus				
50 Hz - 1 ms ou 100 Hz - 0,5 ms	51 kw	66,7	84,4	104,2
100 Hz - 1 ms	102	133,4	168,8	208,4

TABL. 11. — Puissance électrique consommée entre les électrodes en fonction de la tension pour différents stimuli.

4° Générateur électrique et pompe aspirante.

1. Alternateur impulsionnel.

Nous avons établi que dans une eau de salinité égale à 35 ‰ et pour une température de 20°, la résistance entre les électrodes mesure 0,12 Ohm. Cette valeur est très faible et avec une tension de 350 V, l'intensité des impulsions atteint 2 917 A d'après la loi d'Ohm. Pour une impulsion, la puissance de pointe avoisine donc le mégawatt et ne peut pas être produite directement de manière simple. L'énergie doit être préalablement accumulée dans un « réservoir » qui, chargé de manière continue, ne délivre son énergie que durant un temps très court. Nous nous trouvons confrontés à un problème d'électrotechnique relatif à l'accumulation des fortes énergies et à la commutation d'intensités élevées.

Après avoir étudié plusieurs systèmes qui utilisaient soit des batteries d'accumulateurs, soit des associations de condensateurs, nous avons finalement retenu la solution de l'alternateur impulsionnel. Cet appareil, de conception récente, fait l'objet d'un brevet appartenant à la Compagnie générale d'Electricité (C.G.E.).

Ce procédé consiste à emmagasiner une énergie cinétique très importante dans le rotor à forte inertie d'un alternateur entraîné à grande vitesse. Une partie de cette énergie, prélevée sous forme électrique pendant un temps très court, permet d'obtenir, après redressement, des impulsions de grande puissance. Les réglages en tension, fréquence et durée d'impulsion, se font, de façon continue, à partir d'un tableau de commande électronique indépendant de l'alternateur, ce qui lui donne une grande souplesse d'emploi. Cet appareil, initialement conçu pour déclencher des rayons Laser, a dû être réétudié selon nos instructions par les ingénieurs de la C.G.E., pour que ses caractéristiques coïncident avec celles requises par la pêche électrique. Nous avons déjà indiqué que cette génératrice d'impulsions doit être entraînée grâce à l'énergie motrice du navire. La réalisation pratique de ce procédé a été étudiée par les A.C.B. et il n'est pas nécessaire d'entrer plus avant dans les détails au niveau de cette publication.

2. Pompe.

L'étude du pompage a été également réalisée par les A.C.B. Elle comprend le calcul du champ hydrodynamique, pour différentes formes d'anodes et la définition du groupe de pompage. Nous avons prévu d'utiliser, dans un premier temps, un disque métallique comme anode. Mais, la mise en forme de ce disque peut améliorer l'efficacité de l'aspiration. Dans le cas d'une élec-

trode parabolique, les calculs ont montré que le champ des vitesses du fluide s'accroît en même temps que la courbure de l'anode.

L'attraction théorique d'un poisson dépend de sa vitesse initiale au moment de la tétanie, de son poids apparent dans l'eau et de la prise qu'il offre au fluide. Or, ces éléments sont assez mal connus et un rayon d'attraction n'a finalement pas été défini mathématiquement. Cette étude a été reportée au moment des essais en vraie grandeur. L'arrivée massive de poissons devant l'embouchure modifie d'ailleurs le problème. Les derniers arrivés risquent de pousser les poissons déjà tétanisés et donc de favoriser leur pénétration dans la zone de suction. Comme les poissons tétanisés tendent à couler, il sera sans doute préférable de placer l'embouchure de la pompe dans la partie inférieure de l'électrode plutôt qu'à son centre. Si, toutefois, les sardines étaient tétanisées à une trop grande distance de l'anode, il serait possible de dissocier l'électrode de l'embouchure de la pompe qui serait alors placée plus en avant. Il est également possible d'augmenter considérablement la vitesse du fluide en réinjectant une partie de l'eau aspirée en avant de la buse d'aspiration.

La pompe finalement retenue est basée sur le principe "Torque Flow" et fonctionne suivant le principe du tourbillon creux ou Vortex. L'agent moteur est l'air comprimé. Il n'y a donc pas d'ailettes susceptibles d'endommager les poissons. Le modèle choisi est capable de débiter 400 m³/heure avec une puissance absorbée de 20 chevaux. Mais la pompe sera entraînée par un moteur de 40 chevaux, avec une transmission par courroies trapézoïdales. Ce système permettrait d'augmenter le débit, s'il s'avérait trop faible, en changeant le rapport des poulies. Il faut également prévoir un groupe auto-amorçant de 70 m³/heure pour l'amorçage de la pompe. Le tuyau d'aspiration devra être souple et présenter un diamètre d'environ 20 cm.

5° Perspectives d'application.

En principe, la technique de pêche que l'on vient d'étudier est applicable à toutes les espèces pélagiques photophiles vivant en bancs près de la surface. Mais, certains paramètres devront être adaptés à chaque espèce et à la taille des poissons. Comme nous avons mené nos études dans la perspective de capturer *Sardina pilchardus*, nous allons évaluer les quantités de sardines qu'il est théoriquement possible de pêcher avec ce système. Nous discuterons ensuite de sa rentabilité par rapport aux engins classiques utilisés actuellement.

1. Possibilités de captures.

Connaissant le volume de la zone de pêche, il est possible de calculer en poids la quantité de poisson qui pourrait être capturée au cours d'une opération de pêche au coup par coup. Dans ce cas, les électrodes ne seraient mises sous tension que lorsque les poissons auraient été regroupés dans la zone de pêche par les effets attractifs du stimulus lumineux. Une fois les poissons aspirés à bord, le courant serait coupé le temps que d'autres sardines soient attirées par le lamparo. Le navire pourrait être dirigé sur d'autres bancs si cela s'avérait nécessaire. Le résultat de la pêche dépendrait bien entendu de la densité de la concentration des poissons et de leur « moule ».

Il n'est pas facile de prévoir la densité des poissons attirés dans la zone de pêche. Celle-ci varie considérablement dans le milieu naturel selon l'époque et au cours d'une journée. L'étude, par méthode acoustique, de ELMINOWICZ (1975), des bancs de sardines sur les côtes nord-ouest de l'Afrique, montre que la densité des sardines peut varier de quelques individus à 55 poissons par mètre cube. D'après les observations visuelles faites à l'I.S.T.P.M., au cours des séances de pêche au lamparo, il semble bien que la densité des sardines attirées dans la zone de pêche soit généralement supérieure. Cette différence est bien entendu due aux effets attractifs du stimulus photique.

Par ailleurs, JOHANNESSON et LOSSE (1973) ont étudié sur les côtes sud de la mer Noire, également par méthode acoustique, la densité des concentrations d'anchois et de chinchards dans leur milieu naturel. La densité maximale rencontrée a été estimée à 657 poissons par m³ et les densités comprises entre 300 et 500 poissons par m³ étaient assez fréquemment représentées.

Nous avons également constaté au cours des séances de pêche au lamparo que la répartition des poissons n'était pas uniforme dans toute la zone de pêche et qu'elle fluctuait dans le temps.

La quantité des poissons capturés au cours d'une opération de pêche devrait donc varier considérablement suivant les cas et en fonction de l'importance des bancs de sardines présents. C'est pourquoi nous avons calculé les captures qui pourraient être réalisées pour une gamme assez étendue de densités moyennes de poissons : 30, 50, 75, 100, 150, 200 et 300 sardines par mètre cube. Ces calculs ont également été effectués pour différents moules des poissons : 20, 30, 40, 50 sardines par kilogramme. Les résultats obtenus sont indiqués en kilogrammes dans le tableau 12, pour une tension anodique de 350 V, et dans le tableau 13, pour une tension anodique de 500 V. Dans ce dernier cas, les captures devraient pouvoir être améliorées en écartant davantage les électrodes comme nous l'avons déjà signalé.

Etant donné que la zone de pêche s'étend jusqu'à 2,50 m derrière l'anode (fig. 36), le système d'électrodes sera plus performant en plaçant l'anode à environ 5 m derrière les lampes plutôt qu'à 2 m, comme nous l'avions prévu. Par ailleurs, si le phénomène observé sur les taxis anodiques des sardines dans une tranche d'eau verticale se confirmait en pleine mer, il faudrait étudier un système d'électrodes à axe vertical. Dans ce cas, 10 V/m devrait suffire dans la zone de pêche. D'après nos résultats de 1971, avec une tension de 350 V, les électrodes pourraient alors être écartées d'environ 8 m, ce qui augmenterait considérablement la zone de pêche.

Densités individus/m ³	30	50	75	100	150	200	300
« Moules »							
20 individus/kg	306 (kg)	510	765	1 020	1 530	2 040	3 060
30	204	340	510	680	1 020	1 360	2 040
40	153	255	282,5	510	765	1 020	1 530
50	(122,4)	(204)	(306)	(408)	(612)	(816)	(1 224)

TABL. 12. — Captures possibles, pour une tension anodique de 350 V, en fonction du « moule » des sardines et de la densité des bancs.

Densités individus/m ³	30	50	75	100	150	200	300
« Moules »							
20	450	750	1 125	1 500	2 250	3 000	4 500
30	300	500	750	1 000	1 500	2 000	3 000
40	225	375	562,5	750	1 125	1 500	2 250
50	(180)	(300)	(450)	(600)	(900)	(1 200)	(1 800)

TABL. 13. — Captures possibles, pour une tension anodique de 500 V, en fonction du « moule » des sardines et de la densité des bancs.

Notons que les captures indiquées pour les sardines de petite taille sont largement surestimées. L'attraction due au champ électrique est en effet sélective et la zone de pêche sera d'autant plus réduite que les poissons seront plus petits. C'est pourquoi les résultats indiqués dans les tableaux 12 et 13, pour le « moule » 50/kg, sont placés entre parenthèses. La zone de pêche qui correspond à des gradients de potentiel égaux ou supérieurs à 15 V/m a été calculée pour des sardines dont le « moule » avoisine 30/kg. Nous voyons que, dans de bonnes conditions, une opération de pêche devrait rapporter quelques centaines ou même quelques milliers de kilogrammes de

sardines. Au cours d'une nuit complète, la multiplication des séances de pêche devrait donc permettre des captures relativement importantes.

On peut également envisager de pratiquer la pêche en continu. Dans ce cas, les électrodes resteront en permanence sous tension et cela suppose que les poissons pénétreront continûment dans la zone de pêche. Il est difficile de prévoir les captures ainsi réalisables. Elles dépendront essentiellement de la quantité des poissons présents et de leur comportement en banc vis-à-vis du champ électrique. Si les sardines ne pénétraient pas en nombre suffisant dans la zone de pêche, il faudrait se contenter de pêcher au coup par coup. La pêche en continu ne devrait être praticable qu'en présence de concentrations de sardines importantes.

2. Résultats d'essais réels réalisés par les Soviétiques.

Les captures théoriques que nous avons calculées concordent assez bien avec les résultats rapportés par des chercheurs soviétiques, lors d'essais en vraie grandeur à la mer (MAL'KYAVICHUS *et al.*, 1968). Ces pêches expérimentales ne portent pas sur *Sardina pilchardus*, mais sur des sardinelles dont l'espèce n'est pas précisée. En 1966, 89 t de sardinelles auraient été pêchées en 50 nuits, la capture la plus importante s'élevant à 21 t en une nuit et le taux de capture maximum atteignant 1 060 kg/mn.

Ces captures ont généralement été réalisées au coup par coup, mais parfois les poissons réagissaient plus intensément à l'attraction de la lumière et des pêches en continu étaient alors possibles. Les caractéristiques des stimuli utilisés au cours de ces essais ne sont malheureusement pas précisées. D'après la disposition des électrodes, la configuration du champ électrique doit être sensiblement sphérique autour de l'anode. MAL'KYAVICHUS précise d'ailleurs effectivement que la zone de pêche correspond à une sphère dont le rayon varie de 3 à 6 mètres selon la taille des sardinelles.

Il signale également des difficultés au niveau de l'aspiration des poissons qui se trouvaient tétanisés à une trop grande distance de l'embouchure de la pompe. Il a remédié à ce problème en utilisant une électrode intermédiaire, réalisée en grillage à grandes mailles. Elle constitue une sphère, d'environ un mètre de diamètre, qui entoure l'anode située à l'embouchure de la pompe. Les poissons, attirés par un courant impulsionnel jusqu'à l'électrode intermédiaire, sont ensuite concentrés vers l'anode par un courant continu. Le seuil de narcose en courant continu est en effet plus élevé que le seuil de tétanie en courant impulsionnel, si bien que les poissons peuvent s'approcher plus près de l'anode. KREUTZER a également signalé cette possibilité (1971, communication personnelle).

En 1967, toujours d'après MAL'KYAVICHUS, 148 t de sardinelles auraient été pêchées en 45 nuits, la capture la plus importante atteignant 45 t en une nuit et le taux de capture maximum s'élevant à 2 tonnes/minute. Une nouvelle série de pêches expérimentales, avec la coque du navire servant cette fois de cathode, auraient rapporté 126,5 t en 42 nuits, le courant électrique ayant été établi 608 fois. La capture moyenne des sardinelles, au cours d'une opération de pêche, atteignait donc 200 kg.

3. Discussion de la rentabilité.

a) Bilan de la dépense énergétique.

Les puissances dissipées entre les électrodes, indiquées dans le tableau 11, ont été calculées en donnant à la durée d'impulsion, à la fréquence et à la tension des valeurs respectivement comprises entre 0,5 et 1 ms - 50 et 100 Hz - 350 et 500 V. Comme la puissance consommée croît avec le carré de la tension, nous avons vu que le système d'électrodes retenu est plus rentable, en kw/m³, à 350 V qu'à 500 V. Nous avons donc décidé de faire un bilan de la dépense énergétique avec une tension anodique de 350 V pour les valeurs moyennes respectives de la fréquence et de la durée d'impulsion 75 Hz et 0,75 ms. La puissance dissipée entre les électrodes atteint dans ce cas 57 kw.

Le moteur du navire doit entraîner un alternateur de puissance qui alimente le bord en courant. Au moment de la pêche, un moteur électrique est prévu pour l'entraînement du générateur impulsionnel proprement dit, à un régime correct. D'après les normes des ingénieurs, le rendement

du générateur impulsif et celui de l'entraînement par le moteur électrique sont respectivement voisins de 60 % et de 85 %. Pour disposer de 57 kw entre les électrodes, il faut donc prélever 112 kw à l'alternateur de puissance.

Les autres dépenses énergétiques directement liées à la pêche électrique sont :

pompe à poissons	34 kw
lamparo - 4 lampes de 500 w	2 kw
ventilation accrue du compartiment moteur	6 kw
ventilation électronique	2 kw
	44 kw

Le bilan total s'élève donc à $112 + 44 = 156$ kw. L'alternateur absorbera ainsi 212 chevaux vapeur (ch) prélevés sur la puissance motrice du navire. Cette dépense énergétique correspond sensiblement à la puissance motrice d'un bateau senneur artisanal. Elle est nettement inférieure à celle d'un navire artisanal armé au chalut pélagique qui dispose, au minimum, d'un moteur de 400 ch.

Si le système de pêche étudié fonctionne au coup par coup, comme c'est probable dans la majorité des cas, le générateur impulsif ne sera entraîné que le temps d'obliger les poissons présents dans la zone de pêche à nager jusqu'à l'anode. Une opération de pêche devrait durer quelques minutes, au plus. Seul le lamparo, de 2 kw, sera sous tension pratiquement en permanence. Cette technique de pêche, en cas de succès, devrait donc être économique, du moins au niveau de l'exploitation, par rapport aux autres engins.

b) Comparaison avec la senne et le chalut.

Il est difficile de discuter de la rentabilité du système de pêche étudié par rapport à la senne tournante ou au chalut pélagique. Quelle que soit la technique utilisée, le résultat d'une opération de pêche dépend de nombreux paramètres, tels que l'importance de la concentration des poissons, les conditions hydrologiques, l'état de la mer, le type du navire et l'efficacité de l'équipage. Seuls des essais en vraie grandeur sur un secteur de pêche, où travailleraient également des senneurs et des bateaux armés au chalut pélagique, permettraient donc des comparaisons valables. En considérant des captures suffisamment nombreuses et échelonnées dans le temps, il serait alors possible d'établir statistiquement le coût d'un kilogramme de poisson pêché par chaque technique. Il faudrait prendre en compte la quantité de poisson débarquée, le prix de revient du navire et de son entretien, la dépense en carburant et le nombre d'hommes embarqués. Ce n'est pas possible, dans l'état actuel des choses. On peut seulement passer en revue les avantages et les inconvénients de chaque technique.

Senne tournante.

Lorsque KURC a débuté ses travaux sur la pêche électrique à l'I.S.T.P.M., un bateau senneur qui appâtait à la roque de morue, avec deux canots, embarquait 14 hommes. A cette époque, le chalut pélagique n'était pas encore utilisé pour les Clupéidés. Un système de capture par lumière, champ électrique et pompe, susceptible d'être hautement automatisé, avait donc toutes les chances d'être rentable. Mais les senneurs ont abandonné l'appât pour encercler à la volée des concentrations de poissons détectées à l'écho-sondeur. Un équipage de 10 hommes a alors suffi. Comme la poulie motrice « power block » est d'une grande utilité pour relever la senne et l'amener à bord, certains bateaux travaillent actuellement avec 7 ou 8 hommes seulement. Au moment de la mise en œuvre des engins, un senneur développe une puissance motrice inférieure à celle d'un bateau armé au chalut pélagique. Mais son efficacité est moins bonne car les concentrations de poissons trop profondes ne peuvent pas être pêchées avec une senne, alors qu'un chalut pélagique est capable de le faire. Par ailleurs, la sélectivité d'une senne tournante peut être considérée comme nulle. Les maillages utilisés sont trop faibles pour permettre aux petits poissons de s'échapper.

Chalut pélagique.

Un navire artisanal, armé au chalut pélagique, compte à son bord 5 à 7 hommes. Ce type de pêche a pris un essor très important au cours des dernières années. L'utilisation de grandes

mailles dans les ailes du chalut, qui offrent donc peu de résistance au filtrage de l'eau, permet de traîner des engins de dimensions considérables et donc très performants. Les poissons n'essaient pas de traverser ces grandes mailles qui, du fait de leur déplacement, équivalent, sur le plan visuel, à un véritable obstacle comparable à un mur. Ils se retrouvent donc piégés dans la poche du chalut constitué de petites mailles. Bien que la traction motrice soit relativement élevée, elle demeure raisonnable, compte tenu des résultats. Mais, la sélectivité des petites mailles terminales n'est pas bonne et les individus les plus petits se trouvent fréquemment maillés dans la poche du chalut. Par ailleurs, tous les poissons présents sur le passage du chalut risquent d'être capturés, quelle que soit leur espèce.

Lumière artificielle, champ électrique et pompe.

L'aménagement du « compartiment machine » d'un navire destiné à pratiquer la pêche électrique est certainement plus onéreux que l'achat d'un chalut pélagique. Il est d'ailleurs honnêtement impossible de chiffrer le coût actuel d'une installation qui serait réalisée en plusieurs exemplaires et probablement en version simplifiée par rapport au prototype prévu pour l'expérimentation. Par contre, la durée de vie d'une machine électrique tournante est considérablement plus longue que celle d'un chalut. Il suffit de changer en temps voulu les pièces dont l'usure est inévitable. Rappelons, de plus, que le temps d'utilisation de cette machine serait en fait très faible. Ces considérations sont également valables pour la pompe aspirante.

Nous avons vu que la dépense énergétique du système étudié est nettement inférieure à celle d'un navire artisanal armé au chalut pélagique, au moment de l'opération de pêche proprement dite. L'automatisation possible des captures est également à prendre en compte. Il est en effet concevable de commander la mise sous tension des électrodes et le démarrage de la pompe par l'information d'un échosondeur qui déclencherait un signal lorsque la concentration des poissons entre les électrodes atteindrait une densité suffisante pour justifier une opération de pêche.

Mais l'intérêt de l'I.S.T.P.M. pour la pêche électrique a été suscité, avant tout, par la sélectivité en taille des captures que cette technique devrait normalement permettre. En effet, seules les espèces photophiles sont attirées par le lampro. De plus, ce sont les formes adultes qui se regroupent dans la zone de photopréférence. Les juvéniles se rapprochent plus près des lampes mais ne forment pas de concentration stable étant donné leur comportement agité. Il est donc possible de capturer des poissons très jeunes, comme SMITH (1955) qui a pêché des harengs de 7,5 cm, mais seulement en faible quantité.

Nous avons également mis en évidence la sélectivité de l'attraction des poissons par taxie anodique. Le volume de la zone de pêche augmente avec la taille des poissons. Mais, il faut se méfier des réactions de groupes. Les individus les plus jeunes pourraient suivre les formes adultes. D'après les résultats de MAL'KYAVICHUS (1968), il ne semble pas que ce soit le cas. Il précise en effet que la zone de pêche correspond à une sphère dont le rayon varie de 3 à 6 m selon la taille des sardinelles. Dans ce cas le volume de pêche varie dans le rapport 8 et augmente de 113 à 904 m³. Ce volume semble considérable, mais nous avons vu que d'après la forme de la concentration des poissons autour du lampro, il est peu probable qu'il soit entièrement utilisé. La distance, 6 m, correspond en fait sensiblement à l'écartement des électrodes du système que nous avons défini.

6° Nuisances spécifiques du système étudié.

Le passage du courant électrique dans le milieu marin est en effet susceptible d'entraîner certaines nuisances. Il apparaît donc important de les apprécier.

1. Post-effets du courant électrique sur les animaux marins.

La pêche électrique est pratiquée depuis une cinquantaine d'années, en eau douce. Pendant tout ce temps, les post-effets du courant électrique sur les animaux aquatiques ont fait l'objet de débats animés. Selon certains, le courant électrique utilisé pour la pêche ne présente aucun

danger. A l'inverse, l'opinion publique est généralement sensibilisée contre ce procédé de capture et craint qu'il ne conduise à de véritables ravages. Aucune de ces deux opinions extrêmes ne traduit la réalité. Nous avons vu que le système de pêche étudié est en principe plus sélectif que le chalut pélagique ou de fond. Il devrait donc logiquement contribuer à une meilleure gestion des stocks. Par ailleurs, il est vrai que dans certains cas, l'exposition prolongée d'animaux aquatiques à des champs trop intenses présente un danger pour ceux-ci.

La sensibilité des poissons au courant électrique varie considérablement suivant les espèces. Nous avons vu (chap. II) que les sardines de 12 cm soumises au stimulus 200 Hz - 1 ms - 200 V/m avaient pour la plupart succombé. En revanche, nous avons exposé volontairement des mullets de 18 cm au stimulus, 50 Hz - 2 ms - 200 V/m, pendant 10, 20, 30, 40 secondes, 1, 3, 5 minutes et la totalité de ces poissons a survécu. Ils subissaient pourtant un gradient de potentiel sensiblement égal à 8 fois la valeur de leur seuil de tétanie. Mais, avant que les mullets ne retrouvent un comportement normal, il s'est écoulé un laps de temps qui était en rapport direct avec la durée d'application du stimulus électrique. Par exemple, pour 1, 3 et 5 minutes, les temps de récupération respectifs ont été de 4, 15 et 35 minutes. Tous ces poissons ont, par la suite, présenté et conservé un comportement normal.

On peut cependant se demander si ces animaux ne présenteront pas de séquelles à long terme, car nous n'avons pu observer leur comportement que pendant une vingtaine de jours après les expériences. Nous n'avons pas non plus étudié la reproduction et le développement des poissons et des invertébrés qui ont subi les effets d'un courant électrique. Mais ce travail a été abordé par d'autres chercheurs. Il consiste généralement à suivre l'évolution d'un lot d'animaux marins qui ont subi des effets électriques bien définis par rapport à un lot-témoin qui n'a subi aucune expérimentation. Les chercheurs soviétiques ont réalisé un travail considérable dans ce domaine (NIKONOROV, 1972 ; DANILYTE *et al.*, 1977). Nous indiquons des résultats et certaines conclusions publiés par DANILYTE et ses collègues qui éclairent assez bien le sujet. C'est pourquoi il nous paraît utile de citer largement ces auteurs :

« A l'issue de ces expériences, nous pouvons conclure que la mortalité des animaux aquatiques soumis à l'action d'un champ électrique est déterminée par l'espèce de l'animal, par la nature du courant utilisé et ses paramètres ainsi que par la durée d'exposition au courant.

Par exemple, les plies, *Platessa platessa*, restaient vivantes à 100 % après avoir subi le stimulus 50 Hz - 1,6 ms - 600 V/m pendant une minute.

D'autres espèces sont plus sensibles. La morue, *Gadus morhua callarias*, le hareng, *Clupea harengus membras*, l'éperlan, *Osmerus eperlanus eperlanus*, supportaient 500 à 600 V/m en courant impulsionnel, mais seulement pendant 5 à 10 secondes. Pour une exposition de 30 à 60 secondes, la mortalité augmentait :

hareng, 5 % de décès pour 160 à 340 V/m, 50 % pour 410 à 750 V/m ;
morue, 5 % de décès pour 50 V/m, 50 % pour 220 à 300 V/m.

C'est le courant alternatif qui est le plus dangereux pour les poissons. Même la plie le supportait mal, le seuil de mortalité de 5 % étant constaté lorsque le gradient de potentiel atteignait 120 à 250 V/m et celui de 50 % pour 380 à 670 V/m »...

« Les seuils de la mortalité des invertébrés étaient plus élevés que ceux des poissons. Chez les espèces d'eau douce, le seuil de mortalité de 5 % était constaté après 30 secondes d'exposition au courant interrompu entre 1 000 V/m (*Daphnia magna*, *Mesomysis kowalewskyi*) et 5 000 V/m (*Dreissena polymorpha*). Pour les espèces d'eau de mer (*Artemia salina*, *Nereis diversicolor*, *Crangon crangon*), ce seuil était atteint pour des gradients variant de 300 à 1 300 V/m »...

« L'excitation électrique périodique des reproducteurs de poissons, ainsi que l'excitation des œufs pendant leur insémination n'ont fait apparaître aucune influence sur le développement des larves et des alevins. Le seul effet nocif de l'action électrique était l'augmentation de la mortalité d'embryons, à condition que l'excitation ait été pratiquée dans les périodes critiques de l'embryogénie. Il paraît tout de même que la mortalité des embryons soumis à l'action électrique dépend de la dimension des œufs, et peut-être, de la durée du développement embryonnaire. Par exemple, chez la truite (gros œufs à longue période d'incubation), la mortalité a augmenté lorsque le gradient de potentiel a dépassé 150 V/m. Alors qu'après des excitations analogues, la mortalité

des embryons de carpes (petits œufs à courte période d'incubation) n'a pas changé. L'excitation électrique pendant l'incubation provoquait l'explosion plus rapide des œufs embryonnés, mais cela n'a pas nui au développement des larves et des alevins »...

« Après l'excitation électrique quelques indices physiologiques restaient stables (Na, K, Ca), d'autres (indices hématologiques, albumens sanguins, médiateur nerveux, acétylcholine) subissaient des changements modérés »...

« A l'issue de ce travail, nous avons obtenu un certain nombre de données nous permettant de faire l'analyse des engins de pêche utilisant l'électricité du point de vue de leurs post-effets... 100 V/m est la valeur limite qui, selon les résultats de nos expériences, ne présenterait pas de danger même si l'exposition du poisson au courant électrique durait 30 à 60 secondes. Nous n'avons examiné que quelques engins de pêche à l'électricité, qui nous intéressaient le plus, mais il est nécessaire que chaque appareil destiné à l'utilisation pratique soit apprécié du point de vue des post-effets sur les animaux aquatiques ».

Ces extraits de l'ouvrage de DANILYTE et de ses collègues permettent les considérations suivantes.

Nous avons vu, qu'avec le système de pêche étudié, le gradient de potentiel atteint 100 V/m à 65 cm de l'anode. Nous estimons que les individus qui auront subi ce gradient de potentiel seront effectivement aspirés par la pompe, faute de quoi le système ne pourrait pas être considéré au point. Les post-effets du champ électrique, qui devraient atteindre plusieurs centaines de volts par mètre dans l'embouchure de la pompe, ne seraient donc plus à craindre pour ces poissons dont la capture serait assurée. Au contraire, d'après MEYER-WAARDEN (1957), il serait souhaitable que les sardines soient tuées par électrocution. Ainsi, elles ne se débattraient pas au moment de l'agonie, ce qui éviterait une accumulation d'acide lactique défavorable à la qualité de la chair des poissons. De plus, elles conserveraient leurs écailles et auraient de ce fait un meilleur aspect au moment de la vente. Les individus, qui auraient subi une vingtaine de volts par mètre dans la zone de pêche et qui auraient réussi à fuir, ne devraient présenter aucun dommage.

Le seul risque réel concerne le plancton qui, aspiré avec l'eau, viendrait au contact de l'anode. Mais, il n'est pas certain que le gradient de potentiel soit suffisamment élevé, ni surtout que le temps d'exposition au champ électrique soit suffisamment prolongé pour causer de sérieux dommages à des micro-organismes. Notons que le chalut n'est pas non plus complètement inoffensif. Il retient une partie du plancton de l'eau filtrée, soit mélangé aux poissons dans la poche, soit accroché aux fibres des nappes de filet. Cette remarque est également valable pour la senne.

2. Electrolyse de l'eau de mer et corrosion.

Le gradient de potentiel provoque la taxie des poissons mais aussi l'électrolyse de l'eau de mer qui porte essentiellement sur le chlorure de sodium, NaCl, dissout. Le métal Na apparaît à la cathode autour de laquelle il donne naissance à de la soude, NaOH, avec dégagement d'hydrogène. Nous avons effectivement observé un dépôt blanchâtre de soude sur les cathodes et l'hydrogène venant se dégager en surface. A la cathode, il n'y a donc pas de corrosion électrolytique. Par contre, le chlore qui se forme à l'anode provoque, au moins partiellement, la production d'hypochlorite de sodium, ClONa. Le chlore oxyde également les bromures présents dans l'eau de mer et donne naissance à l'acide hypobromeux. Mais, la quantité de chlore produite n'a rien d'alarmant. Si l'on considère qu'une opération de pêche dure deux minutes, le temps de conduire par taxie anodique les poissons jusqu'à l'anode, avec une tension de 350 V et un stimulus de 75 Hz - 0,75 ms, la loi de Faraday nous indique le poids de chlore libéré : 7,24 g.

Une anode en métal ordinaire est cependant rongée et donne naissance à des chlorures. Nous avons effectué des mesures de corrosion anodique avec onze métaux différents (DINER et LE MEN, 1971). La corrosion s'est révélée importante pour tous les métaux étudiés. Il est possible que des alliages au plomb prétraités donnent de bons résultats et cette voie de recherche mériterait d'être poursuivie. Les anodes composées de ces alliages se recouvrent tout d'abord de produits de corrosion, notamment de peroxyde de plomb qui possède une bonne conductibilité électro-

nique, mais qui forme ensuite une pellicule protectrice arrêtant la corrosion. D'autres matières, comme le graphite ou le platine, ne subissent aucune attaque. Mais, la résistivité relativement forte du graphite et ses faibles qualités mécaniques ou le prix élevé du platine écartent leur utilisation.

Dans un premier stade, une anode en métal bon marché, consommable et qui serait renouvelée à peu de frais chaque fois qu'il serait nécessaire, est la solution que nous avons retenue. La cathode doit être réalisée en acier inoxydable afin d'éviter une trop forte attaque par l'eau de mer.

Nous avons également étudié les risques de corrosion électrolytique de la coque du navire ou de l'hélice si la coque est en bois. Compte tenu de la disposition des électrodes à l'arrière du bateau et le dos de l'anode étant isolé, la coque se trouve dans une zone où les lignes équipotentielles sont peu resserrées et où par conséquent la densité du courant électrique est faible. Or, les risques d'attaque électrolytique de la coque sont directement liés à la densité de courant. Des essais au laboratoire, sur une maquette au 1/25^e et dans des conditions plus dures que la normale (coque non protégée par une peinture étanche et densité de courant plus forte qu'en réalité), n'ont laissé apparaître aucune trace de corrosion. En revanche, KREUTZER (communication personnelle, 1971) nous a signalé qu'aux Etats-Unis la corrosion des coques des navires qui pratiquaient la pêche électrique a posé des problèmes et que, dans certains cas, il a même fallu remplacer des tôles. La solution a consisté à établir entre la coque et l'anode un faible courant de polarité opposée afin d'annihiler les effets du champ électrique. Les chercheurs soviétiques ne signalent pas ce genre d'incident. Bien au contraire, nous avons vu que MAL'KYAVICHUS *et al.* (1968) ont parfois utilisé la coque du navire comme cathode.

3. Sécurité à bord.

Le risque essentiel à bord, au moment des opérations de pêche, est dû à la différence de potentiel qui existe entre le bateau et l'eau pompée à l'anode. En effet, la coque se met au potentiel de l'eau. Comme le tuyau de la pompe est isolant, la chute de tension à l'intérieur de ce tuyau est beaucoup moins forte que celle qui se fait directement par le milieu marin entre l'anode et le navire. Si bien que l'eau pompée arrive sur le pont à un potentiel très supérieur à celui du bateau. En extrapolant en vraie grandeur des mesures sur maquette, nous avons trouvé que cette différence de potentiel atteignait 136 V pour une tension anodique de 350 V. Il est possible de remédier à ce problème en installant sur le tuyau de la pompe une partie métallique qui établit un bon contact électrique avec la coque. L'eau rejetée sur le pont possède alors le même potentiel que celui du navire et ne présente donc plus aucun risque pour le personnel travaillant à bord.

7° Conclusion du chapitre III.

Le navire prototype, équipé d'un système de pêche par lumière, champ électrique et pompe, qui devait être réalisé en collaboration par l'I.S.T.P.M., le C.N.E.X.O., les A.C.B. et la C.G.E., n'a finalement pas été construit. Ce projet n'a pas abouti, faute d'un financement suffisant. Sans essais en vraie grandeur, il nous est impossible de conclure de manière absolue. Mais les études que nous avons menées, en laboratoire seulement compte tenu de nos moyens, permettent néanmoins quelques considérations.

Nous avons vu que les caractéristiques du stimulus électrique que nous avons définies pour capturer *Sardina pilchardus* correspondent sensiblement à celles que SEIDEL et KLIMA ont retenues pour pêcher les espèces pélagiques dans le golfe du Mexique. Par ailleurs, les captures théoriques que nous avons calculées concordent assez bien avec les pêches réellement réalisées par les Soviétiques rapportées par MAL'KYAVICHUS. Nous considérons donc nos résultats comme probablement proches de la réalité. Ce système devrait être compétitif avec la senne tournante, telle qu'elle est pratiquée sur nos côtes. Mais, bien que son coût de fonctionnement apparaisse très raisonnable, il ne le serait sans doute plus avec un chalut pélagique artisanal qui, ces dernières années, est devenu extrêmement performant. De plus, on ne peut établir une comparaison avec

les navires industriels modernes qui traînent des engins dont l'ouverture dépasse mille mètres carrés.

Le fait que le système de pêche n'ait pas encore été commercialisé, alors qu'il a été étudié dans des pays disposant de moyens importants, comme les U.S.A. ou l'U.R.S.S., conduit également à quelques réserves quant à son exploitation. En effet, ce procédé ne peut être utilisé que la nuit et par mer assez calme. De plus, l'attraction des poissons par la lumière ne concerne que les individus relativement proches de la surface, tandis qu'un chalut pélagique permet également la capture des concentrations plus profondes. Le succès de cette attraction n'est pas non plus toujours certain ; il peut être compromis par une situation thermique défavorable, lorsqu'une thermocline trop marquée fait barrage, par exemple, et empêche les poissons de se rapprocher des lampes. Il se peut donc que les conditions nécessaires au bon déroulement d'une opération de pêche soient trop rarement réunies pour que le système étudié soit effectivement compétitif avec d'autres engins qui, sauf mauvais temps, sont utilisables à tout moment. Son faible coût d'exploitation et ses grandes possibilités d'automatisation ne sont cependant pas à négliger. Mais seuls des essais en vraie grandeur, étalés sur des périodes suffisamment longues, permettraient de conclure de manière plus catégorique.

CONCLUSION GENERALE

Un certain savoir est désormais acquis dans le domaine de la pêche électrique en mer. Nos propres travaux apportent des éléments nouveaux, en particulier une bonne connaissance des seuils de taxie et de tétanie de quelques espèces marines. Les expériences que nous avons réalisées avec un champ électrique croissant, de configuration connue, permettent également de mieux prévoir les réactions des poissons dans le milieu naturel et donc de mieux les contrôler.

Nous constatons, par contre, que les applications pratiques n'ont guère dépassé le stade expérimental. Il est d'ailleurs légitime de se demander si, dans le contexte actuel, il est souhaitable de continuer à perfectionner les engins de pêche, alors que la plupart des espèces commerciales sont surexploitées, ou en voie de l'être. Ce problème semble en fait dépassé, étant donné que les techniques modernes suffisent déjà largement à déséquilibrer, voire à détruire un stock, lorsqu'elles sont utilisées inconsidérément. Seule une législation internationale acceptée et réellement appliquée par tous est susceptible d'apporter une solution à cette question vitale pour l'avenir des ressources marines naturelles. Si les quotas attribués à chacun sont respectés, un perfectionnement des engins contribue alors à une meilleure rentabilité des navires et peut conduire à une réduction du temps passé en mer pour les équipages.

C'est pourquoi nous avons tenté de développer un nouveau système de pêche par lumière, champ électrique et pompe aspirante. Afin d'éviter de nous disperser, nous nous sommes limités à présenter ce travail, mais d'autres applications figurent dans la bibliographie. Notons que pour les chaluts électrifiés, les effets recherchés diffèrent selon qu'il s'agit d'animaux benthiques ou d'espèces vivant en pleine eau. Dans le premier cas, le champ électrique est seulement destiné à déclencher des réactions de fuite chez les animaux suffisamment ensablés pour normalement échapper à l'engin ; le chalut devient alors capable de les capturer après qu'ils aient jailli de leur abri. Tandis que dans le deuxième cas, le but est d'attirer vers l'embouchure du chalut, par taxie anodique, les individus vivant en pleine eau, voire de les immobiliser par tétanie. La dépense énergétique est alors considérablement plus importante que pour les espèces benthiques et la rentabilité apparaît très incertaine.

Plusieurs raisons peuvent expliquer qu'aucun système de pêche électrifié en eau de mer ne soit passé dans le domaine commercial, même dans les cas apparemment favorables, comme

le chalut à perche électrifié, par exemple (voir annexe). Tout d'abord la haute conductivité du milieu marin a indéniablement un aspect limitatif. La dépense énergétique croît rapidement avec le volume d'eau à électrifier et les problèmes techniques sont d'autant plus complexes que les dimensions du système d'électrodes deviennent plus importantes. Ces deux obstacles apparaissent inévitables dans la mesure où ils résultent directement des lois physiques qui régissent la répartition de l'énergie électrique dans un milieu conducteur infini.

Ensuite, l'utilisation de l'électricité dans le milieu naturel inquiète, bien souvent à priori d'ailleurs. Les effets et les post-effets d'un champ électrique sur la faune marine ont été étudiés et il apparaît que ces craintes sont exagérées lorsqu'un système est utilisé judicieusement. Bien entendu, il faut éviter les stimuli trop violents et des expositions trop longues des animaux à des champs trop intenses. Le fait que des services officiels utilisent la pêche électrique en eau douce, depuis plus de cinquante ans, démontre le caractère outrancier de certaines craintes.

A l'inverse, il existe des aspects positifs, comme la sélectivité au niveau des captures, par exemple. La sélectivité des effets électriques sur les animaux marins mérite d'être prise d'autant plus en considération qu'une meilleure gestion des stocks est plus que jamais à l'ordre du jour. La priorité devrait donc être désormais de pêcher mieux plutôt que plus. Ce phénomène n'a malheureusement pas été suffisamment mis en lumière, dans un cadre réel d'exploitation. Aussi peut-on craindre que la sélectivité soit plus théorique qu'effective au cours d'une opération de pêche électrique, par suite de réaction de groupe par exemple. Le fait que ce doute subsiste est essentiellement dû au coût élevé des essais en vraie grandeur qui, insuffisamment développés, n'ont pas permis d'aboutir à des conclusions catégoriques pour convaincre d'éventuels utilisateurs ou pour démontrer, au contraire, qu'un système donné manque totalement d'intérêt.

Cette incertitude est regrettable, car la crise de l'énergie que nous connaissons, et qui risque de s'accroître, va modifier profondément les données de la compétitivité entre les différents engins de pêche. En effet, le prix de revient des poissons capturés dépend, pour une part importante, de la dépense en carburant. Une étude norvégienne (ANDERS ENDAL, 1979) montre que cette dépense varie sensiblement selon la technique de pêche utilisée. Les engins passifs, comme les nasses, les palangres, les filets maillants, pourraient de ce fait devenir plus économiques que les chaluts, bien que ceux-ci assurent des captures quantitativement plus importantes par homme embarqué. Dans ce contexte nouveau, le chalut à perche électrifié pourrait passer dans le domaine commercial, compte tenu des avantages qu'il apporte et le système par lumière, champ électrique et pompe pourrait retrouver un intérêt qu'il semblait avoir perdu.

Il est également possible que l'électricité trouve, dans un avenir plus ou moins lointain, des applications dans le domaine des cultures marines, pour assurer la recapture sélective des poissons par lots de taille homogène par exemple. On peut aussi imaginer un système d'électrodes pour contraindre les poissons à s'engager dans un canal d'évacuation, afin de leur éviter de pénétrer dans les circuits de refroidissement des centrales nucléaires en cours de réalisation et d'autres applications, encore insoupçonnées, sont susceptibles de voir le jour. Mais de telles réalisations seront avant tout conditionnées par leur simplicité sur le plan de la conception et leur rentabilité au niveau du fonctionnement, c'est-à-dire par leur compétitivité vis-à-vis des autres méthodes.

BIBLIOGRAPHIE

Avertissement.

Une bibliographie traitant de l'électrophysiologie proprement dite sortirait du cadre de notre étude. Signalons à cet égard que MEYER WAARDEN a rédigé, en 1960, un ouvrage bibliographique sur la pêche électrique en eau douce et en eau de mer, dans lequel sont citées les recherches fondamentales rattachées à ce sujet. Cet ouvrage comprend 104 pages et 600 références. HALSBAND a mis cette étude à jour en 1970 avec 72 pages et 414 références supplémentaires, puis en 1980 avec 156 pages et 320 références commentées.

C'est pourquoi nous nous sommes limité à citer les publications qui traitent seulement des engins et des techniques de pêche qui utilisent, sous une forme quelconque, l'électricité en mer.

- APPLEGATE (V.C.), MACY (P.T.) et HARRIS (V.E.), 1954. — Selected bibliography on the applications of electricity in fishery science. — *U.S. Fish Wildl. Serv., spec. sci. Rep.*, n° 127, 55 p.
- ARRIGNON (J.), 1970. — Les écrans et les barrières électriques. — *Bull. franc. Piscis.*, n° 238 : 7-22.
- BAGGS (I.), 1863. — Improvements in the means of an apparatus for paralyzing, capturing, or killing fish, birds and other animals. — Brevet britannique n° 2644.
- BARRON (D.H.) et MATTHEWS (B.H.C.), 1938. — The interpretation of potential changes in the spinal cord. — *J. Physiol.*, **92** : 276-321.
- BARY (B.M.), 1956. — The effect of electric fields on marine fishes. — *Mar. Res. Scot. Home Depart.*, **1** : 1-32.
- BLANCHETEAU (M.), 1965. — Sommations réflexes dans les taxies anodiques des poissons en réponse à un courant continu ou interrompu. — *C.R. Acad. Sci., Paris*, **261** : 4860-4863.
- 1971. — Choix du stimulus approprié à la pêche à l'électricité en mer. — *Rev. Trav. Inst. Pêches marit.*, **35** (1) : 13-20.
- BLANCHETEAU (M.) et KURC (G.), 1966. — Pêche sans filet et théorie des tropismes. — *Rev. Trav. Inst. Pêches marit.*, **30** (4) : 313-316.
- 1967. — Photocinèse et crises motrices tonico-cloniques chez les poissons pélagiques. — *C.P. Soc. Biol.*, **161** (2) : 275-276.
- BLANCHETEAU (M.), LAMARQUE (P.), MOUSSET (G.) et VIBERT (R.), 1961. — Etude neurophysiologique de la pêche électrique (courant continu). — *Bull. Cent. Etud. Rech. Sci., Biarritz*, **3** (3) : 275-382.
- BLASIUS (E.) et SCHWEITZER (F.), 1893. — Elektropismus und verwandte Erscheinungen. — *Pflügers Archiv. ges. Physiol.*, **53** : 491-543.
- BOONSTRA (G.P.), 1975. — The application of electrical stimulation in fisheries. — Comm. conf. int. d'Océanologie « Into Deeper Water » à Brighton, Londres. BPS Exhibitions : 213-219.
- 1977. — Comparative electrical fishing for shrimp and flatfish on commercial vessels in 1976. — *Cons. int. Explor. Mer, Comité Engins et comportement*, B, 3 : 19-36.
- BOONSTRA (G.P.) et de GROOT (S.J.), 1970. — Report on the development of an electrified shrimp-trawl in the Netherlands. — *Cons. int. Explor. Mer, Comité Engins et comportement*, B : 5, 6 p.
- 1974. — The development on an electrified shrimp-trawl in the Netherlands. — *J. Cons. int. Explor. Mer*, **35** (2) : 165-170.
- BURGOON (D.W.), 1959. — The use of fish pumps in the U.S.A. — *Modern Fishing gear of the world, Fish. News*, **1** : 414-417.
- BURNET (A.M.R.), 1959. — Electric fishing with pulsatory direct current. — *N.Z. J. Sci. Technol.*, **2** (1) : 46-56.
- Comité Central des Pêches maritimes, 1975. — Comportement du poisson dans le chalut électrique. — *Bull. int. Pêches marit. étrangères*, n° 57, 6 p. (traduction d'un article russe publié dans *Rybnôïe Khoziaïstvo*, n° 1, 1975).
- DANIULYTE (G.), VIRBICKAS (J.), TRAKYS (A.) et al., 1977. — Post-effets du champ électrique sur les animaux aquatiques. — *Inst. de Zoologie et de Parasitologie, Ac. Sc. Lituanienne, Wilno, Mokslas*, 166 p. (en russe, résumé en français).
- DETHLOFF (J.), 1959. — Electro-fishing. — *Modern Fishing gear of the world, Fish. News*, **1** : 583-585.
- 1964. — Problems of electro-fishing and their solution. — *Ibid.*, **2** : 551-556.
- DICKSON (W.), 1954. — Marine electrical fishing. — *World Fish.*, **3** (4) : 148-151.
- DINER (N.), 1969. — La pêche à la lumière (influence des facteurs de milieu sur les concentrations de poissons). — *Science et Pêche, Bull. Inst. Pêches marit.*, n° 180, 10 p.
- DINER (N.) et LE MEN (R.), 1971. — Etude du champ électrique nécessaire à la taxie anodique du poisson. — *Rev. Trav. Inst. Pêches marit.*, **35** (1) : 21-34.
- ENDAL (A.), 1979. — Energy consumption in various norwegian fisheries. — *Cons. int. Explor. Mer, Comité Technologie des Pêches*, B, **3** : 45-49.
- ELMINOWICZ (A.), 1975. — Measurements of sardine schools by Hydroacoustic Apparatus. — *Cons. int. Explor. Mer, Comité Engins et comportement*, B : 14, 27 p.
- FESSARD (A.), 1936. — Propriétés rythmiques de la matière vivante, I. Nerfs isolés. — *Actualités sci. indus.*, **417** (2) : 99 p.
- FRIDMAN (A.L.), 1969. — Electric fishing gear. — *In Theory and design of commercial fishing gear, Moscou (traduit du russe en anglais par Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1973)* : 456-469.
- GROODY (T.), LOUKASHKIN (A.) et GRANT (N.), 1952. — A preliminary report on the behaviour of the Pacific sardine, *Sardinops caerulea*, in an electrical field. — *Proc. Cal. Acad. Sci.*, **27** (8) : 311-323.
- GROOT (S.J. DE) et BOONSTRA (G.P.), 1970. — Preliminary notes on the development of an electrical tickler chain for sole, *Solea solea* (L.). — *Cons. int. Explor. Mer, Comité Engins et comportement*, B : 4, 4 p.
- HAIER (U.), 1954. — Die elektrotechnischen Grundlagen der elektrofischerei im mer. — *Arch. Fischerei-Wiss.*, **5** (3 et 4) : 132-144.
- HALSBAND (E.), 1959. — The effect of pulsating electric current on fish. — *Modern Fishing gear of the World, Fish. News*, **1** : 575-580.
- 1968. — Principes fondamentaux de la pêche à l'électricité. — *In Applications de l'électricité à la biologie et à l'aménagement des pêches continentales. Symposium F.A.O.-I.N.R.A., Belgrade, 1966*, p. 79-85.

- HALSBAND (E.), 1970. — Bibliographie über die elektrofischerei und ihre grundlagen teil 2. — *Arch. Fischerei-Wiss.*, **21** (1), 72 p.
- 1980. — Bibliographie über die Elektrofischerei, ihre Grundlagen und die Gefahren des elektrischen Stromes. Hamburg, Bundesforschungsanstalt für Fischerei, 156 p.
- HERMANN (L.), 1885. — Eine Wirkung galvanischer Ströme auf Organismen. — *Pflügers Archiv ges. Physiol.*, **37**: 457-460.
- HORN (W.), 1976. — Rationalization of sole fisheries by means of electrified beam trawls. — *Cons. int. Explor. Mer. Comité Engins et comportement*, B: 7, p. 63-66.
- JOHANNESSON (K.A.) et LOSSE (G.F.), 1973. — Some results of observed abundance estimations obtained in several U.N.D.P./F.A.O. resource survey projects. — Comm. n° 3, Symposium, Acoustic Methods in Fisheries Research, F.A.O., Bergen, 77 p.
- KLIMA (E.F.), 1968. — Shrimp-behavior studies underlying the development of the electric shrimp-trawl system. — *U.S. Fish. Wildl. Serv. Fish. industr. Res.*, **4** (5): 165-181.
- 1972. — Voltage and pulse rates for inducing electrotaxis in twelve coastal pelagic and bottom fishes. — *J. Fish. Res. Bd Canada*, **29**: 1605-1614.
- KREUTZER (C.), 1941. — Thune werden elektrisch geangelt. — *Fischereiwelt, Hambourg*, **3** (10): 160-161.
- 1963. — Elektrofischerei im meer. — *Elektrotechnische Zeitschrift*, **15** (15): 417-421.
- 1964. — Utilisation of fish reactions to electricity in commercial sea fishing. — *Modern Fishing gear of the world, Fish. News*, **1**: 545-550.
- KURC (G.), 1963. — La pêche à la lumière en Atlantique. — *Science et Pêche, Bull. Inst. Pêches marit.*, n° 113, 13 p.
- 1971. — Pêche à l'électricité avec lumière artificielle et pompe. — *Rev. Inst. Pêches marit.*, **35** (1): 5-12.
- KURC (G.) et BLANCHETEAU (M.), 1966. — Etude théorique et pratique de la pêche à la lumière. — *Ibid.*, **30** (4): 289-312.
- KURC (G.) et PERCIER (A.), 1959. — La pêche à la lumière (les essais de l'Institut des Pêches). — *Science et Pêche, Bull. Inst. Pêches marit.*, n° 59: 9 p.
- KUROKI (T.), 1959. — Electrical fishing in Japan. — *Modern fishing gear of the world, Fish News*, **1**: 581-582.
- LAMARQUE (P.), 1963. — Les réactions du poisson dans la pêche électrique et leur explication neuro-physiologique. — *La Nature*, n° 3336: 137-148.
- 1968. — Electrophysiologie du poisson soumis à l'action d'un champ électrique. — *In Applications de l'électricité à la biologie de l'aménagement des pêches continentales. Symposium, F.A.O.-I.N.R.A., Belgrade*, 87-110, 1966.
- LE MEN (R.), 1971. — Pêche électrique en mer. — *Science et Pêche, Bull. Inst. Pêches marit.*, n° 200, 14 p.
- 1977. — Etude d'un système de pêche par lumière, champ électrique et pompe pour la capture des sardines, *Sardinia pilchardus* (WALBAUM). — *Cons. int. Explor. Mer, Comité Engins et Comportement*, B: 6, 3 p.
- 1977. — Les techniques de la pêche à l'électricité. — *Comm. conf. int. Océanexpo*, Bordeaux, 11 p.
- 1979. — Système d'aquaculture en haute mer (quelques considérations sur une éventuelle recapture des poissons par un procédé utilisant le courant électrique). — Non publié, diffusion restreinte, 9 p.
- 1979. — La pêche électrique en mer, perspectives d'application. — *La Pêche maritime*, n° 1221: 722-726.
- LOUKASHIKIN (A.) et GRANT (N.), 1954. — Further studies of the behavior of the pacific sardine, *Sardinops caerulea*, in an electrical field. — *Proc. Cal. Acad. Sci.*, **28** (6): 323-337.
- MAL'KYAVICHUS (S.K.), 1961. — Perspectives de la pêche à l'électricité. — *Ryb. Khoz. (en russe)*, n° 10: 31-37.
- 1963. — Technique de la pêche à l'électricité. — *Ibid.*, n° 4: 42-52.
- 1967. — Résultats de la pêche sans filet des sardines en Atlantique tempéré. — *Ryb. Khoz. (en russe)*, n° 8: 39-41.
- 1968. — Pêche en mer sans filet et ses perspectives de développement. — *Ibid.*, n° 10: 44-46.
- MAL'KYAVICHUS (S.K.), DANYULITE (G.) et SAMARKIN (A.), 1968. — Behavior of some marine fish in electric fields. — *In Fish behavior and fishing techniques*, Murmansk, PINRO, ALEKSEEV, Edit. (traduit du russe en anglais par Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1971): 23-30.
- MARSHALL (N.B.), 1970. — La vie des poissons. — Paris et Montréal, Bordas, **1**: 383 p.
- McRAE (E.D.) et FRENCH (L.E.), 1965. — An experiment in electrical fishing with an electric field used as an adjunct to an otter-trawl net. — *U.S. Fish. Wild. Ser., comm. Fish. Rev.*, **27** (6): 1-11.
- MEYER-WAARDEN (P.F.), 1955. — Neue wege der elektrofischerei. — *Elektronik*, **4** (7): 159-165.
- 1956. — Elektrische Wollhandkrabbersperren. — *Anzeiger für Schädlingskunde*, **29** (9): 137-142.
- 1957. — La pêche à l'électricité. — *Etude F.A.O. sur la pêche*, n° 7, 81 p.
- MEYER-WAARDEN (P.F.) et HALSBAND (E.), 1960. — Bibliographie über die elektrofischerei und ihre grundlagen. — *Arch. Fischerei-Wiss.*, **11** (1): 104 p.
- MONNIER (A.M.), BENOIT (P.H.) et MONNIER (A.), 1940. — Propriétés générales du nerf et du muscle. — *Actual. scient. ind.*, **857** (10): 88 p.
- NAGEL (W.), 1895. — Über Galvanotaxis. — *Pflügers Archiv ges. Physiol.*, **59**: 603-642.
- NIKONOROV (I.V.), 1959. — The basic principles of fishing for the Caspian killka by underwater light. — *Modern Fishing gear of the world, Fish. News*, **1**: 559-566.

- NIKONOROV (I.V.), 1964. Pump fishing with light and electric current. Modern Fishing gear of the world, *Ibid.*, **2**: 577-579.
- 1972. — Effect of electrodes on the normal vital activity of fish. — In Electrical fishing, theory and practice, Moscou, Pishchevaya Promyshlennost' (traduit du russe en anglais par Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1976): 191-206.
- NIKONOROV (I.V.) et PATEEV (A.K.), 1959. — Catching Kilka with a fish pump using underwater illumination and a pulsing electric current. — *Ryb. Khoz.*, **35**: 53-58 (traduit du russe en anglais par *Fish. Res. Bd. Can.*, translation serie n° 445, 1963).
- PEASE (N.L.), 1967. — The design and field testing of an electro-shrimp trawling system. — *F.A.O. Fish. Rep.*, **57** (2): 513-520.
- PEASE (N.L.) et SEIDEL (W.R.), 1967. — Development of the electro-shrimp trawl system. — *U.S. Fish. Wildl. Serv. comm. Fish. Rev.*, **29** (8/9): 58-63.
- SAILA (S.B.) et WILLIAMS (C.E.), 1972. — An electric trawl system for lobsters. — *Mar. Tech. Soc. J.*, **6** (5): 25-31.
- SCHARFE (J.), 1965. — Neue versuche mit Elektrofischerei im meer. — *Allgemeine Fischerei-Zeitung*, **17** (28/29): 12-16.
- SCHEMINZKY (F.), 1924. — Versuche über Electrotaxis und Electronarkose. — *Pflügers Archiv ges. Physiol.*, **202**: 200-216.
- SEIDEL (W.R.), 1969. — Design, construction and field testing of the BCF electric shrimp-trawl system. — *U.S. Fish Wildl. Serv. Fish. industri. Res.*, **4**: 213-231.
- SEIDEL (W.R.) et KLIMA (E.F.), 1974. — In situ experiments with coastal pelagic fishes to establish design criteria for electrical fish harvesting system. — *U.S. Fish Wildl. Serv., Fish. Bull.*, **72** (3): 657-669.
- SEIDEL (W.R.) et WATSON (J.W.), 1978. — A trawl design: Employing electricity to selectively capture shrimp. — MFR paper 1325 from Marine Fisheries Review, **40** (9): 21-23.
- SKOGLUND (C.R.), 1949. — Excitation selective par renversement du signe du courant stimulant. — *Arch. Sci. physiol.*, **3** (5): 533-545.
- SMITH (K.A.), 1955. — Use of an electrical attracting and guiding device in experiments with a « fish pump ». — *U.S. Fish. Wildl. Serv., comm. Fish. Rev.*, **17** (2): 1-7.
- STERNIN (V.G.), NIKONOROV (I.V.) et BUMESTER (Yu.K.), 1972. — Electrical fishing, theory and practice. — Moscou, Pishchevaya Promyshlennost' (traduit du russe en anglais par Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1976), 316 p.
- STEWART (P.A.M.), 1973. — The selection of electrode materials for electrical fishing. — *Cons. int. Explor. Mer, Comité Engins et comportement*, B: 11, 4 p.
- 1974. — An investigation into the effects of electric fields on *Nephrops norvegicus*. — *J. Cons. int. Explor. Mer*, **35** (3): 249-257.
- 1975. — Comparative fishing for *Nephrops norvegicus* (LINNAEUS) using a beam trawl fitted with electric ticklers. — *Mar. Res.*, **1**: 1-10.
- 1975. — Catch selectivity by electrical fishing systems. — *J. Cons. int. Explor. Mer*, **36** (2): 106-109.
- 1976. — Observations on flatfish reactions to a model electrified beam trawl. — *Cons. int. Explor. Mer, Comité Engins et comportement*, B: 41, 4 p.
- 1976. — Aquarium experiments on the use of fixed electrical screens. — Marine Laboratory, Aberdeen, Rapport interne n° 11, 7 p. (non publié).
- 1977. — A study of the response of flatfish (Pleuronectidae) to electrical stimulation. — *J. Cons. int. Explor. Mer*, **37** (2): 123-129.
- 1978. — Comparative fishing for flatfish using a beam trawl fitted with electric ticklers. — *Scott. Fish. Res.*, n° 11, 10 p.
- 1979. — The selection of pulse characteristics for electrical fishing experiments from measurements on direct muscle stimulation. — *Cons. int. Explor. Mer, Comité Engins et comportement*, B: 17, 9 p.
- STEWART (P.A.M.) et CAMERON (G.M.), 1977. — The design and testing of electrical fishing equipment for an otter trawl. — *Cons. int. Explor. Mer, Comité Engins et comportement*, D: 3, p. 7-16.
- TOURASSE (G. DE LA), 1954. — La pêche du thon rouge à la ligne électrique. — *Science et Pêche, Bull. Inst. Pêches marit.*, n° 19, 3 p.
- VANDEN BROUCKE (G.), 1973. — Further investigations on electrical fishing. — *Cons. int. Explor. Mer, Comité Engins et comportement*, B: 14, 6 p.
- VIBERT (R.), 1968. — Applications de l'électricité à la biologie et à l'aménagement des pêches continentales. — Symposium, F.A.O.-I.N.R.A., Belgrade, 1966: 31-73.
- WATHNE (F.), 1963. — The development of electrical shrimp trawling gear. — Comm. n° 35, Sec. World Fishing gear Congress, Londres.
- 1964. — Shrimp reaction to electrical stimulus. — *Modern Fishing gear of the world, Fish. News*, **2**: 566-569.
- WATSON (J.W.), 1976. — Electrical shrimp trawl catch efficiency for *Penaeus duorarum* and *Penaeus aztecus*. — *Trans. Am. Fish. Soc.*, 105: 135-148.
- WILLIAMS (C.E.), 1971. — A study of an electric trawl system for lobsters. — Unpubl. Ph. D. Thesis, Dept. of Ocean Engineering, University of Rhode Island, 52 p.

ANNEXE

Le chalut à perche électrifié.

Il nous paraît intéressant de traiter succinctement, à titre d'information, le cas du chalut à perche électrifié qui a fait l'objet d'études dans différents pays. Cet engin concerne essentiellement les crevettes et les poissons plats, voire les langoustines. Il s'agit, afin d'augmenter son efficacité, de contraindre les animaux, suffisamment ensablés pour normalement échapper à l'engin, à jaillir hors de leur abri et donc à être capturé par le piège qui s'avance sur eux.

De tels effets sont actuellement obtenus en utilisant des bourrelets suffisamment lestés pour assurer un grattage intense des fonds devant l'ouverture du chalut. Dans le cas des poissons plats, ces effets sont accentués en tendant en avant de l'engin et transversalement à son déplacement de lourdes chaînes, appelées « racasseurs ». Le poids du train de pêche peut alors devenir considérable. D'après BOONSTRA (1975), un chalut à perche trainé par un chalutier moderne hollandais de 1 200 chevaux pèse environ 5 300 kg, qui se répartissent de la manière suivante (fig. I et II) :

perche : 1 000 kg ; patins : 1 300 kg ; racasseurs : 2 300 kg ; filet : 700 kg.

Ce procédé, qui est efficace, présente cependant des inconvénients. Il peut endommager certains fonds de pêche en les râclant trop intensément. De plus, les débris benthiques viennent souvent colmater la poche, au détriment de la sélectivité du chalut. Les animaux qui ne sont pas capturés au passage d'un tel engin peuvent également être sérieusement blessés, sinon tués. Par ailleurs, la traction supplémentaire nécessitée par les racasseurs exige une puissance motrice accrue.

Or, il est possible d'obtenir des effets identiques en utilisant de légères électrodes, traînées parallèlement au déplacement du chalut juste en avant de son ouverture (fig. I). Elles ne grattent donc plus les fonds et n'opposent plus de résistance à la traction. Etant donné leur faible poids, elles ne présentent aucun danger pour les animaux marins. Des impulsions émises à basse fréquence produisent les mêmes effets que les racasseurs et une certaine sélectivité peut parfois être enregistrée au niveau des captures.

Ce procédé, qui présente un intérêt certain, a été largement étudié aux Etats-Unis (PEASE, 1967 ; KLIMA, 1968 ; SEIDEL, 1969), en Ecosse (STEWART, 1973, 1974, 1975, 1976, 1977, 1978), en Hollande (DE GROOT et BOONSTRA, 1970 ; BOONSTRA et DE GROOT, 1970, 1974 ; BOONSTRA, 1975), en Belgique (VANDEN BROUCKE, 1973). Nous avons personnellement participé à des essais en mer, avec STEWART en 1973, à bord du "Clupea" de la station d'Aberdeen et avec VANDEN BROUCKE en 1976, à bord d'un chalutier professionnel d'Ostende. Comme les navires traînent généralement deux chaluts à perche, l'un à tribord, l'autre à babord, il est particulièrement simple de réaliser des pêches comparatives. Il suffit de conserver un chalut gréé classiquement et d'électrifier le second après l'avoir allégé.

Les résultats diffèrent assez sensiblement suivant les auteurs et les séries d'expériences considérées. Ceci s'explique, étant donné qu'un certain nombre de paramètres sont modifiés en cours d'étude (écartement des électrodes qui, parallèles et équidistantes, sont connectées de manière à être alternativement positives et négatives; tension appliquée; fréquence et durée des impulsions; temps d'application et d'interruption du stimulus; vitesse du navire). Il apparaît, d'après les études de BOONSTRA et de STEWART, que les stimuli les plus performants sont très différents, selon qu'il s'agit de crevette ou de poisson plat.

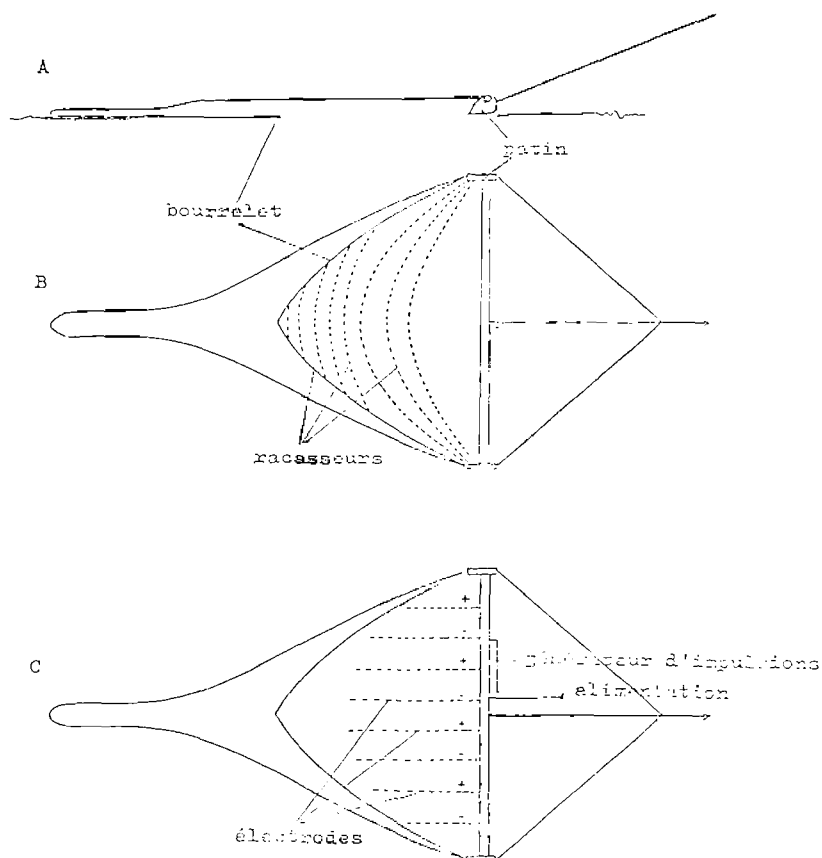


FIG. I. — Chalut à perche: A vue de profil, B vue de dessus avec un gréement de « racasseurs », C vue de dessus en version électrifiée.

Les crevettes réagissent très bien au stimulus $5 \text{ Hz} - 0,3 \text{ ms} - 35 \text{ V/m}$. BOONSTRA (1975) estime que, dans ces conditions, le chalut à crevettes électrifié pêche 30 % de plus que le chalut classique (100 % lorsque les eaux sont très claires et qu'il fait jour). Il a également constaté que les captures de plies étaient meilleures, d'environ 20 %. Mais, pour les poissons plats, le stimulus le plus performant est 20 à 40 Hz - 0,7 ms - 10 V/m, avec une fréquence d'interruption 1/2 (le stimulus n'est appliqué qu'une seconde sur deux). Les captures sont assez variables. Par exemple, STEWART (1978) signale qu'en 1974 il a pêché 28 % de limande-sole, 58 % de plie, 49 % de limande de plus avec le chalut électrifié, alors qu'en 1975 et 1976, les captures étaient sensiblement comparables. En restant prudent, on peut donc considérer qu'un chalut à perche électrifié pêche, au moins, aussi bien qu'un chalut à perche classique.

Par contre, l'allègement du train de pêche présente des avantages considérables. BOONSTRA estime à 25 % l'économie de carburant ainsi réalisée. L'économie des racasseurs n'est pas non plus négligeable. Il faut les remplacer environ sept fois par an en raison de leur usure (BOONSTRA, 1975). Cela peut représenter une quinzaine de tonnes de chaînes, ce qui correspond à environ

la moitié de l'économie réalisée en carburant sur un an. BOONSTRA a également constaté qu'un chalut électrifié était plus pêchant à faible vitesse, environ 3 nœuds, alors que les chalutiers modernes travaillent à des vitesses plus élevées atteignant jusqu'à 7 nœuds. Il est donc moins dangereux pour la faune marine et plus économique. Cet auteur pense qu'il serait intéressant de comparer un chalutier de 2 000 ch trainant à 7 nœuds deux chaluts à perche munis de racasseurs et un chalutier de 400 à 500 ch trainant à 3,5 nœuds deux chaluts à perche électrifiés.

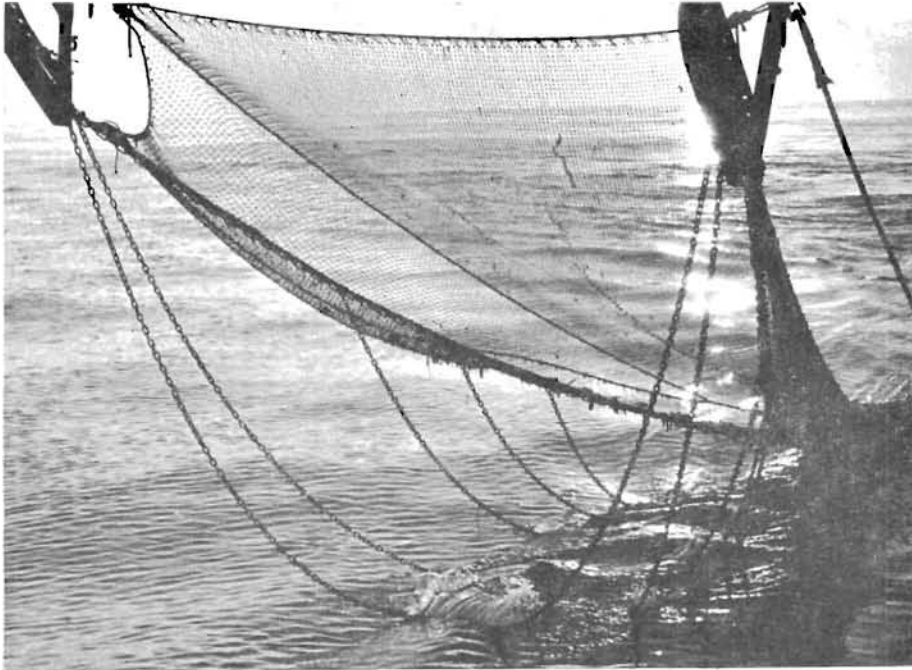


FIG. II. — Mise à l'eau d'un chalut à perche pourvu de « racasseurs » ; les patins sont visibles mais la perche qui les joint sort du cadrage.

Etant donné que les animaux les plus grands réagissent le mieux au courant électrique, un chalut électrifié présente une certaine sélectivité qui vient s'ajouter à celle du maillage. Elle est actuellement difficile à chiffrer, mais elle semble beaucoup plus marquée pour les poissons plats que pour les crevettes. Elle dépend en fait du stimulus utilisé ; il faut éviter de saturer le système en appliquant un champ électrique trop fort.

Signalons, pour conclure, que le chalut à perche se prête particulièrement à une électrification car il constitue une plateforme stable où fixer les électrodes et, le plus souvent, le générateur impulsionnel dans son enceinte étanche. Sur un chalut classique à panneaux, le problème apparaît plus complexe. Des auteurs ont pensé supprimer le câble d'alimentation en utilisant des batteries d'accumulateurs étanches directement fixées sur la perche. L'avantage essentiel de ce système est en effet de consommer très peu d'énergie, quelques centaines de watts entre les électrodes. Compte tenu des pertes élevées, les générateurs utilisent 2 à 3 kilowatts, ce qui demeure très faible.